

بررسی پارامترهای مؤثر در اصلاح نشست نامتقارن پی سازه‌های بتنی به روش جک‌زنی

علی اکبر اهرامی (کارشناسی ارشد)

حسین سلطانی جقه* (دانشیار)

امیرحسین رضائی فرعی (استادیار)

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

مهندسی عمران تهرانی، بهار (۱۴۰۰)
دوری ۲ - ۳۷، شماره ۱/۲، ص. ۸۶-۷۵

کوی فرشته از جمله مناطقی در شمال شرق شهر تبریز می‌باشد که نشست متقارن و نامتقارن در ساختمان‌های احداث شده در آن به دلایل ژئوتکنیکی و ضعف طراحی ایجاد شده است. اگر نشست سازه از محدوده غیرمجاز آیین‌نامه‌ها فراتر رود، می‌بایست به وسیله عملیات اصلاح نشست، تصحیح گردد. در این مطالعه، روش جک‌زنی به دلیل مزایای آن، به منظور اصلاح نشست سه سازه ۸، ۶ و ۴ طبقه بتنی مورد بررسی قرار گرفته است. در این روش، اعمال نیرو توسط جک‌ها تا حدی ادامه پیدا می‌کند که میزان نشست غیریکنواخت پی به کمترین مقدار ممکن کاهش یابد. شمع‌هایی که در عملیات اصلاح نشست برای تأمین نیروی عکس‌العمل جک استفاده می‌شوند، در طول انجام عملیات جک زنی دچار جابه‌جایی قائم در خلاف جهت نیروی اعمالی توسط جک‌ها بر پی خواهند شد. بروز این نشست باعث تراکم خاک زیر نوک شمع می‌شود و احتمال جابه‌جایی سازه بعد از اصلاح نشست را کاهش می‌دهد.

aliakbar.ehterami@gmail.com
hsoltani@azaruniv.ac.ir
rezaei.ah@azaruniv.ac.ir

واژگان کلیدی: سازه بتنی، نشست نامتقارن پی، اندرکنش خاک - سازه، اصلاح نشست، جک‌زنی، مطالعه عددی.

۱. مقدمه

میکروتولینگ^۴ را ارائه داده‌اند.^[۲] این روش‌ها به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شوند: در دسته اول با اعمال نشست بر قسمت نشست نکرده دو سوی سازه هم‌تراز می‌شود و در دسته دوم قسمت نشست نموده را بالا می‌برند تا سازه به حالت شاقول خود برسد.^[۳]

ساخت برج تاریخی پیرا، در شهر پیرای ایتالیا که با شنیدن نام آن عبارت کج‌شدگی سازه به ذهن خطور می‌کند، در سال ۱۱۷۳ م. شروع شد و در سال ۱۳۵۰ م. با ۵۷ متر ارتفاع تکمیل گردید. در طول این زمان، روند کج‌شدگی آن ادامه داشت تا در سال ۱۹۶۲ م. میزان انحراف آن به ۵/۵ درجه رسید. معماران پیشنهاد دادند مقداری از خاک زیر قسمت کمتر نشست کرده حفاری شود تا تحت وزن برج از میزان انحرافش کاسته شود.^[۵] در سال ۱۹۹۰ میزان انحراف به حدی رسید که دسترسی به محیط اطراف برج ممنوع اعلام شد و مجدداً با حفر چاه‌هایی با قطر کم قسمتی از خاک زیر پایه برج در قسمت کمتر نشست نموده در دو مرحله به ترتیب با حجم ۷ و ۳۸ مترمکعب خارج شد. این عملیات تا سال ۲۰۰۱ م. ادامه داشت و موفقیت آمیز بود.^[۶]

در روش تزریق، مصالح پایه سیمانی یا شیمیایی با فشار به داخل منافذ موجود در توده خاک و سنگ وارد می‌شود تا مشخصات مکانیکی خاک بهبود یابد. از بین روش‌های مختلف تزریق، تزریق تراکمی برای اصلاح نشست سازه‌ها به کار می‌رود. طرح اختلاط تزریق تراکمی طوری است که به حفارت موجود در خاک نفوذ نکند و

معمولاً هر سازه بعد از احداث، در طول عمر خود دچار مقداری نشست می‌شود. برای پیشگیری از آسیب‌ها، مهندسین موظف هستند از نشست سازه‌ها جلوگیری نموده و یا طراحی را طوری انجام دهند که نشست سازه در محدوده مجاز باشد. گاهی بنا به دلایل متعدد، خاک زیر سازه عملکرد خود را از دست داده و نشست سازه به حدی می‌رسد که روند سرویس دهی سازه با مشکل مواجه می‌شود. حالت بحرانی زمانی رخ می‌دهد که نشست سازه غیریکنواخت بوده و سازه کج شود. در این حالت، ترک و خرابی در تأسیسات و المان‌های سازه‌یی بروز می‌نماید. معمولاً افراد، حاضر به استفاده از این ساختمان‌ها نبوده و همسایه‌ها و سازه‌های مجاور آنها در معرض خطر قرار می‌گیرند. عمده‌تاً، مالکین سازه‌های کج شده به دلایل اقتصادی تمایلی برای تخریب و نوسازی ندارند و در مورد سازه‌های با قدمت تاریخی تخریب و نوسازی امکان‌پذیر نمی‌باشد.^[۱]

بدین منظور، محققین راهکارهای مختلفی پیشنهاد داده‌اند که قدیمی‌ترین آنها اصلاح نشست به روش حفاری^۱ و بعد انواع روش‌های تزریق^۲ و سپس تکنولوژی جک‌های هیدرولیکی^۳ می‌باشد. اخیراً محققین با تلفیق روش اصلاح نشست حفاری و تکنولوژی پاپ جک‌زنی روش نوینی به اسم روش اصلاح نشست

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۱۱/۲، اصلاحیه ۱۳۹۹/۴/۱۴، پذیرش ۱۳۹۹/۵/۲۷.

DOI:10.24200/J30.2020.55141.2705



الف) برج اول؛



ب) برج دوم.

شکل ۱. وضعیت برج‌های مانزونی قبل و بعد از عملیات جک‌زنی.

تیرهای عرضی، به فونداسیون جدید منتقل و عملیات جک‌زنی انجام می‌گرفت. اما بعد از حفر میکروپایل‌ها به دلایل اقتصادی ادامه‌ی طرح متوقف شد. بعد از ۱۱ سال به دلیل اصطکاک ایجاد شده توسط میکروپایل‌ها، زمین زیر پروژه مقاوم‌تر و روند افزایش نشست تقریباً متوقف شده بود. بنابراین، در پیشنهادی جدید جک‌ها بر روی کلاهک‌های بتنی میکروپایل‌ها قرارگرفت و عملیات جک‌زنی با موفقیت انجام شد.

شکل ۱ وضعیت سازه‌ها را قبل و بعد از عملیات اصلاح نشست نشان می‌دهد. از جمله روش‌های پرکاربرد در اصلاح نشست سازه، روش جک‌زنی است که در محیط‌های شهری قابل اجرا بوده و در مراحل اصلاح نشست امکان سرویس‌دهی سازه وجود دارد. در نواحی شمال شرقی تبریز، به دلیل وجود لایه‌های خاک ریزدانه و بالا بودن تراز آب زیرزمینی، تعدادی از سازه‌ها در اثر نشست‌های متقارن و نامتقارن دچار آسیب شده‌اند. نشست نامتقارن برخی از این سازه‌ها را می‌توان اصلاح نمود و سازه را به حالت قائم درآورد.

بررسی پارامترهای مؤثر در عملیات جک‌زنی هدف اصلی این پژوهش است. بدین منظور، اصلاح نشست نامتقارن سه سازه بتنی مسلح ۸، ۶ و ۴ طبقه به روش جک‌زنی در نرم‌افزار المان محدود Midas GTS NX مدل‌سازی شده و نتایج جابه‌جایی پی سازه‌ها قبل و بعد از عملیات اصلاح نشست، تعیین نیروی لازم و موقعیت قرارگیری جک‌ها، تأثیر احداث شمع‌های عکس‌العمل بر جابه‌جایی پی و تأثیر عملیات جک‌زنی بر جابه‌جایی این شمع‌ها ارائه شده است.

۲. اصول اصلاح نشست سازه به روش جک‌زنی

در این روش قسمتی از یک ساختمان یا تمام آن بر اساس میزان و حالت نشست سازه با استفاده از نیروی جک بالا برده می‌شود. عملکرد جک‌ها می‌تواند به صورت کنترل نیرو یا جابه‌جایی باشد.^[۱۱] معمولاً جک‌ها در زیر المان‌های باربر طبقه اول سازه یا پی قرار داده می‌شوند که نیازمند تخریب بخشی از دیواره‌ها یا قسمت‌هایی از پی سازه می‌باشد.^[۱۲] جک‌ها برای بلند کردن سازه نیاز به تکیه‌گاهی برای ایجاد نیروی عکس‌العمل دارند که این تکیه‌گاه به یکی از روش‌های زیر ایجاد می‌شود:^[۱۳]

۱. جک را روی پی قرار داده و نیروی عکس‌العمل از طریق خود پی تأمین می‌شود. سرعت اجرای این روش بالا بوده لیکن برای ساختمان‌های کوچک و با آسیب کم مناسب است.

۲. اگر بستر خاکی در اطراف و زیر پی مقاوم باشد، می‌توان نیروی عکس‌العمل را از طریق زمین زیر سازه تأمین نمود.

