طراحی، ساخت و آزمون پایه‌های بتنی پیش‌تنیده H شکل شبکه توزیع برق

علی‌اصغر ذکاوتی[۱]، علیرضا رهنورد[۲]

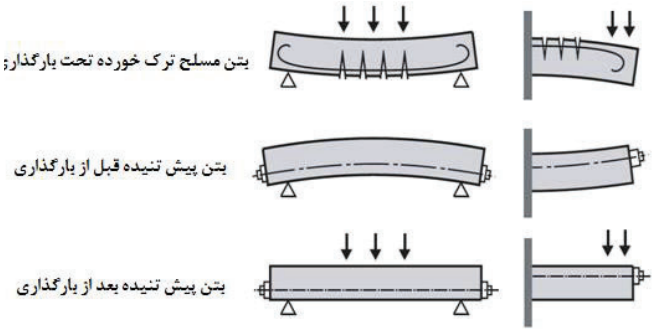
[۱]گروه سازه‌های صنعت برق، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران، azekavati@nri.ac.ir
[۲]گروه سازه‌های صنعت برق، پژوهشگاه نیرو ، تهران، ایران، arehnavard@nri.ac.ir

چکیده: یکی از مهمترین و پرمصرفترین مولفه های شبکه توزیع، پایه های هوایی انتقال برق شبکه توزیع است. انواع مختلفی از پایه های هوایی در نقاط مختلف ایران استفاده شده است که یکی از پرکاربردترین آن‌ها پایه H شکل بتنی چهارگوش است. در کشورهای توسعه یافته، پایه های بتنی معمولی بدلیل هزینه بالا و عمر مفید کوتاه به ندرت تولید می شود و پایه های پیش تنیده جایگزین آن شده است. استفاده از بتن پیش تنیده در پایه های بتنی موجب افزایش کیفیت و عمر پایه می‌شود و میزان فولاد مصرفی و حجم بتن نسبت به مورد مشابه سنتی در این نوع پایه ها بدون کاهش در مقاومت اسمی و نهایی آن به مقدار قابل توجهی کاهش می یابد. در این تحقیق با هدف حفظ کارگاههای متعدد موجود ساخت پایه های بتنی H شکل چهارگوش، رویه طراحی، ساخت و آزمون یک نمونه پایه بتنی پیش‌تنیده H شکل با رده مقاومتی ۱۲۰۰-۱۲ ارائه می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد میتوان با حفظ قالب های موجود و عدم تغییرات پیچیده در خط تولید پایه‌های سنتی اچ شکل، طرح این نوع پایه را بر اساس بتن پیش تنیده ارائه نمود بطوریکه علاوه بر افزایش عمر و کیفیت پایه، طرح پایه پیش‌تنیده ۱۲۰۰-۱۲ نسبت به طرح H شکل معمولی مشابه، ۲۸٪ کاهش هزینه مصالح و ۱۶٪ کاهش وزن خواهد داشت.

کلید واژه: *بتن پیش‌تنیده، پایه هوایی، شبکه توزیع، پایه H شکل، استرند، آزمون کشش*

۱. مقدمه

عوامل مهمترین ضعف بتن، ضعف در کشش می باشد. تدابیری که می توانند ضعف کششی بتن را برطرف کنند معمولا یا با کاهش تنش کششی و یا با حذف کلی کشش وارده و تبدیل آن به تنش فشاری، اتخاذ می شوند. موثرترین روش موجود در صنعت برای این مهم، استفاده از ایجاد فشار زودرس بر بتن به منظور خنثی کردن نیروی کششی می باشد. نام این عمل را "پیش-تنیدگی" نهاده اند. پیش تنیدگی عبارت است از ایجاد یک تنش ثابت دائمی در یک عضو بتنی به نحو دلخواه و به اندازه لازم، به طوری که در اثر این تنش مقداری از تنش ها و ترکهای کششی ناشی از بارهای وارد در این عضو خنثی شده و در نتیجه مقاومت کششی آن افزایش پیدا می کند. شکل ۱ مفهوم پیش‌تنیدگی را با بزرگنمایی رفتار یک نمونه تیر ساده و طره‌ای شکل نشان می‌دهد.



