

نشریه مهندسی سازه و ساخت (علمی - پژوهشی)

www.jsce.ir

بررسی رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های بلند لوله‌ای با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه

فرزاد اعتدادی علی‌آبادی^۱، محمد مهدی معمارپور^{۲*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، موسسه البرز، قزوین، ایران

۲- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران

چکیده

در ساختمان‌های بلند با سیستم لوله‌ای ستون‌ها و تیرهای اطراف سازه وظیفه تحمل بارهای جانبی را به عهده دارند. در این سیستم سازه‌ای در حالت ایده‌آل کل سازه به صورت یک تیر طره رفتار کرده و ستون‌های سازه در دو وجه مقابل هم به‌طور یکنواخت به کشش و فشار باربری می‌نمایند ولی با توجه به تغییر شکل ایجاد شده در تیرهای محیطی سازه، یکنواختی تنش در ستون‌های محیطی دچار خلل شده و پدیده لنگی‌برشی ایجاد می‌گردد. میزان اثر پدیده لنگی‌برشی به عواملی مانند انعطاف‌پذیری تیرهای جانبی، فاصله و ابعاد ستون‌های جانبی، ارتفاع سازه و دیگر مشخصات سازه بستگی دارد. تعیین اثر پدیده لنگی‌برشی بر توزیع نیروی جانبی بین المان‌های سازه‌ای اهمیت زیادی دارد. در این تحقیق میزان تاثیر اندرکنش خاک و سازه بر پدیده لنگی‌برشی، تغییر شکل‌ها، نحوه توزیع نیروهای جانبی بین ستون‌های محیطی ساختمان و روند تشکیل مفصل‌های پلاستیک در سازه‌های لوله‌ای بتن‌آرمه بررسی می‌شود. همچنین مقایسه‌ای بین نتایج تحلیل خطی و غیرخطی صورت گرفته و اثرات تشکیل مفصل‌های پلاستیک با در نظر گرفتن تاثیرات ثانویه P-Delta بر تغییر شکل‌ها و رفتار کلی سازه بررسی شده‌است. در این تحقیق با مدل کردن یک ساختمان بتنی ۵۰ طبقه با سیستم لوله‌ای و تحلیل رفتار لرزه‌ای سازه تحت اعمال بارهای جانبی ناشی از زلزله در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که به‌طور کلی وجود اندرکنش خاک و سازه باعث کاهش پدیده لنگی‌برشی و افزایش تغییر شکل می‌شود همچنین تشکیل مفصل‌های پلاستیک اثر زیادی بر رفتار کلی و تغییر شکل سازه لوله‌ای خواهد داشت.

کلمات کلیدی: لنگی‌برشی، سازه لوله‌ای، اندرکنش خاک و سازه، تاثیرات ثانویه P-Delta، تحلیل بارافزون استاتیکی غیرخطی

سابقه مقاله:

شناسه دیجیتال:

10.22065/JSCE.2018.95818.1298	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/JSCE.2018.95818.1298	۱۳۹۸/۰۶/۰۱	۱۳۹۶/۱۱/۱۶	۱۳۹۶/۱۱/۱۶	۱۳۹۶/۱۰/۰۵	۱۳۹۶/۰۶/۰۹

*نویسنده مسئول: محمد مهدی معمارپور

memarpour@eng.ikiu.ac.ir

پست الکترونیکی:

Investigation of the Seismic Behavior of Framed Tube Buildings Considering Soil Structure Interaction

Farzad Etedadi Aliabadi ¹, Mohammad Mahdi Memarpour ^{2*}

1- M.Sc. in Structural Engineering, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Alborz Institute, Qazvin, Iran

2- Assistant professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

ABSTRACT

In recent years, the framed tube system has been known as the most efficient structural system for the high-rise buildings. The entire lateral resistance in the framed tube structures is provided by closely spaced exterior columns and deep spandrel beams. A framed tube building suffers from the shear lag effects, which cause a nonlinear distribution of axial stresses along the face of the building so that the axial stress in the corner columns increases while it decreases in the interior columns. Shear lag depends on the perimeter columns size and spacing and flexibility of the spandrel beams. In this study, the influence of soil structure interaction (SSI) on shear lag phenomenon and deformation of reinforced concrete framed tube structures have been investigated and the results of linear and nonlinear analyses have been compared. In addition, P-Delta effects on some of the nonlinear static analyses have been considered and the sequence of plastic hinges formation has been investigated. The influence of SSI, the formation of plastic hinges and P-Delta effects have been determined by analyzing a 50-story reinforced concrete framed tube structure under seismic loading. The results show that SSI decreases shear lag and increases deformations of the structure. It also indicates that the formation of plastic hinges is so effective in deformation of the top stories and distribution of axial stresses in the top half of the building, and how P-Delta effects are important in deformation and strength of the framed tube structures.

ARTICLE INFO

Received: 31/08/2017

Revised: 26/12/2017

Accepted: 05/02/2018

Keywords:

*Shear lag,
Framed tube,
Soil structure interaction,
P-delta effects,
Nonlinear static pushover
analysis.*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2018.95818.1298

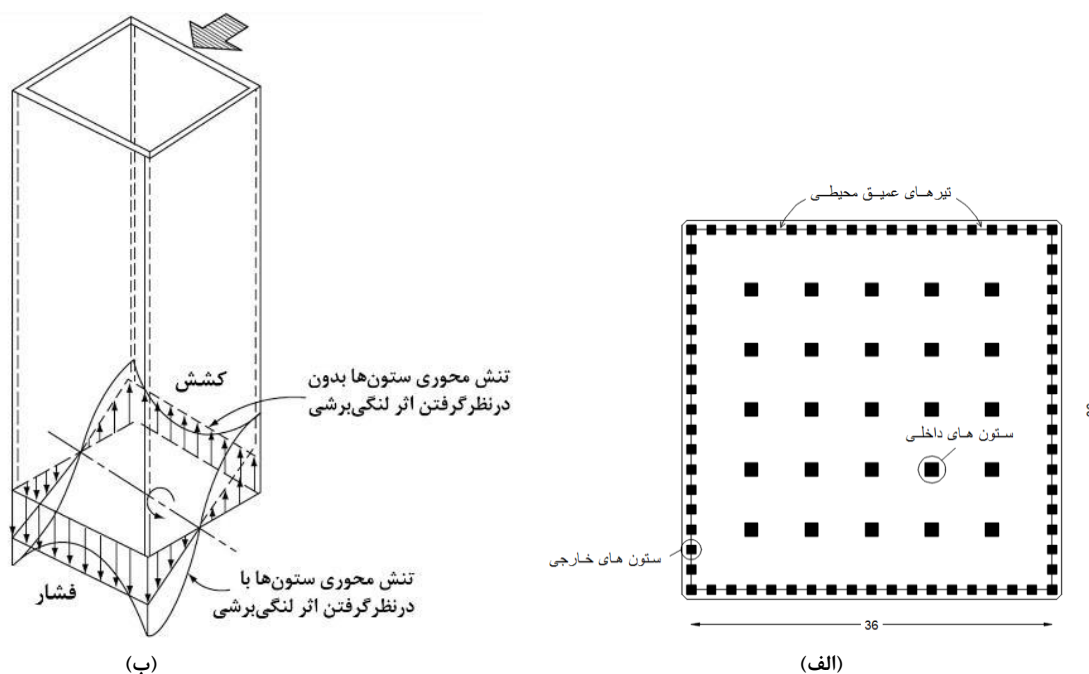
*Corresponding author: Mohammad Mahdi Memarpour
Email address: memarpour@eng.ikiu.ac.ir

۱- مقدمه

سیستم لوله‌ای یک سیستم رایج و کارآمد در ساخت سازه‌های بلند می‌باشد. در این سیستم ستون‌های جانبی با فاصله‌های بسیار کم از یکدیگر قرار گرفته و از تیرهای محیطی کوتاه با عمق زیاد استفاده می‌شود. بارهای جانبی وارد بر ساختمان به تیرها و ستون‌های اطراف سازه که به شکل لوله‌ای در محیط سازه قرار گرفته‌اند، وارد می‌شوند بطوریکه یک سمت ساختمان کاملاً تحت کشش و سمت دیگر کاملاً تحت فشار قرار دارد. همچنین بارهای ثقلی بین ستون‌های میانی و ستون‌های جانبی ساختمان تقسیم می‌شوند. این سیستم به‌طور کلی رفتاری شبیه به یک لوله توخالی طره نشان می‌دهد [۲۰].

قاب‌های موازی با بار جانبی مانند جان یک تیر و قاب‌های عمود بر بار جانبی مانند بال یک تیر عمل می‌کنند [۳]. مقاومت اولیه در برابر بارهای جانبی در قاب‌های جان ایجاد می‌شود و خمش داخل صفحه‌ای در این قاب‌ها اتفاق می‌افتد. سپس نیروهای وارده توسط تیرهای محیطی بین ستون‌های جانبی ساختمان توزیع می‌شود [۱]. انعطاف‌پذیری تیرهای محیطی و ستون‌های جانبی و تغییر شکل‌های ایجاد شده در آنها باعث می‌شود که نیروهای محوری ایجاد شده در ستون‌های خارجی در اثر اعمال نیروهای جانبی، یکسان نبوده و تفاوت قابل ملاحظه‌ای داشته باشند. در نتیجه در محیط سازه نیروی محوری ستون‌های گوشه بیشتر از نیروی محوری ستون‌های میانی است [۲۰]. این پدیده لنگی برشی یا Shear Lag نام دارد.

پدیده لنگی برشی باعث می‌شود سازه رفتار لوله‌ای کامل نداشته‌باشد و ستون‌های سازه لوله‌ای باربری غیریکسان داشته‌باشند (شکل ۱-الف). در یک سازه لوله‌ای ایده‌آل که دورتادور آن از دیوارهای یک‌تکه تشکیل شده‌است رفتاری شبیه به یک تیر طره که به‌صورت قائم قرار گرفته‌باشد، مشاهده می‌شود. به این رفتار سازه‌ای، رفتار لوله‌ای گفته می‌شود [۴]. به عبارت دیگر تفاوت رفتار سازه‌ای ساختمانی با سیستم لوله‌ای که دیوارهای آن از تیر و ستون تشکیل شده‌اند با یک سازه لوله‌ای ایده‌آل، در پدیده لنگی برشی است [۱]. کاهش اثر لنگی برشی در یک ساختمان با سیستم لوله‌ای باعث می‌شود که این ساختمان رفتاری نزدیک به رفتار لوله‌ای نشان دهد.



