

عمارت «طاق بزرگ» پاریس

تجربه بررسیها و محاسبات سازه‌ها

دکتر سهراب باقری

مهندسان مشاور COYNE ET BELLIER - پاریس

خلاصه:

به قراری، ساختمان بنای «طاق بزرگ» در حومه پاریس، رویدادی مهم در زمینه نوآوری در فن ساختمان و جسارتی در نگرش حاکم بر طرح و محاسبات سازه‌ها است. اگر چه اجزاء مختلف تشکیل دهنده این بنا، هرکدام جداگانه، به تجربه و سابقه‌ای در زمینه‌ای معین شبیه‌اند آنچه به این بنا ویژگی می‌بخشد، تجمع تجربه‌های ممتاز زمینه‌های مختلف در ساختمانی یگانه است.

این نوشته که سعی در تشریح گوشه‌های اصلی بررسیهای انجام شده در مراحل مختلف این طرح را دارد، بخشهایی از تجربه کارهای اجرایی ساختمان را نیز ارائه می‌کند. کوشش شده است که آن مسائل و نکات و مشکلات اساسی که در هنگام مطالعات قبل و حین اجرا ظهور کردند، با توجه به محدودیت منطقی چنین نوشته‌ای، عنوان شوند.

نویسنده این مقاله فارغ‌التحصیل سال ۱۳۵۵ دانشکده فنی دانشگاه تهران و فارغ‌التحصیل دکترای مهندسی از مدرسه PONTES ET CHAUSSEES پاریس است. از ابتدای شروع مطالعات سازه‌های این بنا (سال ۱۹۸۴) و تا پایان ساختمان آن (سال ۱۹۸۹) وی عهده‌دار مسئولیتهای مختلف در پیش‌برد این طرح بوده است. در طول مطالعات مقدماتی و فازهای اول و دوم، نویسنده، مسئول بررسیها و محاسبات سازه‌ها بوده و در فاز سوم، مسئولیت نظارت بر اجرا را از طرف شرکت مهندسان مشاور COYNE ET BELLIER عهده‌دار بوده است.

مقدمه:

سمت غرب، موزه لوور، میدان کنکور، خیابان شانزلیزه و بنای سرباز گمنام (طاق اتوال) در امتداد این محور قرار دارند. از این لحاظ، وجود این آسمانخراشها که فضای غرب پاریس را در آن سوی عمارت سرباز گمنام اشغال می‌کردند مباحثات چندی را در افکار عمومی ساکنان پاریس برانگیخت. به ویژه این مباحثات حول آن بنا که می‌بایست دقیقاً در امتداد «محور تاریخی» قرار گرفته و به نحوی نقش بنای سرباز گمنام را کمی دورتر به عهده بگیرد، متمرکز شدند. از سالهای ۱۹۶۰ تا اوایل دهه ۱۹۸۰،

محله «دانس» (La Défense) در غرب پاریس در ۱۲ کیلومتری مرکز آن قرار دارد. توسعه و گسترش فعالیتهای بازرگانی و خدماتی به ویژه بعد از جنگ دوم جهانی به توسعه شهرسازی دامن زد و از همان سالهای ۱۹۵۰ آسمانخراشهای متعددی در این محله که تا آن زمان دست نخورده باقی مانده بود، ساخته شدند. این سازه‌ها حول شبکه پیچیده‌ای از راههای ارتباطی سطحی و زیر زمینی و از جمله حول یک محور شرقی - غربی که به «محور تاریخی» معروف است بنا شدند. از مرکز شهر به

کارفرما: شرکت مختلط با سهام زیر: دولت
۳۴ درصد، صندوق پس انداز ۲۶ درصد، بانکها و شرکتهای
بیمه: ۴۰ درصد

مشاوران:

معماری: شرکت فرودگاههای پاریس
AEROPORTS DE PARIS

سازه: شرکت کوین و بلیه
COYNE ET BELLIER

نظارت و کنترل:

شرکت CEP

مقاطع کار اصلی:

شرکت بوئیگ BOUYGUES

قسمتهای تشکیل دهنده مکعب باز (شکل ۱)

این ساختمان که در شروع مطالعات پروژه به مکعب باز معروف بوده و سپس نام «طاق بزرگ»^۱ را به خود گرفت، از چهار قسمت عمده ساخته شده است: دو قسمت عمودی و دو قسمت افقی. دو قسمت عمودی که دوجدار قائم مکعب باز را تشکیل می دهند، هر کدام عمارتی به ارتفاع ۱۱۰ متر، به عرض ۱۸ متر و به طول ۱۱۰ متر است. دو قسمت افقی که جدارهای قائم را در پائین و بالا به هم متصل می کنند، به ترتیب قاعده و تاج این مکعب را تشکیل می دهند.

جدار جنوبی، محل استقرار وزارت آبادانی و مسکن است و در جدا شمالی، شرکتهای خصوصی از قبیل بیمه بانک جای گزیده اند.

تاج فوقانی محل دائمی نمایشگاه و کنفرانس است و

طرحهای متعددی به این منظور به وجود آمدند و هر بار به دلیلی (فشار افکار عمومی، بحران نفت و فشار اقتصادی) به مرحله اجرا در نیامدند. در سال ۱۹۸۳، از میان ۴۲۴ طرح معماری که در کنکور شرکت کردند، طرح یک آرشتیکت دانمارکی به نام «اوتو فون اسپرکلسن OTTO VON SPRECKELEN» برنده شد. این طرح که با عنوان «مکعب باز» معرفی شد، بر «محور تاریخی» قرار داشت و معمار دانمارکی جمله زیر را در بیان انگیزه اش در ایجاد این طرح به کار برده بوده: «پنجره ای باز به روی آینده ای غیر قابل پیش بینی».

مشخصات عمومی طرح:

مطالعات مقدماتی و فازهای اول و دوم طرح (کارهای خاکی، پی، سازه های بتنی و فلزی) در ماه آوریل ۱۹۸۴ شروع و یکسال بعد نقشه ها و مدارک مناقصه آماده شد. در ماه مه ۱۹۸۵، قرارداد اجرا با شرکت ساختمانی برنده مناقصه به امضاء رسید و عملیات ساختمانی در ماه ژوئن همان سال آغاز شد و چهار سال بعد، در ماه ژوئیه ۱۹۸۹ پایان یافت.

مساحت کلی بنا ۱۸۰۰۰۰ مترمربع و وزن کل آن ۳۰۰۰۰۰ تن است.

ابعاد خارجی مکعب حدود ۱۱۰ متر است و کل مکعب بر ۱۲ ستون استوار است.

میزان مصالح مصرفی به ترتیب زیر است:

- بتن با مقاومت بالا (۵۰۰ تا ۶۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع): ۱۱۰۰۰۰ متر مکعب

- آرماتور: ۱۰۰۰۰ تن

- کابل پیش تنیدگی: ۱۲۰۰ تن (معادل

۷۰ کیلومتر)

- قالب بتن: ۵۰۰۰۰۰ مترمربع.

مسئولیت های اداری، مالی، مطالعاتی و اجرایی:

۲۱ متر است و ستونها در امتداد و در زیر ضلع عمودی قابها قرار دارند. اضلاع افقی و نیز قسمتهای انتهایی اضلاع قائم از بتن پیش تنیده تشکیل شده‌اند.

اضلاع قائم این قابها از سه بخش مجزا تشکیل شده‌اند و اتصال این اجزاء تنها در فاصله‌های قائم ۲۱ متر، در سطح «طبقات فنی» (طبقاتی به ارتفاع ۱/۵ متر که جهت استقرار تاسیسات طرح شده‌اند) صورت می‌گیرد. مقاطع هر کدام از این اجزاء مقطعی جعبه‌ای (توخالی) است. شکل خارجی این جعبه‌ها^۵، مستطیلی به طول ۵/۵ و به عرض ۱/۵ متر است. ضخامت جعبه‌ها بین ۵۰ تا ۷۰ سانتیمتر است. قسمتهای خالی داخل این جعبه‌ها برای عبور کانال و لوله و کابل و ۰۰۰۰ طرح شده‌اند.

فاصله بین دو جعبه متوالی ۱/۵ متر است که همان عرض راهرو در طبقات عمومی است. (شکلهای ۳ و ۴)

۲- «بزرگ سازه» گروه دوم: این گروه سازه‌های واقع در ارتفاع «طبقات فنی‌اند» و اضلاع قائم قابها را به هم متصل می‌کنند. فاصله عمودی بین دو گروه متوالی از این دسته از سازه‌ها ۲۱ متر است که همان فاصله بین دو «طبقه فنی» است. در هر کدام از این سطوح چهار تیرپیش تنیده قرار دارند که اضلاع قائم جعبه‌ای قابها را در سطح نماهای داخلی و خارجی و نیز در امتداد دیوارهای داخلی به هم متصل می‌کنند.

یکی از ویژگیهای جالب طرح سازه‌ها این است که در ارتفاع، ارتباط بین طبقات یکسان و سراسری نیست بلکه در سطح «طبقات فنی»، قطع شده است. به این معنی که چهار تیرپیش تنیده‌ای که در بالا ذکر شد، بارهای ۷ طبقه بالایی خود (بین دو طبقه فنی متوالی، ۷ طبقه عادی موجود است) را دریافت می‌کنند و به جای انتقال آنها به پائین، این بارها را به ضلعهای قائم قابهای بزرگ سازه گروه

فضاهای موجود در قاعده به نمایشگاه و سینما اختصاص یافته‌اند.

این مکعب با وزن ۳۰۰ هزار تن بر روی ۱۲ ستون بزرگ واقع است که به ترتیبی یکسان در زیر دوجدار عمودی قرار دارند. در سطح افقی بالای هر یک از سرستونها، حدود ۴۰ تکیه‌گاه نشویرن^۲ قرار دارند که شرایط ایزوستاتیکی خارجی^۳ را برای مکعب باز تامین می‌کنند. بنابراین تمامی مکعب باز به سادگی و بی هیچ لنگر گیری بر ستونها قرار گرفته است. نشویرنها تغییر مکان‌های طولی و عرضی آزاد را برای مکعب باز تامین می‌کنند. چنانکه در صفحات بعد خواهیم دید، این امر برای عناصر پیش تنیده لازم است زیرا از انتقال بخش مهمی از نیروی پیش‌تنیدگی به ستون و پی جلوگیری می‌کند.

سطح نشویرنها، سطح صفر پروژه است. حجم واقع در زیر مکعب باز و مابین دو ردیف ستون را پنج طبقه زیرزمین اشغال کرده است. ستونها با حدود ۳۵ متر ارتفاع بر روی لایه‌ای ضخیم (۱۵ متر) از سنگ آهک قرار دارند. (شکل ۲)

سازه‌های اصلی

در آغاز مطالعات، سازه‌های اصلی مکعب باز به دلیل نقش عمده و اساسی خویش به «بزرگ سازه»^۴ معروف شدند. «بزرگ سازه‌ها»، خود نیز به چند دسته تقسیم می‌شوند:

۱- «بزرگ سازه» گروه اول که به نحوی عامل مولد مکعب باز شناخته می‌شود، از چهار قاب بسته تشکیل شده است. طول و عرض هر یک از این چهار قاب، همان طول و عرض مکعب باز است: فاصله بین دو قاب متوالی،

2- Néorrène

3- Isostatioqe Externe

4- Méga - Structure

5- Caisson

محوطه زیرینا را:

- دورشته بزرگراه (A14)
- سه رشته تونل مترو (RER)
- یک ایستگاه راه آهن (Gare SNCF)
- یک رشته خط آهن مورب نسبت به ایستگاه (Voies SNCF)
- یک پارکینگ مرکز تجاری (Parking PA) اشغال کرده بود.

۱۲ ستون مکعب باز (طاق بزرگ) توانستند در این محوطه شلوغ جای گیرند. متنها معمار دانمارکی بنا به توصیه مهندسان مشاور، چاره‌ای ندید جز آنکه مکعب را حول محور قائم مرکزیش به مقدار ۶ درجه بچرخاند. این تغییری بود در طرح مبنا زیرا که محور مکعب می‌بایست در امتداد «محور تاریخی» قرار می‌گرفت. (شکل ۷).

بررسیهای مراحل اول و دوم

بررسیهای فاز اول و فاز دوم بزرگ سازه‌ها حول ۴ محور انجام گرفت.

- ۱- تخمین مقدار نشست ستونهای مکعب باز و تعیین نشستهای نامساوی بین ستونهای مجاور.
- ۲- مطالعه رفتار سازه‌های اصلی مکعب باز در هنگام اجرا و پیشنهاد روشهای اجرا و ساختمان
- ۳- مطالعه رفتار سازه‌ها، به ویژه بزرگ سازه‌ها در مقابل نشستهای نامساوی.
- ۴- تعیین حد تنش حاصل از کارکرد سازه‌ها در اثر بارها و سربارها و نیز در اثر نشستهای نامساوی (تنش حاصل از اثر بارها و سربارها ارتباط مستقیم با روش اجرای ساختمان داشت).

در نتیجه شناساییهایی که از لایه‌های خاک شده بود، ستونهای مکعب بار بر لایه‌ای از سنگ آهک قرار

یک مستقل می‌کنند. این پدیده، با ایجاد درزی^۶ به ضخامت ۳ سانتیمتر در بالای سازه‌های نماها و دیوارهای داخلی عملی شده است. به این ترتیب، تیرهای پیش‌تنیده طبقات فنی، به نحوی تکیه‌گاه ساختمانهای ۷ طبقه‌ای می‌باشند که در جدارهای مکعب جا گرفته‌اند. هر کدام از این مجموعه ساختمانهای ۷ طبقه، مستقل از ساختمانهای دیگر است، به گونه‌ای که حذف ۷ طبقه اول بین دو قاب متوالی تاثیر چندانی بر طبقات دیگر نخواهد داشت. این ساختمانهای ۷ طبقه به مکعبهای ریز (mini - cube) معروف‌اند که بین دو «بزرگ سازه» دسته اول (در طول) و دو «بزرگ سازه» دسته دوم (در ارتفاع) قرار دارند. (شکل ۵ و شکل ۶).