شکل ۹: مفهوم پیش تنیدگی

فِریسینت در دهه ۱۹۳۰ توانست برای اولین بار از بتن بصورت پیش‌تنیده در ساخت پایه ها استفاده کند. از سوی دیگر شاید بتوان آغاز نیاز روز افزون به بتن پیش تنیده برای استفاده در پایه های

توزیع را به دوران جنگ جهانی دوم ربط داد؛ زمانی که در اثر جنگ، فولاد ساختمانی نایاب شده بود، استفاده تجاری از این محصول از دهه ۵۰ روشن تر شد. در اوایل دهه ۶۰ میلادی نیز بتن پیش تنیده در آمریکا برای اولین بار بصورت صنعتی در درون پایه های توزیع نیرو مورد استفاده قرار گرفت و تا امروزه در تولید این پایه ها مورد استفاده قرار می گیرد[۱]. امروزه در اکثر کشورهای پیشرفته دنیا از جمله آمریکا، کانادا، سوئیس، ژاپن، استرالیا، فرانسه و آفریقای جنوبی از بتن پیش تنیده برای ساخت پایه های توزیع استفاده می شود. باتوجه به برتری های موجود در بتن پیش تنیده نسبت به بتن مسلح معمولی، قطعا می توان انتظار داشت که صنعت برق کشور نیز به این ماده ساختمانی ارزشمند توجه نشان داده باشد. مزایای متعددی را می توان برای چنین پایه هایی برشمرد؛ در زیر به تعدادی از آنها اشاره می شود:

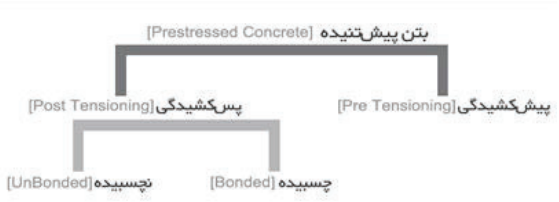
- عمر مفید بیشتر
- هزینه نگهداری پایین تر
- پایداری بالاتر در برابر عوامل محیطی
- کاهش وزن فولاد مصرفی و حجم بتن و در نتیجه کاهش وزن پایه
- کاهش هزینه ساخت
- مزایای زیست محیطی

منظور از مزایای زیست محیطی کاهش وزن پایه ها و به دنبال آن کاهش حمل و نقل؛ افزایش عمر مفید و به دنبال آن کاهش هزینه های تعمیر و نگهداری و در آخر کاهش حجم میلگرد و مصالح مصرفی و در نتیجه کاهش آلایندگی کارخانه تولیدی می باشد.

شکل ۱۰: پایه بتنی پیش تنیده چهارگوش شبکه توزیع نیوزلند و فرانسه [۲]

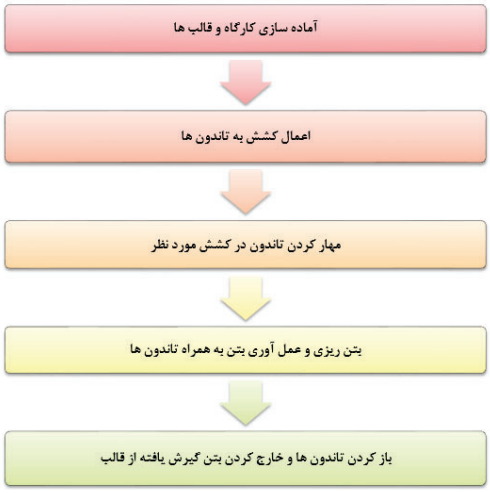
۲.روش‌های ساخت بتن پیش تنیده

نیروی پیش تنیدگی را می توان به طرق مختلف به یک پایه بتنی وارد کرد. پیش تنیدگی در دو روش کلی پیش کشیدگی و پس کشیدگی تقسیم بندی می شود. بدین معنی که عملیات کشش کابلها می تواند به ترتیب پیش از بتن ریزی یا پس از بتن ریزی انجام شود. در صورتی که ابتدا تاندون ها تحت کشش قرار گرفته و سپس بتن ریزی صورت گیرد، فرآیند همانطور که از نام آن پیداست پیش کشیده کردن نامیده خواهد شد. درصورتی که تاندون‌ها بعد از سخت شدن بتن کشیده شوند، فرآیند پس کشیدگی نام خواهد گرفت. فرآیند پس کشیدگی خود در دو دسته کلی جای خواهد گرفت (مطابق شکل ۳).