شکل ۱: سیستم لوله‌ای؛ (الف) پدیده لنگی برشی؛ (ب) پلان چیدمان تیرها و ستون‌ها

در گذشته تحقیقات زیادی در این زمینه صورت گرفته است. هدف اصلی در این تحقیقات بررسی میزان این پدیده با مدل سازی و ارزیابی دقیق تر رفتار سازه لوله ای می باشد تا ساختمان رفتاری نزدیک به رفتار لوله ای ایده آل داشته باشد. زیرا توزیع غیر یکنواخت نیروهای جانبی در اثر پدیده لنگی برشی و انتقال این نیروهای غیر یکنواخت به فونداسیون ساختمان و نشست های ناهمسانی که در فونداسیون ایجاد می شود، اثرات نامطلوبی بر سازه دارد. خصوصا در ستون های گوشه که با تمرکز بسیار زیاد نیرو روبه رو هستند [۵]. در حالیکه در ساختمانی با رفتار لوله ای، نیروهای جانبی وارد بر ساختمان به شکل یکنواخت به ستون های بیرونی و در نتیجه به فونداسیون ساختمان وارد می شوند.

تحقیقات گذشته نشان می دهد که لنگی برشی حساسیت زیادی به سختی سازه دارد [۶] که شامل سختی محوری و سختی خمشی ستون ها و سختی خمشی تیرها می شود و به طور کلی افزایش سختی تیر و ستون باعث کاهش لنگی برشی می شود [۷ و ۸]. هرچه فاصله بین ستون های جانبی کمتر شود و تعداد ستون ها در قاب های بال و جان افزایش یابد، هم به دلیل افزایش سختی خمشی کلی سازه و هم به دلیل کوتاه شدن طول تیرهای عمیق محیطی که با افزایش سختی آنها همراه است، لنگی برشی کاهش خواهد یافت [۱].

وجود مهاربند جانبی که سختی کلی سازه را افزایش می دهد منجر به کاهش لنگی برشی می شود [۹ و ۱۰ و ۱۱]. نتایج تحقیقات لئونارد [۹] در سال ۲۰۰۴ نشان می دهد که با وجود مهاربند جانبی مقدار لنگی برشی کاهش می یابد ولی به طور کامل از بین نمی رود. در سیستم لوله ای مهاربندی شده نیز لنگی برشی وجود دارد و رفتار هر دو سیستم مشابه است با این تفاوت که سیستم لوله ای مهاربندی شده در ساختمان های بلندتر کارایی بیشتری دارد. سیستم لوله ای مهاربندی شده از نظر لنگی برشی و تغییر مکان جانبی تا سه برابر بهتر از سیستم لوله ای عمل می کند. نتایج این تحقیق نشان می دهد که لنگی برشی رابطه مستقیم با مقدار تغییر مکان جانبی ساختمان ندارد.

افزایش عمق تیرهای محیطی، کاهش فاصله ستون های جانبی، وجود هسته مرکزی در سازه و نحوه قرارگیری ستون ها طوری که طول بلندتر مقطع مستطیلی در امتداد محیط ساختمان باشد، از دیگر عواملی هستند که لنگی برشی را کاهش می دهند [۱۲ و ۱۳]. طبق نتایج بدست آمده از تحقیقات هوملن [۵] در سال ۲۰۱۰ شدت لنگی برشی با میزان لاغری یک سازه رابطه معکوس دارد. زیرا هرچه لاغری کمتر باشد درصد بیشتری از نیروی جانبی توسط برش به فونداسیون منتقل می شود، در نتیجه مقاومت در برابر نیروهای جانبی بیشتر برعهده سختی برشی سازه است که باعث افزایش لنگی برشی می شود.

طبق تحقیق انجام شده توسط کوآن [۱۳] در سال ۱۹۹۴، افزایش سختی برشی قاب های بال و جان باعث کاهش مقدار لنگی برشی می شود به همین دلیل با افزایش ابعاد اعضای قاب های محیطی شدت لنگی برشی کاهش می یابد. طبق روابط بدست آمده در این تحقیق، در سازه های لاغر که نسبت ارتفاع به عرض آنها زیاد است سختی برشی نسبی آنها نیز زیاد است و شدت لنگی برشی کم می شود در حالیکه در سازه های کوتاه تر عکس این اتفاق مشاهده می شود و شدت لنگی برشی بیشتر می شود. تاثیر نحوه اعمال بارهای جانبی به یک ساختمان بر میزان لنگی برشی، در روابط و ضرایبی که توسط کوآن ارائه شده است، مشاهده می شود. در این مطالعه روشی ارائه شده است که اثرات لنگی برشی را در قاب های بال و جان در نظر گرفته است. این روش با تعریف پارامترهایی بدون بعد با عنوان ضرایب لنگی برشی، اثر نحوه بارگذاری جانبی به شکل بار گسترده یکنواخت، بار گسترده مثلثی یا بار متمرکز در بالای سازه را بر روی مقادیر این ضرایب اعمال کرده است. در ادامه این ضرایب برای تعیین تنش های موجود در اجزا سازه و تغییر مکان های جانبی مورد استفاده قرار می گیرند. در واقع بوسیله این ضرایب اثر لنگی برشی در تعیین میزان تنش ها و تغییر مکان های ایجاد شده به علت وارد شدن بارهای جانبی به سازه با اشکال مختلف، اعمال شده است. نتایجی که از این تحقیق بدست آمده نشان می دهد که درجه لنگی برشی به نوع توزیع بار جانبی وابسته است. به طور کلی در پایین سازه لنگی برشی با شدت بیشتری نسبت به بالای سازه مشاهده می شود.

در تحلیل لرزه ای یک سازه بر روی بستر سنگی، حرکت زمین با حرکت آن پیش از احداث سازه یکسان است. بنابراین می توان محاسبات لرزه ای را با اعمال همین حرکت به سازه انجام داد اما در مورد زمینی با خاک نرم، بین سازه و خاک اطراف آن فعل و انفعالاتی اتفاق می افتد که باعث ایجاد تغییراتی در حرکت لرزه ای بستر ساختمان خواهد شد. این فعل و انفعالات بین سازه و خاک، اندرکنش خاک و سازه نامیده می شود [۱۴]. در روش های معمول طراحی ساختمان های بلند همواره اتصالی گیردار بین سازه و زمین فرض می شود و اثرات اندرکنش خاک و سازه در نظر گرفته نمی شود. این موضوع برای ساختمان های کوتاه و بر روی خاک های نسبتا سخت منطقی به نظر می رسد اما این اثرات برای سازه های سنگین قرار گرفته بر روی خاک های نسبتا سست دارای اهمیت بسیاری است [۱۵].

به طور کلی در تحلیل‌ها و طراحی‌های مرسوم، انعطاف‌پذیری فونداسیون و خاک اطراف آن در نظر گرفته نمی‌شود به این معنی که یک سازه بلند و فونداسیون آن به شکل جداگانه و هر کدام به عنوان یک سیستم مستقل طراحی می‌شوند در حالی که سازه بلند در قسمت پایین خود مقید شده‌است. در نتیجه، عملکرد لرزه‌ای ساختمان فقط به سازه بلند بستگی دارد. این روشی ساده و راحت است اما خصوصیات دینامیکی و عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌ها بدون در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری فونداسیون و خاک اطراف آن می‌تواند تفاوت قابل ملاحظه‌ای با رفتار واقعی ساختمان‌ها داشته‌باشد و ممکن است منجر به یک طراحی ناایمن شود [۱۶]. وجود خاک انعطاف‌پذیر در زیر سازه یا در مجاورت آن، به شکل‌های مختلفی بر پاسخ لرزه‌ای سازه اثر خواهد داشت. دوره تناوب اصلی سازه‌ای با تکیه‌گاه‌های انعطاف‌پذیر نسبت به دوره تناوب اصلی سازه‌ای با تکیه‌گاه‌های گیردار بیشتر است و در سازه‌ای با تکیه‌گاه‌های انعطاف‌پذیر قسمتی از انرژی ارتعاشی در تکیه‌گاه‌ها و خاک اطراف آن‌ها اتلاف می‌شود [۱۷].

در گذشته تحقیقات گسترده‌ای اهمیت در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه را بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها نشان داده‌اند. طبق نتایج تحقیقات وانزلی و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۱۴ در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه اثر قابل ملاحظه‌ای بر تغییر مکان‌ها و نیروهای داخلی دارد. به طوری که به حساب آوردن انعطاف‌پذیری خاک باعث افزایش تغییر مکان‌ها و کاهش نیروهای داخلی خواهد شد. تحقیقات انجام شده توسط استوارت و همکاران [۱۹] در ۱۹۹۹ روش‌های تحلیل و تکنیک‌های شناسایی سیستم برای ارزیابی اثرات اندرکنش خاک و سازه بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها را بیان می‌کند.

در تحقیقی دیگر که با مدل‌سازی آسمان‌خراش شانگهای انجام شده‌است مشاهده می‌شود که اثر اندرکنش خاک و سازه باعث افزایش دوره تناوب مودهای ارتعاشی اولیه سازه و بخصوص دوره تناوب اصلی می‌شود و با کاهش سختی سیستم خاک و فونداسیون دوره تناوب‌ها افزایش خواهد یافت. اثر اندرکنش خاک و سازه ظرفیت مقاومتی سازه در برابر فروپاشی را بهبود می‌بخشد و هرچه سختی سیستم کمتر باشد این ظرفیت افزایش می‌یابد. اندرکنش خاک و سازه می‌تواند اثراتی بر روندهای خرابی سازه‌ای که در معرض زلزله شدید قرار گرفته‌است، داشته‌باشد اما بر حالت‌های تخریب نهایی سازه اثر ناچیزی خواهد داشت [۲۰].

در تحقیق موجود سعی شده‌است با مدل‌سازی اثرات خاک زیر فونداسیون بر سازه به وسیله سیستم فنرهای گسترده، اثرات اندرکنش خاک و سازه بر پدیده لنگی برشی مشخص شود. همچنین تغییرات ناشی از وجود اندرکنش خاک و سازه بر توزیع نیروها، مقدار تغییر شکل‌ها و روند تشکیل مفصل‌های پلاستیک تعیین شده‌است. در ادامه نیز مقایسه‌هایی بین نتایج تحلیل خطی و غیرخطی صورت گرفته‌است و همچنین میزان اثرات P-Delta بر نتایج تحلیل بارافزون استاتیکی غیرخطی بررسی شده‌است.

