مشاوران سازه اندرکنش

طراح تخصصی سازه‌های بتنی دهانه بلند

نگارش و تولید محتوا: مه تا ایوبی

ناظر علمی: دکتر مجید هاشمی

تابستان ۱۴۰۴

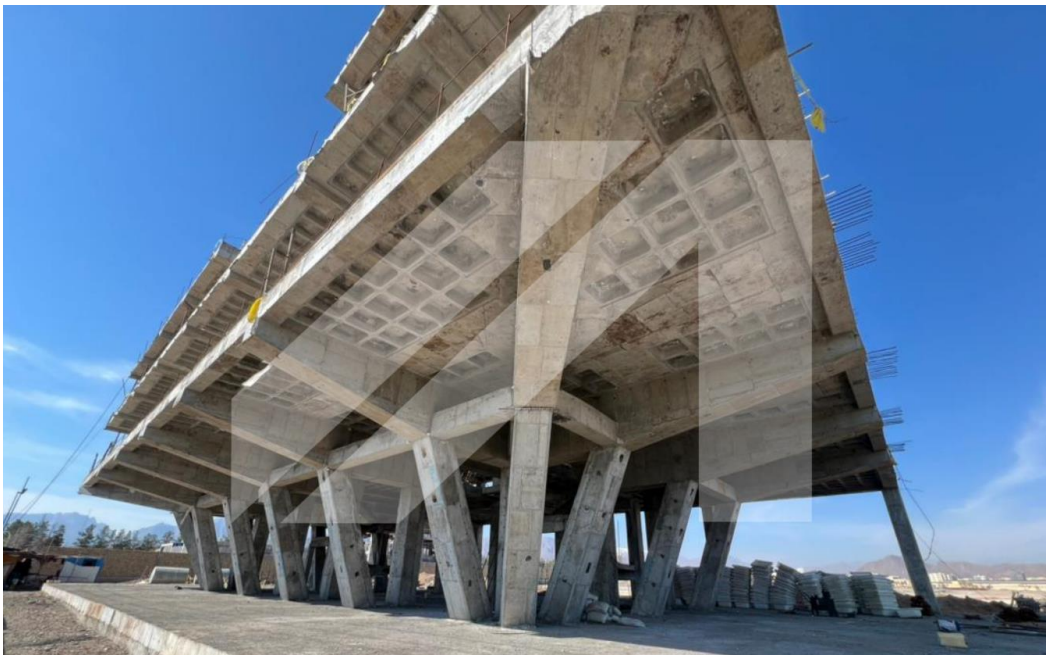
سقف پیش تنیده

فهرست مطالب

۱- مقدمه ۱
۲- آشنایی با سیستم پیش‌تنیده: ۱
۱-۲- نگاهی کوتاه به تاریخچه ۲
۳- اجزای اصلی سیستم سقف پیش‌تنیده ۲
۱-۳- تاندون‌ها ۲
۲-۳- غلاف ۳
۳-۳- مهار ۳
۴- انواع سیستم‌های اجرایی پیش‌تنیدگی ۴
۱-۴- سیستم پیش‌کشیده (Pre-tensioning) ۴
۲-۴- سیستم پس‌کشیده (Post-tensioning) ۴
۵- آرماتوربندی در سقف پیش‌تنیده ۵
۶- مسیر کابل‌ها در سقف پیش‌تنیده ۶
۱-۶- چیدمان عمود بر هم ۶
۲-۶- پروفیل سهموی ۷
۳-۶- سر زنده و سر مرده در کابل‌های پیش‌تنیده ۷
۷- مزایای سقف پیش تنیده ۸
۸- نتیجه‌گیری ۱۱
۹- پرسش و پاسخ ۱۱

۱-مقدمه

در عصر ساخت‌وساز مدرن، ایجاد فضاهای باز با دهانه‌های بلند و بدون ستون‌های میانی، یکی از مهم‌ترین چالش‌های سازندگان و معماران است. سیستم سقف پیش‌تنیده به عنوان یک راهکار نوآورانه، این امکان را فراهم می‌کند که سازه‌هایی با استحکام بالا، وزن کمتر، کنسول‌های بلند و طراحی‌های انعطاف‌پذیر ساخته شوند. استفاده از بتن پیش‌تنیده، به ویژه روش پس‌کشیدگی، به مهندسان عمران اجازه می‌دهد محدودیت‌های سقف‌های سنتی را پشت سر گذاشته و پروژه‌هایی با دهانه‌های گسترده‌تر، کنسول‌های بلندتر، خیز کمتر و دوام طولانی‌تر اجرا کنند.