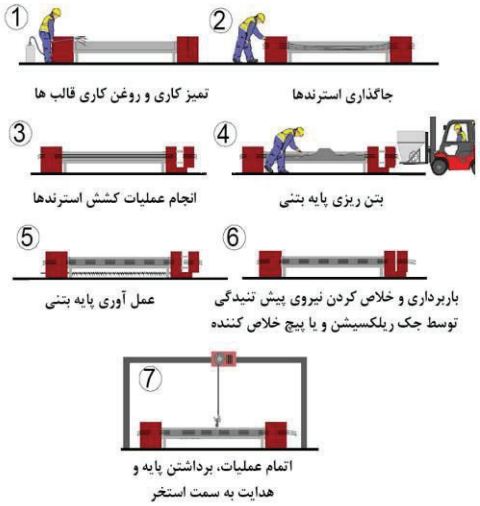
شکل ۱۱: دسته بندی کلی برای نحوه پیش‌تنیده کردن بتن

در این تحقیق از روش پیش کشیدگی برای پیش‌تنیده کردن بتن پایه استفاده شده است. مراحل کلی تولید پایه های پیش‌تنیده را می توان در قالب روند شکل ۴ نمایش داد.



شکل ۱۲: مراحل تولید پایه های پیش‌تنیده

شکل ۵ مراحل مصور تولید پایه بتنی پیش‌تنیده را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳: شمای یک کارگاه مجهز به تولید پایه های پیش تنیده

۳.طراحی پایه های بتنی پیش تنیده

پایه های پیش تنیده در این تحقیق با هدف کاهش وزن تمام شده و در نتیجه هزینه مصالح و نیز هزینه حمل، طراحی شده است بطوریکه با استفاده از مزایای عملیات پیش تنیدگی با حفظ رده مقاومتی از قالب های یک رده پایین‌تر نسبت به طرح H معمولی استفاده شده است. به عنوان نمونه، با استفاده از قالب پایه ۸۰۰-۱۲، ظرفیت و مقاومت تراز بالاتر یعنی مقاومت اسمی ۱۲۰۰ کیلوگرم حاصل شده است.

مواد و مصالح مورد استفاده

در پایه های پیش تنیده مورد نظر این تحقیق از مصالح مصرفی همچون سیمان، سنگدانه، آب، استرند و میلگرد استفاده شده است. در این بخش این مواد مورد بررسی قرار گرفته و شرایط و کیفیت مورد نیاز هریک جهت رسیدن به محصول نهایی با کیفیت، ارائه می گردد. لازم به ذکر است که کیفیت بالای محصولات (در کنار روش اجرای صحیح ساخت) تاثیر مستقیمی بر تامین طول عمر مفید بهره برداری پایه دارد. سیمان مصرفی از نوع پرتلند (تیپ۲) با حداقل عیار ۴۵۰ kg/m3 می‌باشد. بطور عمومی مشخصات مصالح مصرفی بایستی با مشخصات و تعاریف پیشنویس دستورالعمل "تعیین الزامات، معیارهای ارزیابی فنی و آزمونهای پایه های بتنی پیش تنیده چهارگوش" حاصل از مرجع [۳] مطابقت داشته باشد.

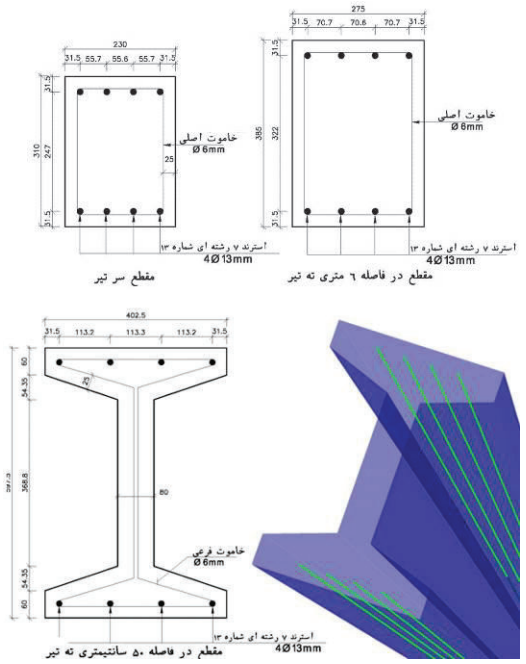
تاندون مورد استفاده در تحقیق فوق از نوع کابل۲ و از نوع هفت رشته‌ای و حداقل مقاومت تسلیم مجاز آنها برابر با ۱۷۲۵ مگاپاسکال می‌باشد و میلگردها عرضی یا سیم های فولادی (خاموت) بایستی از نوع A-I با حداقل مقاومت کششی نهایی ۳۶۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع باشد.