۲- مدل‌سازی

در این تحقیق با توجه به حجم مدل‌سازی و ابعاد سازه، همچنین عدم امکان مدل‌سازی دو بعدی جهت بررسی رفتار لنگی برشی، مدل‌سازی در محیط نرم‌افزار SAP2000 انجام شده‌است تا امکان تحلیل خطی و غیرخطی برای سازه مورد نظر امکان‌پذیر باشد. به منظور بررسی اثر اندرکنش خاک و سازه بر پدیده لنگی برشی در ساختمان‌های لوله‌ای بتن مسلح، یک ساختمان ۵۰ طبقه بتنی با سیستم سازه‌ای لوله‌ای طراحی شده‌است. بطوریکه ستون‌های خارجی با فاصله کمی از یکدیگر قرار دارند و تیرهای عمیق محیطی این ستون‌ها را به هم متصل می‌کنند. ترکیب این تیرها و ستون‌های محیطی، ۴ قاب را در محیط ساختمان تشکیل می‌دهند که به همراه ستون‌های داخلی کلیه بارهای وارده بر سازه را، شامل بارهای ثقلی و بارهای جانبی، تحمل می‌کنند. در محاسبات طراحی که برای یک ساختمان مسکونی انجام شده، آیین‌نامه ACI-318-11 [۲۱] استفاده شده‌است. تعیین مشخصات تحلیل‌های غیرخطی با استفاده از آیین‌نامه FEMA 356 [۲۲] انجام شده‌است. همچنین برای مدل‌سازی اثرات اندرکنش خاک و سازه در زیر فونداسیون سازه آیین‌نامه NIST GCR 12-917-21 [۲۳] مورد استفاده قرار گرفته‌است.

ساختمان مورد نظر دارای ارتفاع ۱۵۰ متر است با پلان مربعی به ابعاد ۳۶ متر × ۳۶ متر، که ستون‌های خارجی با فاصله مرکز به مرکز ۲ متر و ستون‌های داخلی با فاصله مرکز به مرکز ۶ متر از یکدیگر قرار دارند. در شکل ۱-ب پلان چیدمان تیرها و ستون‌ها مشاهده می‌شود. همچنین بارهای مرده و زنده اعمال شده بر طبقات به ترتیب برابر با ۷۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع می‌باشد. ابعاد تیرها و ستون‌های این ساختمان در جدول ۱ ارائه شده‌است. برای تعیین اثرات اندرکنش خاک و سازه دو مدل مورد نیاز است. مدل شماره ۱

ساختمانی است با مشخصات گفته شده و با سیستم لوله‌ای که در آن تمامی اتصالات ستون‌ها به زمین به صورت کاملاً گیردار فرض شده است و هیچگونه تغییرمکان و یا دوران در تکیه‌گاه‌ها اتفاق نمی‌افتد. در این تحقیق از این مدل با عنوان ((مدل تکیه‌گاه‌های گیردار)) یاد می‌شود. در مدل تکیه‌گاه‌های گیردار فونداسیون ساختمان کاملاً گیردار است و هیچ حرکتی در خاک ندارد. در واقع در این مدل از اثر اندرکنش خاک و سازه صرف نظر شده است.

جدول ۱: جزئیات المان‌های ساختمان بر حسب طبقات

شماره طبقه	ستون‌های داخلی			ستون‌های خارجی			تیرهای خارجی		
	ابعاد (cm)	درصد آرماتورهای طولی	مساحت آرماتورهای برشی در واحد طول ($10^{-3} m^2$)	ابعاد (cm)	درصد آرماتورهای طولی	مساحت آرماتورهای برشی در واحد طول ($10^{-3} m^2$)	ابعاد (cm)	درصد آرماتورهای طولی	مساحت آرماتورهای برشی در واحد طول ($10^{-3} m^2$)
۵۰ - ۴۷	۴۰ × ۴۰	۳٫۹۸	۱٫۷	۴۰ × ۴۰	۳٫۹۸	۱٫۷	۴۰ × ۶۰	۰٫۸۴	۲٫۵
۴۶ - ۴۵				۵۰ × ۵۰	۳٫۴	۲٫۲			
۴۴	۵۰ × ۵۰	۴٫۲۵	۱٫۹	۵۰ × ۵۰	۴٫۵	۲٫۶	۵۰ × ۷۰	۰٫۷۸	۳٫۳
۴۳ - ۴۱									
۴۰	۷۰ × ۷۰	۳٫۰۳	۲٫۲	۶۰ × ۶۰	۲٫۹۵	۳	۶۰ × ۸۰	۰٫۶۳	۳٫۶
۳۹ - ۳۷									
۳۶	۹۰ × ۹۰	۲٫۶۲	۲٫۷	۷۰ × ۷۰	۲٫۶	۳٫۹	۶۰ × ۱۰۰	۰٫۴۹	۳٫۳
۳۵ - ۳۳									
۳۲ - ۲۷	۱۱۰ × ۱۱۰	۲٫۱۱	۳	۸۰ × ۸۰	۳٫۴۷	۴٫۲	۶۰ × ۱۰۰	۰٫۴۹	۳٫۳
۳۱ - ۲۹									
۲۶ - ۲۵	۱۳۰ × ۱۳۰	۱٫۶۲	۳٫۵	۹۰ × ۹۰	۲٫۹۹	۴٫۶	۶۰ × ۱۰۰	۰٫۴۹	۳٫۳
۲۴									
۲۳ - ۱۹	۱۱۰ × ۱۱۰	۲٫۱۱	۳	۸۰ × ۸۰	۳٫۴۷	۴٫۲	۶۰ × ۱۰۰	۰٫۴۹	۳٫۳
۱۸ - ۱۳									
۱۲ - ۷	۱۳۰ × ۱۳۰	۱٫۶۲	۳٫۵	۹۰ × ۹۰	۲٫۹۹	۴٫۶	۶۰ × ۱۰۰	۰٫۴۹	۳٫۳
۶ - ۴									
۳ - ۱	۱۳۰ × ۱۳۰	۱٫۶۲	۳٫۵	۹۰ × ۹۰	۲٫۹۹	۴٫۶	۶۰ × ۱۰۰	۰٫۴۹	۳٫۳
۲ - ۱									

مدل شماره ۲ کاملاً مشابه مدل تکیه‌گاه‌های گیردار است با این تفاوت که در آن اثر اندرکنش خاک و سازه در نظر گرفته شده است. برای انجام این کار در نرم‌افزار SAP2000 صفحه‌ای به ضخامت ۳ متر و با ابعاد ۴۲×۴۲ متر از جنس بتن مسلح در خاک زیر ساختمان قرار گرفته است. این صفحه بتنی که نمایانگر فونداسیون سازه می‌باشد با اتصالات گیردار به ستون‌ها متصل است و برای شبیه‌سازی حرکات فونداسیون در خاک، بین این صفحه بتنی و زمین زیر آن اتصالات فنری به صورت قائم وجود دارند. این فنرها سختی خاک در برابر حرکت فونداسیون در خاک را نشان می‌دهند. در ادامه از این مدل با عنوان ((مدل فونداسیون و فنر)) یاد می‌شود.

در واقع در مدل فونداسیون و فنر، ساختمان بتنی ۵۰ طبقه و فونداسیون زیر آن به صورت یک‌تکه عمل می‌کنند و با تغییرمکان یا دوران فونداسیون در خاک، کل سازه حرکت می‌کند. به منظور روشن شدن اثر سختی خاک بر حرکت فونداسیون، فنرهای گسترده در زیر فونداسیون با ۴ سختی متفاوت مدل شده‌اند که سختی آنها با توجه به تحقیقات گذشته و خواص ژئوتکنیکی خاک‌های مختلف همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود در محدوده ۱۵۰۰ تا ۳۰۰۰ تن بر مترمکعب در نظر گرفته شده است.

جدول ۲: سختی خاک در مدل‌های مختلف

شماره خاک	سختی فنر (تن بر مترمکعب)
۱	۱۵۰۰
۲	۲۰۰۰
۳	۲۵۰۰
۴	۳۰۰۰

در اولین تحلیل انجام گرفته بر روی مدل‌ها، بارهای جانبی با استفاده از روش تحلیل طیفی خطی به مدل اعمال شده‌اند. در این مرحله برای تعیین اثر اندرکنش خاک و سازه، بارهای جانبی یک‌بار به مدل تکیه‌گاه‌های گیردار و یک‌بار به مدل فونداسیون و فنر اعمال شده‌اند. از مقایسه تغییر مکان‌های جانبی و نیروی محوری ستون‌ها در این دو حالت اثرات اندرکنش خاک و سازه بدست آمده‌است.

دومین مرحله در تحلیل مدل‌ها به تحلیل بارافزون استاتیکی غیرخطی اختصاص دارد که عملیات تحلیل و مقایسه تغییر مکان‌های جانبی و نیروهای محوری ستون‌ها برای تعیین اثرات اندرکنش خاک و سازه، مشابه با عملیات انجام گرفته در تحلیل اول است با این تفاوت که رفتار غیرخطی مصالح در نظر گرفته شده‌است. در این مرحله فقط بارهای جانبی وارد بر سازه مورد نظر بوده‌است و از بارهای ثقلی چشم‌پوشی شده‌است تا اثر خالص بارهای جانبی و رفتار لوله‌ای سازه مشاهده شود. در همه تحلیل‌ها تا این مرحله رفتار لوله‌ای مدل‌ها در شرایط اعمال بارهای جانبی خالص بررسی شده‌است تا مقایسه بین نتایج تحلیل طیفی و تحلیل بارافزون استاتیکی غیرخطی و همچنین تعیین اثر اندرکنش خاک و سازه بر پدیده لنگی برشی با سهولت بیشتری انجام شود. در تحلیل غیرخطی تعریف مشخصات مفصل‌های پلاستیک طبق ضوابط آیین‌نامه FEMA 356 انجام شده و محل تشکیل مفصل‌های پلاستیک در دو سر تیرها و ستون‌های سازه در نظر گرفته شده‌است. مفصل‌های پلاستیک تعریف شده برای تیرها از نوع درجه آزادی M3 و برای ستون‌ها از نوع درجه آزادی PM3 است که با توجه به نتایج تحلیل و براساس لنگر خمشی بحرانی تر انتخاب شده‌است. با توجه به اینکه با در نظر گرفتن ابعاد و دهانه تیرها، یعنی وجود تیرهای عمیق محیطی با طول نسبتاً کوتاه ۲ متر، و با مشاهده رفتار کلی سازه مشخص می‌شود که در این دهانه‌ها اجزا رفتار خمشی دارند در نتیجه احتمال تشکیل مفصل پلاستیک خمشی بیشتر از برشی است. در تحلیل بارافزون استاتیکی غیرخطی ابتدا بارهای ثقلی شامل بارهای مرده و زنده به سازه اعمال می‌شوند و پس از آن اعمال بارهای جانبی ناشی از زلزله آغاز می‌شود. بار جانبی متناسب با شکل مود اول و در چند مرحله به سازه وارد می‌شود تا زمانی که شرایط سازه به حد خرابی تعریف شده برای سازه برسد. با افزایش تدریجی بار جانبی ناشی از زلزله، یک مفصل پلاستیک طبق تعریف آیین‌نامه FEMA 356 به ترتیب در چند مرحله تشکیل می‌شود [۲۲]. حد‌های رفتار پلاستیک ایجاد شده در این مراحل در جدول ۳ مشاهده می‌شوند. در تحلیل‌های غیرخطی انجام شده حد خرابی سازه تخریب اولین مفصل پلاستیک و رسیدن به حد C (collapse) در نظر گرفته شده‌است.