یا با خاک مخلوط نشود و فقط حجم حفرات خالی را کاهش داده و باعث تراکم محیط شود.^[۷]

براساس گزارش جنگ و همکاران، یک سازه ۸ طبقه در تایوان به علت عملیات گودبرداری در جنوب غربی سازه، دچار نشست نامتقارن شده بود. لایه‌های خاک زیر پی گسترده این سازه تا عمق ۲ متر از ماسه لای دار و از عمق ۲ متر به بعد از رس لای دار بسیار نرم تشکیل شده بود. از بین گزینه‌های مختلف، روش تزریق تراکمی در دو مرحله برای اصلاح نشست این سازه انتخاب شد. در مرحله اول، ۵۰۸ مترمکعب دوغاب سیمانی‌کنندگی از طریق ۳۵ لوله تزریقی از روی پی به عمق ۲ الی ۹ متر زیر سازه در طول ۴۰ روز تزریق شد. هدف از این مرحله، ایجاد یک پایه محکم برای تأمین عکس‌العمل فشار تزریق مرحله دوم بوده است. در مرحله دوم، دوغاب زودگیر به حجم ۱۳۴ مترمکعب و از طریق همان لوله‌های تزریقی تا عمق ۲ متر زیر سازه در طی ۱۲ روز تزریق شد. نهایتاً تحت عملیات تزریق، نزدیک‌ترین ستون سازه به عملیات گودبرداری با بیشترین میزان نشست، به میزان ۱۵/۵۵ سانتیمتر به سمت بالا جابه‌جا شد.^[۸]

روش اصلاح نشست با حفر خاک، امروزه با ترکیب حفاری و تکنولوژی پاپ جک‌زنی مورد توجه بوده و تحت عنوان روش میکروتولینگ شناخته می‌شود. در این روش، با احداث میکروتونل‌هایی، خاک زیر قسمت نشست نکرده سازه خارج شده و سازه تحت اثر وزن خود یا با اعمال بار به سمتی که حجم خاک آن در اثر حفاری تونل‌ها کاهش یافته متمایل می‌شود.^[۲] این روش در مرحله تحقیقات بوده و وارد فاز اجرایی نشده است. به علت نیاز به احداث شفت‌های ورود و خروج برای حفر تونل در دو سوی سازه، استفاده از این روش در محیط‌های متراکم توصیه نمی‌شود.^[۹] توفیق و عید^[۲] و رحمانی^[۹]، اصلاح نشست سازه‌ها به روش میکروتونل را به روش اجرای محدود بررسی کردند.

در طول ساحل شهر سانتوس برزیل، به علت وجود لایه‌هایی از رس نرم زیر لایه ماسه متراکم، صداها برج دچار نشست تحکیمی و نامتقارن شده‌اند. مافقی و گونچالوز^[۱۰] به بررسی دو سازه بتنی ۵۷ متری مجاور و یکج شده در این شهر پرداختند. عمق پی این سازه‌ها ۲ متر بوده و به علت صلبیت زیاد سازه، کل سازه همراه پی نشست کرده و ترک‌های چندانی در سازه‌ها مشاهده نشده بود. برای اصلاح نشست هر یک از ساختمان‌ها یک روش اختصاصی پیشنهاد شد که روش اصلاحی برای برج اول شامل مراحل زیر بود:

۱. حفر ۱۶ شمع بتنی با قطرهای ۱۷۰ الی ۱۷۴ متر و طول ۵۵ متر در طرفین پی موجود که به عمق لایه‌های سخت‌تر رسیدند.

۲. انتقال بار سازه به شمع‌های حفاری شده توسط تیرهای تبدیل که شامل هفت تیر اصلی و تیرهای فرعی انتقال دهنده بار پایه‌های غیر هم‌تراز با تیرهای اصلی می‌باشد.

۳. قرار دادن ۱۴ جک هیدرولیکی بین تیرهای اصلی و بلوک شمع‌ها که ظرفیت جک‌ها بین ۴۰۰ تا ۹۰۰ تن بر اساس وزن قسمتی که می‌بایست بلند شود متغیر انتخاب شد.

برج اول با بیشترین نشست ۲/۱ متر بعد از عملیات جک‌زنی به حالت قائم خود رسید. عملیات اجرای شمع‌ها و تیرها با گام‌بندی و سرعت تعیین شده‌ی صورت پذیرفت تا حفاری شمع‌ها نشست سازه را بیش از پیش افزایش ندهد. تمام مراحل عملیات جک‌زنی با انحراف سنج‌ها تحت کنترل بوده است. چون موقعیت برج دوم امکان استفاده از راهکار قبل را نمی‌داد، محققین راهکار جدیدی را بررسی کردند. در این روش درون پی موجود میکروپایل‌هایی با عمق ۵۵ متر حفر و بار سازه به وسیله

جدول ۱. ابعاد المان‌های سازه‌یی ساختمان (cm).

طبقه	سازه‌ی ۴ طبقه		سازه‌ی ۶ طبقه		سازه‌ی ۸ طبقه	
	ستون	تیر	ستون	تیر	ستون	تیر
۲ و ۱	۴۰ × ۴۰	۴۰ × ۳۵	۴۵ × ۴۵	۴۵ × ۴۰	۵۰ × ۵۰	۵۰ × ۴۵
۳ و ۴	۳۵ × ۳۵	۳۵ × ۳۰	۴۰ × ۴۰	۴۰ × ۳۵	۴۵ × ۴۵	۴۵ × ۴۰
۵ و ۶	-	-	۳۵ × ۳۵	۳۵ × ۳۰	۴۰ × ۴۰	۴۰ × ۳۵
۷ و ۸	-	-	-	-	۳۵ × ۳۵	۳۵ × ۳۰

جدول ۲. مشخصات مصالح بتنی مورد استفاده در پی و المان‌های سازه‌یی.

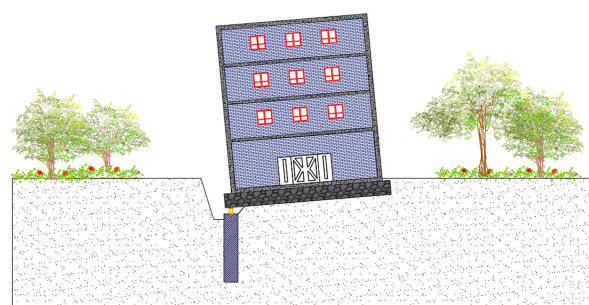
$\gamma (kN/m^3)$	$E (kN/m^2)$	u	$f_c (kN/m^2)$	$f_y (kN/m^2)$	$f_{ys} (kN/m^2)$
۲۵۰۰	2.3×10^4	۰٫۲	2.5×10^2	4×10^5	3×10^5

جدول ۳. بارهای وارد بر سازه.

محل اعمال بار	مرده	پارتیشن	دیوار	زنده	بارش
(kN/m^2)	(kN/m^2)	(kN/m^2)	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m^2)
طبقات	۴٫۴	۱٫۳	۶٫۳	۲٫۰	-
بام	۴٫۴	-	۲٫۲	۱٫۵	۱٫۰
پارکینگ	۵٫۰	-	-	-	-

Etabs مدل‌سازی، تحلیل و طراحی شدند. پلان طبقات با طول 16.7° متر و عرض 10.7° متر و پلان پی گسترده با طول 17.7° و عرض 11.7° متر برای هر سه سازه یکسان انتخاب شده و ارتفاع هر طبقه سازه‌ها 3.7° متر انتخاب شده است (شکل ۳). انتخاب پلان ثابت امکان مقایسه تأثیر روش جک‌زنی در پروژه‌های اصلاح نشست سازه‌های کوتاه و بلند مرتبه را فراهم می‌آورد. بر اساس مشخصات فنی و مشاهدات مصالح در ناحیه مورد مطالعه، عموماً از پی‌های سطحی گسترده برای سیستم پی سازه‌ها استفاده می‌شود. در مطالعه حاضر برای هر سه سازه معرفی شده یک پی گسترده با ضخامت 1.7° متر در نظر گرفته شده است.

با توجه به تعداد طبقات سازه‌یی، ابعاد المان‌های سازه‌یی مطابق جدول ۱ متغیر انتخاب شد. جدول ۲ مشخصات مصالح مورد استفاده در مدل‌سازی سازه‌ها و پی آنها را نشان می‌دهد که تابع مدل رفتاری الاستیک هستند. برای بارگذاری سازه‌ها، علاوه بر مقادیر جدول ۳ که نحوه بارگذاری آنها را بر اساس مبحث ۶ مقررات ملی ساختمان مشخص می‌نماید، وزن المان‌های سازه‌ها بر اساس ابعاد و مصالح آنها توسط نرم‌افزار Midas GTS NX به مدل عددی اعمال و در مراحل تحلیل مدنظر قرار گرفته است.^[۱۸]



شکل ۲. تأمین نیروی عکس‌العمل جک توسط شمع جهت اصلاح نشست.^[۱۴]

۳. در صورتی که نتوان نیروی عکس‌العمل را از طریق پی موجود یا زمین تأمین نمود برای ایجاد نیروی عکس‌العمل جک، یک شمع، میکروپایل یا المان جدید در زمین قرار داده می‌شود. استفاده از این روش علاوه بر متوقف نمودن روند کج‌شدگی سازه قبل از عملیات جک‌زنی، احتمال نشست پی را در آینده کاهش می‌دهد و از اطمینان بالایی برخوردار است (شکل ۲).

۳. مدل‌سازی عددی

در مطالعه حاضر سازه‌ها بعد از مدل‌سازی و تحلیل در نرم‌افزار Etabs برای مدل‌سازی مدل اندرکنش مستقیم خاک - سازه و عملیات جک‌زنی به نرم‌افزار Midas GTS NX منتقل شده‌اند.