۳- «بزرگ سازه» گروه سوم: ۸ تیرپیش‌تنیده این گروه اضلاع افقی قابها را (که مولد قاعده و تاج مکعب باز هستند) به هم متصل می‌کند. ابعاد این تیرها شبیه ابعاد اضلاع افقی قاب‌ها، به ارتفاع ۱۰ متر و به عرض ۱ مترند. برای تأمین عبور و مرور در فضاهای قاعده و تاج مکعب باز، این تیرها (همانند اضلاع افقی قابها) مشبک‌اند. هریک از این تیرها در دوسر خود به دو طره به طول ۲۵ متر تبدیل می‌شود.

۴- «بزرگ سازه» گروه چهارم: علاوه بر چهار قاب اصلی گروه اول، در دو انتهای هر یک از دو جدار مکعب باز، دو دیوار مایل^۷ قرار دارد و در زیر هر کدام از آنها ستونی همانند ستونهای زیر قابها واقع است. صرف‌نظر از درزهایی که در بالای ساختمانهای ۷ طبقه قرار دارند و قبلاً بدانها اشاره شد، کل ساختمان مکعب باز بی‌درز است و از این لحاظ ساختمانی یکپارچه^۸ تلقی می‌شود.

مسائل مربوط به محوطه ساختمان

تعیین محل استقرار ستونها در ارتباط مستقیم با وضعیت بناهای زیر زمینی موجود قرار داشت. در واقع،

حداکثر نشست نامساوی بین دو ستون مجاور (ستون انتهایی و ستون ماقبل) ، ۳۶ میلی متر اعلام شد. مقادیر نشست واقعی ستونها که در حین اجرا و پس از آن اندازه گیری شده اند، این فرضیه ها را تاکنون تأیید کرده اند.

روش اجرای ساختمان این بنا نیز می بایستی از ابتدا مطالعه شده و تأثیر آن در مقدار تنش و کرنش عناصر سازه ها بررسی می شد. در مرحله بررسیهای فاز اول و دوم، سه روش برای ساختمان مکعب باز تصور و یکی از آنها در محاسبات عددی وارد شد. در این طرز ساختمان ، تکیه گاههای موقت در زیر بزرگ سازه های افقی قاعده مکعب در نظر گرفته شده بود. علت این امر نیز آن بود که تا اجرای کامل مکعب و تا «بستن» تاج آن ، قاعده و جدارهای قائم که هنوز تکمیل نشده اند و شکل «U» دارند، از سختی کافی برخوردار نخواهند بود و تغییر شکلهای زیادی را متحمل خواهند شد (جدارهای قائم «U» به طرف هم می گریند). از این لحاظ ، گذاشتن چند تکیه گاه زیر قاعده «U» تا زمان بستن آن به صورت یک قاب کامل (□) ، هم از مقدار تنش در عناصر افقی می کاست و هم از تغییر شکلهای زیاد که خارج از حد قابل قبول بود، جلوگیری می کرد. مراحل مختلف مربوط به گذاشتن و یا برداشتن این تکیه گاهها در محاسبات عددی وارد شدند.

علاوه بر این روش ساختمان ، دو روش دیگر نیز پیشنهاد شده بود که یکی از آنها، استفاده از تیرهای فشاری^{۱۱} موقت بود که نقش تاج مکعب را تا زمان ساختمان آن به عهده می گرفت. این روش ، از طرف شرکت پیمانکار انتخاب و به اجرا گذاشته شد.

در ضمیمه شماره یک ، خلاصه ای از جزئیات محاسبات این مرحله آورده شده است.

گرفتند که حدود ۳۵ متر پائین تر از سطح زمین موجود بود. ضخامت این لایه سنگ آهک ۱۵ متر بود و خود بر لایه های نشست پذیری از قبیل لایه های رُسی و ماسه ای - رسی قرار داشت. تخمین نشست تکیه گاههای مکعب باز (ستونها) مشکلات بزرگی را به همراه داشت. در واقع تخمین مقدار نشست از طریق روشها و فرمولهای معمول (به دلیل وجود حدود ۴۰ متر خاک نشست پذیر) به مقادیر غیر قابل قبولی منتهی می شد و انجام طرح را ناممکن می ساخت. از این لحاظ مطالعه ای دقیق و با در نظر گرفتن همه عوامل اساسی ، با وارد کردن محاسبات عددی در تخمین نشست صورت گرفت: لایه سنگ آهک به صورت صفحه ای مستقر بر لایه های نشست پذیر در محاسبات عددی وارد شد و سختی مکعب باز نیز هنگام تاثیر بارها در معادله ها دخالت داده شد.

به این ترتیب رفتار لایه سنگ آهک که ستونها بر آن قرار داشتند، به صورت رفتار صفحه ای نسبتاً سخت مستقر بر تکیه گاههای ارتجاعی^۹ بررسی شد. مقدار دامنه نشست به ضریب سختی این صفحه و تکیه گاههای زیر آن (لایه های رسی) بستگی داشت. تخمین حداکثر مقدار نشست بین ۱۰ تا ۱۸ سانتی متر بود. شکل عمومی نشست ستونهای هر کدام از دو جدار مکعب باز، به صورت منحنی مقعر در آمد که نقطه حداکثر در وسط ردیف ستونها قرار داشت. تخمین نشست نامساوی بین دو ستون مجاور از اهمیت بسیاری برخوردار بود، زیرا به علت سختی زیاد سازه ها، این پدیده می توانست تنشهای شدیدی در سازه های اصلی پدید آورد.

در این مرحله از مطالعه ، بر اساس تجربه های پیشین موجود در حوالی محوطه ساختمان و در نظر گرفتن حد معادلی از ناهمگونی در لایه سنگ آهک (ترک و شکستگی و) تخمین نهائی نشست نامساوی انجام یافت و شرکت مهندسان مشاور با تعهد به آن ، بررسیها را دنبال کرد. مقدار

بررسیهای اجرایی (مرحله سوم):

بین ستونها و به ویژه بین ستونهای مجاور بود. نتیجه این محاسبه به تعیین ابعاد ستونها و پیها انجامید.

- برای بررسی جدارهای قائم مکعب باز، مدل به کار گرفته شده از ۱۱۱۵۶ جزء و ۶۶۳۲ گره^{۱۳} تشکیل شده بود. به دلیل زیاد بودن درجههای آزادی این مدل، تعداد مراحل اجراء در این محاسبه به ۷ مرحله محدود شد (مراحل اجراء بیشتر در بزرگ سازههای افقی واقع در قاعده و تاج مکعب باز مؤثر بودند). براساس این محاسبه، ابعاد بزرگ سازههای قائم تعیین شدند.

- بزرگ سازههای افقی واقع در قاعده و تاج مکعب باز از طریق مدلی حاوی ۵۰۰ جزء بررسی شدند. مدل سازههای بزرگ سازههای افقی، نسبت به مدل دوم تغییری نکرده بود، تنها در این مدل، بزرگ سازههای قائم، سادهتر در نظر گرفته شده بودند. برعکس مدل دوم، به دلیل حساسیت بزرگ سازههای افقی به مراحل اجراء، ۷۶ مرحله ساختمان در این محاسبات وارد شدند. این مراحل ساختمان عبارت بودند از: مراحل مختلف اجراء و ساختمان جدارهای قائم، مراحل به کار بردن و تحت فشار قرار دادن تیر فشاری، وضعیتهای مختلف سازهها در اثر تغییر شکل ساختمان و.....

بررسیهای اجرایی کل ساختمان و نیز عناصر مختلف بزرگ سازهها میبایستی با در نظر گرفتن موارد زیر انجام می گرفت.

- کنترل دقیق تغییر شکل عناصر مکعب باز، چه در هنگام ساختمان و چه پس از آن: به دلیل بررسیهای مربوط به نمای ساختمان، حدود تغییر شکل ساختمان بسیار کوچک بود.

- کنترل دقیق و تنظیم نیروهای داخل تیرچههای فشاری در هنگام ساختمان بر حسب دمای هوا و پیشرفت اجراء.

- تعیین مقادیر تنش موجود در عناصر سازه چه در حین اجراء و چه پس از آن

- تعیین نیروی پیش تنیدگی لازم در مراحل مختلف و در نظر گرفتن آنها در محاسبات عددی. به دلیل کثرت مراحل مورد بررسی، اجراء محاسبات عددی میبایستی با برنامه ریزی مشخصی به پیش می رفت.

مدل سازی^{۱۱} سازهها برای محاسبات عددی (از طریق روش اجراء محدود) حول سه محور انجام گرفت:

- برای بررسی ستونها و پی، مدلی با حدود ۱۵۰۰ جزء^{۱۲} ساخته شد.

هدف از این محاسبه تعیین حدود تغییرات بارهای

عملیات اجرایی

نکات مهم و اساسی در اجرای مکعب باز (طاق بزرگ) عبارت بودند از :

- بنای قاعده و به ویژه تاج مکعب باز که در ارتفاع ۱۳۰ متری زمین و بین دو جدار قائم به فاصله ۸۰ متر قرار می گرفت .

- وجود سازه‌ها و زیربنای موجود درست در زیر مکعب باز : شاهراه ، تونل مترو ، خط راه آهن ، ایستگاه راه آهن ، پارکینگ زیر زمینی

- پایداری سازه‌های ناتمام (در حین ساختمان) در مقابل باد (یادآور می شود که حساسیت مکعب باز نسبت به باد در هنگام اجرا ، یعنی زمانی که هنوز تاج آن ساخته نشده بود و قابها « بسته » نشده بودند، بسیار زیاد بود).

- مسئله نشستهای نامساوی بین ستونها

- بتن ریزی سازه‌های فوقانی و نیز تاج مکعب باز که در ارتفاع ۱۳۰ متری قرار داشتند. در این بخش از نوشته به روشهای اجرای بزرگ سازه‌های افقی قاعده ، بزرگ سازه‌های قائم جدارهای مکعب و بزرگ سازه‌های افقی تاج می پردازیم.

روش ساختمان بزرگ سازه‌های افقی قاعده

بین دو جدار قائم که به فاصله ۷۰ متر از یکدیگر بودند، به ۷ قطعه تقسیم شدند و قطعات بر روی یک تیر - قالب فلزی به وزن ۲۰۰ تن بتن ریزی شدند. تیر قالب فلزی که از دو سو به جدارهای مکعب متصل بود، در فواصل بینایی بر روی تکیه گاههای موقتی که در فواصل بین زیر بناهای موجود (تونل مترو ، بزرگراه ، خط آهن و ...) جاداده شده بودند ، قرار داشت.

هر یک از ۷ قطعه به طول ۱۰ متر و حجم متوسط ۱۵۰ متر مکعب بود. هر قطعه بعد از بتن ریزی و برداشتن قالب ، توسط کابل‌های پیش تنیده به تیر - قالب مهار می شد تا امتداد و راستای عمومی قطعات حفظ شود. (شکل ۸).

برای این دسته از بزرگ سازه‌ها بر عکس بزرگ

سازه‌های فوقانی (تاج) ، لوله‌های کابل‌های پیش تنیده از قبل در قطعات جاگذاری شده بودند و امتداد و ادامه این لوله‌های خالی مابین قطعات مجاور حفظ می گشت. پس از اتمام بتن ریزی قطعه هفتم ، کابلها وارد لوله‌ها شدند و بخش اول پیش تنیدگی صورت پذیرفت (بخشهای دیگر کمی دیرتر و به موازات ساختمان قسمتهای دیگر و در نتیجه ، وارد آمدن بار بیشتر به بزرگ سازه‌ها به اجرا درآمدند). (شکل ۹)

مسئله مهمی که می بایستی در این مرحله حل می شد ، لزوم یا عدم لزوم کابل‌های اضافی پیش تنیدگی برای حالت موقت اجرای ساختمان بود: چنانکه قبلاً نیز ذکر شد ، پیش از کامل شدن قابهای بزرگ سازه‌ها ، یعنی تا زمانی که عضو افقی و فوقانی قابها ساخته نشده اند ، ساختمان ناقص آنها که به شکل (U) است، از نظر خارجی و داخلی ایزوستاتیک بوده و بزرگ سازه افقی قاعده مکعب (عضو پائینی U) همانند تیری است که بر دو گروه تکیه گاه متشکل از توپرن قرار دارد. در نتیجه لنگر خمشی در وسط دهانه این تیر به مقدار حداکثر خود می رسد و از این لحاظ به مقدار قابل توجهی از کابل‌های پیش تنیده نیاز هست. بعد از کامل شدن قاب و اضافه شدن بار ناشی از ساختمان قسمتهای باقیمانده و یا هنگام بهره برداری از ساختمان ، بزرگ سازه‌های افقی قاعده و تاج ، نسبت به بزرگ سازه‌های قائم جدار مکعب ، گیردار می شوند و لذا لنگرهای وسط دهانه ، به تکیه گاه منتقل شده و کابل‌های اضافی لازم در مرحله اجرای ساختمان غیر ضروری می شوند.

علاوه بر آن ، حالت ایزوستاتیک بزرگ سازه‌های افقی قاعده مکعب باعث چرخش تکیه گاه گشته و جدارهای مکعب که در حال ساختمان اند ، این چرخش را به اجبار متحمل می شوند . در نتیجه این چرخش تدریجی تکیه گاه و باتوجه به این امر که قابهای بتن ریزی جدارهای قائم بر قسمتهای بتن ریزی شده پائین تر سوار می شوند ، شکل پایانی بتن ریزی شده جدارها دیگر مسطح نخواهد بود.