جدول ۳: مراحل تشکیل مفصل پلاستیک

شماره مرحله	حد رفتار پلاستیک	عنوان کامل
۱	IO	Immediate Occupancy
۲	LS	Life Safety
۳	CP	Collapse Prevention
۴	C	Collapse

در آخرین مرحله تحلیل هدف تعیین مقدار اثر P-Delta بر نتایج حاصل از تحلیل غیرخطی مدل‌ها است. بنابراین در این حالت تحلیل بارافزون استاتیکی غیرخطی با در نظر گرفتن تمامی بارهای وارد بر سازه، انجام می‌گیرد. برای تعیین اثر P-Delta تحلیل بارافزون استاتیکی غیرخطی یک‌بار با در نظر گرفتن رفتار P-Delta و یک‌بار بدون آن انجام می‌شود. نتیجه دیگری که از این تحلیل بدست می‌آید مشاهده روند تشکیل مفصل‌های پلاستیک در حالت‌های مختلف و مقایسه آنها با یکدیگر می‌باشد.

۳- تفسیر نتایج

۳-۱- نتایج تحلیل خطی

۳-۱-۱- اثر اندرکنش خاک و سازه بر لنگی برشی

برای مشاهده تغییرات پدیده لنگی برشی در دو مدل یادشده، باید نیروهای محوری ستون‌های جانبی را در این مدل‌ها و برای هر طبقه با هم مقایسه کرد. این مقایسه نحوه توزیع نیروهای کششی و فشاری را بین ستون‌های جانبی کاملاً نمایش می‌دهد. به دلیل اهمیت اثرات لنگی برشی در طبقات پایه و به منظور روشن شدن تغییرات لنگی برشی، ستون‌های طبقه دوم ساختمان برای انجام این مقایسه انتخاب

شده‌اند. در نمودار شکل ۲-الف توزیع نیروها بین ستون‌های طبقه دوم در مدل تکیه‌گاه‌های گیردار و مدل فونداسیون و فنر با ۴ سختی مختلف نشان داده شده‌است. این نمودار نیروی محوری ستون‌های قاب عمود بر جهت نیروهای جانبی (قاب بال) را نمایش می‌دهد. طبق نمودار شکل ۲-الف نیروی محوری ستون گوشه در مدل تکیه‌گاه‌های گیردار بیشتر از نیروی محوری ستون گوشه در مدل‌های فونداسیون و فنر است. هرچه سختی فنر افزایش یافته‌است نیروی محوری ستون گوشه هم افزایش می‌یابد. همچنین نیروی محوری ستون‌های میانی در مدل تکیه‌گاه‌های گیردار کمتر از نیروی محوری ستون‌های میانی در مدل فونداسیون و فنر است و هرچه سختی فنر بیشتر شده نیروی محوری ستون‌های میانی کاهش یافته‌است.

با این فرض که مدل تکیه‌گاه‌های گیردار همان مدل فونداسیون و فنر با سختی بی‌نهایت است می‌توان نتیجه گرفت که هرچه سختی خاک بیشتر شود نیروی محوری ستون گوشه افزایش یافته و نیروی محوری ستون‌های میانی کمتر شده‌است. به‌طور کلی با کاهش سختی خاک، بدلیل تغییر شکل‌های خاک زیر فونداسیون در محل ستون‌های گوشه که تمرکز تنش زیادی وجود دارد، تنش محوری ستون‌های گوشه به ستون‌های میانی منتقل می‌شود و توزیع نیروی محوری بین ستون‌های محیطی یکنواخت‌تر می‌شود و در نتیجه لنگی برشی کاهش می‌یابد.

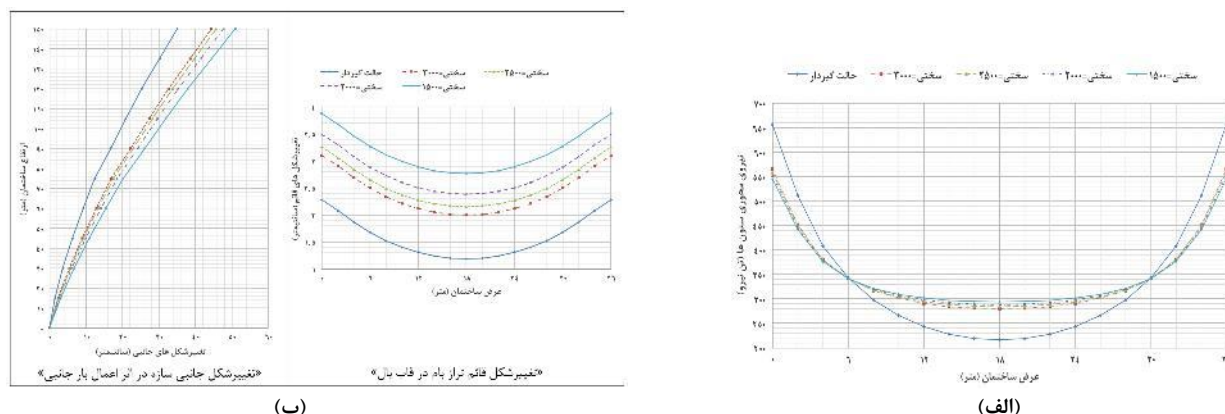
۳-۱-۲- اثر اندرکنش خاک و سازه بر تغییر شکل قائم و جانبی

اندرکنش خاک و سازه علاوه بر لنگی برشی بر تغییر شکل‌های قائم و جانبی سازه نیز تاثیر دارد. نمودار شکل ۲-ب تغییر شکل قائم تراز بام را در مدل تکیه‌گاه‌های گیردار و مدل‌های فونداسیون و فنر نشان می‌دهد. این نمودار تراز بام را در قاب بال نشان می‌دهد. تغییر شکل قائم هر نقطه از تراز بام، ترکیبی از جابه‌جایی قائم فونداسیون و تغییر شکل محوری ستون‌ها است. با توجه به این نمودار مشخص می‌شود که هرچه سختی خاک کاهش یافته‌است تغییر شکل قائم در تراز بام افزایش می‌یابد ولی این افزایش فقط به دلیل تغییر شکل محوری ستون‌ها نیست. برای مثال تغییر شکل قائم تراز بام در مدل تکیه‌گاه‌های گیردار برابر با تغییر شکل محوری ستون‌ها است چون در این حالت فونداسیون گیردار است و هیچ‌گونه تغییر شکلی ندارد.

هرچه سختی خاک کاهش می‌یابد و از حالت گیردار فاصله می‌گیرد، تغییر شکل‌های قائم فونداسیون هم به تغییر شکل محوری ستون‌ها اضافه می‌شوند. در واقع تفاوت بین منحنی مدل تکیه‌گاه‌های گیردار و منحنی‌های مدل فونداسیون و فنر در این نمودارها، تقریباً برابر با تغییر شکل قائم فونداسیون است و هرچه سختی خاک کمتر می‌شود این اختلاف افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده افزایش تغییر شکل قائم فونداسیون است.

به دلیل دوران کل ساختمان و به دلیل تغییراتی که در نیروی محوری ستون‌ها در مدل فونداسیون و فنر نسبت به مدل تکیه‌گاه‌های گیردار اتفاق می‌افتد اختلاف این دو منحنی دقیقاً برابر با تغییر شکل قائم فونداسیون نیست. به‌طور کلی با کاهش سختی خاک و افزایش اندرکنش خاک و سازه، تغییر شکل قائم فونداسیون افزایش می‌یابد. به همین ترتیب می‌توان تغییر شکل‌های جانبی سازه را در اثر اعمال بارهای جانبی بررسی کرد.

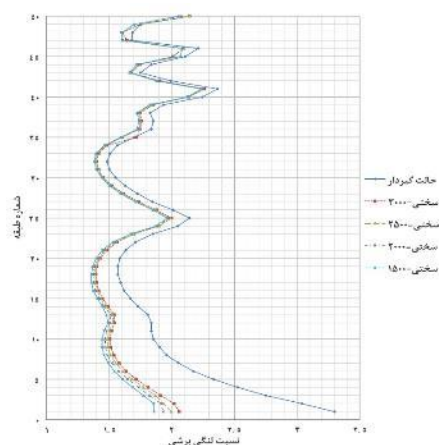
در نمودار شکل ۲-ب رابطه بین سختی خاک و میزان تغییر شکل‌های جانبی سازه مشاهده می‌شود. هرچه سختی خاک افزایش یافته‌است مقدار تغییر شکل جانبی کاهش می‌یابد. در حالت گیردار تغییر شکل جانبی ایجاد شده تنها به دلیل خمش ستون‌ها بوده‌است زیرا در این حالت فونداسیون هیچ حرکتی ندارد، در حالی که در مدل فونداسیون و فنر این تغییر شکل‌ها هم به دلیل خمش ستون‌ها است و هم به دلیل دوران فونداسیون. در نتیجه هرچه سختی خاک کم می‌شود به دلیل افزایش دوران فونداسیون در خاک، تغییر شکل جانبی کل سازه در اثر نیروهای جانبی افزایش می‌یابد.



شکل ۲: توزیع نیرو و تغییر شکل‌ها در قاب بال؛ (الف) نیروی محوری ستون‌ها؛ (ب) تغییر شکل‌های قائم و جانبی در اثر اعمال بار جانبی

برابر است با نسبت نیروی محوری در ستون کناری طبقه به نیروی محوری در ستون میانی آن طبقه یا به عبارت دیگر نسبت بیشترین نیروی محوری به کمترین نیروی محوری ستون‌های یک طبقه. هرچه این مقدار بیشتر باشد نشان می‌دهد که اختلاف نیروی محوری ستون گوشه با نیروی محوری ستون میانی بیشتر است و شدت پدیده لنگی‌برشی بیشتر شده است. در حالت توزیع نیرو یکنواخت (رفتار لوله‌ای ایده‌آل) مقدار نسبت لنگی‌برشی برابر واحد است [۹ و ۱۱].

در نمودار شکل ۳ تغییرات نسبت لنگی‌برشی در ارتفاع ساختمان در مدل تکیه‌گاه‌های گیردار و در مدل‌های فونداسیون و فنر با ۴ سختی مختلف نشان داده شده است. هرچند طبق این نمودار مقادیر نسبت لنگی‌برشی در بعضی از طبقات بالا بیشتر از طبقات پایین است اما اهمیت لنگی‌برشی در طبقات پایین و طبقات میانی ساختمان بیشتر از طبقات بالایی آن است به این دلیل که در طبقات پایه نیروی برشی بیشتری نسبت به طبقات بالایی به سازه وارد می‌شود و مقدار نیروی محوری ستون‌ها در این طبقات خیلی بیشتر از طبقات بالایی است. همچنین اثرات اندرکنش خاک و سازه بر میزان لنگی‌برشی در ارتفاع سازه یکسان نیست و در طبقات پایین اثر آن بسیار قابل ملاحظه است در حالی که در طبقات میانی اثر آن کم است و در طبقات آخر ساختمان هیچ اثری ندارد.