شکل(۱) پروژه ساختمان نظام مهندسی یزد، کنسول به طول ۶ متر

این فناوری نه تنها در ساخت پارکینگ‌های طبقاتی، سالن‌های تجاری و ساختمان‌های صنعتی کاربرد فراوان دارد، بلکه مزایای اقتصادی و اجرایی قابل توجهی نیز برای کارفرمایان و پیمانکاران به همراه دارد. در این مقاله به بررسی کامل سیستم سقف پیش‌تنیده، مزایا، کاربردها و نکات اجرایی آن می‌پردازیم تا نشان دهیم چگونه می‌توان با استفاده از این روش، پروژه‌هایی با کیفیت بالاتر و طراحی‌های خلاقانه‌تر اجرا کرد.

۲-آشنایی با سیستم پیش‌تنیده:

پیش‌تنیدگی به زبان ساده یعنی اعمال یک نیروی فشاری دائمی و کنترل‌شده به عضو بتنی، پیش از آن‌که

تهران، سعادت آباد، سرو غربی، خیابان آسمان، آسمان چهارم غربی، پلاک ۲، واحد ۲
۰۲۱-۲۲۰۹۲۷۰۰
Interaction-str.ir

تحت بارگذاری‌های واقعی قرار گیرد. هدف این کار، خنثی‌کردن تنش‌های کششی آینده و جلوگیری از ترک‌خوردگی زودهنگام بتن است.

در این فناوری، از کابل‌ها یا تاندون‌های فولادی با مقاومت بسیار بالا استفاده می‌شود که یا پیش از بتن‌ریزی یا پس از آن کشیده می‌شوند. کشش این کابل‌ها باعث اعمال یک نیروی فشاری در تمام طول عضو می‌شود. زمانی که بارهای وارده مانند وزن مرده سازه، بارهای زنده طبقات یا نیروهای جانبی به سقف منتقل می‌شوند، بخش تحتانی عضو دچار کشش خواهد شد. از آن‌جا که بتن ذاتاً در برابر کشش ضعیف است، این ناحیه بدون پیش‌تنیدگی به‌سرعت دچار ترک می‌شود. پیش‌تنیدگی با ایجاد فشار داخلی در مقطع، این ضعف ذاتی را جبران کرده و از ایجاد یا گسترش ترک جلوگیری می‌کند. نتیجه این عملکرد، امکان اجرای دهانه‌های بلندتر، کاهش ضخامت دال، کاهش تعداد ستون‌ها و ایجاد کنسول‌های بزرگ بدون افت عملکرد سازه است.

۲-۱-نگاهی کوتاه به تاریخچه

ایده پیش‌تنیدگی از اواخر قرن ۱۹ مطرح بود، اما یک چالش بزرگ مانع موفقیت آن می‌شد، نیروی اولیه در کابل‌ها به دلیل افت ناشی از رفتار بتن، از بین می‌رفت. نقطه عطف این تکنولوژی و تولد بتن پیش‌تنیده مدرن، مدیون مهندس برجسته فرانسوی، اوژن فریسیه است. او برای اولین بار به درستی دریافت که برای غلبه بر این مشکل، باید از فولادهای بسیار مقاوم با قابلیت کشش بالا استفاده کرد. این نوآوری، اساس بتن پیش‌تنیده مدرن را بنا نهاد و راه را برای ساخت سازه‌های امروزی هموار کرد.

۳-اجزای اصلی سیستم سقف پیش‌تنیده

سیستم سقف پیش‌تنیده از چند جزء کلیدی و مهندسی‌شده تشکیل شده است که هماهنگی کامل آن‌ها، عملکرد بهینه و ایمن سازه را تضمین می‌کند.

۳-۱-تاندون‌ها

تاندون‌ها، مهم‌ترین عنصر تحمل‌کننده کشش است. متداول‌ترین نوع تاندون در ساختمان‌سازی، سیم هفت‌رشته‌ای از فولاد پرمقاومت است. این تاندون از شش رشته سیم مارپیچ که به دور یک سیم مرکزی پیچیده شده‌اند تشکیل می‌شود. این تاندون‌ها معمولاً مقاومت کششی نهایی ۱۸۶۰ مگاپاسکال دارند و در قطرهای رایج ۰/۵ اینچ (۱۲/۷ میلی‌متر) و ۰/۶ اینچ (۱۵/۲ میلی‌متر) استفاده می‌شوند.