ساختمان تاج (شکل ۱۱)

بزرگ سازه‌های گروه اول تاج مکعب باز همگی در بالای مکعب در ارتفاع ۱۳۰ متری بتن ریزی شدند. برای این کار از تیر - قالبی^{۱۴} که برای ساختن بزرگ سازه‌های قاعده مکعب به کار رفته بود، دو باره استفاده شد. این تیر قالب در دو سر به جدارها متصل بود و در دو نقطه میانی بر دو ستون فلزی که ستونهای جدا شده جرنقیلها بودند، تکیه داشت. بتن ریزی در ۷ قطعه صورت گرفت. ترتیب بتن ریزی، برعکس بزرگ سازه‌های قاعده، از دو سمت و به صورت روش اجرای پلهای دانه تسییحی بود. با این تفاوت که قطعات در محل بتن ریزی می شدند و تیر - قالب فلزی و ستونهای میانی، عدم توازن حاصل از بتن ریزی تنها در یک سوی تکیه گاه راجیران می کرد. (شکل ۱۲ و شکل ۱۳)

ستونهای قائم میانی مجهز به جک و وسائل لازم برای خشی کردن اثر تغییر دما بودند. مقدار نیروی قائم در آنها به ۹۰۰ تن می رسد.

بزرگ سازه‌های گروه دوم تاج مکعب، با تکیه بر بزرگ سازه‌های گروه اول به اجرا درآمدند. در این مورد می توان به بتن ریزی هشت قسمت طره‌ای به طول ۲۵ متر در ارتفاع ۱۳۰ متری اشاره کرد. (شکل ۱۴)

انتقال بتن به ارتفاع ۱۳۰ متری و از مسیری به طول حدود ۲۰۰ متر (با احتساب مسیرهای افقی و قائم) با توجه به تعداد قابل ملاحظه پیچ و خمها از مسائل عمده بود. بتنی که برای تاج مکعب ساخته می شد، جهت استفاده در سازه‌هایی بود که به کیفیت بالایی از بتن نیاز داشتند. علاوه بر این با توجه به حجم قابل توجه قطعات بتنی (حدود ۱۵۰ متر مکعب) و وجود آرماتور با درصد نسبتاً زیاد، به درجه قابل ملاحظه‌ای از روانی^{۱۵} نیاز بود. علاوه بر اینها باید به مشکلات دیگری مثل تفکیک دانه بندی بتن بعد

برای حل این معضلات، دو راه وجود داشت:

- حفظ تکیه گاههای موقت در زیر بزرگ سازه‌های

افقی قاعده

- استفاده از تیر فشاری در فواصل بینایی ارتفاع

قاب که نقش بزرگ سازه‌های افقی بالای قاب رادر غیاب آنها و در حالت موقت به عهده می گیرند.

به دلیل اینکه تکیه گاههای موقت مشکلات متعددی، از جمله در زمینه نشستهای نامساوی ایجاد می کرد، این راه حل کنار گذاشته شد و راه حل دوم (تیرهای فشاری) پذیرفته شد. (شکل ۱۰)

هر یک از این تیرهای فشاری، خریایی سه بعدی فلزی به طول ۷۰ متر و به وزن ۹۰ تن بود. در انتهای آنها جکهای به کار گمارده شده بودند که بر اساس نیاز (تغییر دما - تغییر شکل‌های اختلافی، اثر باد) می توانستند تا ۲۰۰۰ تن نیرو در محور این تیرهای فشاری وارد کنند. برای کاهش اثر تغییر دمای هوا بر این تیرهای فشاری، اعضای فلزی آن را با پوشش ویژه‌ای به رنگ سفید، پوشانده بودند.

ساختمان جدارهای قائم

مشکل عمده‌ای در ساختمان این قسمت از مکعب باز وجود نداشت. قالبها بر طبقات پائین تر سوار می شدند و بتن ریزیها به سرعت انجام می گرفت. سرعت متوسط پیشرفت کار در این قسمت، دو طبقه در ۵ روز بود (یک طبقه از هر جدار).

تیرهای فشاری در طبقات هفتم و چهاردهم

(طبقات فنی) قرار داشتند و از این لحاظ، این طبقات نیروهای بیشتری را متحمل می شدند.

۱۴- تیر- قالب (Cintre) در این اجراء و نقش عمده داشت: اول آنکه نقش قالب را برای بتن ریزی ایفا می کرد. ثانیاً تا تکمیل شدن قطعات مختلف بتنی بزرگ سازه، همانند تیر فلزی، در ترکیب با قطعات بتنی جزئاً ساخته شده که به آن متصل شده بودند عمل می کرد.

اصولاً در تمامی مراحل طرح و اجرا مدنظر بود، خالی از اشکال نبود. زیرا، در قطعات بتن فولادی، استفاده از بتن با مقاومت بالا که با گرایش به تقلیل ابعاد مقاطع همراه بود، مشکلات جا دادن فولاد در قسمت‌های کششی بتن رابه همراه داشت. در واقع حد و مدول کشسانی فولاد، نقاط ضعف در به اجرا درآوردن چنین هدفی هستند. اگر بتوان مقدار فولاد لازم را با استفاده معقول از حدکشسانی بالاتر، کمی کاهش داد، این کاهش نمی‌تواند از حد معینی تجاوز کند. زیرا که با توجه به مدول کشسانی (مدول «یونگ») ثابت فولاد، به موانع مربوط به باز شدن ترک در قسمت کششی بتن برخورد خواهیم کرد.

اضافه شود که این نقاط ضعف در قطعات بتن پیش‌تنیده تقریباً وجود ندارند.

چنانکه پیشتر نیز گوشزد شد به کار بردن این بتن، برخی از مشکلات مربوط به پمپ کردن بتن به نقطه‌ای در ارتفاع زیاد و از طریق مسیری طولانی را از میان برداشت. فرمول ترکیبی بتن، به ویژه استفاده از خاکستر سیلیس و مواد روان‌کننده، موجب شدند که با وجود پائین بودن نسبت آب به سیمان ($E/C=0.37$)، اسلامپ بتن بین ۲۰ تا ۲۴ تغییر می‌کرد و تقریباً هیچ‌گونه تغییری در دانه بندی بتن پمپ شده به وجود نیامد.

از طی مسیر طولانی (خصوصاً در ارتفاع) و فشار بالای لازم برای پمپ کردن چنین بتنی اشاره کرد.

چنانکه در فصلی دیگر خواهیم دید، این مشکلات با استفاده از بتن با مقاومت بالا از میان برداشته شدند. لازم به یادآوری است که فشار لازم برای پمپ کردن بتن، در مقطع پمپ به میزان ۶۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع بود.

استفاده از بتن با مقاومت بالا^{۱۶}

چنانکه پیشتر گفته شد، همگی بزرگ سازه‌های افقی و قسمت عمده بزرگ سازه‌های قائم از بتن با مقاومت بالا ساخته شدند.

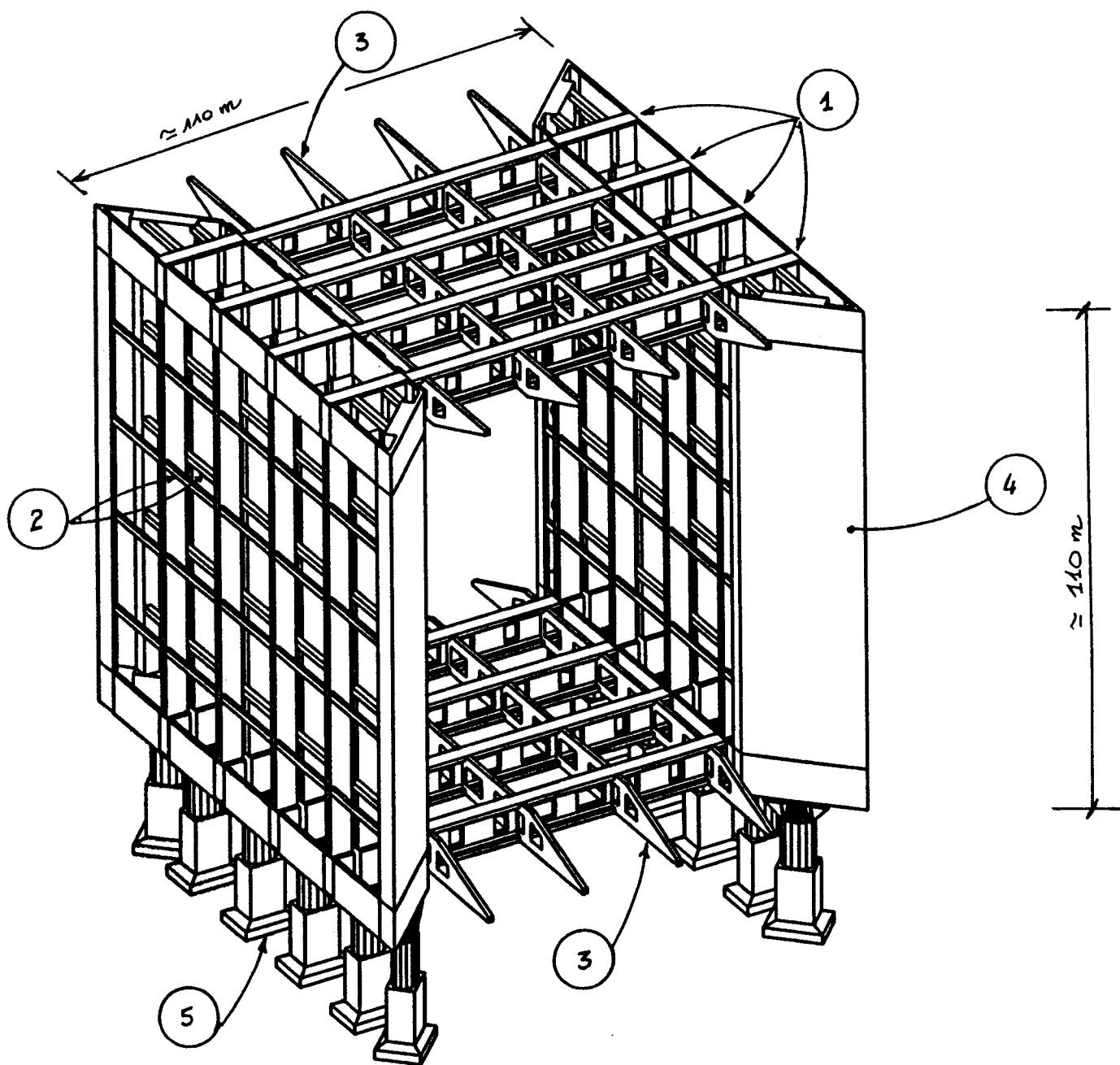
مقاومت مشخصه بتن مطابق قرارداد ۵۰۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع بود. این بتن که با اضافه کردن خاکستر سیلیس^{۱۷} درست شد، مقاومت مشخصه بسیار بالاتری داشت. به این ترتیب که مقاومت ۵۰۰ «بار» عمدتاً بعد از ۷ روز کسب می‌شد و حداقل مقاومت به دست آمده پس از ۲۸ روز در حدود ۶۵۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع بود.

در فرانسه، اگرچه قبلاً این نوع بتن در آزمایشگاهها و در مقیاس تجربی ساخته شده بود، این اولین بار بود که چنین بتنی در مقیاس صنعتی در این کشور تولید و ساخته می‌شد. هدف اصلی در استفاده از این بتن، طرح و اجرای سازه‌های کم حجم و کشیده^{۱۸} بود. پیاده کردن این هدف که

16- Beton á Haute Performance (BHP)