شکل ۳: تغییرات نسبت لنگی‌برشی در ارتفاع ساختمان

در نمودار شکل ۳ مشاهده می‌شود که تغییرات نسبت لنگی‌برشی در ارتفاع سازه یکنواخت نیست و با فراز و نشیب زیادی همراه است. دلیل اصلی این تغییرات کوچکتر شدن مقاطع تیرها و ستون‌ها در ارتفاع سازه است. به این شکل که در طبقاتی که مقاطع تیرها و یا ستون‌ها دچار تغییر شده‌اند و نسبت به طبقه پایین خود دارای مقاطع کوچکتری هستند، به دلیل لاغری تیرها و یا ستون‌ها و کاهش

سختی آنها اثر لنگی برشی بیشتر شده و مقدار نسبت لنگی برشی به طور ناگهانی افزایش یافته است. همچنین به علت لاغری تیرها و ستون‌ها در طبقات بالایی ساختمان میانگین مقادیر نسبت لنگی برشی در این طبقات بیشتر از سایر طبقات است. مقایسه منحنی مدل تکیه‌گاه‌های گیردار با منحنی مدل فونداسیون و فنر نشان می‌دهد که اثر اندرکنش خاک و سازه باعث کاهش لنگی برشی شده و نسبت لنگی برشی نیز کاهش یافته است. دلیل اصلی این اتفاق این است که با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه مقدار نیروی محوری ستون‌های گوشه کاهش می‌یابد در حالیکه نیروی محوری ستون‌های میانی افزایش یافته است، در نتیجه نسبت لنگی برشی بیشتر می‌شود.

۳-۲- نتایج تحلیل غیرخطی

با توجه به اینکه در شرایط بارگذاری جانبی لرزه‌ای رفتار مصالح از حالت خطی خارج شده و غیرخطی می‌باشد؛ بررسی نتایج تحلیل با فرض رفتار غیرخطی مصالح بسیار حائز اهمیت است. نتایج بدست آمده در تحلیل غیرخطی شامل نیروی محوری ستون‌های جانبی، تغییر شکل‌های قائم و جانبی ساختمان و میزان لنگی برشی با نتایج حاصل از تحلیل خطی به لحاظ روند تغییرات پاسخ همخوانی دارند. به طور کلی نتایج تحلیل غیرخطی به دلیل در نظر گرفتن رفتار غیرخطی مصالح از دقت بیشتری برخوردار می‌باشد.

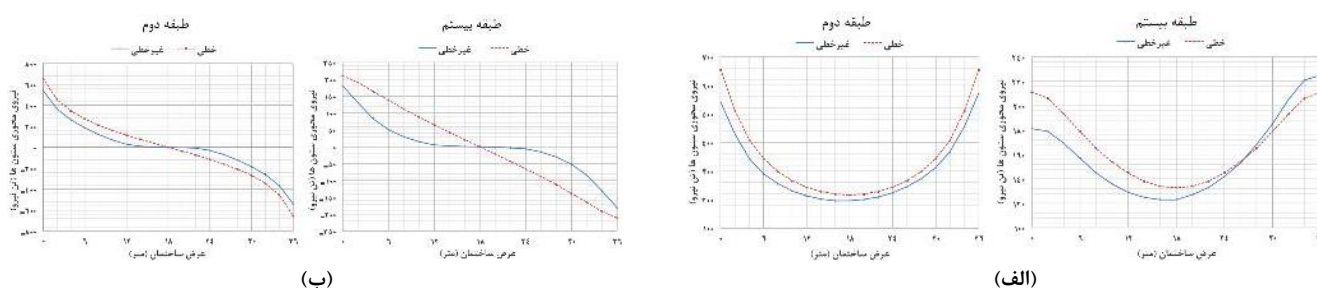
۳-۲-۱- نتایج تحلیل غیرخطی در شرایط اعمال بار جانبی خالص

در این تحقیق تحلیل غیرخطی انجام شده بر روی سازه به دو مرحله تقسیم شده است. در مرحله اول فقط بارهای جانبی ناشی از زلزله به سازه اعمال شده‌اند و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفته است. به این دلیل فقط بار جانبی به سازه وارد می‌شود که رفتار لوله‌ای سازه بهتر قابل مشاهده باشد بطوریکه یک قاب بال تحت کشش و قاب بال دیگر تحت فشار باشد. در این حالت پدیده لنگی برشی کاملاً قابل تشخیص است و مقایسه آن با نتایج بدست آمده از تحلیل خطی راحت‌تر انجام می‌شود. در مرحله دوم، هم بارهای ثقیلی و هم بار جانبی به سازه اعمال می‌شوند.

۳-۲-۱-۱- مقایسه نتایج تحلیل خطی و غیرخطی

با مقایسه مقادیر نیروی محوری ستون‌های جانبی و تغییر شکل‌های قائم و جانبی بدست آمده از تحلیل خطی با مقادیر تحلیل غیرخطی، تفاوت‌هایی که بین این دو تحلیل وجود دارد مشخص می‌شود. مقدار نیروی محوری ستون‌ها در قاب تحت کشش و قاب تحت فشار یکسان است و بررسی نتایج در هر کدام از قاب‌ها می‌تواند انجام شود. در ادامه از نتایج تحلیل‌هایی که بر روی مدل تکیه‌گاه‌های گیردار انجام شده است استفاده می‌شود تا اندرکنش خاک و سازه بر آن اثری نگذارد. مطابق نمودار شکل ۴-الف نیروی محوری ستون‌های قاب بال در تحلیل خطی بیشتر از تحلیل غیرخطی است.

به طور کلی در تحلیل غیرخطی نیروها کمتر و تغییر شکل‌ها بیشتر است. همچنین اختلاف بین نیروی محوری ستون‌های قاب بال در تحلیل خطی و غیرخطی در ارتفاع ساختمان یکسان نیست و دچار تغییر می‌شود به طوری که نسبت تغییرات نیروی محوری ستون‌ها در طبقه بیستم بیشتر از این مقدار در ستون‌های طبقه دوم است و اختلاف بین تحلیل خطی و غیرخطی بیشتر شده است. طبق نمودار شکل ۴-ب نیروی محوری ستون‌های قاب جان نیز همانند قاب بال، در تحلیل خطی بیشتر از تحلیل غیرخطی است. در قاب جان نیز بیشترین اختلاف بین نتایج تحلیل خطی و غیرخطی مربوط به طبقات یک سوم میانی ساختمان می‌شود. این اختلافات رابطه مستقیمی با تشکیل مفصل‌های پلاستیک در ساختمان دارد که در ادامه به طور کامل به آن پرداخته می‌شود.



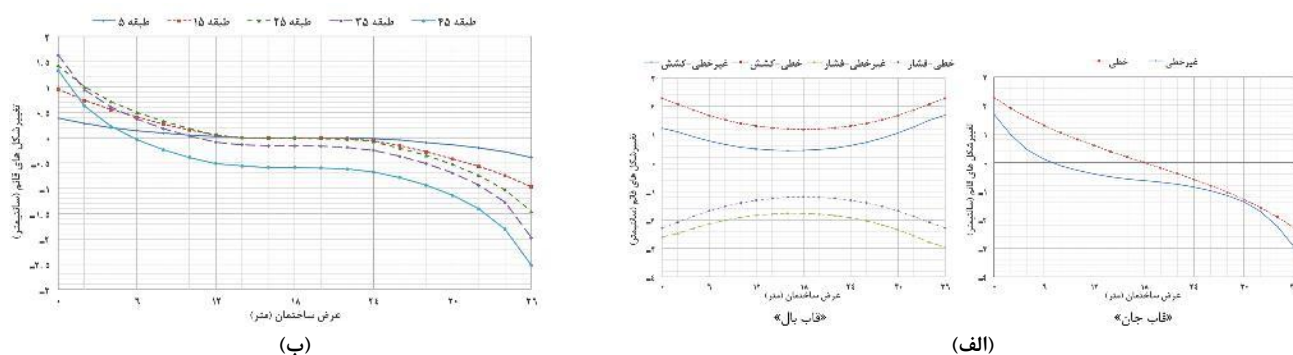
شکل ۴: نیروی محوری ستون‌های الف) قاب بال و ب) قاب جان

۳-۲-۱-۲- اثر تشکیل مفصل‌های پلاستیک بر تغییر شکل‌های قائم و جانبی

یکی از تفاوت‌های اساسی بین تحلیل غیرخطی و تحلیل خطی، در نظر گرفتن تشکیل مفصل‌های پلاستیک در نقاط حساس سازه است که این موضوع باعث می‌شود نتایج تحلیل خطی و غیرخطی با هم متفاوت باشند. رفتاری که در بام ساختمان مورد انتظار است رفتاری متقارن است و اختلاف زیادی با تحلیل خطی ندارد، ولی بررسی نتایج نشان می‌دهد که در عمل رفتار بام بسیار متفاوت است. در بررسی‌هایی که در ادامه انجام می‌شود از نتایج تحلیل بر روی مدل تکیه‌گاه‌های گیردار استفاده شده است تا از اثر اندرکنش خاک و سازه بر مقایسه نتایج تحلیل خطی و غیرخطی جلوگیری شود.

مقایسه تغییر شکل بام بر اثر اعمال نیروی جانبی در دو حالت خطی و غیرخطی در نمودارهای شکل ۵-الف نمایش داده شده است. در این نمودارها مشاهده می‌شود که در قاب بال تحت کشش تغییر شکل قائم بام در تحلیل غیرخطی کوچک‌تر از تحلیل خطی است در حالی که در قاب بال تحت فشار این مقدار در تحلیل غیرخطی بزرگ‌تر از تحلیل خطی است.

بررسی دقیق‌تر نتایج نشان می‌دهد که تغییر شکل‌های قائم در سقف طبقات تا طبقه سی‌ام ساختمان کاملاً متقارن است، پس از آن در طبقات بالایی و به تدریج این تقارن در تغییر شکل‌ها از بین می‌رود و سقف طبقات هم در قسمت تحت فشار و هم در قسمت تحت کشش به سمت پایین کشیده می‌شود. روند این تغییرات در شکل ۵-ب نمایش داده شده است. دلیل اصلی این تغییر شکل‌ها تشکیل مفصل‌های پلاستیک در طبقات بالاست. تشکیل مفصل پلاستیک در یک عضو با افزایش خمش وارد شده به آن از زمان جاری شدن دورترین تار مقطع تا زمان جاری شدن تمامی تارهای مقطع و تخریب کامل، به چند مرحله تقسیم می‌شود.