۱.۳. هندسه و مصالح سازه و پی

سه ساختمان ۴، ۶ و ۸ طبقه بتنی با سیستم سازه‌یی قاب خمشی متوسط و سیستم باربر سقف تیرچه بلوک با کاربری مسکونی با فرض احداث در شهر تبریز و رعایت ضوابط مباحث ۶، ۷ و ۹ مقررات ملی ساختمان^[۱۵-۱۷]، توسط نرم‌افزار المان محدود

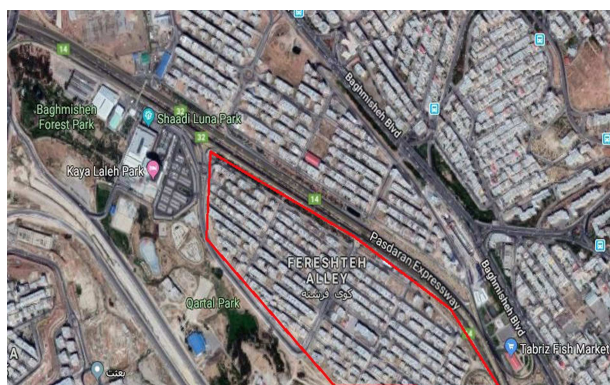
۲.۳. هندسه و مصالح خاک

در این مطالعه، از اطلاعات حاصل از چهار گمانه، حفاری شده در کوی فرشته تبریز، استفاده شده است. دو عدد از گمانه‌ها به منظور احداث یک سازه مسکونی حفاری شده و دو عدد دیگر از داده‌های مطالعات علیزاده مجد و دبیری استفاده شده است.^[۱۹] رفتار لایه‌های خاکی با مدل موهر-کولمب و بر اساس مشخصات ژئوتکنیکی ارائه شده در جدول ۴ مدل‌سازی شده است.

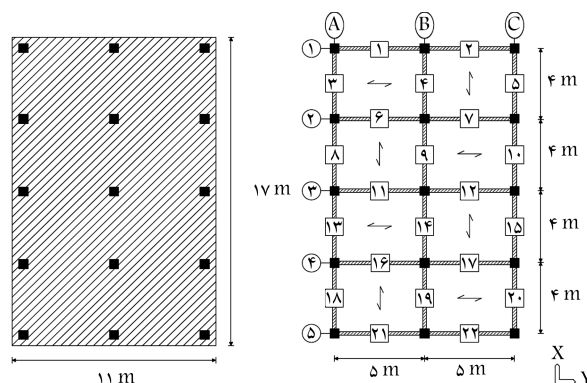
شکل ۴ تصویر هوایی کوی فرشته در مجاورت اتوبان پاسداران را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۵ خاک مورد مطالعه از چندین لایه تشکیل شده است که عموماً شامل رس سیلت‌دار ریزدانه می‌باشند و لایه‌های ماسه ریزدانه بین آنها قرار گرفته

جدول ۴. مشخصات لایه‌های خاک مورد مطالعه. [۱۹]

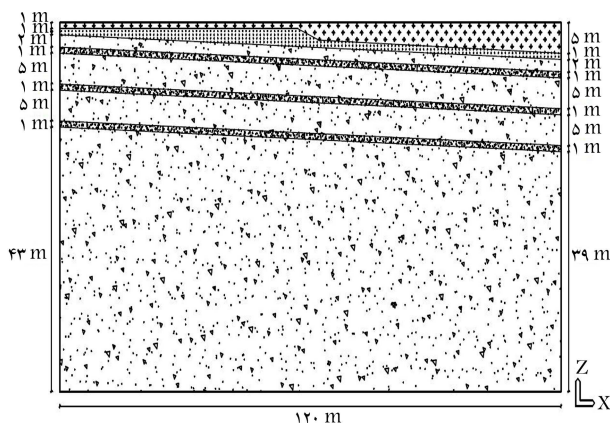
لایه	نوع خاک	c (kN/m^2)	ϕ (deg)	E (kN/m^2)	γ (kN/m^3)	γ_{sat} (kN/m^3)	k_{avg} (m/sec)	P_c (kN/m^2)	C_c	C_s	e_o	K_o
۱	خاک دستی	۲۲٫۰	۵٫۰	7×10^2	۱۷٫۰	۱۷٫۰	1×10^{-7}	-	-	-	۰٫۷۲	۰٫۹۱
۲	رس سیلتی ماسه‌دار	۳۸٫۰	۱۵٫۰	13×10^2	۱۵٫۸	۱۹٫۳	1×10^{-7}	۶۰	۰٫۱۴	۰٫۰۱	۰٫۶۵	۰٫۷۴
۳	سیلت رسی	۲۷٫۰	۶٫۰	15×10^2	۱۵٫۶	۲۰٫۱	1×10^{-7}	۵۵	۰٫۱۵	۰٫۰۲	۰٫۶۹	۰٫۸۹
۴	ماسه ریزدانه سیلتی	۸٫۰	۳۲٫۰	12×10^2	۱۶٫۰	۲۰٫۲	1×10^{-3}	۵۰	۰٫۱۳	۰٫۰۱	۰٫۶۸	۰٫۴۷
۵	رس سیلتی	۴۰٫۰	۷٫۵	17×10^2	۱۶٫۹	۲۰٫۶	1×10^{-8}	۵۷	۰٫۱۲	۰٫۰۲	۰٫۶۱	۰٫۸۶
۶	ماسه ریزدانه سیلتی	۸٫۰	۳۲٫۰	12×10^2	۱۶٫۰	۲۰٫۲	1×10^{-3}	۵۰	۰٫۱۳	۰٫۰۱	۰٫۶۸	۰٫۴۷
۷	رس سیلتی	۴۰٫۰	۹٫۰	2×10^2	۱۶٫۶	۲۰٫۸	1×10^{-8}	۵۰	۰٫۱۳	۰٫۰۳	۰٫۶۲	۰٫۸۴
۸	ماسه ریزدانه سیلتی	۸٫۰	۳۲٫۰	13×10^2	۱۶٫۰	۲۰٫۳	1×10^{-3}	۴۸	۰٫۱۳	۰٫۰۱	۰٫۶۸	۰٫۴۷
۹	رس سیلتی	۴۵٫۰	۵٫۰	3×10^2	۱۶٫۷	۲۱٫۲	1×10^{-8}	۴۲	۰٫۱۴	۰٫۰۴	۰٫۶۲	۰٫۹۱



شکل ۴. تصویر هوایی کوی فرشته تبریز برگرفته از Google Maps.



شکل ۳. پلان تیپ طبقات سازه و پی گسترده.



شکل ۵. تصویر شماتیک لایه‌های خاک مورد مطالعه.

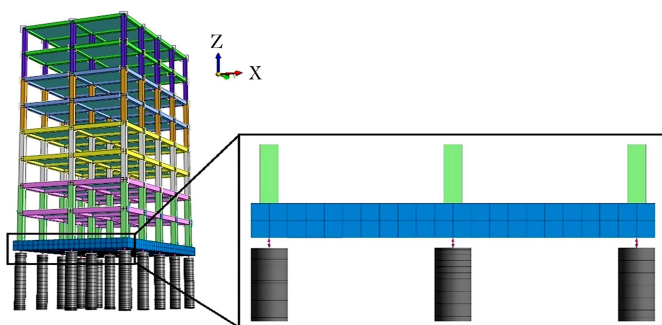
شکل ۱۶ الف مدل مش بندی شده سازه ۸ طبقه را نشان می‌دهد که ۶۰ متر عمق و ۱۲۰ متر عرض و طول دارد. همچنین مدل نهایی دارای بیش از ۷۱۰۰۰ المان است که به دلیل تعداد زیاد المان‌ها، برای مراحل تحلیل از رایانه دارای قدرت پردازش بالا متعلق به دانشگاه شهید مدنی آذربایجان استفاده شده است. برای مدل‌سازی سیستم جک‌زنی برای اصلاح نشست سازه کج شده، به علت سستی خاک زیر پی، از المان‌هایی همچون شمع بتنی در جابجایی برای تأمین نیروی عکس‌العمل جک‌ها استفاده شده و بدین منظور از المان‌های یک بعدی Pile استفاده شده است.

و سطح آب زیرزمینی در عمق ۱٫۶- متری سطح زمین قرار دارد. شیب‌دار بودن لایه‌های خاکی، بالا بودن سطح آب زیرزمینی و وجود میان لایه‌های ماسه‌یی، استعداد بروز نشست تحکیمی در منطقه را به شدت افزایش داده و به دلایل اقتصادی کارفرمایان تمایلی به احداث شمع‌های عمیق، جهت کاهش نشست‌ها، ندارند. [۱۹]

۳.۳. مدل‌سازی عددی

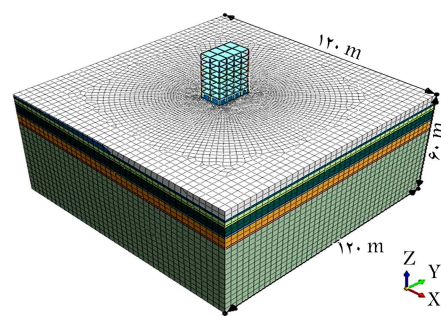
موقعیت مرزهای مدل طوری انتخاب شده است که وجود مرزها تأثیری در میدان‌های تنش و تغییرشکل نداشته باشد. همچنین شرایط مرزی با استفاده از تکیه‌گاه‌های گیردار در کف مدل، تکیه‌گاه‌های غلتکی در کناره‌های آن و آزاد بودن مرزهای سطح بالایی مدل، مشابه شرایط واقعی زمین فرض شده است. [۲۰]

نرم‌افزار Midas GTS NX برای شبکه‌بندی، دارای دو نوع مش با نام‌های هیبرید و ترا می‌باشد. مش هیبرید ترکیبی از المان‌های چهار، پنج و شش وجهی بوده و مزیت آن دقت بالا در محاسبه تنش و تغییرشکل‌ها می‌باشد. همچنین مش ترا صرفاً از المان‌های چهار وجهی تشکیل شده و با وجود اینکه در اندازه برابر مش، المان‌های بیشتری نسبت به مش هیبرید تولید می‌کند، ولی زمان کمتری برای آنالیز مدل احتیاج دارد. علاوه بر نوع مش، اندازه مش‌ها نیز در نتایج تحلیل عددی تأثیرگذار هستند. [۲۱] در این مطالعه، مش هیبریدی برای شبکه‌بندی انتخاب شده و اندازه مش‌ها در نواحی مجاور سازه و پی، ریز بوده و با فاصله گرفتن از مرکز مدل اندازه آنها به تدریج تا ۳ متر افزایش می‌یابد.