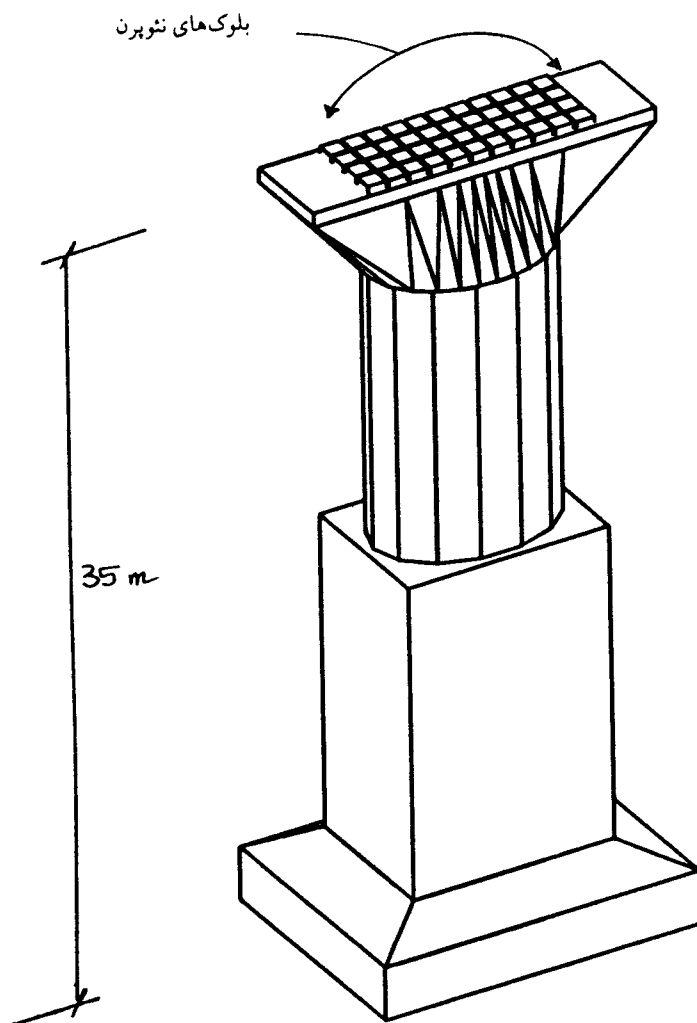
17- fumée de Silice

18- élané

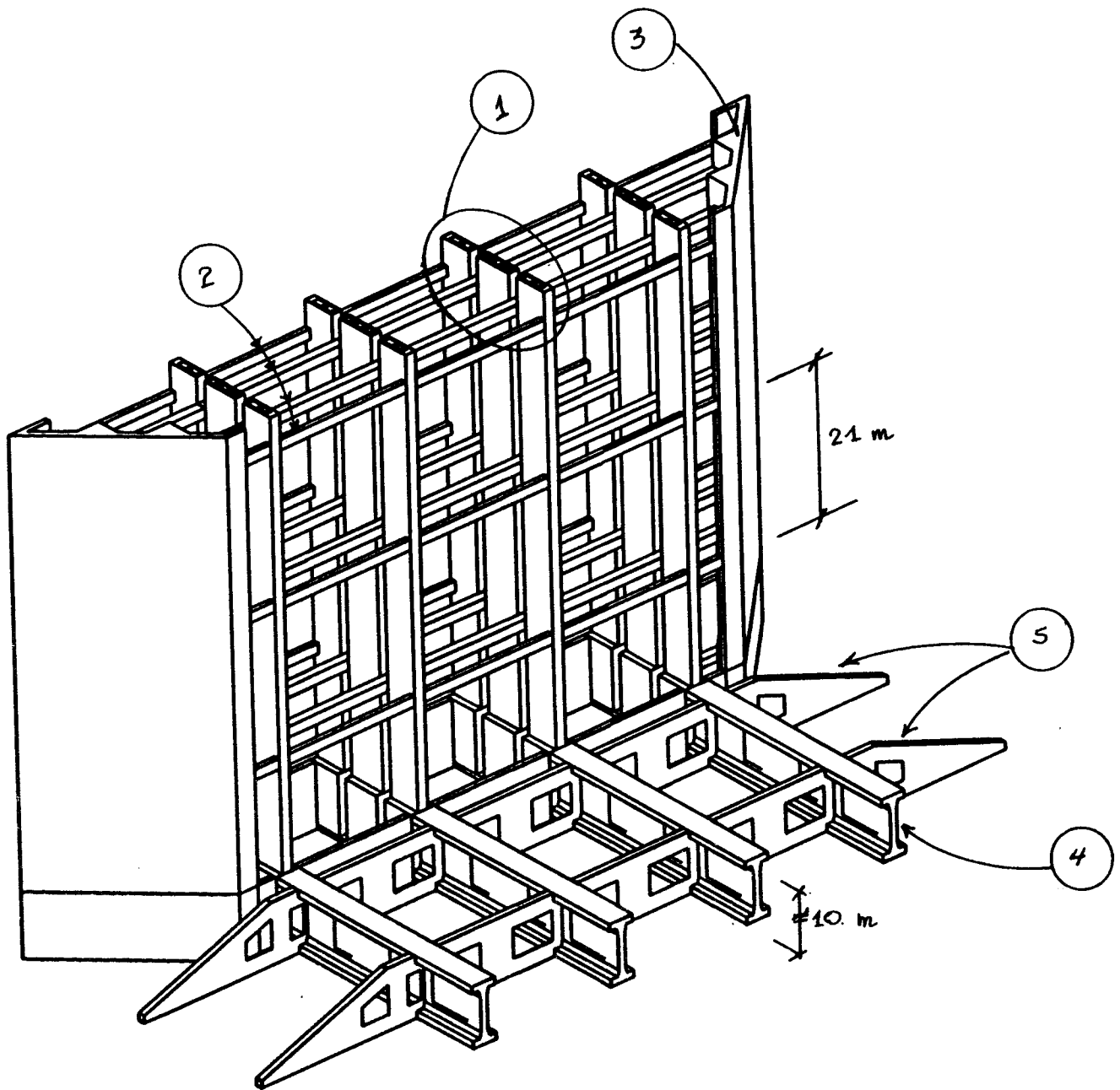


- ۱- بزرگ سازه گروه ۱
- ۲- بزرگ سازه گروه ۲
- ۳- بزرگ سازه گروه ۳
- ۴- بزرگ سازه گروه ۴
- ۵- ۱۲۵ ستون اصلی

شکل ۱- اجزاء مکعب باز (طاق بزرگ)

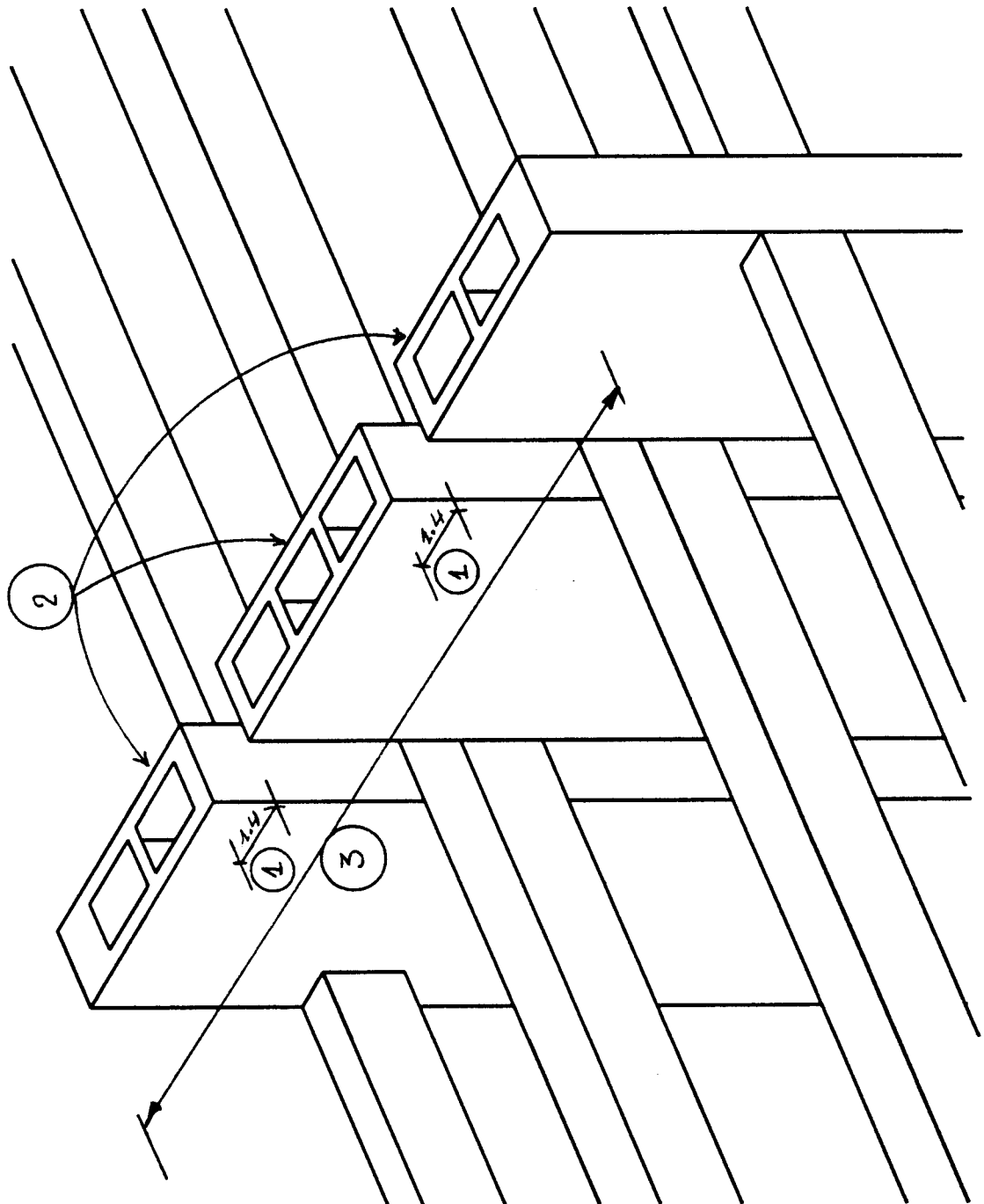


شکل ۲- یکی از ۱۲ ستون اصلی طاق بزرگ



- 1- ضلع قائم قاب (به شکل ۴ مراجعه شود)
- 2- تیرهای پیش‌تندگی (بزرگ سازه گروه ۲)
- 3- دیوار مایل (بزرگ سازه گروه ۴)
- 4- ضلع افقی قاب (بزرگ سازه گروه ۱)
- 5- بزرگ سازه گروه ۳

شکل ۳- مقطعی از مکعب‌باز

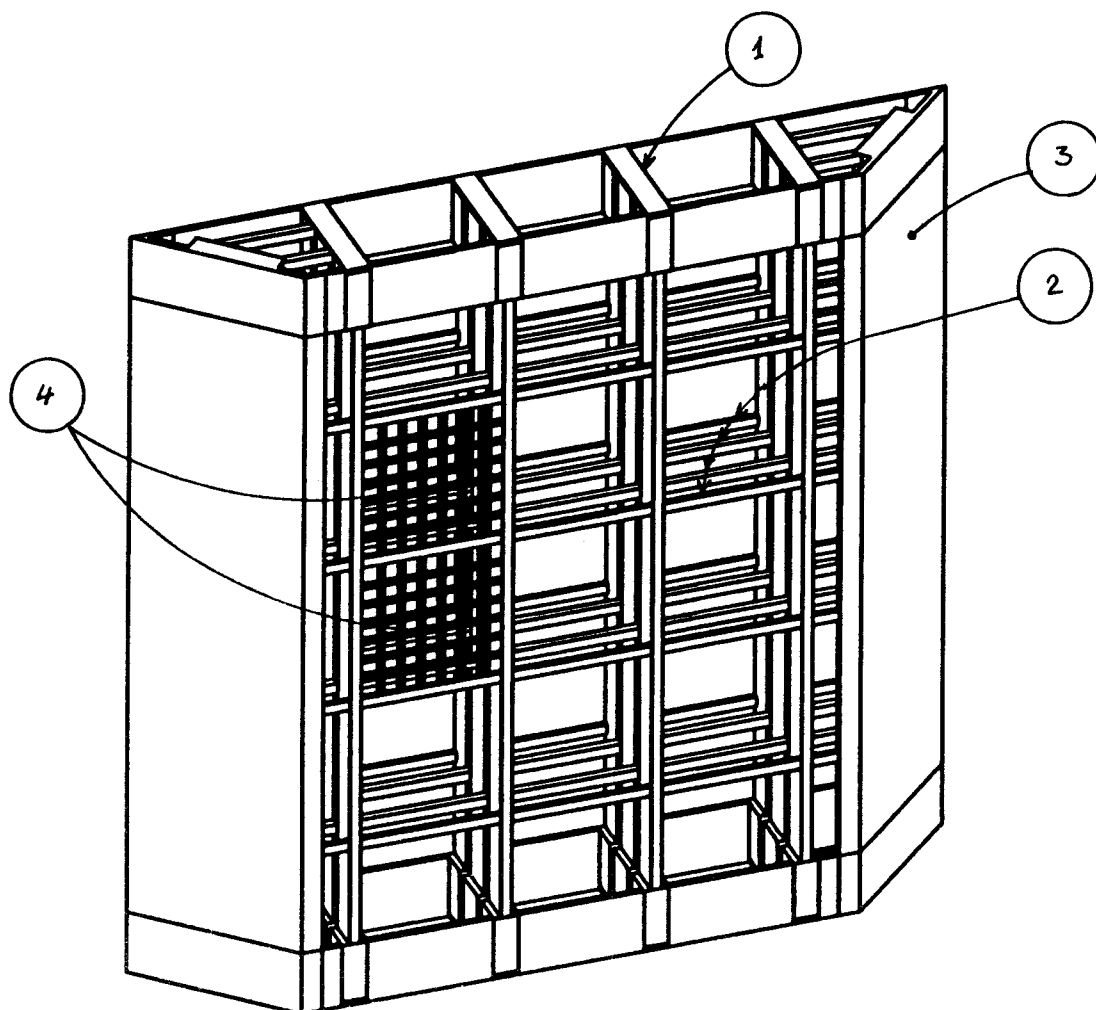


1- راهرو

2- جمعیه‌های توخالی تشکیل دهنده قائم قاب

3- عرض جدار قائم (۱۸ متر).