شکل ۵: تغییر شکل‌های قائم الف) تراز بام در تحلیل خطی و غیرخطی و ب) تراز سقف طبقات مختلف در قاب جان

با انجام تحلیل غیرخطی بر روی مدل تکیه‌گاه‌های گیردار و اعمال بار جانبی به سازه، مفصل‌های پلاستیک در دو سر تیرها تشکیل می‌شوند. در این مدل مفصل‌ها به تعداد زیادی در قاب‌های جان تشکیل شده‌اند و در قاب‌های بال تعداد بسیار کمی مفصل پلاستیک بوجود می‌آید که دلیل اصلی آن تغییر شکل بیشتر و وجود لنگر خمشی بیشتر در تیرهای قاب جان است.

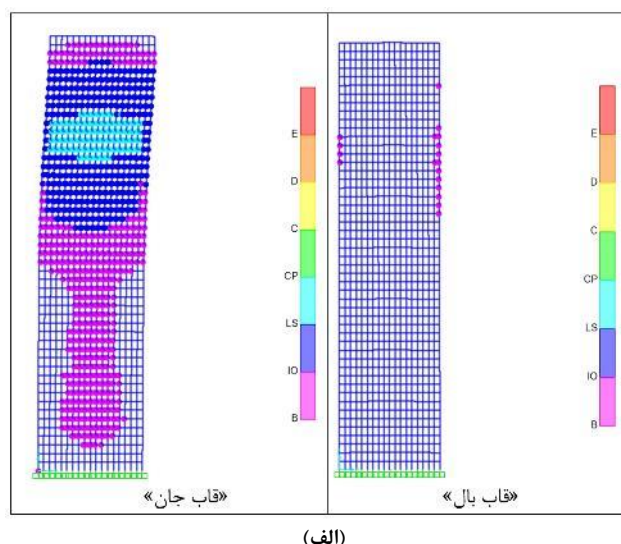
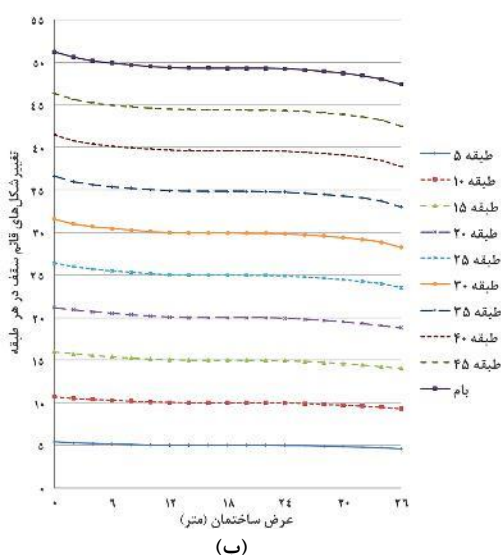
همانطور که در شکل ۶-الف مشاهده می‌شود در نیمه پایین ساختمان مفصل‌های پلاستیک حد IO در تیرهای میانی قاب جان تشکیل می‌شوند. از حدود طبقه بیست و پنجم تا طبقه سی و پنجم ساختمان مفصل‌های پلاستیک تشکیل شده در تیرهای جانبی از نوع سطح عملکرد LS هستند. از طبقه سی و پنجم تا طبقه چهارم مفصل‌های پلاستیک حد CP تشکیل شده‌اند که در آستانه گسیختگی قرار دارند و دو سر تیرها تقریباً رفتاری شبیه به یک مفصل خواهند داشت. در طبقات چهارم تا پنجم مفصل‌های پلاستیک با سطح عملکرد LS بوجود آمده‌اند و در طبقات بالاتر مفصل‌های حد IO تشکیل شده‌اند.

وجود تعداد زیادی مفصل پلاستیک با سطح عملکرد LS و CP در یک سوم بالایی ساختمان، به خصوص در طبقات سی و پنجم تا چهارم که مفصل‌های پلاستیک حد CP به صورت متمرکز قرار گرفته‌اند، باعث ایجاد تغییر شکل‌های زیادی در نیمه بالایی ساختمان می‌شود. تعداد مفصل‌های پلاستیک با سطح عملکرد بالا در یک قسمت خاص از قاب جان و قرار گرفتن آنها در کنار هم به‌طور متوالی باعث می‌شود

که تیرهای جانبی کارایی خود را از دست بدهند و این موضوع می‌تواند در قسمتی از ساختمان که تیرها به ظرفیت خمشی نهایی خود رسیده‌اند مشکلاتی را ایجاد کند.

زمانی که قسمتی از یک سازه توانایی تحمل تمامی بارهای وارده را ندارد، اجزای دیگر سازه می‌توانند در تحمل بارهای بیش از حدی که به آن قسمت از سازه وارد شده‌است، همکاری کنند. یکی از عواملی که از گسیختگی کامل در این ناحیه جلوگیری می‌کند و باعث حفظ مقاومت سازه می‌شود، تیرهایی از قاب بال هستند که به قاب جان متصل‌اند و آن را نگه می‌دارند. وجود مفصل‌های پلاستیک به‌خصوص در طبقات سی و پنجم تا چهارم از قاب بال، همان طبقاتی که مفصل‌های پلاستیک حد CP به تعداد زیادی در قاب جان ایجاد شده بودند، نشان‌دهنده همین موضوع است (شکل ۶-الف).

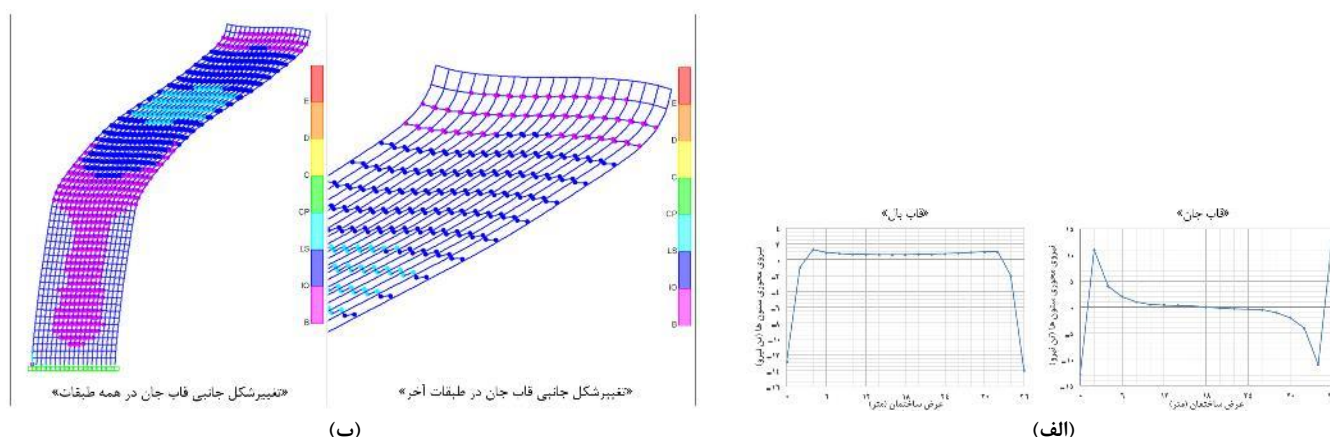
مقایسه تغییرشکل قائم سقف طبقات مختلف ساختمان با یکدیگر در شکل ۶-ب نمایش داده شده‌است. در این شکل مشاهده می‌شود که تغییرشکل قائم سقف طبقات تا طبقه بیست و پنجم کاملاً متقارن است و تغییرشکل قسمت کششی سقف با بخش فشاری آن برابر است. از همین طبقه تشکیل مفصل‌های پلاستیک با سطح عملکرد بالاتر آغاز شده و باعث ایجاد تغییرشکل بیشتر در سقف شده‌است. همچنین مقایسه تغییرمکان جانبی ساختمان در سقف طبقات در تحلیل خطی و غیرخطی نشان می‌دهد که در نیمه بالایی ساختمان اختلاف زیادی بین نتایج تحلیل خطی و غیرخطی وجود دارد. در این مورد هم می‌توان اصلی‌ترین دلیل را وجود مفصل‌های پلاستیک با سطح رفتار پلاستیک بالا در نیمه بالایی ساختمان دانست.



شکل ۶: مفصل‌های پلاستیک و تغییرشکل سقف طبقات؛ الف) مفصل‌های پلاستیک تشکیل شده بر اثر اعمال بار جانبی؛ ب) تغییرات تغییرشکل قائم سقف طبقات مختلف در ارتفاع ساختمان

نیمه فشاری ساختمان تحت کشش و در نیمه کششی ساختمان تحت فشار قرار گرفته‌اند. در شکل ۷-الف نیروی محوری ستون‌های خارجی در طبقه پنجاهم نشان داده شده‌است.

با توجه به کاهش نیروی جانبی در طبقات بالایی ساختمان، سختی این طبقات که منجر به حفظ شکل اولیه سازه در این طبقات می‌شود و مقاومت بالای قاب‌های بال، عملاً انحنای تغییرشکل سازه در ۷ طبقه فوقانی در جهت عکس ایجاد شده‌است (شکل ۷-ب). این پدیده باعث می‌شود ستون‌های کناری واقع در قاب‌های جان با نیروی جهت عکس ستون‌های مجاور وارد عمل شوند. این اتفاق در حالت خطی فقط در ۳ طبقه انتهایی ساختمان قابل مشاهده است. در این حالت به دلیل رفتار خطی و عدم تشکیل مفصل‌های پلاستیک عملاً تغییرشکل کلی سازه کمتر شده‌است و تفاوت رفتاری کمتری بین قاب‌های بال و جان ایجاد می‌شود.



شکل ۷: توزیع نیروها و تغییر شکل ساختمان؛ الف) نیروی محوری ستون‌های جانبی در طبقه پنجاهم؛ ب) جزئیات تغییر شکل اجزای قاب جان در اثر اعمال بار جانبی

علت تغییر شکل نامتقارن طبقات فوقانی در شکل ۶-ب را نمی‌توان تنها در نیروی محوری ستون‌های محیطی طبقات مجاور جست‌وجو کرد بلکه تغییر شکل‌های نامتقارن ایجاد شده ترکیبی هستند از تغییر شکل سازه در طبقاتی که مفاصل پلاستیک باعث ایجاد تغییر شکل‌های بزرگی شده‌اند و تغییر شکل سازه در طبقات فوقانی که تمایل دارند با انحنای معکوس تشکیل شوند. ترکیب این تغییر شکل‌ها با هم رفتار کلی سازه را تشکیل می‌دهد که در بام نمود آن در یک گوشه سازه به صورت کشش و در باقی ستون‌ها به صورت فشار است. به عبارت دیگر قسمتی از تغییر شکل‌ها ناشی از نیروی برشی وارد بر سازه است و قسمتی دیگر تغییر شکل‌هایی هستند که به صورت تجمعی و به شکل تحمیلی از سوی طبقات پایینی به تغییر شکل‌های نیمه بالایی سازه افزوده می‌شوند که باعث ایجاد مفصل‌های پلاستیک در این طبقات شده‌است. اما در طبقات یک‌سوم فوقانی ساختمان دلیل نیروی جانبی کمتری که به سازه وارد می‌شود سازه مقاومت بیشتری در برابر این تغییر شکل‌های تحمیلی نشان می‌دهد. در کل به دلیل تعداد طبقات زیاد سازه نمی‌توان ارتباط مستقیمی بین نیروی محوری ستون‌ها در طبقات یک‌سوم بالایی سازه و تغییر شکل نهایی متناظر با این المان‌های سازه برقرار کرد.