تهران، سعادت آباد، سرو غربی، خیابان آسمان، آسمان چهارم غربی، پلاک ۲، واحد ۲
۰۲۱-۲۲۰۹۲۷۰۰ Interaction-str.ir

۳-۲-غلاف

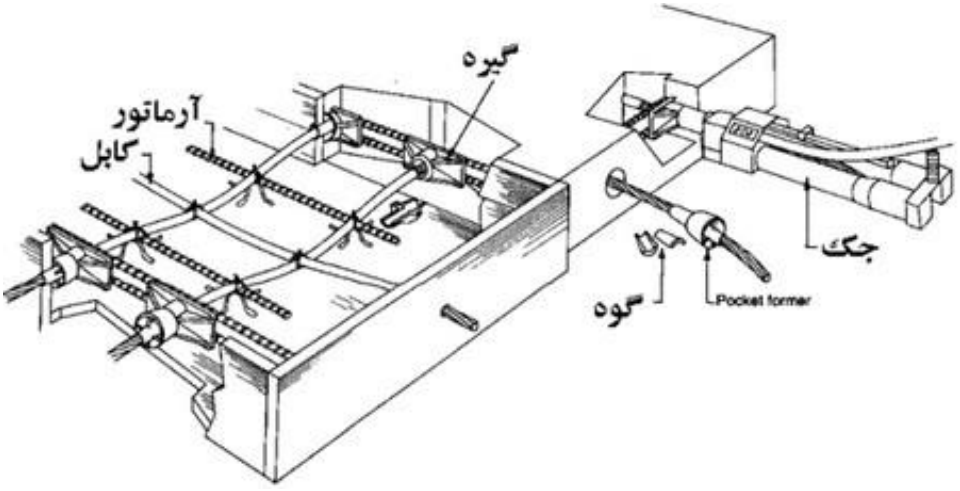
غلاف، لوله‌ای توخالی از جنس ورق گالوانیزه یا پلی‌اتیلن است که قبل از بتن‌ریزی در محل‌های مشخص‌شده نصب می‌شود. وظیفه غلاف‌ها، ایجاد مسیر عبور ایمن و تمیز برای تاندون در داخل بتن و جلوگیری از چسبیدن آن به بتن قبل از عملیات کشش است.

شکل(۲) نمایش قرارگیری تاندون‌ها

۳-۳-مهار

مهار یا انکر، یکی از حیاتی‌ترین قطعات سیستم است که وظیفه انتقال نیروی عظیم کششی از تاندون به بتن را بر عهده دارد. هر مهار معمولاً از دو جزء اصلی تشکیل شده است:

۱. گیره: قطعه‌ای چدنی است که در لبه بتن قرار می‌گیرد و نیرو را به سطح وسیع‌تری از بتن منتقل می‌کند.
۲. گُوه‌ها: قطعات فولادی مخروطی شکلی هستند که پس از کشش، تاندون را مانند یک گیره قدرتمند در داخل بدنه مهار قفل می‌کنند.



شکل(۳) اجزای تشکیل دهنده سیستم پیش‌تنیده

تهران، سعادت آباد، سرو غربی، خیابان آسمان، آسمان چهارم غربی، پلاک ۲، واحد ۲
۰۲۱-۲۲۰۹۲۷۰۰
Interaction-str.ir

٤-انواع سیستم‌های اجرایی پیش‌تنیدگی

تکنولوژی پیش‌تنیدگی به دو روش اصلی اجرا می‌شود که انتخاب بین آن‌ها به نوع پروژه و محل اجرا بستگی دارد.