شکل ۱۴: کابل هفت رشته ای (PC Strand)

[۲] PC Strand

۳,۱. مدلسازی و طراحی پایه

مدلسازی پایه در نرم افزار SAP2000 انجام شده و طراحی مطابق ضـوابط آیین نامه ACI318-11 [۴] صـورت گرفته اسـت. برای نمونه نتایج مدلسـازی و طراحی پایه بتنی پیش تنیده ۱۲۰۰-۱۲ در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود ابعاد مقطع فوق با ابعاد ۸۰۰-۱۲ طرح H معمولی همخوانی دارد و این مزیت موجب کاهش حجم بتن و سـبک شـدن پایه نسـبت به طرح‌های سابق شده است.



شـکل ۱۵: مدل پایه پیش‌تنیده ۱۲۰۰-۱۲ و نتایج طراحی

۴. تولید پایه و آزمون کشش

۴,۱. تولید پایه

پس از انجام کلیه مراحل طراحی، تولید پایه بین دو سـکو با قابلیت پیش کشیدگی استرند انجام می پذیرد. این سکو با هدف کوچک سازی هرچه بیشتر فضای اشغال شده جهت پیش تنیده کردن پایه ها طراحی شده است. در این سکو قابلیت اجرای پایه پیش‌تنیده در رده های مختلف مقاومتی وجود دارد و گزینه‌های مختلف اجرایی به تناسـب کارگاه‌ها و میزان تولید پایه‌ها قابل طراحی اسـت. یک طرف این سکو با ایجاد سوراخ های لوبیایی شکل متحرک بوده که بعد از اتمام عملیات پیش تنیدگی با خلاص کردن نیروهای پیش تنیده توسط پیچ و مهره و یا جک ریلکسیشن به سمت جلو حرکت خواهد کرد و نیروها آزاد می شود و طرف دیگر ثابت است.

شکل ۱۶: سکوی تولید پایه بتنی پیش تنیده (قسمت متحرک)

شکل ذیل تولید پایه ۱۲۰۰-۱۲ در قالب ۸۰۰ را نشان می‌دهد.

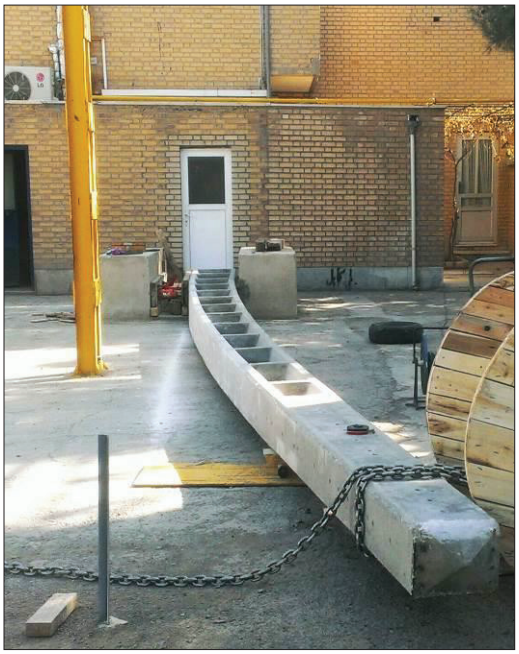
شکل ۱۷: عملیات کشش کابل های (استرند) هفت رشته ای

شکل ۱۸: کنترل جانمایی خاموت‌ها (بالا) و بتن ریزی پایه پیش تنیده (پایین)

در کنار احداث سکوهای نگهدارنده، تجهیزات اساسی عملیات پیش‌تنیدگی شامل گوه و گیره های نگهدانده ا سترند، جک اعمال کشش و پمپ می‌باشد که موارد فوق در داخل کشور قابل تامین است. در این تحقیق بعد از مرحله ساخت، عمل آوری پایه مطابق ضوابط [۳] انجام شده و در نهایت پایه جهت انجام آزمون آماده می شود. بطور خلا صه بای ستی ا شاره نمود ا ستفاده از روش عمل آوری با بخار برای تولید پایه های بتنی پیش تنیده ضروری ا ست و با توجه به ضرورت بازدید ناظر شرکت توزیع از فرآیند تولید و اطمینان از مطابقت حداقل زمان عمل آوری با تاریخ مندرج بر روی پایه‌ها، استفاده از دیگر روش‌های عمل‌آوری در کارگاه ممنوع می‌باشد.