شکل ۴- بزرگ سازه گروه ۱- جمعیه‌های تشکیل دهنده اضلاع قائم



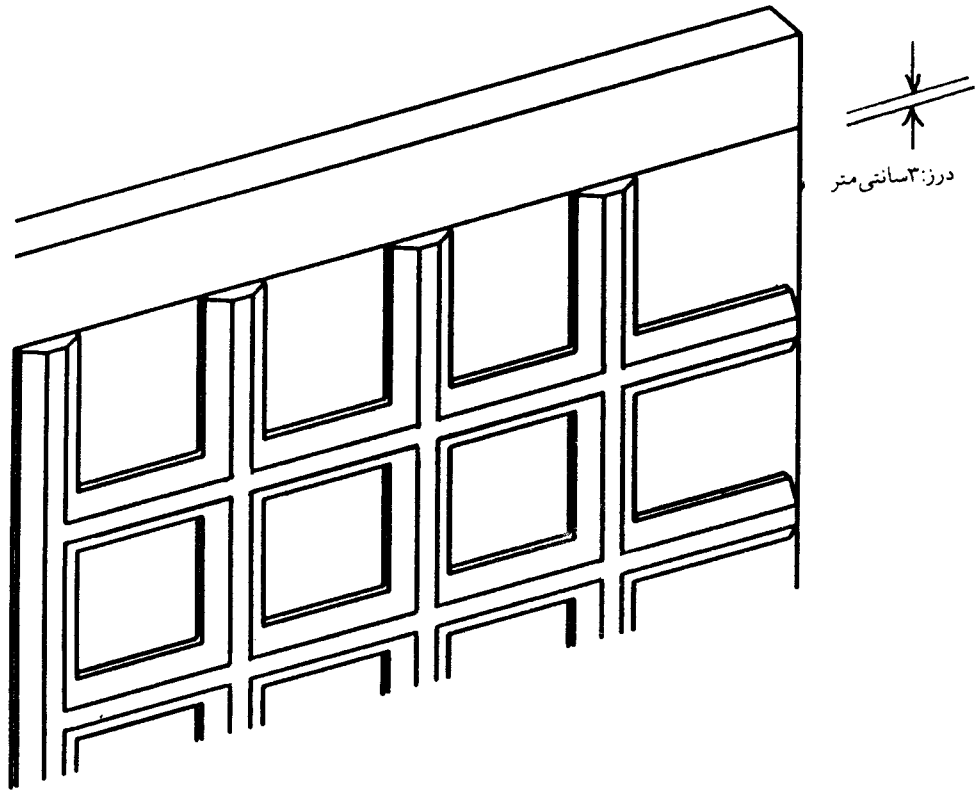
1- ضلع قائم قاب (گروه ۱)

2- تیرهای پیش‌تنیدگی طبقات فنی: پی‌های مکعب‌های ریز

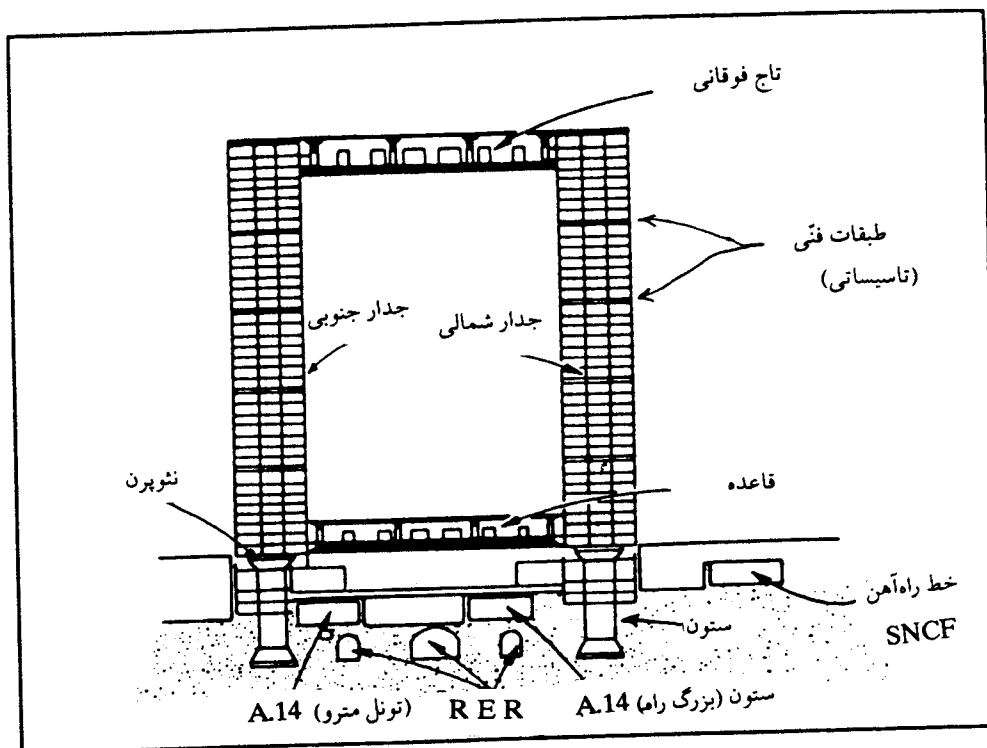
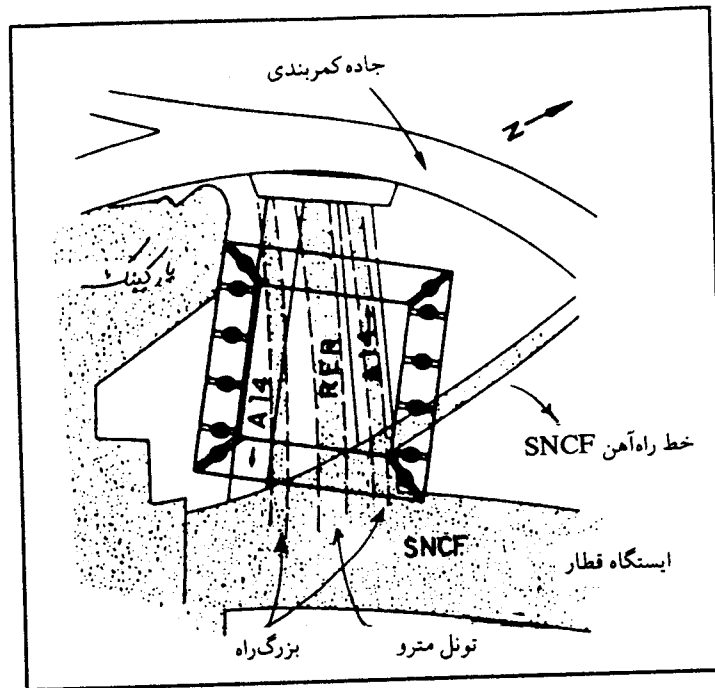
3- دیوار مایل

4- مکعب‌های ریز (۷ طبقه)