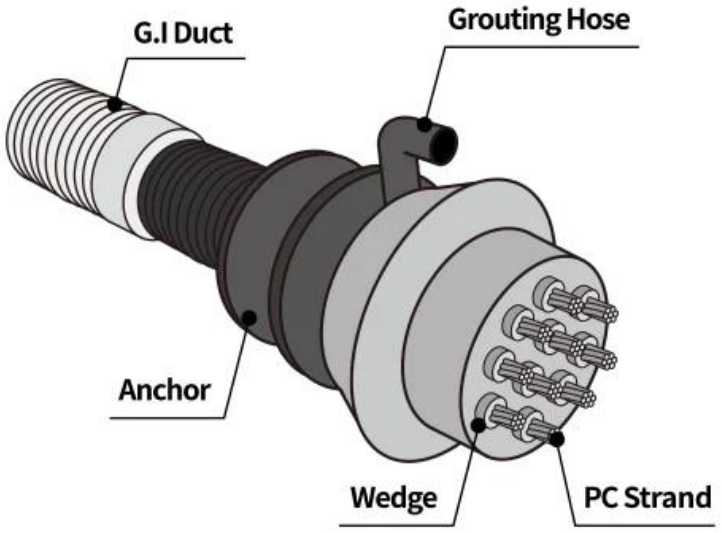
٤-١-سیستم پیش‌کشیده (Pre-tensioning)

در این روش، عملیات کشش کابل‌ها پیش از بتن‌ریزی انجام می‌شود. کابل‌ها بین دو تکیه‌گاه محکم کشیده شده، بتن اطراف آن‌ها ریخته می‌شود و پس از سخت شدن بتن، کابل‌ها آزاد شده و نیرو از طریق چسبندگی به بتن منتقل می‌شود. این متد انتخاب اصلی برای تولید قطعات پیش‌ساخته استاندارد در محیط کنترل‌شده کارخانه است، مانند دال‌های هالوکور، تیرهای پل و شمع‌ها.

٤-٢-سیستم پس‌کشیده (Post-tensioning)

این روش که کاربرد اصلی آن در ساختمان‌سازی است، فرآیندی برعکس دارد. در سیستم، کابل‌ها پس از بتن‌ریزی و سخت شدن بتن کشیده می‌شوند. غلاف‌ها در قالب قرار گرفته، بتن‌ریزی انجام شده و پس از کسب مقاومت، کابل‌ها از درون غلاف‌ها کشیده و در انتها مهار می‌شوند. این روش خود به دو زیرمجموعه مهم تقسیم می‌شود:

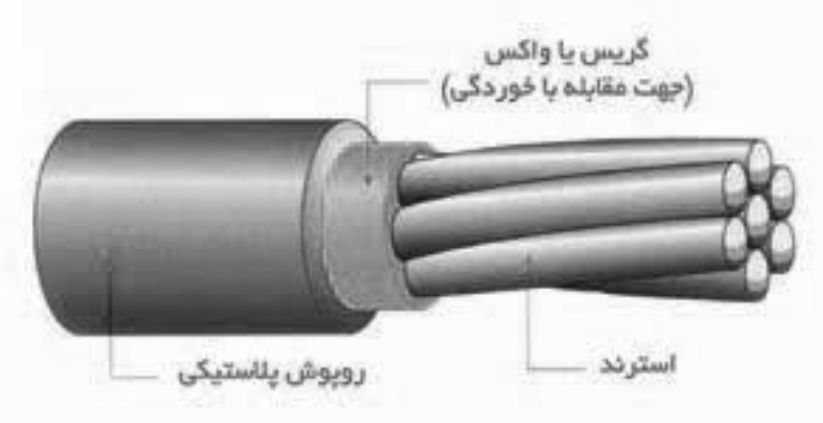
١. سیستم چسبیده (Bonded): در این سیستم، فضای خالی داخل غلاف با گروت سیمانی پر می‌شود.



٢. سیستم نچسبیده (Unbonded): کابل‌ها از قبل گریس‌کاری و روکش‌دار هستند و نیازی به تزریق

تهران، سعادت آباد، سرو غربی، خیابان آسمان، آسمان چهارم غربی، پلاک ۲، واحد ۲
۰۲۱-۲۲۰۹۲۷۰۰
Interaction-str.ir

گروت نیست. این روش عموما در دال‌های ساختمانی و پارکینگ‌ها بسیار محبوب است.