ب) مدل سازی المان شمع و اثر چک های هیدرولیکی در زیر سازه جهت انجام عملیات اصلاح نشست.

شکل ۶. مدل عددی.



الف) کل سیستم مش بندی شده خاک- سازه؛

جدول ۵. مقایسه نتایج حاصل از ابزاربندی و مدل عددی.

جابه جایی ستون $P_{۳۳}(cm)$	ابزاربندی	Midas GTS NX
شروع عملیات چک زنی	-۲۱۰	-۲۲۰
اتمام عملیات چک زنی	-۳/۳۳	-۰/۲۱

۴. صحت سنجی

روش مدل سازی مطالعه حاضر بر پایه مطالعات مافئی و گونچالوز^[۲۵،۱۰] است که تحقیقات و اقدامات ایشان در بخش مقدمه به اختصار معرفی شد. جهت صحت سنجی، سازه اول این مطالعه انتخاب و مراحل مدل سازی و تحلیل مدل صحت سنجی با در نظر داشتن شرایط مخصوص پروژه مورد نظر و مطابق مراحل معرفی شده در بخش ۳-۴ صورت گرفت.

جدول ۵ تغییرات جابه جایی ستون P۳۳ سازه الف شکل ۱ را که دچار ۲/۱- متر نشست قائم شده بود، در شروع و پایان مراحل اصلاح نشست چک زنی برای داده های حاصل از ابزاربندی در مطالعات مافئی و گونچالوز^[۲۶،۱۰] و مدل عددی صحت سنجی توسط نرم افزار Midas نشان می دهد. ملاحظه می شود که تطابق خوبی بین داده های اندازه گیری شده و نتایج حاصل از تحلیل های عددی وجود دارد. شکل ۷ الف مدل عددی ساخته شده و شکل های ۷ ب و ۷ ج به ترتیب میزان جابه جایی سازه را بعد از گذشت دوره نشست تحکیمی و بعد از اتمام عملیات چک زنی نشان می دهند.

۵. نتایج

آیین نامه های ژئوتکنیکی تنها معیار استاندارد برای تشخیص لزوم اجرای عملیات اصلاح نشست می باشند. بنابراین، بعد از بررسی شرایط قید شده در مبحث ۷ مقررات ملی ساختمان^[۱۶] برای نشست پی های سطحی، محل قرارگیری چک های اصلاح نشست و احداث شمع های عکس العمل در زیر پی توسط مطالعه عددی مشخص می شود. تعیین نیروی چک های اصلاح نشست نیازمند انجام آنالیزهای حساسیت متعدد است، تا بتوان تمام قسمت های پی را به شکل متناسب و با حفظ صلبیت پی و در جهت اصلاح نشست جابه جا کرد. در پایان مراحل چک زنی، شمع های عکس العمل جزئی از سیستم خاک، پی و سازه خواهند شد. بنابراین، بررسی رفتار

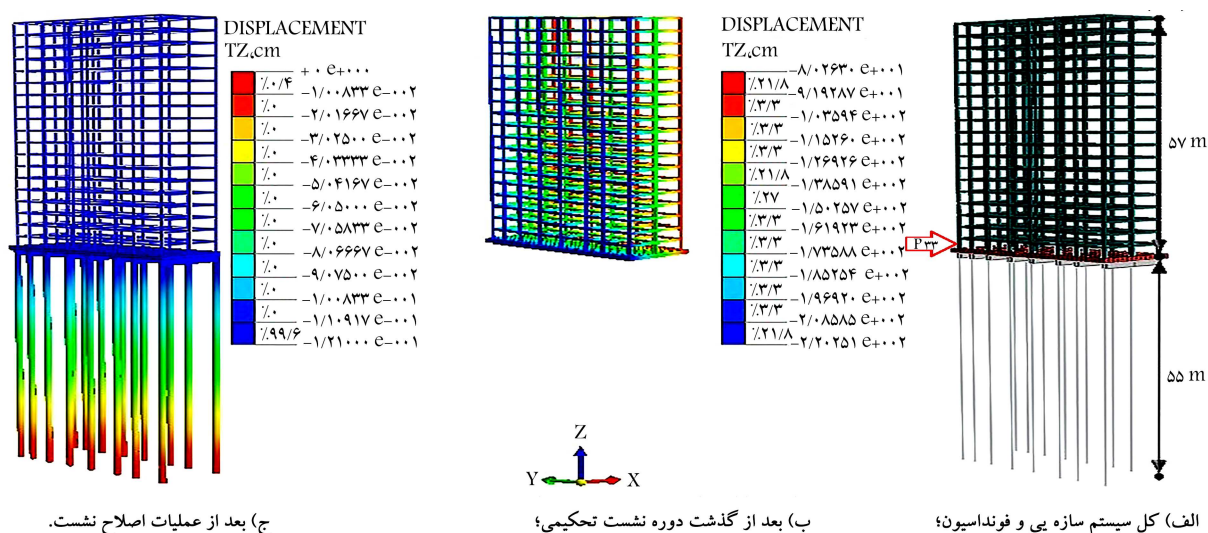
به منظور تعیین ظرفیت باربری شمع های عکس العمل، آزمایش بارگذاری استاتیکی با توجه به اصول ذکر شده برای این آزمایش در مراجع به روش عددی مدل سازی شده است.^[۲۳،۲۲] ظرفیت باربری نهایی این شمع ها برابر ۳۳۵۰ kN است. بنابراین، مجموع بار ستون های سازه و نیروی عکس العمل چک وارد بر شمع ها باید کمتر از مقدار فوق باشد. مطابق شکل ۶ ب که نحوه قرارگیری و مدل سازی شمع های عکس العمل و چک های اصلاح نشست را نشان می دهد، یک فاصله ۳۰ سانتی متری بین پی و سطح بالایی شمع ها، هم اندازه با ابعاد چک های هیدرولیکی، برای قرارگیری چک ها لحاظ شد. جهت مدل سازی اثر چک های هیدرولیکی ابتدا با آنالیز حساسیت نیروی مورد نیاز چک زنی برای اصلاح نشست هر بخش از سازه تعیین شد و بر کف پی اعمال می شود.^[۲۴] برای در نظر گرفتن نیروی عکس العمل چک ها بر روی شمع، نیرویی برابر و هم راستای نیروی تعیین شده و در خلاف جهت آن بر شمع ها اعمال می شود. نیروی عکس العمل حاصل از عملیات چک زنی، باعث بروز اندکی نشست در شمع ها خواهد شد.^[۱۴]

۴.۳. تحلیل

با توجه به استعداد نشست تحکیمی خاک منطقه، برای هر سه سازه، ابتدا آنالیز تحکیم شامل مراحل ساخت سازه و یک دوره نشست تحکیم سه ساله صورت گرفته است. در مرحله تحکیم به علت خروج آب زیرزمینی، خاک زیر پی نشست می نماید. در گام بعد، با در نظر گرفتن نتایج آنالیز تحکیم، آنالیز تنش برای مدلسازی عملیات اصلاح نشست انجام گردید. به علت مرحله پی بودن احداث سازه، شمع های عکس العمل و عملیات چک زنی برای هر دو آنالیز تحکیم و تنش از روش تحلیل ساخت مرحله پی استفاده شده و مراحل تحلیل مدل ها به شرح زیر می باشد:

الف) آنالیز تحکیم

۱. فعال سازی لایه های خاک و معرفی تراز آب زیرزمینی؛
 ۲. احداث پی سازه در مدت زمان یک ماه؛
 ۳. احداث طبقات سازه در مدت زمان یک ماه به طور متوالی و در فازهای مجزا.
 ۴. مرحله تحکیم سه ساله بعد از اتمام مرحله ساخت سازه.
- ب) آنالیز تنش
۵. احداث ۱۵ شمع بتنی در جاریز در زیر پی در راستای محور ستون ها؛
 ۶. اعمال تدریجی اثر چک ها در حد فاصل شمع و پی سازه.



شکل ۷. مدل صحت‌سنجی.

۲.۵. تأثیر احداث شمع‌های عکس‌العمل بر نشست پی

مطابق مطالب بیان شده در بخش ۳-۳، جهت تأمین نیروی عکس‌العمل جک‌ها باید شمع‌های بتنی احداث شوند. شمع‌ها به علت وزن مصالح خود و اجرای درجا، نشست پی را زیاد می‌کنند. شکل ۱۱ میزان نشست پی سازه‌ها را بعد از احداث ۱۵ شمع در زیر محور ستون‌ها نشان می‌دهد. به علت حفظ فشار جانبی دیواره و کف چاهک حفر شده در روش انتخابی برای مدل‌سازی شمع بتنی، احداث شمع‌ها تأثیر چندانی در افزایش نشست پی ندارد و مطابق شکل‌های ۸ الی ۱۰ و مقایسه نتایج آنها با شکل ۱۱ در هر سازه، احداث شمع‌های بتنی حدود ۰/۵ سانتی‌متر نشست قائم در پی ایجاد می‌کند. این رویکرد مدل‌سازی، مطابق عملیات واقعی احداث شمع‌های در جاریز بتنی در خاک‌های سست است که در مراحل حفر از رینگ‌های بتنی و یا با استفاده از گل بنتونیت فشار جانبی دیواره‌های چاه حفر شده را حفظ می‌نمایند.^[۲۶]

۳.۵. بررسی آیین‌نامه‌یی لزوم اصلاح نشست سازه‌ها

بر اساس جدول ۷-۴-۴ مبحث هفت مقررات ملی ساختمان، بیشینه نشست غیریکنواخت برای پی‌های نواری و گسترده احداث شده بر روی خاک رسی ۲/۵ سانتی‌متر است.^[۱۶] همچنین، مقادیر ۰/۴ الی ۰/۰۶۷ رادیان، به عنوان حداکثر مقدار مجاز چرخش پی و حد خرابی سازه‌های ساختمان‌های دارای اسکلت و مقادیر ۰/۰۲ الی ۰/۰۳۳ رادیان، به عنوان حد ایجاد ترک در ساختمان معرفی شده است. مقادیر نشست نامتقارن و اعوجاج پی هر سه سازه، بعد از اتمام مرحله تحکیم در جدول ۶ ارائه شد.