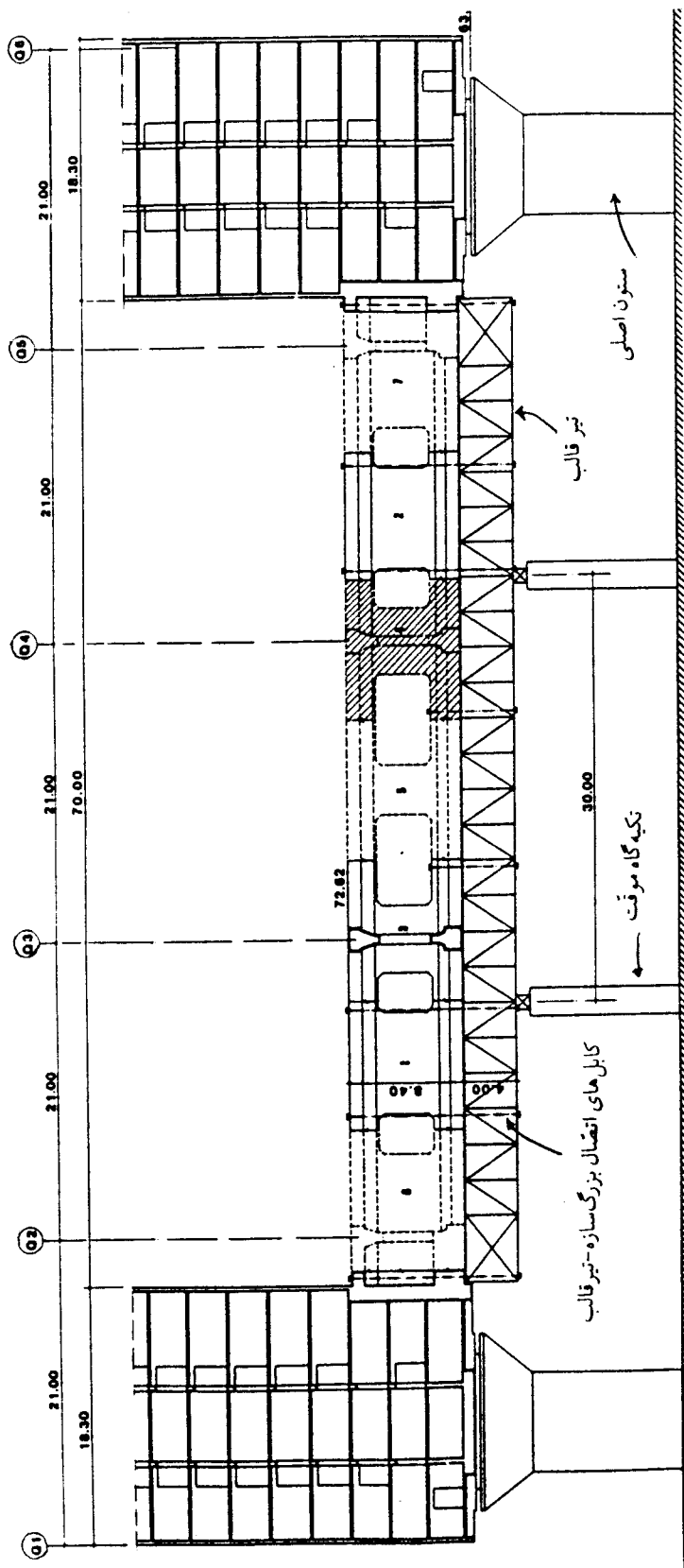
شکل ۵- نمای یک جدار قائم



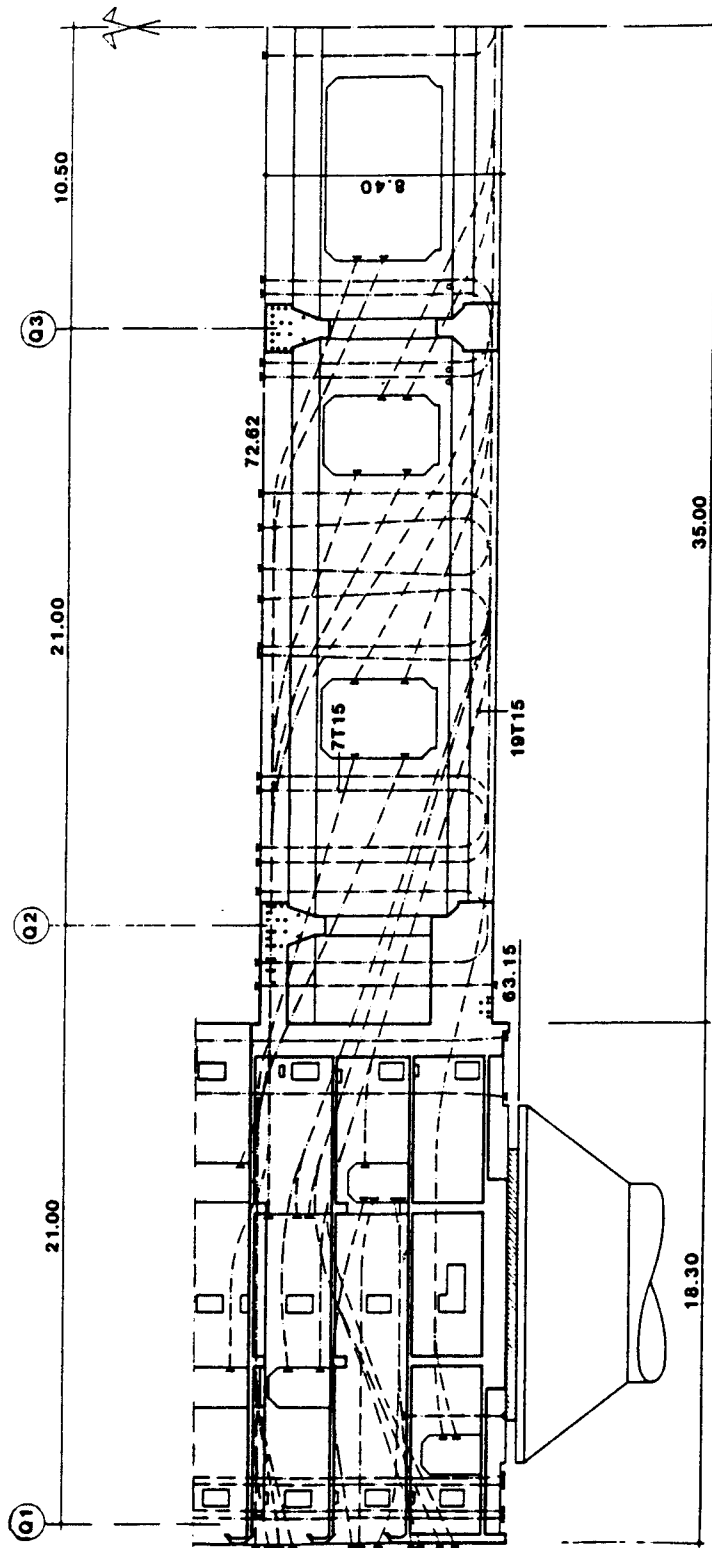
شکل ۶- درز جداکننده سازه‌های مکعب زیر



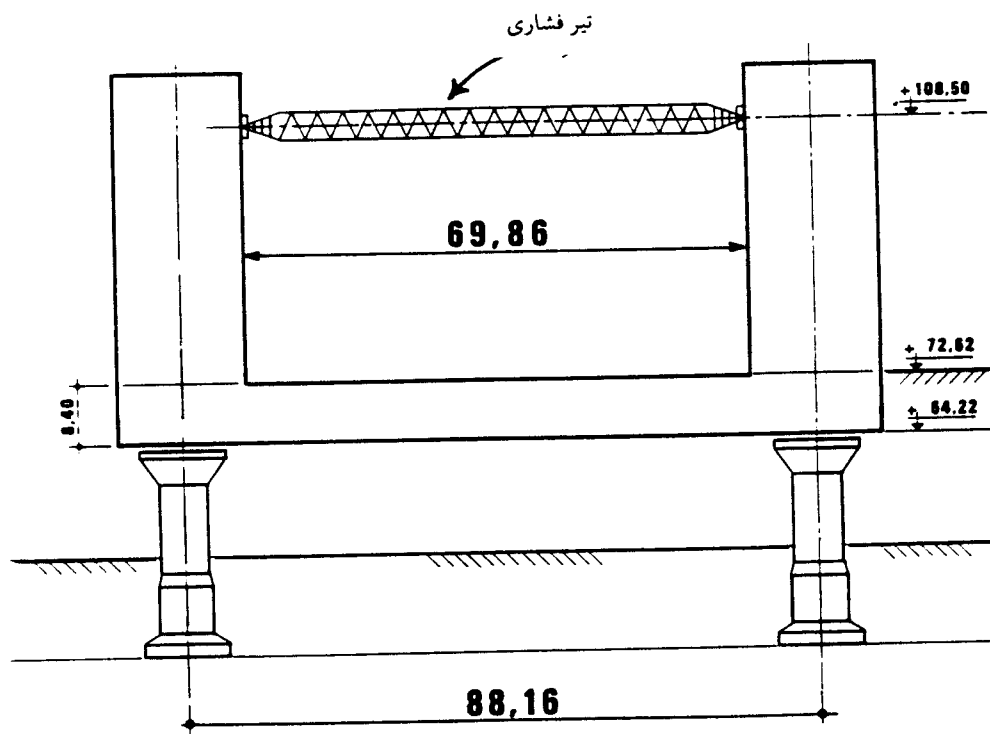
شکل ۷- بناهای موجود در محل ساختمان



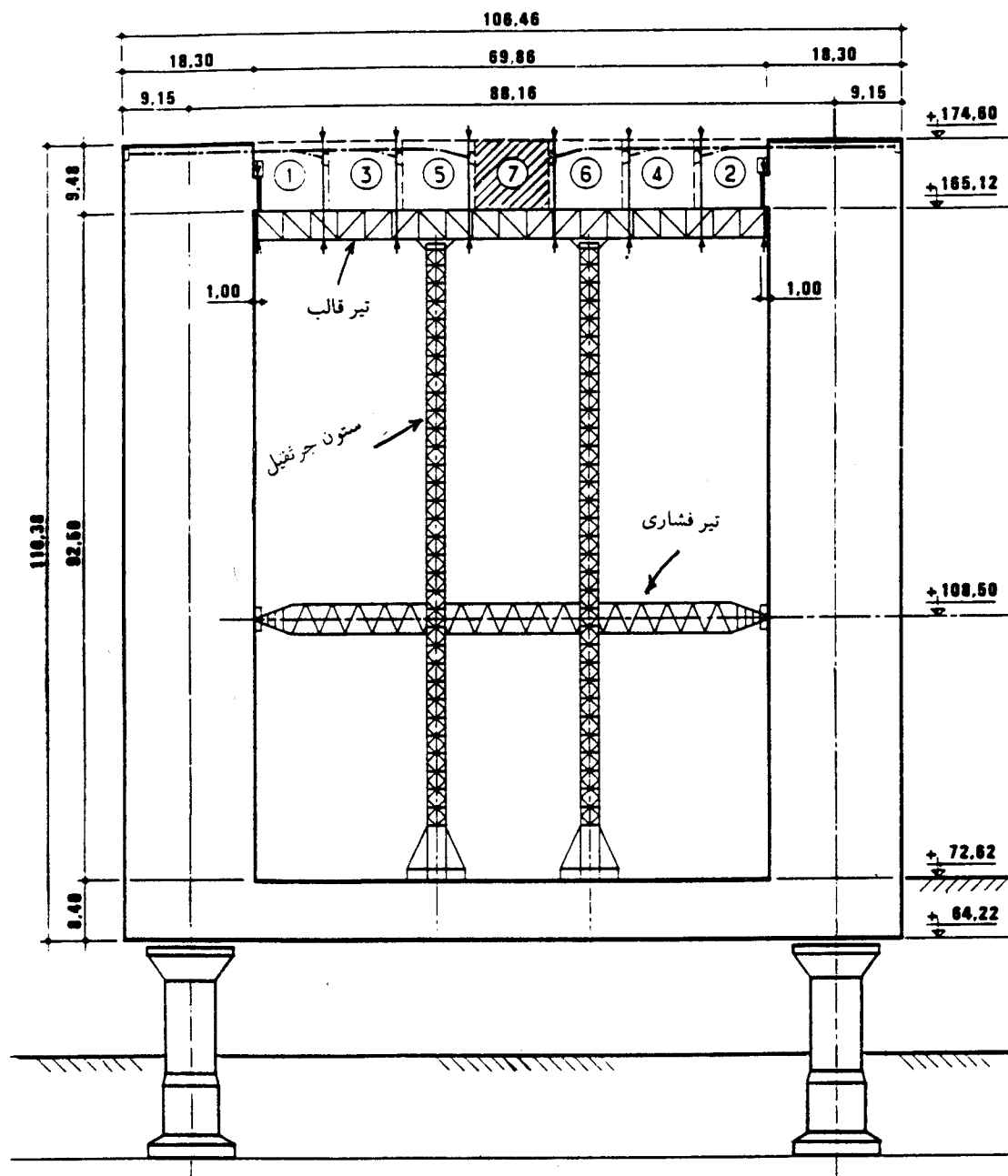
شکل ۸- روش ساختمان بزرگ سازه های قاعده تختانی



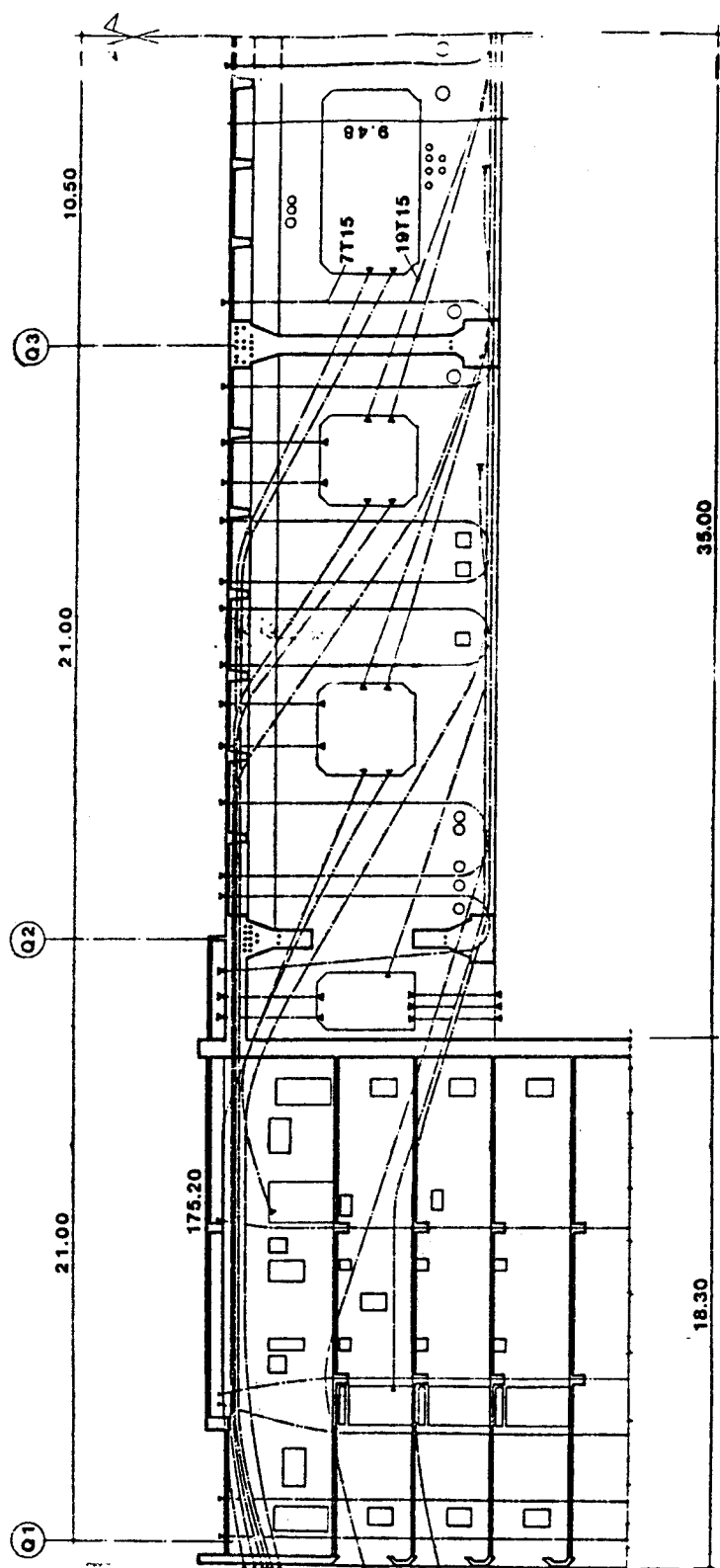
شکل ۹- کابل های پیش تنیدگی بزرگ سازه های تحتانی



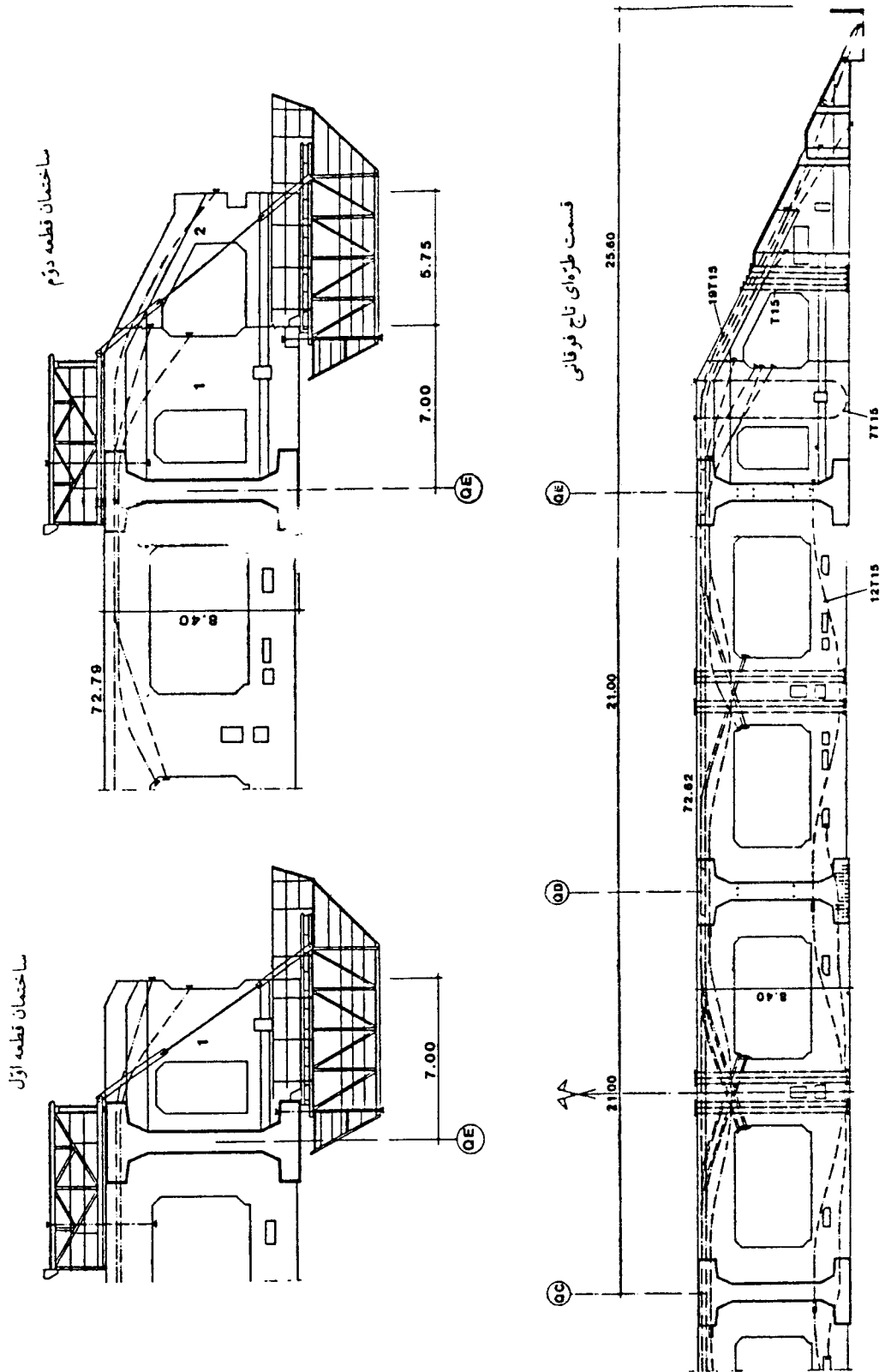
شکل ۱۰- استفاده از تیرهای فشاری جهت تأمین پایداری سازه‌های اصلی در حین اجرا



شکل ۱۱- روش اجرای تاج فوقانی



شکل ۱۳- کابل های پیش تنیدگی بزرگ سازه های افقی گروه اول تاج فوقانی و اتصال آنها به جدار قائم



شکل ۱۴- روش اجرای قسمت طره‌ای قاعده تختانی و تاج فوقانی-کابل‌های پیش‌تندگی

پیوست شماره یک

خلاصه محاسبات فاز دوم بزرگ سازه‌ها

اهداف اصلی محاسبات

همه تیرهای پیش تنیده افقی (بزرگ سازه گروه دوم) همه سازه‌های افقی (گروه سوم) قاعده و تاج، دیوارهای مایل (گروه چهارم) و ستونهای اصلی نیاز داشت. لازم به یادآوری است که چه درمدل دوبعدی و چه درمدل سه بعدی از تقارن سازه‌ها حول دو محور مرکزی مکعب استفاده شده و با بهره برداری از روش «تقارن - ضد تقارن» تأثیر بارها، تنها بخش اساسی مدلها در نظر گرفته شدند: به این ترتیب که درمدل دوبعدی نصف یک قاب و درمدل سه بعدی، ربع مکعب در محاسبات اجزاء محدود وارد شدند.

فاز دوم بررسیهای سازه‌های اصلی مکعب باز (طاق بزرگ) با اهداف اصلی زیر جریان یافت:

- ۱- تعیین رفتار سازه‌ها در هنگام اجرا.
- ۲- بررسی و تعیین روشهای ممکن اجرای بنا و پیشنهاد یکی از آنها.
- ۳- بررسی و تعیین تنش در سازه‌ها بعد از اتمام ساختمان و در زمان بهره برداری، به ویژه تعیین میزان انتقال بار بین کادرها، متوازی در نتیجه نشست نامساوی ستونها.