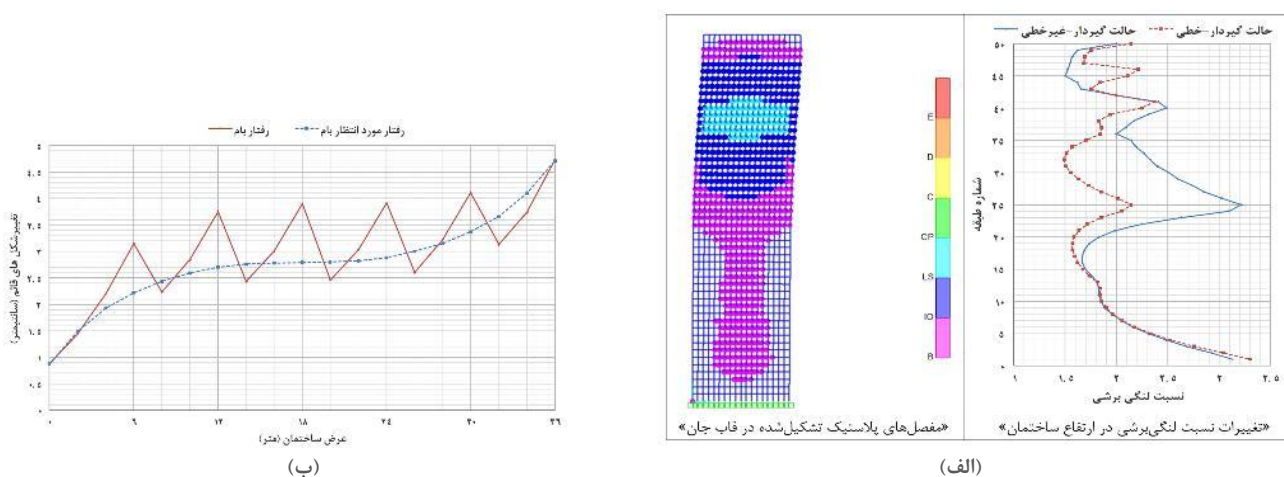
۳-۲-۱-۳- اثر تشکیل مفصل‌های پلاستیک بر لنگی برشی

به وجود آمدن مفصل‌های پلاستیک در اجزای ساختمان باعث ایجاد تغییرات قابل ملاحظه‌ای در رفتار سازه می‌شود. در شکل ۸-الف اختلاف بین تغییرات نسبت لنگی برشی در ارتفاع سازه برای تحلیل خطی و غیرخطی در مدل تکیه‌گاه‌های گیردار، به همراه تصویری از مفصل‌های پلاستیک ایجاد شده در قاب جان در اثر اعمال نیروی جانبی زلزله به ساختمان، نمایش داده شده‌است. هرچه از پایین سازه و اتصال گیردار ستون‌ها فاصله می‌گیریم ضامن عملکرد یکنواخت ستون‌ها رفتار خمشی تیرها است و اهمیت تیرها برای کاهش لنگی برشی بیشتر می‌شود. در نتیجه غیرخطی شدن رفتار مصالح و در نظر گرفتن تشکیل مفصل‌های پلاستیک در تیرها اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. همانطور که در شکل ۸-الف مشاهده می‌شود در قسمت پایینی ساختمان به علت گیردار بودن ستون‌ها و کاهش لنگر خمشی وارد بر تیرها، اختلاف زیادی بین نسبت لنگی برشی طبقات در تحلیل خطی و غیرخطی وجود ندارد. همچنین در قسمت بالایی ساختمان به دلیل نیروی برشی کم تفاوت چشمگیری در تغییرات نسبت لنگی برشی مشاهده نمی‌شود. اما در طبقات میانی ساختمان با توجه به تشکیل تعداد زیادی مفصل با حد رفتار پلاستیک LS و CP در نیمه بالایی ساختمان، عملاً بار بیشتری به تیرهای طبقات میانی برای جلوگیری از لنگی برشی وارد می‌شود که این بار اضافه در حالت غیرخطی به مراتب بیشتر از حالت خطی خواهد بود. در طبقات یک‌سوم فوقانی تیرها عملاً دچار تشکیل مفاصل پلاستیک شده‌اند و ستون‌ها در این طبقات آزادتر نسبت به یکدیگر جابه‌جا می‌شوند. آزادی عمل ستون‌ها و وجود تیرهایی که خمش وارد بر آنها بیشتر از ظرفیت نهایی‌شان است باعث می‌شود که نیروها از طبقات فوقانی که ظرفیت تحمل بار بیشتری را نداشته‌اند به طبقات پایین‌تر منتقل شوند. این اتفاقات مسبب تغییرات قابل ملاحظه در نسبت لنگی برشی در یک‌سوم میانی ساختمان می‌شوند.

۳-۲-۲- نتایج تحلیل غیرخطی با اعمال بارهای ثقلی و بار جانبی

در این تحقیق تحلیل غیرخطی در دو مرحله انجام شده است. در مرحله اول فقط بار جانبی زلزله به مدل‌ها اعمال شده است ولی در مرحله دوم هم بارهای ثقلی و هم بار جانبی به سازه وارد می‌شود. رفتار مدل‌ها در تحلیل مرحله دوم با تحلیل مرحله اول تفاوت زیادی دارد. با اضافه شدن بارهای ثقلی مشاهده می‌شود که دیگر هیچ یک از ستون‌ها تحت کشش نخواهند بود و همه نیروها فشاری شده است. در شکل ۸-ب رفتار پیش‌بینی شده بام طبق نتایج تحلیل غیرخطی مرحله اول نمایش داده شده است، درحالی‌که در عمل این پیش‌بینی نادرست است و بام رفتار متفاوتی نشان می‌دهد.

در شکل مشاهده می‌شود که تناوب زیادی در تغییر شکل قائم بام وجود دارد. با وجود اینکه بارهای ثقلی بین ستون‌های داخلی و خارجی تقسیم می‌شود، به دلیل بارهای ثقلی زیاد در این سازه و فشار بسیار زیادی که به ستون‌های داخلی ساختمان وارد می‌شود تمرکز تنش‌های فشاری در ستون‌های داخلی بیشتر از ستون‌های خارجی است. در نتیجه تغییر شکل‌های محوری در ستون‌های داخلی خیلی بیشتر از ستون‌های خارجی است. اختلاف تغییر شکل بین ستون‌های داخلی و ستون‌های خارجی باعث می‌شود که ستون‌های داخلی به کمک دال‌های سقف ستون‌های خارجی را به سمت پایین بکشند و باعث ایجاد تناوب‌هایی در سقف طبقات شوند. در این میان آن دسته از ستون‌های خارجی که دقیقاً در امتداد ستون‌های داخلی قرار گرفته‌اند با وجود اینکه بوسیله تیر به ستون‌های داخلی متصل نیستند، به این دلیل که در فشار بسیار بالا دال‌های سقف مانند تیر عمل می‌کنند، تحت اثر مستقیم تغییر شکل ستون‌های داخلی قرار می‌گیرند. در نتیجه این ستون‌ها نسبت به ستون‌های کناری خود بیشتر تحت فشار هستند و تغییر شکل بیشتری نشان می‌دهند.



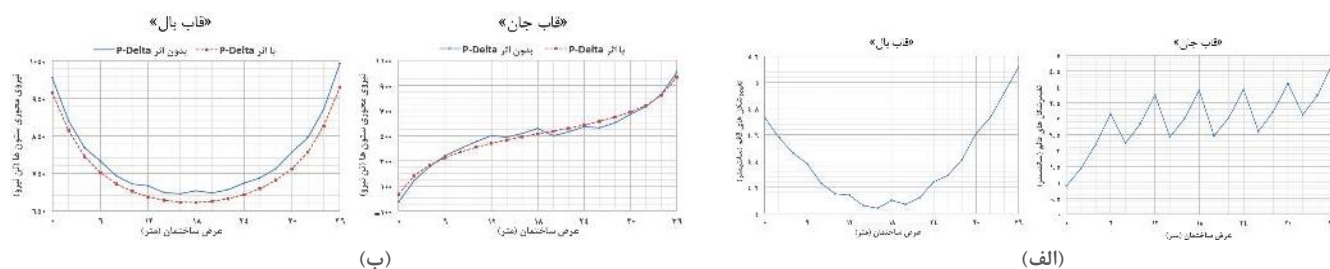
شکل ۸: اثر مفاصل پلاستیک و تغییر شکل بام؛ الف) اثر تشکیل مفاصل پلاستیک بر تغییرات نسبت لنگی برشی در ارتفاع ساختمان؛ ب) تغییر شکل‌های قائم فشاری بام در تحلیل‌های غیرخطی

بررسی نتایج نشان می‌دهد که در طبقات فوقانی به دلیل طول بیشتر ستون‌ها تا کف ساختمان، تغییر شکل‌های فشاری ستون‌های داخلی بیشتر است و ستون‌های خارجی بیشتر به سمت پایین کشیده می‌شوند. در ارتفاع ساختمان، اختلاف تغییرات تغییر شکل قائم سقف‌ها نسبت به طبقات پایین‌تر کمتر است که دلیل آن وجود بارهای ثقلی کمتر در طبقات بالا است ضمن اینکه نیروی محوری ناشی از اعمال بار جانبی نیز در ستون‌های طبقات بالا بسیار کمتر است. همچنین وجود مفاصل‌های پلاستیک به خصوص در سقف طبقات سی و پنجم تا چهل و پنجم باعث ایجاد شکستگی‌های بیشتر در نمودار شکل بالا در این طبقات شده و تغییر شکل‌ها را غیریکنواخت‌تر کرده است.