۵-آرماتوربندی در سقف پیش‌تنیده

یکی از باورهای نادرست رایج این است که در سقف‌های پیش‌تنیده هیچ آرماتوری استفاده نمی‌شود. در حالی که هرچند حجم آرماتور در این سیستم به‌مراتب کمتر از سقف‌های بتن مسلح سنتی است، اما استفاده از یک شبکه حداقلی آرماتور برای عملکرد ایمن و بهینه، الزامی است. این آرماتورها شامل موارد زیر می‌شوند:

۱. آرماتور حرارتی: شبکه‌ای که معمولاً در لایه پایینی دال قرار می‌گیرد و وظیفه کنترل ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی و تغییرات حرارتی بتن را بر عهده دارد. این آرماتور باعث می‌شود ترک‌ها به صورت یکنواخت و غیرمتمرکز توزیع شوند.

۲. آرماتور تقویتی: در بخش‌هایی با تمرکز تنش بالا، مانند اطراف ستون‌ها، لبه بازشوها و ناحیه مهارهای انتهایی (انکرها)، از آرماتورهای تقویتی استفاده می‌شود تا مقاومت موضعی افزایش یافته و از ترک‌خوردگی جلوگیری شود.

تهران، سعادت آباد، سرو غربی، خیابان آسمان، آسمان چهارم غربی، پلاک ۲، واحد ۲
۰۲۱-۲۲۰۹۲۷۰۰
Interaction-str.ir

شکل(۴) پروژه گلدن مال ، آرماتوربندی در یک لایه مش تحتانی

٦-مسیر کابل‌ها در سقف پیش‌تنیده

پروفیل و چیدمان کابل‌ها در سقف پیش‌تنیده، نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد سازه دارد:

٦-١-چیدمان عمود بر هم

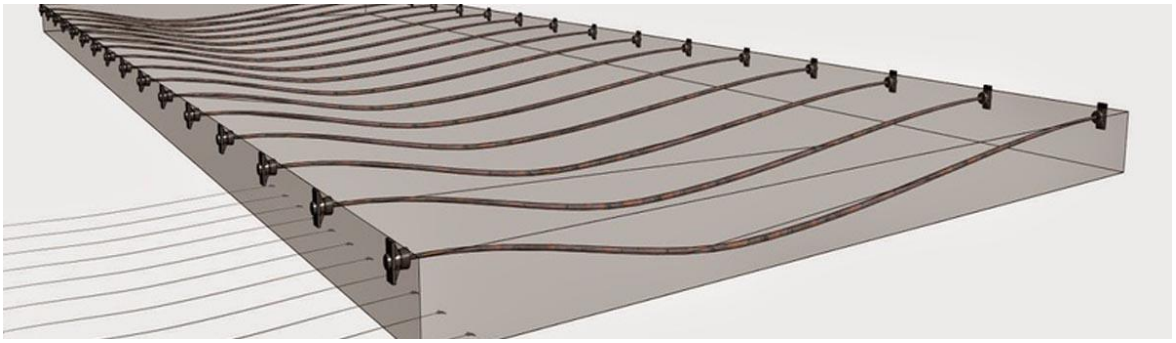
در سقف پیش تنیده، کابل‌ها معمولاً در دو جهت عمود بر هم اجرا می‌شوند. این چیدمان باعث می‌شود که نیروی پیش‌فشردگی در هر دو امتداد اصلی دال ایجاد شود. در نتیجه، دال بتنی توانایی مقابله با خمش در هر دو جهت را پیدا خواهد کرد.

شکل(۵) چیدمان دوطرفه تاندون‌ها در سقف پیش‌تنیده

تهران، سعادت آباد، سرو غربی، خیابان آسمان، آسمان چهارم غربی، پلاک ۲، واحد ۲
۰۲۱-۲۲۰۹۲۷۰۰
Interaction-str.ir

۶-۲-پروفیل سهموی

کابل‌های پیش‌تنیده برخلاف آرماتورهای معمولی، در یک مسیر مستقیم قرار نمی‌گیرند و دارای یک پروفیل منحنی و سهموی هستند. این مسیر به گونه‌ای طراحی می‌شود که پروفیل کابل‌ها در وسط دهانه‌ها (جایی که لنگر خمشی مثبت و کشش در پایین دال است) در قسمت تحتانی دال و در قسمت تکیه‌گاه‌ها و ستون‌ها (جایی که لنگر خمشی منفی و کشش در بالای دال است) در قسمت فوقانی دال قرار بگیرد. این مسیر منحنی، یک نیروی بالابرنده ایجاد می‌کند که با وزن سقف مقابله کرده و اثر آن را خنثی می‌کند. برای تثبیت موقعیت کابل‌ها و حفظ شکل پروفیل سهموی، از قطعات فلزی به نام خرک استفاده می‌شود.