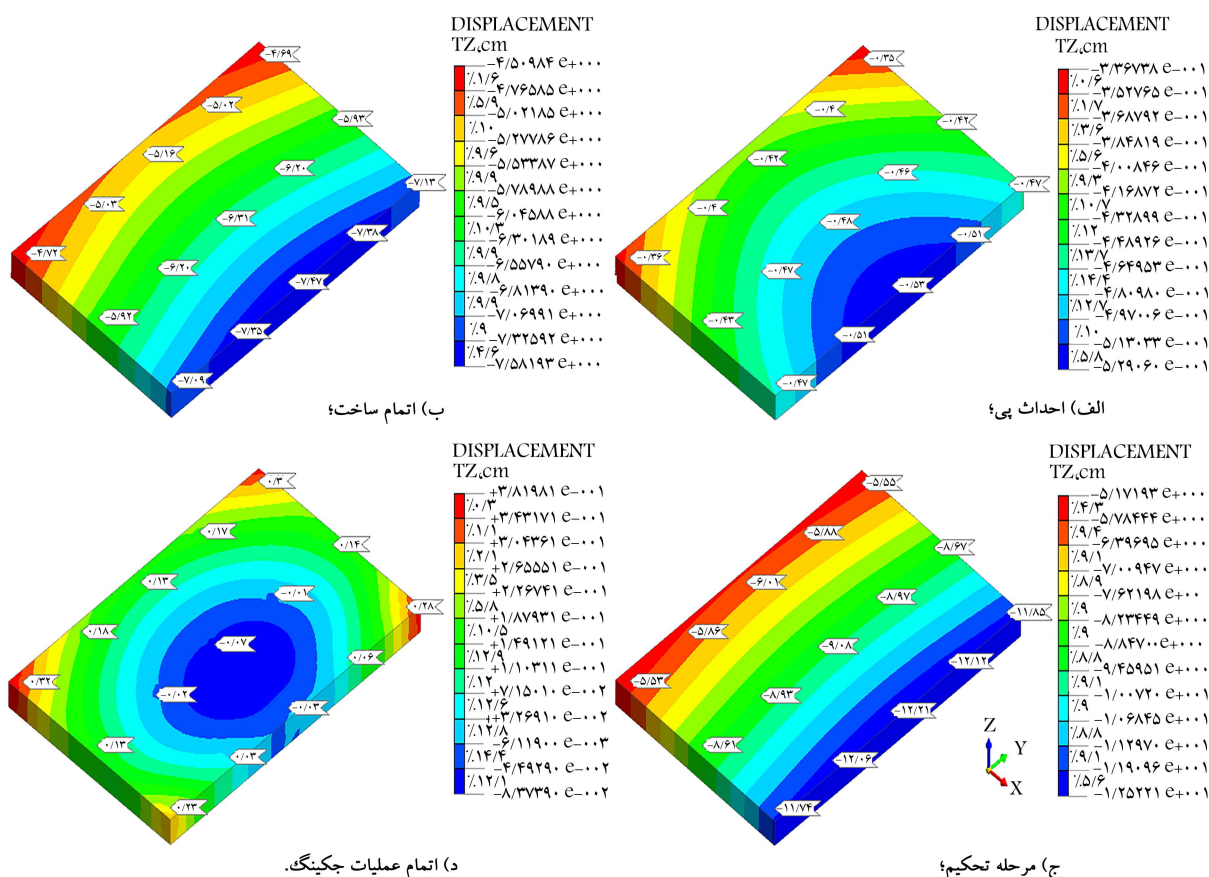
میزان نشست غیریکنواخت در تمام حالات مورد بررسی در محدوده غیرمجاز آیین‌نامه‌یی قرار می‌گیرد که در این شرایط سازه از محور قائم خود خارج شده و اصطلاح سازه کج شده به آن اطلاق می‌شود. همچنین میزان اعوجاج پی سازه ۸ طبقه در مرز حد خرابی المان‌های سازه‌یی قرار دارد که بحرانی‌ترین شرایط در بین سازه‌های مورد مطالعه می‌باشد. پی سازه ۶ طبقه بیش از حد ایجاد ترک اعوجاج داشته است و احتمال وجود ترک‌هایی در المان‌های سازه‌یی و غیرسازه‌یی آن بسیار بالا است، اما وضعیت اعوجاج پی سازه ۴ طبقه در پایین‌ترین حد بروز ترک قرار دارد و احتمال بروز ترک‌های عمیق و گسترده در این سازه بسیار پایین است.

و جابجایی‌های احتمالی این شمع‌ها در طول مراحل عملیات اصلاح نشست از اهمیت بالایی برخوردار است.

۱.۵. جابجایی پی‌ها قبل و بعد از عملیات جک‌زنی

در شکل‌های ۸ الی ۱۰ میزان جابجایی نقاط اتصال ستون‌های سازه و پی به ترتیب در سازه‌های ۸، ۶ و ۴ طبقه در چهار مرحله احداث پی، بعد از اتمام مراحل ساخت سازه، بعد از اتمام دوره تحکیم سه ساله و بعد از اتمام عملیات اصلاح نشست جک‌زنی نشان داده شده است. شکل‌های ۸ الف، ۹ الف و ۱۰ الف، جابجایی نقاط پای ستون سازه‌ها را بعد از احداث پی در مدت یک ماه نشان می‌دهند. در این مرحله بیشینه نشست نامتقارن پی حدوداً به ۰/۲ سانتی‌متر می‌رسد. با اتمام ساخت سازه، که زمان آن برای سازه‌های ۸، ۶ و ۴ طبقه به ترتیب هشت، شش و چهار ماه بوده است، نشست پی افزایش می‌یابد.

شکل‌های ۸ د و ۹ د و ۱۰ د، کانتورهای نشست پی‌های مورد بررسی را بعد از اتمام مراحل عملیات اصلاح نشست نشان می‌دهد. بر اساس نتایج با انجام عملیات جک‌زنی، نشست پی در دو طرف، تقریباً در یک تراز قرار می‌شوند. به دلیل شرایط ژئوتکنیکی خاک، نشست سازه در راستای محور Y تقریباً یکنواخت و در راستای محور X غیریکنواخت می‌باشد. مطابق شکل‌های ۸ الی ۱۰، قبل از احداث سازه‌ها، خطوط تراز نشست نیم‌دایره‌هایی با مرکز تقریبی در محل ستون C-۳ تشکیل می‌شوند. با ساخت سازه‌ها و تکمیل مراحل تحکیم خاک، علاوه بر افزایش نشست پی، صلبیت المان‌های سازه‌یی باعث افزایش عملکرد جابجایی یکنواخت پی شده و شعاع انحناء کانتورهای نشست کاهش می‌یابد. بعد از اتمام مراحل اصلاح نشست، به دلیل تمرکز بار سقف‌های سازه در مرکز هندسی پلان، کانتورهای جابجایی پی از شکل نیم دایره در شکل‌های ۸ الف، ۹ الف و ۱۰ الف، به شکل دایره‌های هم مرکز در محدوده مرکز پی تغییر می‌نماید. بعد از اتمام عملیات جک‌زنی بیشینه اختلاف نشست دو طرف پی به ترتیب در سازه ۸، ۶ و ۴ طبقه به ۰/۴۴، ۰/۳۰ و ۰/۱۳ سانتی‌متر می‌رسد که مقادیری بسیار ناچیز می‌باشند و شرایط آیین‌نامه تأمین می‌شود.



شکل ۸. جابه جایی نقاط اتصال ستون و پی سازه ۸ طبقه بر حسب سانتی متر بعد از:

جدول ۶. مقایسه مقادیر نشست و اعوجاج پی بعد از تحکیم با مقادیر مجاز.

طبقات سازه	نشست پی (cm)		میزان نشست نامتقارن (cm)	اعوجاج پی (رادیان)	وضعیت آیین نامه پی	
	بیشینه	کمینه			نشست	اعوجاج
۸	-۱۲٫۵۲	-۵٫۱۷	-۷٫۳۵	۰٫۰۰۶۷	غیرمجاز	حد خرابی سازه پی
۶	-۹٫۱۴	-۴٫۵۱	-۴٫۶۳	۰٫۰۰۴۲	غیرمجاز	بیش از حد ایجاد ترک
۴	-۵٫۲۴	-۲٫۷۷	-۲٫۴۷	۰٫۰۰۲۲	غیرمجاز	حد ایجاد ترک