برای اهداف اول و دوم، محاسبات حول یک مدل دوبعدی یکی از چهار قاب اصلی انجام شد. درحالی که هدف سوم به یک مدل سه بعدی مشتمل بر همه کادرها،

الف: محاسبات دو بعدی:

چنانکه ذکر شد، این محاسبات با استفاده از مدلی که مشخصات هندسی و مکانیکی نصف یکی از قابهای گروه اول بزرگ سازه‌ها را برداشت، به پیش رفت. این مدل با ترکیبی از اجزاء صفحه‌ای و تیری ساخته شده بود.

محاسبات این بخش، مراحل مختلف اجرا، بتن ریزی سطحهای مختلف بنا، تاثیر بارهای مختلف و مراحل پیش‌تندگی را آشکار می‌کرد.

شکلهای (الف - ۱) تا (الف - ۳)، تصاویری از این مدل تحت تاثیر اجرای عملیات پیش‌تندگی، وزش باد در حین اجرا و کاربرد تیر فشاری را نشان می‌دهند.

تغییر مکان نسبی طبقات فوقانی جدارهای قائم تحت تاثیر باد (نسبت به تکیه گاههای نشویرن) حدود ۱ سانتی متر و تغییر مکان نشویرنها هم به همین اندازه بود.

عملیات پیش‌تندگی، سازه‌های افقی قاعده را به مقدار ۱/۵ سانتی متر کوتاه می‌کرد و مقدار نقصان طول این سازه‌ها تحت اثر افت بتن، حدود ۱ سانتی متر تخمین زده شد.

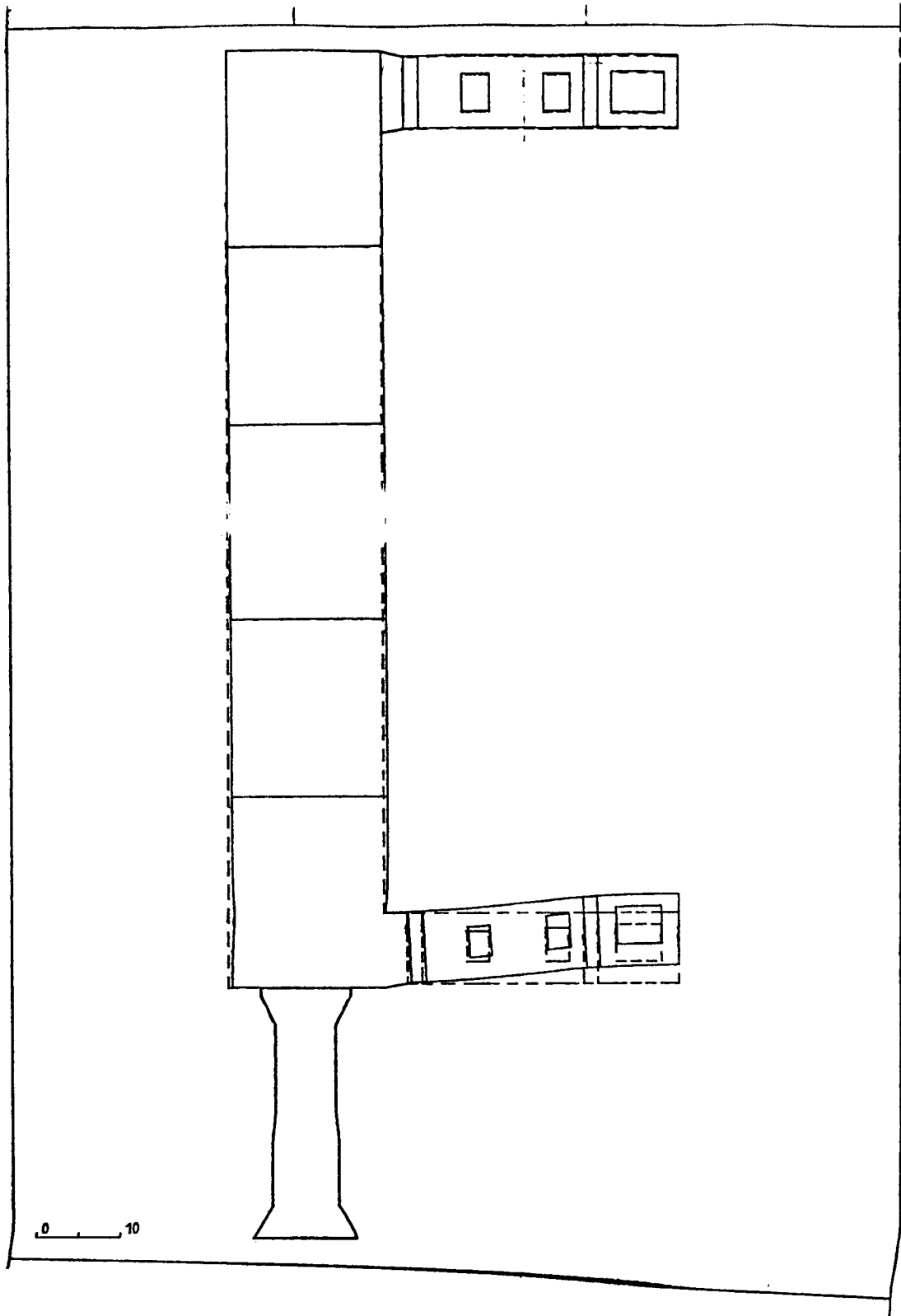
ب: محاسبات ۳ بعدی:

اجزاء صفحه‌ای و تیری در این مدل به کار رفته است. این بخش از محاسبات، رفتار و تنشهای سازه‌های اصلی راتحت تاثیر بارهای مختلف و نیز تحت تاثیر نشستهای نامساوی ستونها و میزان انتقال بارهای قائم بین قابها و دیوارهای مایل را در نظر داشت.

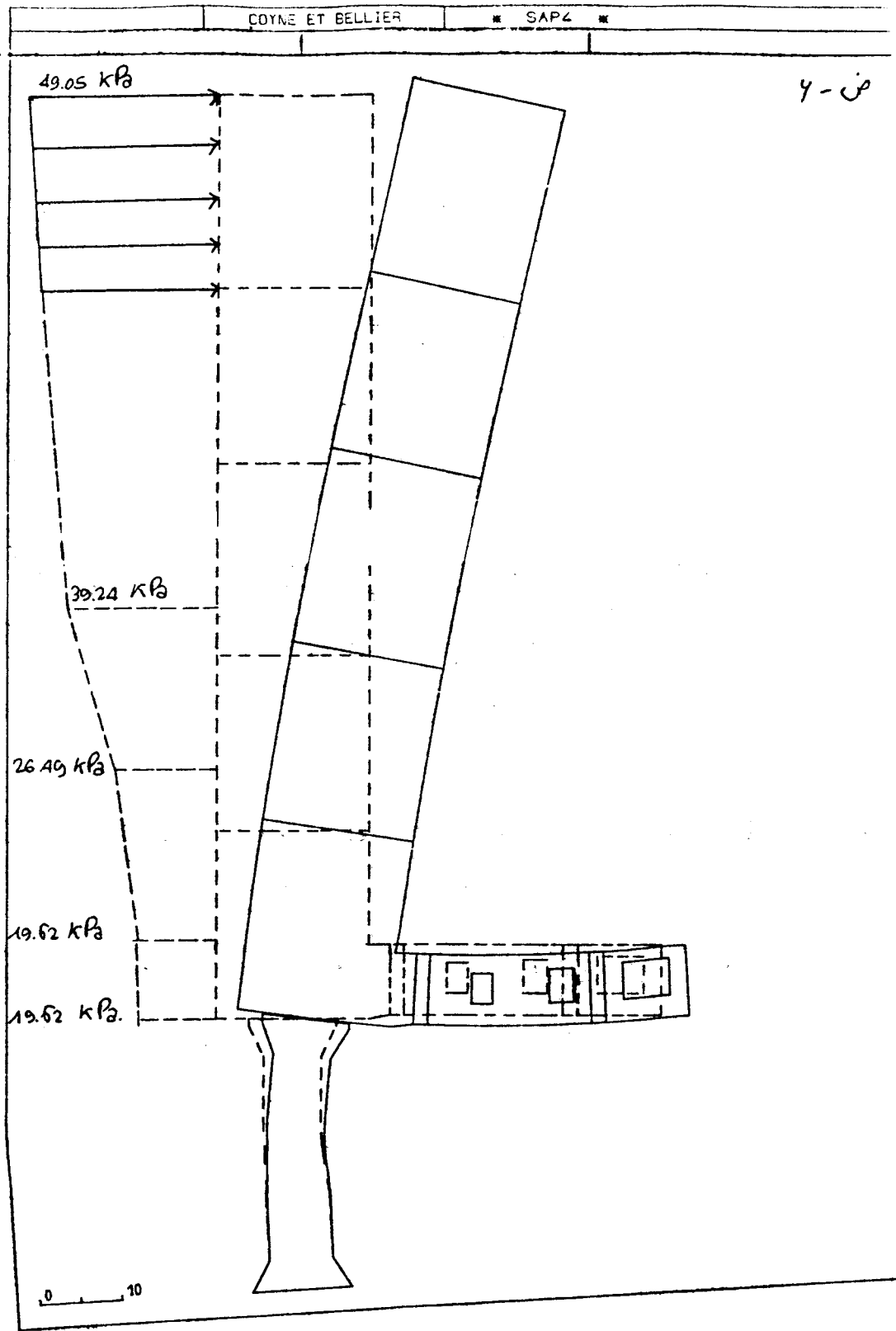
شکلهای (ب - ۱) تا (ب - ۳)، این مدل و نتیجه محاسبات را تحت تاثیر کابلهای پیش‌تندگی و نیز در مرحله بهره‌برداری بادر نظر گرفتن نشستهای نامساوی پی نشان می‌دهند.

محاسبات این بخش، نتایج حاصل از محاسبات دوبعدی را تأیید کرده و نشان دادند که در اثر نشستهای نامساوی بین ستونهای انتهایی، امکان انتقال باری معادل ۷۰۰۰ تن از یک قاب انتهایی به دیوار مایل مجاور آن وجود دارد.

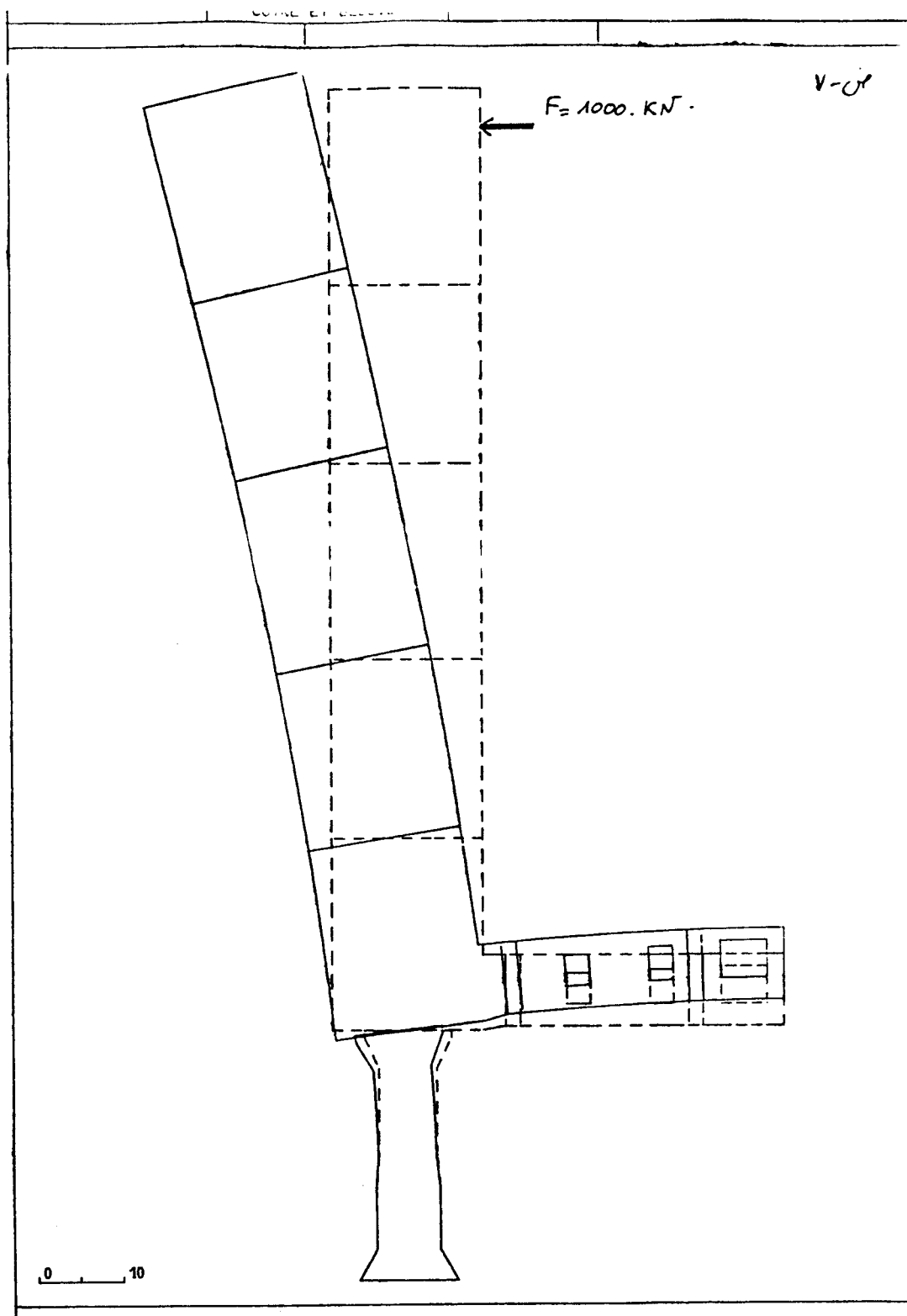
این نتیجه گیری در تعیین ابعاد سازه‌های اتصالی موجود بین قاب انتهایی و دیوار مایل مربوطه و نیز در تعیین ابعاد ستون و پی دیوار مایل مورد بهره‌برداری قرار گرفت.