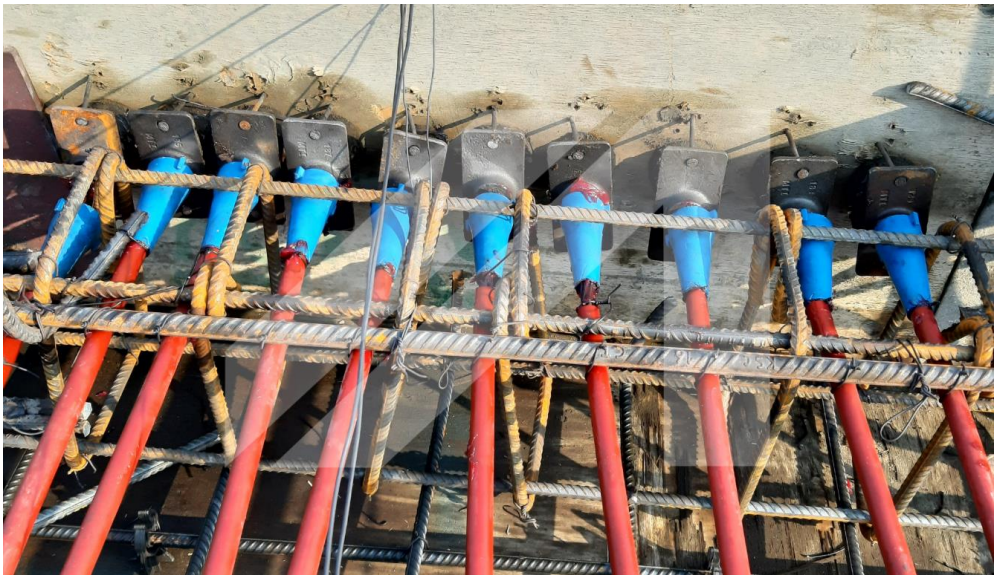
شکل(۶) پروفیل قرارگیری کابل در بتن

۶-۳-سر زنده و سر مرده در کابل‌های پیش‌تنیده

در سیستم پیش‌تنیدگی پس‌کشیده، هر کابل یا تاندون دو انتها دارد که به آن‌ها سر زنده و سر مرده گفته می‌شود.

۱. سر زنده: سمتی که عملیات کشش کابل با جک هیدرولیکی انجام می‌شود. پس از کشش، کابل با استفاده از سیستم مهار (معمولاً گوه) در همین نقطه قفل می‌شود.

تهران، سعادت آباد، سرو غربی، خیابان آسمان، آسمان چهارم غربی، پلاک ۲، واحد ۲
۰۲۱-۲۲۰۹۲۷۰۰
Interaction-str.ir



۲. سر مرده: سمتی که کابل از ابتدا در بتن مهار شده و جک به آن متصل نمی‌شود. این مهار می‌تواند به صورت پیازگی یا انکر ثابت باشد.

در دهانه‌های بسیار بلند، برای کاهش افت نیرو ناشی از اصطکاک، ممکن است کشش از هر دو طرف (دو سر زنده) انجام شود.

۷-مزایای سقف پیش تنیده

- **دهانه‌های بلند و حذف ستون‌ها:** امکان خلق پلان‌های باز و یکپارچه در فضاهای تجاری، اداری و مسکونی.

تهران، سعادت آباد، سرو غربی، خیابان آسمان، آسمان چهارم غربی، پلاک ۲، واحد ۲
۰۲۱-۲۲۰۹۲۷۰۰
Interaction-str.ir