۴,۲. آزمون کشش

پس انجام آزمون‌های نمونه‌ای بتن و بررسی و پذیرش اولیه پایه مطابق ضوابط پیش‌نویس دستورالعمل نوبت به اجرای آزمون کشش پایه می‌رسد. اجرای آزمون برای سه سطح مقاومت اسمی، ارتجاعی و نهایی برای پایه پیش‌تنیده ۱۲۰۰-۱۲ در قالب ۸۰۰ انجام پذیرفت و در نهایت آزمون پایه مذکور پس پذیرفته شدن مراحل اسمی و ارتجاعی، در مرحله نهایی با تحمل ۳۶۰۰ کیلوگرم نیرو و تغییر مکان ۷۰ سانتیمتر بدون گسیختگی با موفقیت پایان یافت و پایه به لحاظ عملکرد مورد پذیرش قرار گرفت.



شکل ۱۹: آزمون پایه پیش تنیده ۱۲۰۰-۱۲

۵. مقایسه اقتصادی

در این بخش با توجه به نتایج طراحی و آزمون کشش، دو نوع پایه پیش‌تنیده ۱۲۰۰-۱۲ (در قالب‌بندی ۸۰۰-۱۲) و پایه چهارگوش (H) معمولی ۱۲۰۰-۱۲ به لحاظ میزان مصالح مصرفی مقایسه اقتصادی می‌شوند.

در جدول ۱ میزان مصالح مصرفی و وزن دو نوع پایه با توجه به

نتایج طراحی، با یکدیگر مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، صرفه جویی در هزینه تمام شده و کاهش وزن پایه به ترتیب ۲۸٪ و ۱۶٪ است.

جدول ۱: مقایسه پایه پیش تنیده و پایه H مسلح معمولی ۱۲ متری با مقاومت اسمی ۱۲۰۰ کیلوگرم نیرو

نوع پایه	فولاد طولی	حجم بتن	صرفه جویی در	وزن پایه	میزان کاهش
پیش	۷۲	۱,۱۸	٪۲۸	۲۹۰۴	٪۱۶
اچ	۲۳۰	۱,۳۴		۳۴۴۶	

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله، بعد از ذکر مزایای قابل توجه بتن‌های پیش‌تنیده، روش‌های طراحی و ساخت پایه های بتنی پیش‌تنیده مورد بررسی قرار گرفت. دو طرح پیشنهادی پایه پیش‌تنیده ۱۲۰۰-۱۲ (اجرا شده در قالب ۸۰۰-۱۲) و پایه چهارگوش H شکل معمولی ۱۲۰۰-۱۲ به لحاظ فنی و اقتصادی مورد مقایسه قرار گرفت که نتایج زیر را دربر داشت:

با توجه به امکان سنجی صورت گرفته ، تمامی تجهیزات مورد نیاز جهت تولید پایه پیش‌تنیده در داخل کشور موجود می‌باشد و مجهز شدن کارگاه‌های داخل کشور با حفظ قالب های موجود امکان‌پذیر است بطوریکه تغییر اصلی لازم برای تبدیل خط تولید پایه های عادی به نوع پیش تنیده، احداث سکوهای نگهدارنده و تهیه تجهیزات مربوط به کشش استرند می‌باشد.

نتایج ساخت پایه پیش‌تنیده حاکی از عملکرد مناسب سکوهای طراحی شده داشت بطوریکه با توجه به ابعاد و فضای اشغال اندک آن از مزایای اجرایی قابل توجهی برخوردار است.

آزمون پایه پیش‌تنیده پس از پذیرفته شدن مراحل اسمی و ارتجاعی، در مرحله نهایی با تحمل ۳۶۰۰ کیلوگرم نیرو و تغییر مکان ۷۰ سانتیمتر بدون گسیختگی با موفقیت پایان پذیرفت.

برای نمونه، پایه ۱۲۰۰-۱۲ مورد بررسی قرار گرفت که نتایج نشان داد، طرح پایه پیش‌تنیده ۱۲۰۰-۱۲ نسبت به طرح H شکل مشابه، ۲۸٪ کاهش هزینه مصالح و ۱۶٪ کاهش وزن خواهد داشت.

۶. مرجع

[1] Rodgers Jr., T. E. (1984). “Prestressed Concrete Poles: State-of-the-Art.” PCI Journal, (September-October), 53–103.

[2] "Busck Prestressed Concrete", New Zealand's leading Concrete power pole supplier, busck.co.nz

[۳]"تدوین دانش فنی طراحی، ساخت و آزمون نوعی پایه‌های بتنی پیش تنیده H شکل و نظارت بر اجرای یک نمونه پایلوت" گروه سازه‌های صنعت برق، ۹۵

[4] "Building Code Requirements for Structural Concrete" ACI318-11 American Concrete Institute, 2011