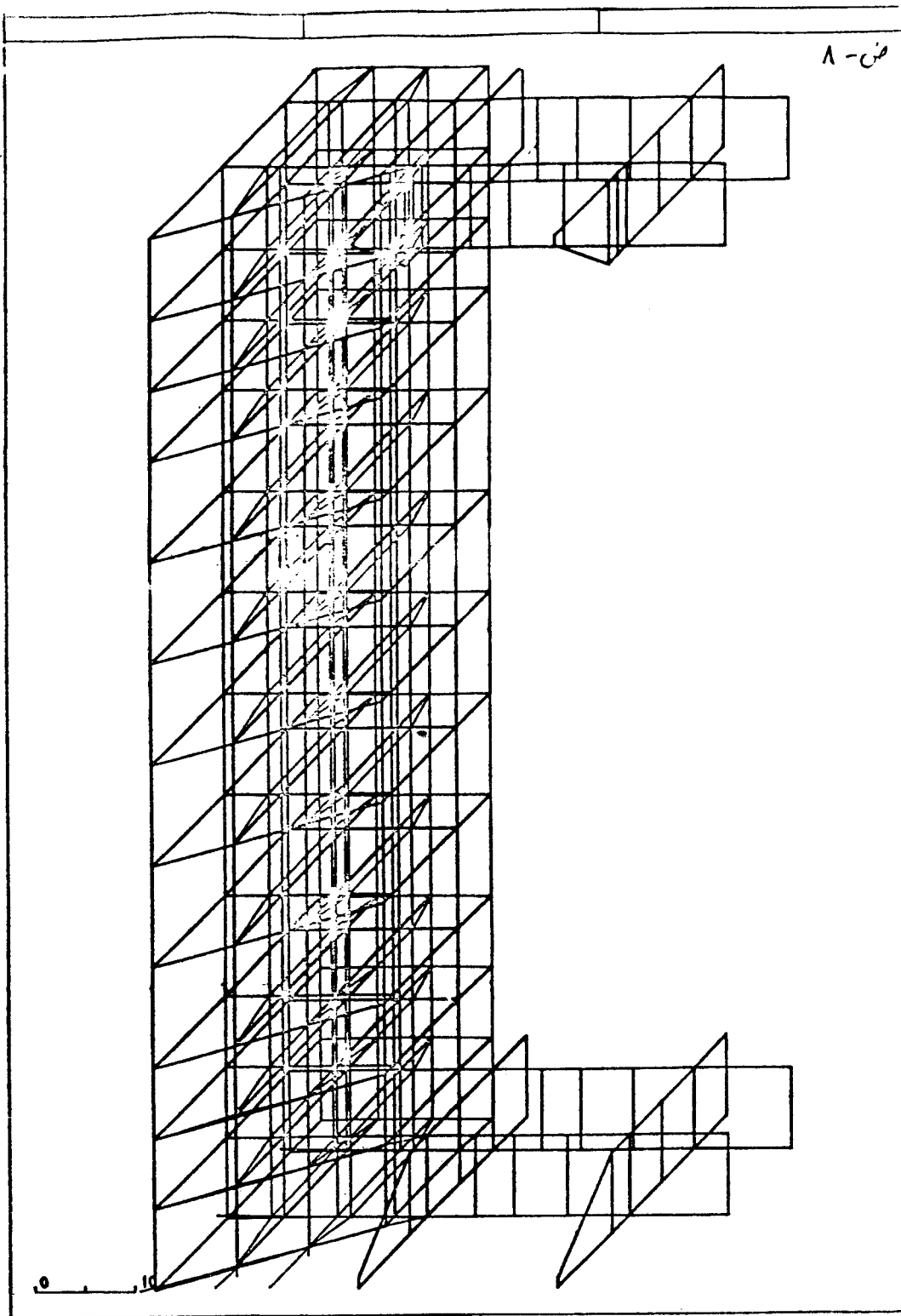
شکل الف-۱- مُدل دوبعدی - اجرای عملیات پیش تنیدگی در قاعده تختانی



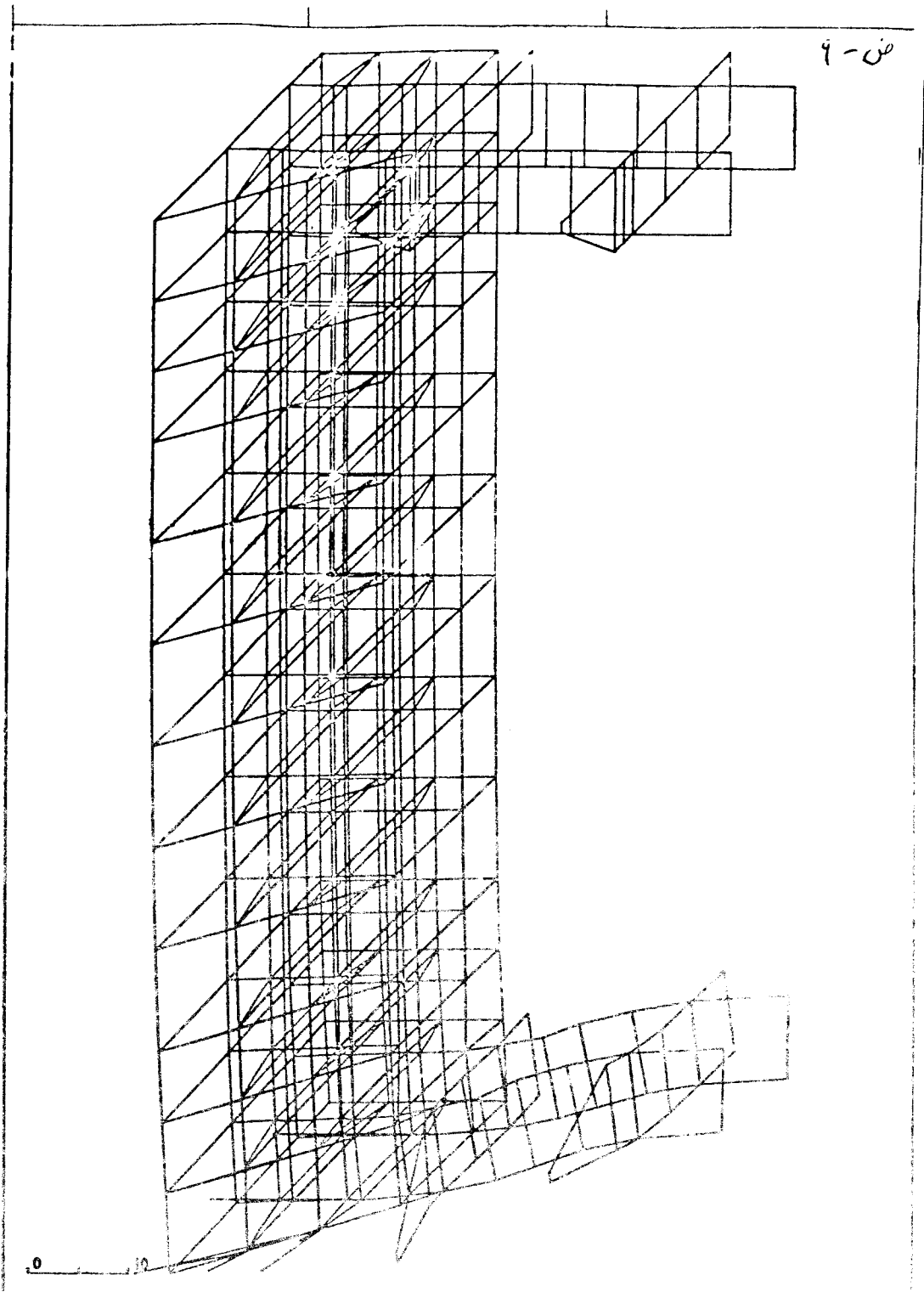
شکل الف-۲- مدل دوبعدی - تأثیر وزش باد در حین اجرا



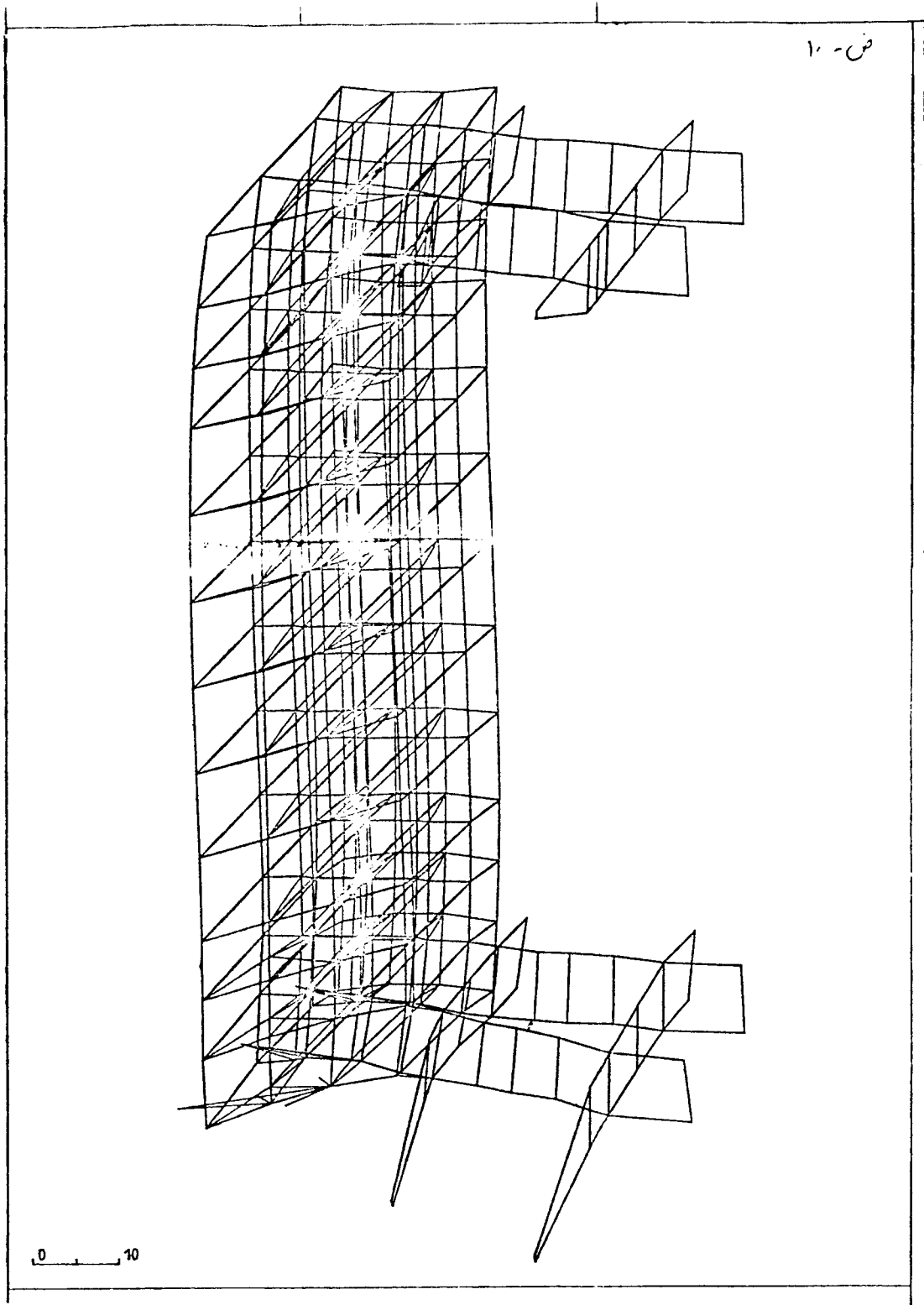
شکل الف-۳- مدل دوبعدی - اثر کاربرد تیر فشاری



شکل ب-۱- مدل سه بعدی



شکل ۹-۳ - گنبد مسجد پاریس - اثر از بنای پیش تیمارگی در قاعده ساختمان



شکل ب-۳- مدل سه بعدی - رفتار سازه‌ها در مرحله بهره‌برداری با در نظر گرفتن اختلاف نشست ستونها.

فهرست منابع:

کلیه مطالب مقاله حاضر از پرونده‌های مطالعاتی فازهای مختلف طرح و اجرای ساختمان طاق بزرگ پاریس اخذ شده‌اند. این پرونده‌ها عبارتند از:

1- Dossier d' études d' Avant Projet
Sommaire du Cube Ouvert , Coyne et Bellier ,
Ingénieurs Conseils, Paris, 1984;

2- Dossier d' Avant - Projet Détaillé et de
Consultation d' Entrerises Génie Civil , Coyne et
Bellier , Ingénieurs Conseils, Paris, 1985;

3- Documents d' études d' exécution,
Entrerise BOUYGUES, 1985 - 1989.

ABSTRACT

«La Grande Arche de la Défense,» erected to the West of Paris, is a monumental building designed by the Danish architect, Johan - Otto Von Spreckelsen, in 1983.

The design of the structure was developed by COYNE et BELLIER , Consulting Engineers, and the civil works were performed by the company BOUYGUES, between June 1985 and July 1989.

«La Grande Arche» is Structurally organized as a monolithic hollow cube with sides about 110m long laying on two lines of six megapiles each. All 12

megapiles are designed to support up to 300000 tonnes. The complexity of the project and the works done were due to:

The site which was already occupied by many existing projects (highway, railway, parking areas, etc.),

The phases of construction, large spanning beams at high levels , limited tolerance of construction.

The time schedule which was extremely short for studies as well as for construction.