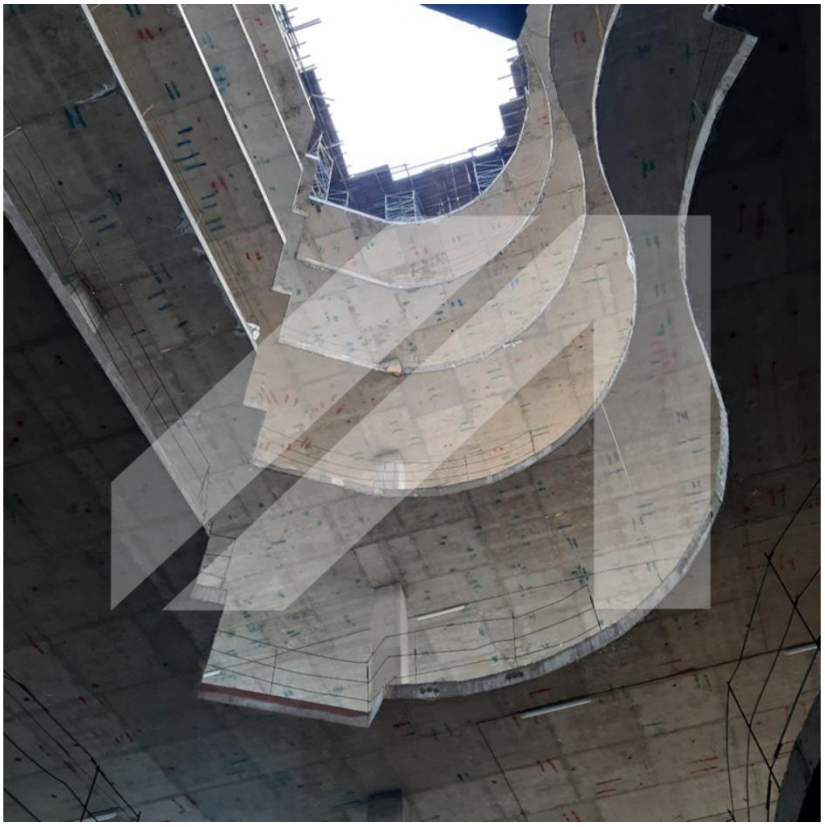
شکل(۷) سقف وافل پیش‌تنیده با دهانه ۲۶ متر در پروژه کارخانه میکرونخ کویر یزد

- **کنسول‌های بلند و نماهای جسورانه:** قابلیت اجرای بالکن‌ها و کنسول‌های طولانی بدون ایجاد خیز بیش از حد.

شکل(۸) کنسول بتنی به طول ۱۱ متر در پروژه ویلا سایا

تهران، سعادت آباد، سرو غربی، خیابان آسمان، آسمان چهارم غربی، پلاک ۲، واحد ۲
۰۲۱-۲۲۰۹۲۷۰۰
Interaction-str.ir

- **کاهش ضخامت سقف:** کاهش ارتفاع طبقات و صرفه‌جویی در هزینه نما و تأسیسات.
- **سقف‌های مسطح و پلان‌های پیچیده:** یکی از بزرگترین برتری‌های سیستم پس‌کشیدگی، آزادی عملی است که در اختیار معماران و طراحان قرار می‌دهد. این سیستم امکان حذف کامل تیرهای میانی و ایجاد یک سیستم سازه‌ای دال تخت و ستون را فراهم می‌کند. نتیجه، سقفی کاملاً صاف و یکپارچه است که علاوه بر زیبایی و ایجاد حس وسعت، عبور تأسیسات مکانیکی و برقی را بسیار ساده و کم‌هزینه می‌کند. این انعطاف‌پذیری به همینجا ختم نمی‌شود. برخلاف سیستم‌های سنتی که اغلب در دور دال دارای محدودیت هستند، در سیستم پس‌کشیدگی می‌توان پلان‌هایی با هر نوع هندسه پیچیده، مانند لبه‌های منحنی و چیدمان نامنظم ستون‌ها را به راحتی اجرا کرد.



پروژه گلدن مال مشاهده می‌کنید، ترکیب این دو ویژگی به ما اجازه داد تا سقفی یکپارچه و بدون آویز تیر را در یک پلان با فرمی کاملاً منحصربه‌فرد اجرا کنیم و به بهترین شکل به اهداف معماری و سازه‌ای پروژه دست یابیم.

تهران، سعادت آباد، سرو غربی، خیابان آسمان، آسمان چهارم غربی، پلاک ۲، واحد ۲
۰۲۱-۲۲۰۹۲۷۰۰
Interaction-str.ir

۸-نتیجه‌گیری

سیستم سقف پیش‌تنیده با ارائه ترکیبی بی‌نظیر از مزایای معماری، اقتصادی و سازه‌ای، خود را به عنوان یکی از کارآمدترین روش‌ها برای ساخت‌وساز مدرن تثبیت کرده است. این فناوری نه تنها محدودیت‌های سازه‌های سنتی را از میان برمی‌دارد، بلکه به ساخت پروژه‌هایی بادوام‌تر، اقتصادی‌تر و زیباتر کمک می‌کند.