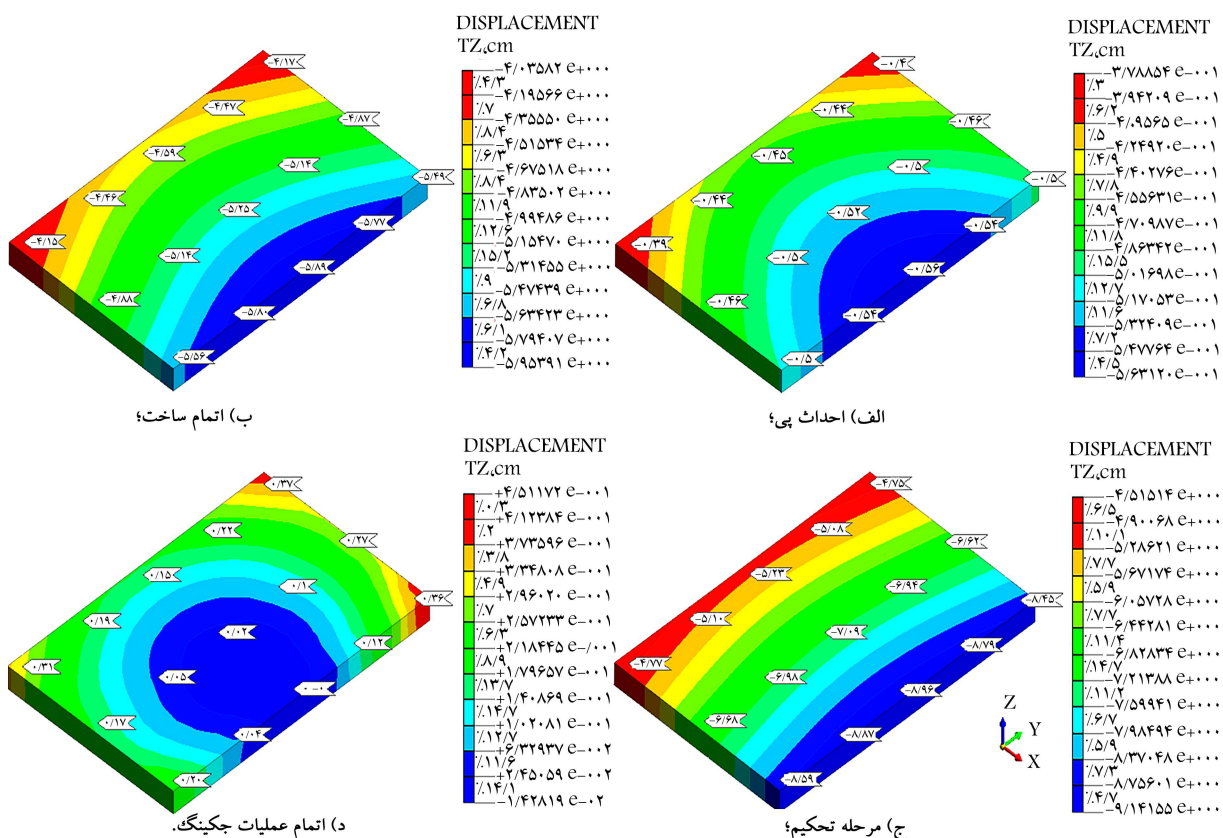
که نشان دهنده تمرکز تنش در راستای محل اتصال ستون و پی در کف آن است.

۵.۵. تعیین نیروی جک براساس جابجایی پی

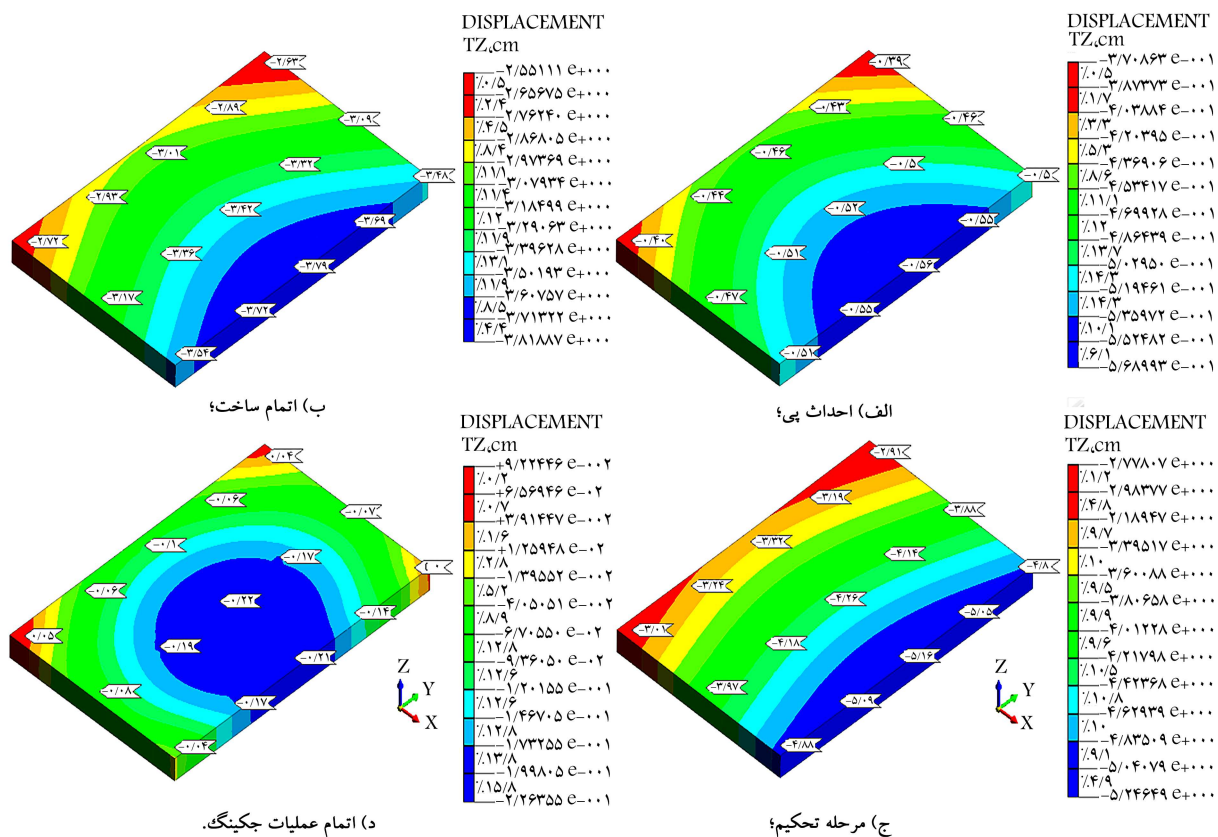
اعمال نیروی جک به منظور اصلاح نشست تا مرحله پی ادامه پیدا می کند که اختلاف نشست دو طرف سازه به کمترین میزان خود برسد و برای نشست بیشتر پی تعویض نشود. با توجه به شکل های ۸ ج، ۹ ج و ۱۰ ج می توان نشست پی را به سه قسمت زیاد در محور C، متوسط در محور B و کم در محور A پلان سازه تقسیم نمود. به منظور تعیین نیروی جک ها برای اصلاح نشست، تحلیل های متعدد به شکل سعی و خطا برای هر کدام از سازه ها صورت گرفته است. جدول ۷ نیروی لازم جک برای اصلاح نشست هر قسمت از پی سازه های مورد مطالعه را نشان می دهد که به صورت مرحله پی و در ۲۰ گام بر پی سازه ها اعمال شده است.

۴.۵. تعیین محل قرارگیری جک های اصلاح نشست

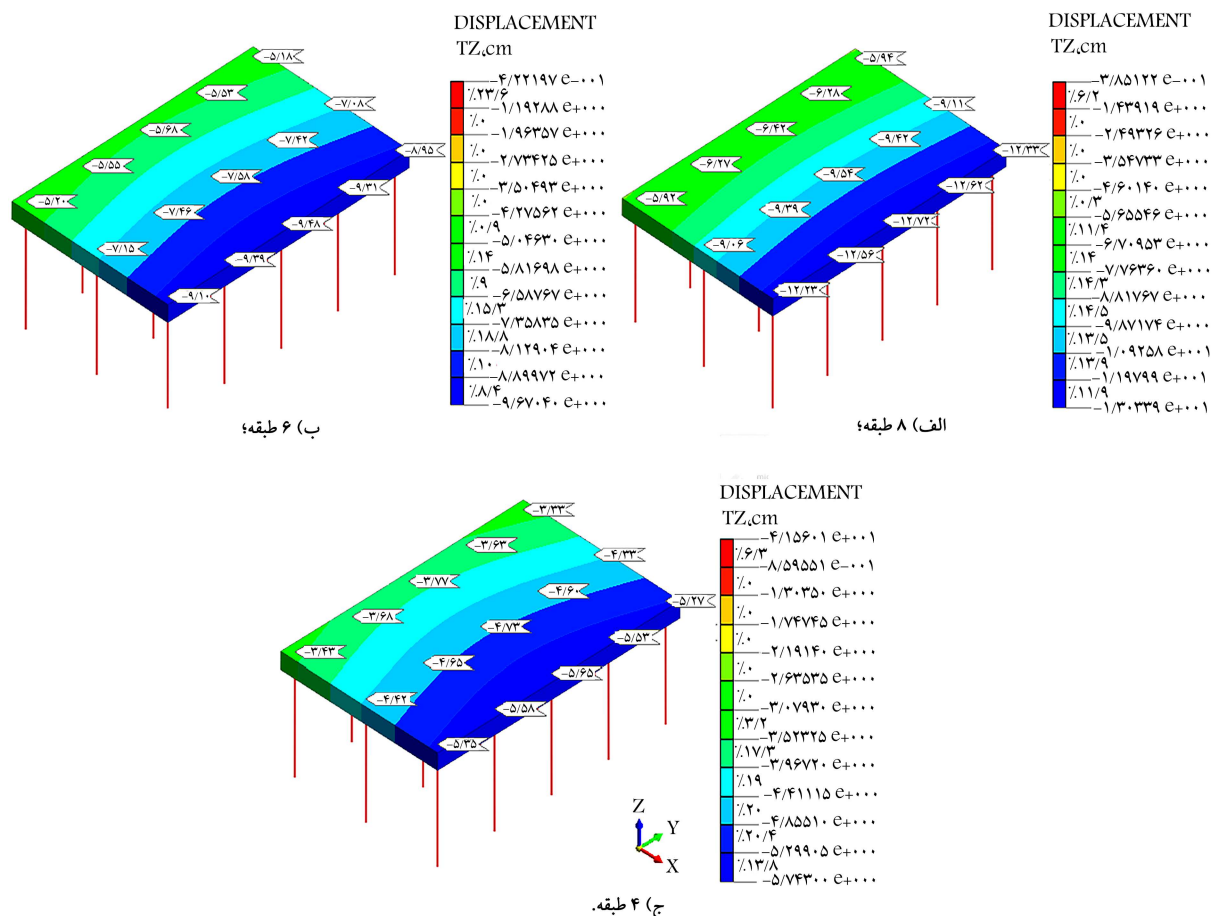
بعد از تعیین نیروهای وارده از سازه بر پی و محاسبه جابجایی های نقاط مختلف آن، باید محل مناسب قرارگیری جک ها مشخص شود. بر اساس نتایج تحلیل ها، در محل اتصال ستون ها بر روی سطح پی، بیشترین تمرکز تنش ایجاد می شود. با وجود اینکه پی، قسمت عمده پی از تنش ها را جذب نموده و بر اساس میزان سختی و صلیبیت، تنش ها را به طور یکنواخت تر در کف خود و روی خاک توزیع می نماید، اما مقدار تنش در نقطه متناظر محل اتصال ستون بر سطح پی در کف آن، از مقدار تنش در سایر نقاط کف پی بیشتر است. [۲۷] بنابراین، قرار دادن جک ها در زیر فونداسیون و در راستای ستون های طبقه اول، مناسب خواهد بود. [۱۱] شکل ۱۲ کانتورهای تنش سطح پی هر سه سازه مورد مطالعه را بعد از اتمام دوره تحکیم نشان می دهد. همچنین دیاگرام تغییرات تنش در کف هر پی در راستای محور مرکزی و عرضی آن، در این شکل آمده است