شرکت ما با تجربه تخصصی در طراحی و اجرای دقیق انواع سیستم‌های پیش‌تنیده، آماده است تا به شما در بهینه‌سازی پروژه‌هایتان کمک کند. برای دریافت مشاوره رایگان و بررسی طرح‌های خود، با ما تماس بگیرید.

۹-پرسش و پاسخ

آیا می‌توان سقف پیش‌تنیده را با سقف وافل ترکیب کرد؟

بله، ترکیب این دو سیستم نه تنها ممکن است، بلکه یک راهکار سازه‌ای بسیار پیشرفته و کارآمد برای دستیابی به دهانه‌های بسیار بلند دوطرفه است. در این سیستم ترکیبی، از مزایای هر دو روش به صورت همزمان استفاده می‌شود.

آیا پس از کشش اولیه، نیازی به کشش مجدد کابل‌ها در آینده وجود دارد؟

خیر؛ در طراحی اولیه سازه‌های پیش‌تنیده، تمام افت‌های نیروی بلندمدت که به دلیل پدیده‌هایی مانند خزش و جمع‌شدگی بتن و واداگی فولاد رخ می‌دهد، به دقت محاسبه و در نیروی کشش اولیه لحاظ می‌شود. نیروی اعمال شده به کابل‌ها به اندازه‌ای است که پس از کسر تمام این افت‌ها در طول زمان، نیروی مؤثر باقی‌مانده برای تمام عمر مفید سازه کافی باشد. بنابراین، در شرایط عادی هیچ نیازی به کشش مجدد تاندون‌ها نیست.

پس از کشش، با بخش اضافی کابل‌ها که از بتن بیرون زده، چه کار می‌کنند؟

این فرآیند یک مرحله تکمیلی و استاندارد در اجرای پس‌کشیدگی است:

پس از اینکه تاندون به نیروی مورد نظر رسید و توسط گُوه‌ها در داخل مهار قفل شد، جک هیدرولیکی جدا می‌شود. سپس، بخش اضافی تاندون که از لبه بتن بیرون زده است، توسط ابزار برش مخصوص (مانند فرز) بریده می‌شود. در نهایت، فرورفتگی یا حفره‌ای که محل قرارگیری انکر است، با گروت یا ملات تعمیری غیر انقباضی پر می‌شود. این کار برای محافظت از انکر و سر تاندون در برابر خوردگی و همچنین برای ایجاد یک سطح تمام‌شده صاف و یکپارچه انجام می‌شود.

طراحی سقف‌های پیش‌تنیده با چه نرم‌افزاری انجام می‌شود؟

تهران، سعادت آباد، سرو غربی، خیابان آسمان، آسمان چهارم غربی، پلاک ۲، واحد ۲
۰۲۱-۲۲۰۹۲۷۰۰
Interaction-str.ir

برای طراحی تخصصی سقف‌های پیش‌تنیده، از نرم‌افزارهای قدرتمند المان محدود استفاده می‌شود. انتخاب نرم‌افزار به پیچیدگی پروژه و رویکرد طراح بستگی دارد، اما دو نرم‌افزار زیر در این حوزه شناخته‌شده‌ترین هستند:

- نرم‌افزار ADAPT: یکی از معروف‌ترین و تخصصی‌ترین ابزارهاست که به طور ویژه برای طراحی و بهینه‌سازی تاندون‌ها در سیستم‌های پیش‌تنیده توسعه یافته است.
- نرم‌افزار CSI SAFE: این نرم‌افزار به طور گسترده برای تحلیل و طراحی انواع دال‌های بتنی، از جمله دال‌های پیش‌تنیده، استفاده می‌شود. SAFE قابلیت مدل‌سازی ترکیبی سیستم پیش‌تنیده و آرماتورهای معمولی را به خوبی دارد و برای کنترل‌های نهایی طراحی بسیار پرکاربرد است.

تهران، سعادت آباد، سرو غربی، خیابان آسمان، آسمان چهارم غربی، پلاک ۲، واحد ۲
۰۲۱-۲۲۰۹۲۷۰۰
Interaction-str.ir