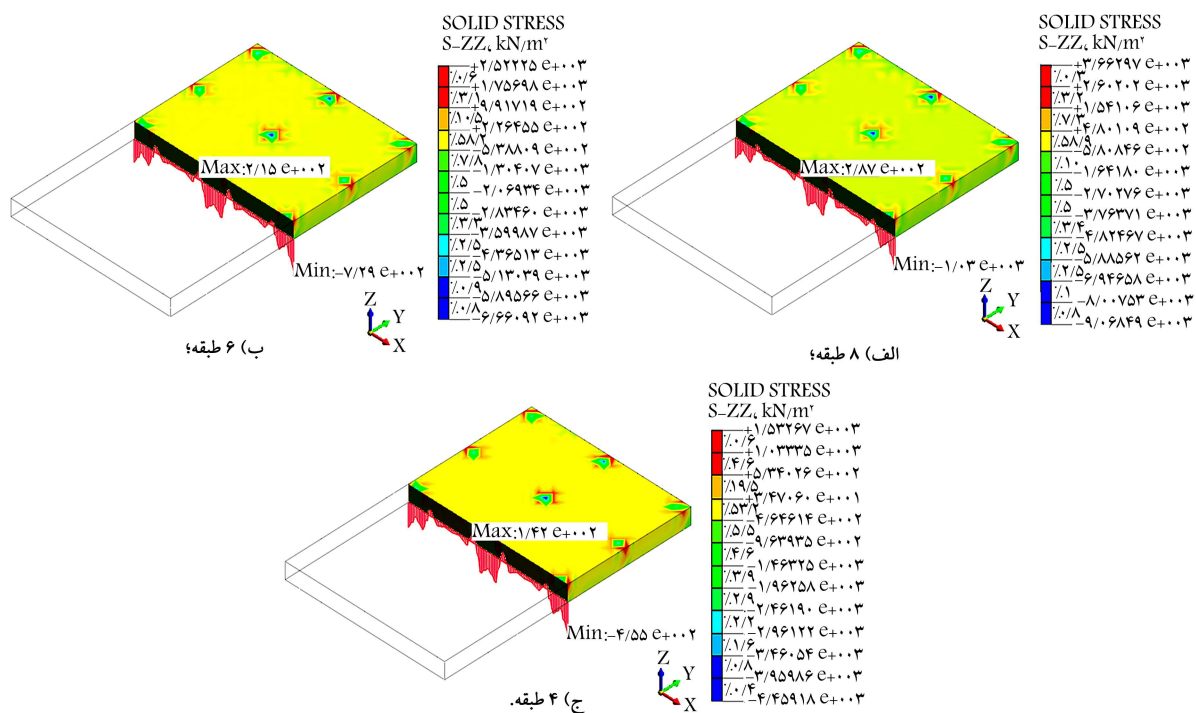
شکل ۹. جابه‌جایی نقاط اتصال ستون و پی سازه ۶ طبقه بر حسب سانتی متر بعد از:



شکل ۱۰. جابه‌جایی نقاط اتصال ستون و پی سازه ۴ طبقه بر حسب سانتی متر بعد از:



شکل ۱۱. نشست محل اتصال ستون‌های سازه و پی بعد از مرحله احداث شمع‌های عکس‌العمل بر حسب سانتی متر در سازه.



شکل ۱۲. تنش نقاط اتصال ستون‌های سازه و پی در سطح و کف فونداسیون بر حسب کیلونیوتن بر مترمربع در سازه.

جدول ۷. تعیین نیروی جک‌های اصلاح نشست براساس جابه‌جایی پی.

سازه	محور پلان	بیشینه‌ی نشست (cm)	نیروی (kN) کل	نیروی هر گام
۸ طبقه	محور C	-۱۲٫۲۱	۲۷۰۰	۱۳۵
	محور B	-۹٫۰۸	۲۴۰۰	۱۲۰
	محور A	-۶٫۰۱	۱۸۰۰	۹۰
۶ طبقه	محور C	-۸٫۹۶	۲۳۰۰	۱۱۵
	محور B	-۷٫۰۹	۲۱۰۰	۱۰۵
	محور A	-۵٫۲۳	۱۶۰۰	۸۰
۴ طبقه	محور C	-۵٫۱۶	۱۳۰۰	۶۵
	محور B	-۴٫۲۶	۱۲۰۰	۶۰
	محور A	-۳٫۳۲	۱۱۰۰	۵۵

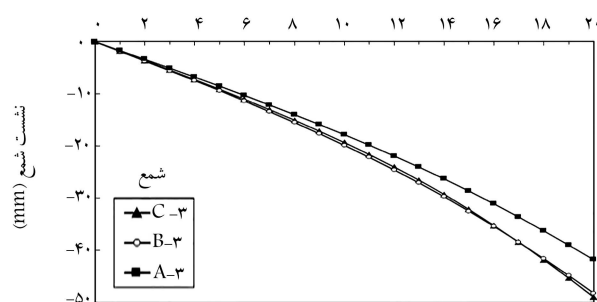
به علت بیشتر بودن اختلاف نیروی لازم برای اصلاح نشست محور A پلان سازه با محور B و C در سازه‌های ۸ و ۶ طبقه، نشست نهایی شمع‌های واقع در محورهای B و C بیشتر از شمع‌های واقع در محور A می‌باشد. در سازه ۴ طبقه، برای اصلاح نشست محورهای B، C و A به ترتیب ۱۳۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۱۰۰ کیلو نیوتن نیرو برای جک نیاز است و به علت کم بودن دامنه تغییرات نیروی جک‌ها، نشست‌های به وجود آمده در شمع‌های عکس‌العمل این سازه اختلاف زیادی با یکدیگر ندارند. براساس نتایج ارائه شده در شکل ۱۳، علیرغم بیشتر بودن نیروی جک‌های اصلاح نشست در محور C، به علت بیشتر بودن تنش وارده بر پی در مرکز پلان سازه، فشردگی قسمت فوقانی شمع‌های قرار گرفته در محور B سازه‌های ۶ و ۴ طبقه اندکی بیشتر از شمع‌های قرار گرفته در محور C می‌باشد. با این وجود در سازه ۸ طبقه به علت زیاد بودن نیروی جک‌های قرار گرفته در محور C سازه، نشست قسمت فوقانی شمع‌های قرار گرفته در محور مذکور اندکی بیش از شمع‌های محور B می‌باشد.

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اصلاح نشست سازه‌های بتنی به روش جک‌زنی و مطالعه رفتار پی‌های ساختمان‌های بتنی ۸، ۶ و ۴ طبقه مطالعه شد. جمع‌بندی نتایج به دست آمده در مطالعه حاضر به شرح زیر است:

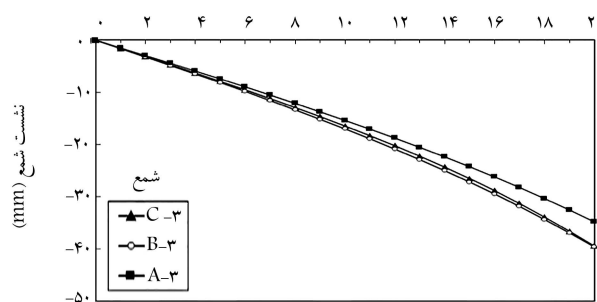
۱. اعمال نیرو توسط جک‌ها به منظور اصلاح نشست نامتقارن تا حدی ادامه پیدا می‌کند که دو سوی پی به مقدار برابری از جابه‌جایی قائم برسد و یا میزان نشست غیریکنواخت پی به کمترین مقدار ممکن کاهش یابد.
۲. به علت حفظ فشار جانبی دیواره و کف چاهک حفر شده در روش انتخابی برای مدل‌سازی شمع‌های بتنی تأمین‌کننده نیروی عکس‌العمل جک، احداث آنها تأثیر چندانی در افزایش نشست پی ندارد و نشست قائم در پی را در حدود ۵/۰ سانتی‌متر افزایش می‌دهد.
۳. علاوه بر لزوم رعایت الزامات آیین‌نامه، مهمترین و مستندترین اطلاعات از وضعیت سازه کج شده را می‌بایست از شرایط کلی و ظاهری المان‌های سازه کسب کرد. گزارش‌های مهندسی و نظرات متخصصین بعد از مشاهده و تحلیل

شماره مراحل اصلاح نشست



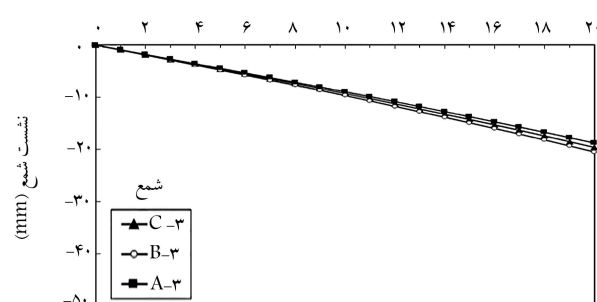
شماره مراحل اصلاح نشست

الف) ۸ طبقه؛



شماره مراحل اصلاح نشست

ب) ۶ طبقه؛



ج) ۴ طبقه.

شکل ۱۳. نشست شمع‌های عکس‌العمل تحت عملیات اصلاح نشست در سازه.

۶.۵. نشست شمع عکس‌العمل در اثر عملیات جک‌زنی

شمع‌هایی که در عملیات جک‌زنی برای تأمین نیروی عکس‌العمل جک‌ها استفاده می‌شوند، بعد از اصلاح کجی ساختمان جزئی از فونداسیون سازه خواهند شد و وظیفه انتقال بار سازه به لایه‌های مقاوم‌تر خاک را دارند. بنابراین، محاسبه جابه‌جایی و فشردگی احتمالی قسمت فوقانی شمع برای انجام یک طرح دقیق ضروری است. میزان جابه‌جایی قائم شمع‌ها در مراحل عملیات جک‌زنی با افزایش نیروی اعمالی جک‌ها، روند افزایشی خواهد داشت. شکل ۱۳ جابه‌جایی قائم قسمت فوقانی شمع‌های عکس‌العمل C-۳، B-۳ و A-۳، واقع در محور طولی شماره ۳ پلان سازه، را برای سه سازه مورد مطالعه نشان می‌دهد. در این شکل، نشست آبی شمع بعد از مرحله احداث آن برابر صفر و به عنوان مبدأ برای نمودار بررسی میزان نشست شمع تحت عملیات جک‌زنی در نظر گرفته شده است. همچنین گام‌های انجام عملیات اصلاح نشست با شماره‌های ۱ الی ۲۰ مشخص شده‌اند که براساس جدول ۶ در هر مرحله نیروی مشخصی بر شمع‌ها اعمال می‌شود.

هیدرولیکی یا مکانیکی استفاده می‌شوند، در طول انجام عملیات جک زنی دچار جابجایی قائم در خلاف جهت نیروی اعمالی توسط جک‌ها بر پی خواهند شد. برزاین نشست باعث متراکم شدن خاک زیر نوک شمع می‌شود و چون بعد از اصلاح کج‌شدگی ساختمان این شمع‌ها جزئی از سیستم پی - سازه خواهند بود، بنابراین احتمال جابه‌جایی و نشست سازه اصلاح نشست شده شدیداً کاهش می‌یابد.

۶. طراحی عملیات اصلاح نشست جک‌زنی یک روند قاعده‌مند نیست. به عبارت دیگر، برای اصلاح نشست هر سازه، یک طرح منحصر به فرد وجود خواهد داشت و به علت متنوع بودن متغیرهای اثرگذار نمی‌توان نتایج حاصل از طرح اصلاح نشست یک سازه را به سازه‌های مشابه دیگر تعمیم داد.

وضعیت ساختمان بهترین و مناسب‌ترین تصمیم را برای تحکیم، اصلاح نشست و یا تخریب کلی سازه‌ی نشست نموده مشخص خواهد کرد.

۴. براساس نتایج بررسی‌های عددی، محل اتصال ستون‌ها بر روی سطح پی بیشترین تمرکز تنش را ایجاد می‌نماید. با وجود اینکه پی، قسمت بسیار زیادی از این تنش‌ها را جذب می‌نماید و آن را براساس میزان سختی و صلبیت خود به طور یکنواخت‌تر در کف خود و روی خاک توزیع می‌نماید، اما مقدار تنش نقطه مقابل محل اتصال ستون بر سطح پی در کف آن، در مقایسه با سایر نقاط کف پی از مقدار بیشتری برخوردار است. بنابراین قرارگیری جک‌ها در زیر محور ستون‌ها انتخاب مناسبی خواهد بود.

۵. شمع‌هایی که در عملیات اصلاح نشست برای تأمین نیروی عکس‌العمل جک‌های

پانویس‌ها

1. soil extraction
2. compaction grouting
3. Jacking
4. Micro tunneling

منابع (References)

1. Zhang, X., Shi, S., Zhao, H. and et al. "Deformation analysis and reinforcement of jin-gang tower in jacking method", *World Journal of Engineering*, **13**(2), pp. 163-168 (2016).
2. Tawfic, Y.R. and Eid, M.A. "Application of micro-tunneling technique to rectify tilted structures constructed on cohesive soil", *World Academy of Science Engineering and Technology, International journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, **9**(11), pp. 1442-1449 (2015).
3. Marchi, M. "Stability and strength analysis of leaning towers", thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy, University of Padova, Padova, Italy (2008).
4. Gromysz, K. "Rectification an 11-storey vertically deflected residential building", *Procedia Engineering*, **57**(12), pp. 382-391 (2013).
5. Ovando-Shelley, E. and Santoyo, E. "Underexcavation for leveling buildings in Mexico city: Case of the metropolitan cathedral and the Sagrario Church", *Journal of Architectural Engineering*, **7**(3), pp. 61-70 (2001).
6. Burland, J.B., Jamiolkowski, M.B. and Viggiani, C. "Leaning tower of Pisa: behavior after stabilization operations", *International Journal of Geoenvironment Case Histories*, **1**(1), pp. 156-169 (2009).
7. Han, J. "Principles and practice of ground improvement", Wiley & Sons, New Jersey, United States of America (2015).
8. Cheng, W.C., Ni, J.C. and Hwang, H.W. "Jacking tilted building by automatic multiple grouting", In *Characterization, Modeling, and Evaluation of Geotechnical Engineering Systems*, pp. 50-57 (2014).
9. Rahmani, A.H. "Investigation on treatment of asymmetric settlement in concrete buildings and their foundation by micro-tunneling technique", Thesis Submitted for The Master's degree, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran (In Persian) (2019-1397).
10. Maffei, C.E. and Goncalves, H.H. "Straightening two tilted buildings using two different techniques", *Innovative Technologies for Severe Weather and Climate Change*, Geo-China 2016, **10**(1), pp. 1-8, (2016).
11. Kijanka, M. and Kowalska, M. "Inclined buildings-some reasons and solutions", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **245**(2), pp. 1-11 (2017).
12. Gromysz, K. "Methods of removing buildings deflection used in Poland", In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **245**(3), pp. 32-46 (2017).
13. Mallaei, M.R., Brazine, M. and Saba, H.R. "Investigation of different methods of reinforcement and improvement of foundations", *Second National Conference on Geotechnical Engineering of Iran*, Kermanshah, Iran, pp. 1-9, (In Persian) (2014-1393).
14. Ehterami, A.A. "Investigation on treatment of asymmetric settlement in concrete buildings and their foundations by jacking method", Thesis Submitted for the Master's degree, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran, (In Persian) (2019).
15. Iranian National Building Code, Part 6th, "Design loads for buildings", Office of National Construction Codes. Ministry of Roads and Urban Development. Tehran, Iran (In Persian) (2013-1392).
16. Iranian National Building Code, Part 7th, "Foundation and construction", Office of National Construction Codes. Ministry of Roads and Urban Development. Tehran, Iran. (In Persian) (2013-1392).

17. Iranian National Building Code, Part 9th, "Design and construction of RC buildings", Office of National Construction Codes. Ministry of Roads and Urban Development. Tehran, Iran. (In Persian) (2013-1392).
18. Mroueh, H. and Shahrou, I. "A full 3-D finite element analysis of tunneling-adjacent structures interaction", *Computers and Geotechnics*, **30**(3), pp. 245-253 (2003).
19. Alizadeh Majd, A. and Dabiri, R. "Geotechnical illustration of fereshteh alley in tabriz city", *New Approaches in Civil Engineering*, **2**(1), pp. 14-32 (In Persian) (2018-1397).
20. Potts, D.M., Zdravkovic, L. and Zdravkovic, L. "Finite element analysis in geotechnical engineering: application", Thomas Telford (2001).
21. MIDAS IT. Co. Ltd. "Manual of GTS-NX". South Korea: MIDAS Company, (2018).
22. Eid, M., Hefny, A., Sorour, T. and et al. "Numerical analysis of large diameter bored pile installed in multi layered soil: A case study of Damietta port new grain silos project", *International Journal of Current Engineering and Technology*, **8**(2), pp. 218-226 (2018).
23. Butler, H.D. and Hoy, H.E. "The Texas quick load test method for foundation load testing user's manual", FHWA IP-77.8, FHWA Implementation Division, Washington, DC. (1977).
24. Zhang, X., Shi, S., Zhao, H. and et al. "Deformation analysis and reinforcement of jin-gang tower in jacking method". *World Journal of Engineering*, **13**(2), pp. 163-168 (2016).
25. Maffei, C.E. and Goncalves, H.H. "Innovative techniques used to plumb two 57 m height concrete buildings leaning 3.8 and 3.1", *Innovative Infrastructure Solutions*, **1**(1), pp. 1-18, (2016).
26. Braszin, M. "PLAXIS software comprehensive guide", First Edition, Elme-Omran Publishing Institute, Tehran, Iran, (In Persian) (2017-1396).
27. Baji, H. "Calculation of construction projects using ETABS and SAFE", Sixteenth edition, Elme-Omran Publishing Institute, Tehran, Iran. (In Persian) (2014-1393).