۳-۲-۲-۱- اثر P-Delta

تحلیل غیرخطی انجام شده در مرحله دوم به دو بخش تقسیم می‌شود. در بخش اول تحلیل از اثرات P-Delta صرف نظر شده است و در بخش دوم، تحلیل با در نظر گرفتن P-Delta انجام شده است. در ادامه برای جلوگیری از دخالت اثرات اندرکنش خاک و سازه در تعیین

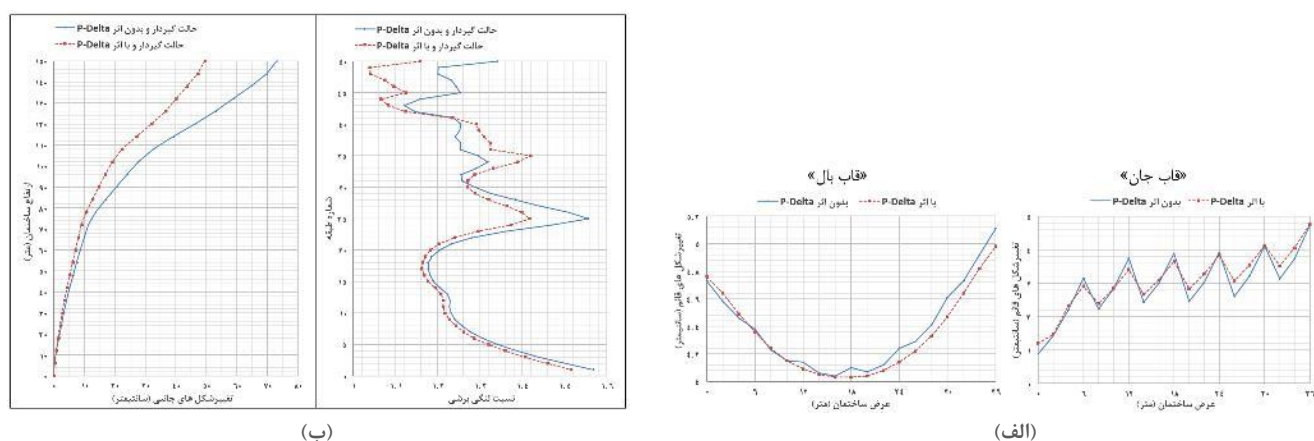
تاثیر اثرات ثانویه P-Delta بر نتایج، از مدل تکیه‌گاه‌های گیردار استفاده می‌شود. در شکل ۹-ب مشاهده می‌شود که در قاب بال نیروی محوری همه ستون‌های خارجی با در نظر گرفتن اثر P-Delta کم شده‌است. در قاب جان هم نیروی محوری در بعضی ستون‌ها بیشتر و در بعضی کمتر شده‌است. ولی بطور کلی اثر P-Delta باعث شده‌است تناوب‌هایی که در منحنی توزیع نیروی محوری بین ستون‌های خارجی وجود دارد به مقدار زیادی کاهش یابد و یکنواخت‌تر شود. با در نظر گرفتن P-Delta یک لنگر خمشی اضافی به نیروهای هر طبقه افزوده می‌شود که تفاوت بین نیروهای محوری ستون‌های داخلی و خارجی را کاهش می‌دهد.



شکل ۹: تغییر شکل‌های بام و اثر P-Delta بر نیروی محوری ستون‌ها؛ الف) تغییر شکل‌های قائم فشاری بام در قاب بال و قاب جان؛ ب) اثر P-Delta بر تغییرات نیروی محوری ستون‌های محیطی طبقه دوم ساختمان

در شکل ۱۰-الف تغییر شکل‌های قائم بام ساختمان هم با در نظر گرفتن P-Delta و هم بدون آن نشان داده شده‌است. تغییر شکل‌هایی که در این شکل مشاهده می‌شود فقط مربوط به تغییر طول ستون‌ها است زیرا فونداسیون هیچگونه تغییر شکلی نداشته‌است. همانطور که مشاهده می‌شود در قاب بال تغییر شکل‌ها با در نظر گرفتن P-Delta کاهش یافته‌است. در قاب جان دیده می‌شود که تناوب موجود در منحنی تغییر شکل‌های بام با در نظر گرفتن P-Delta کمتر شده‌است. به این دلیل که P-Delta باعث می‌شود نشست‌های ستون‌های جانبی بیشتر از حالت قبل شود و با ستون‌های داخلی همخوانی بیشتری داشته باشد. کاهش تناوب موجود در تغییر شکل‌های قائم، در قاب بال نیز مشاهده می‌شود به خصوص در ستون‌های میانی که یکنواخت‌تر شده‌اند.

همانطور که در شکل ۱۰-ب مشاهده می‌شود در نظر گرفتن اثرات ثانویه P-Delta باعث می‌شود تغییر شکل جانبی ساختمان با کاهش نسبتاً زیادی همراه باشد به این دلیل که سازه نسبت به محاسبات قبلی نیروهای بیشتری را تحمل کرده و پیش از رسیدن به تغییر مکان جانبی مورد انتظار تخریب شده‌است.



شکل ۱۰: اثر در نظر گرفتن P-Delta بر الف) تغییر شکل‌های قائم ساختمان در تراز بام و ب) تغییر شکل‌های جانبی ساختمان و نسبت لنگی برشی طبقات

در شکل ۱۰-ب تغییرات نسبت لنگی برشی در طبقات مختلف ساختمان نیز در دو حالت مشاهده می‌شود. نسبت لنگی برشی در طبقات نیمه پایین ساختمان با در نظر گرفتن P-Delta کاهش یافته است. در ده طبقه انتهایی سازه اثرات P-Delta باعث کاهش زیادی در نسبت لنگی برشی شده است. اثرات ثانویه P-Delta در کل باعث کاهش نیروها و تغییر شکل‌ها می‌شود که این کاهش در نیروی محوری ستون‌ها تا طبقات بالایی ساختمان ادامه دارد. در طبقات بالایی به دلیل کوچک بودن مقدار نیروها، این تغییرات بر نسبت لنگی برشی اثر بیشتری دارد. منحنی تغییرات نسبت لنگی برشی نشان می‌دهد که به طور کلی در اکثر طبقات مقدار نسبت لنگی برشی با در نظر گرفتن P-Delta کاهش یافته است و فقط در محدوده طبقات سی و پنجم تا چهلیم این مقدار بیشتر شده است.

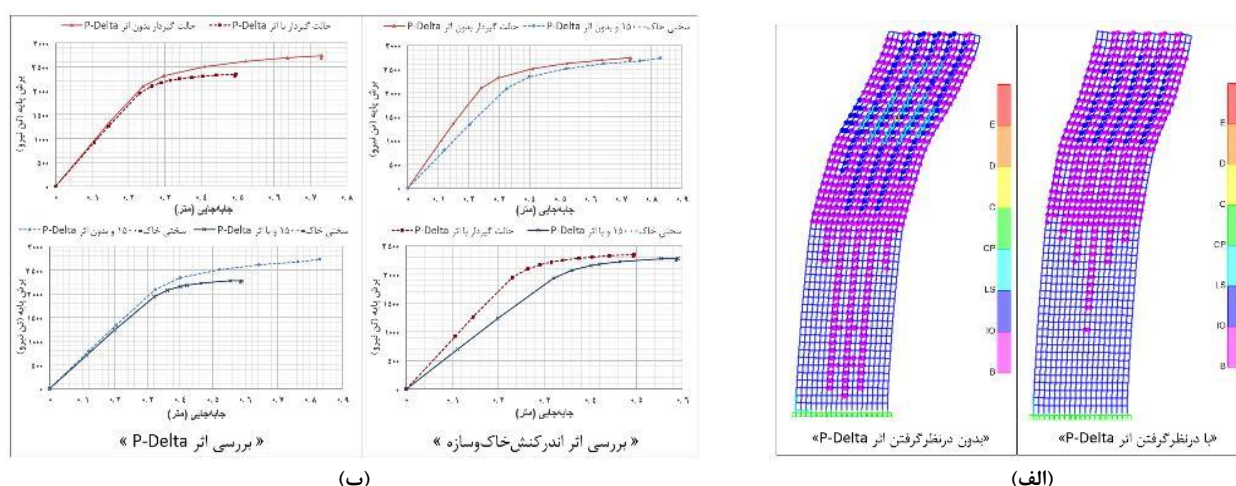
در شکل ۱۱-الف مشاهده می‌شود که اثرات ثانویه P-Delta چه تاثیری بر تشکیل مفصل‌های پلاستیک در قاب جان دارد. به طور کلی اثرات P-Delta باعث می‌شود که سازه نسبت به حالت قبل زودتر به حد نهایی مقاومتش برسد به همین دلیل اکثر مفصل‌های پلاستیک نسبت به حالت قبل در حد رفتار پلاستیک پایین تری قرار می‌گیرند.

۳-۲-۲-۲-۳- مقایسه منحنی‌های بدست آمده از تحلیل بارافزون استاتیکی غیرخطی

تحلیل غیرخطی مرحله دوم در دو بخش بر روی مدل تکیه‌گاه‌های گیردار و مدل فونداسیون و فنر با سختی ۱۵۰۰ تن بر مترمکعب انجام شده است. بخش اول بدون در نظر گرفتن اثرات P-Delta و بخش دوم با در نظر گرفتن آن بوده است. در نتیجه ۴ حالت مختلف شکل می‌گیرد که منحنی‌های بارافزون بدست آمده از این حالت‌ها در شکل ۱۱-ب با هم مقایسه شده‌اند. این مقایسه می‌تواند اثر P-Delta و اندرکنش خاک و سازه را بر نتایج تحلیل مشخص کند.

برای تعیین اثر P-Delta بهتر است که منحنی‌های بدست آمده از تحلیل بر روی مدل تکیه‌گاه‌های گیردار مقایسه شوند تا از دخالت اثر اندرکنش خاک و سازه جلوگیری شود. همچنین برای تعیین اثر اندرکنش خاک و سازه بهترین حالت مقایسه منحنی بدست آمده در تحلیل‌های انجام شده بدون اثرات ثانویه P-Delta است تا از دخالت اثر P-Delta جلوگیری شود.

طبق نمودارهای شکل ۱۱-ب، اثر P-Delta باعث می‌شود مقدار جابه‌جایی و برش پایه هر دو کم شوند که نشان می‌دهد سازه زودتر از حد معمول و با تغییر شکل کمتری نسبت به تحلیل‌های قبلی، به حد نهایی مقاومت خود می‌رسد. اثر اندرکنش خاک و سازه باعث افزایش جابه‌جایی می‌شود بدون اینکه اثر زیادی بر مقدار برش پایه بگذارد که نشان‌دهنده دوران فونداسیون در خاک است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که اثر P-Delta در زمانی که اثرات اندرکنش خاک و سازه در نظر گرفته شده است، بیشتر است. همچنین می‌توان گفت که با در نظر گرفتن اثرات P-Delta، اثر اندرکنش خاک و سازه بر نتایج کمی بیشتر خواهد شد.



شکل ۱۱: اثر P-Delta بر (الف) نحوه توزیع مفصل‌های پلاستیک در قاب جان و (ب) منحنی‌های Pushover بدست آمده از تحلیل غیرخطی

۳- روند تشکیل مفصل‌های پلاستیک

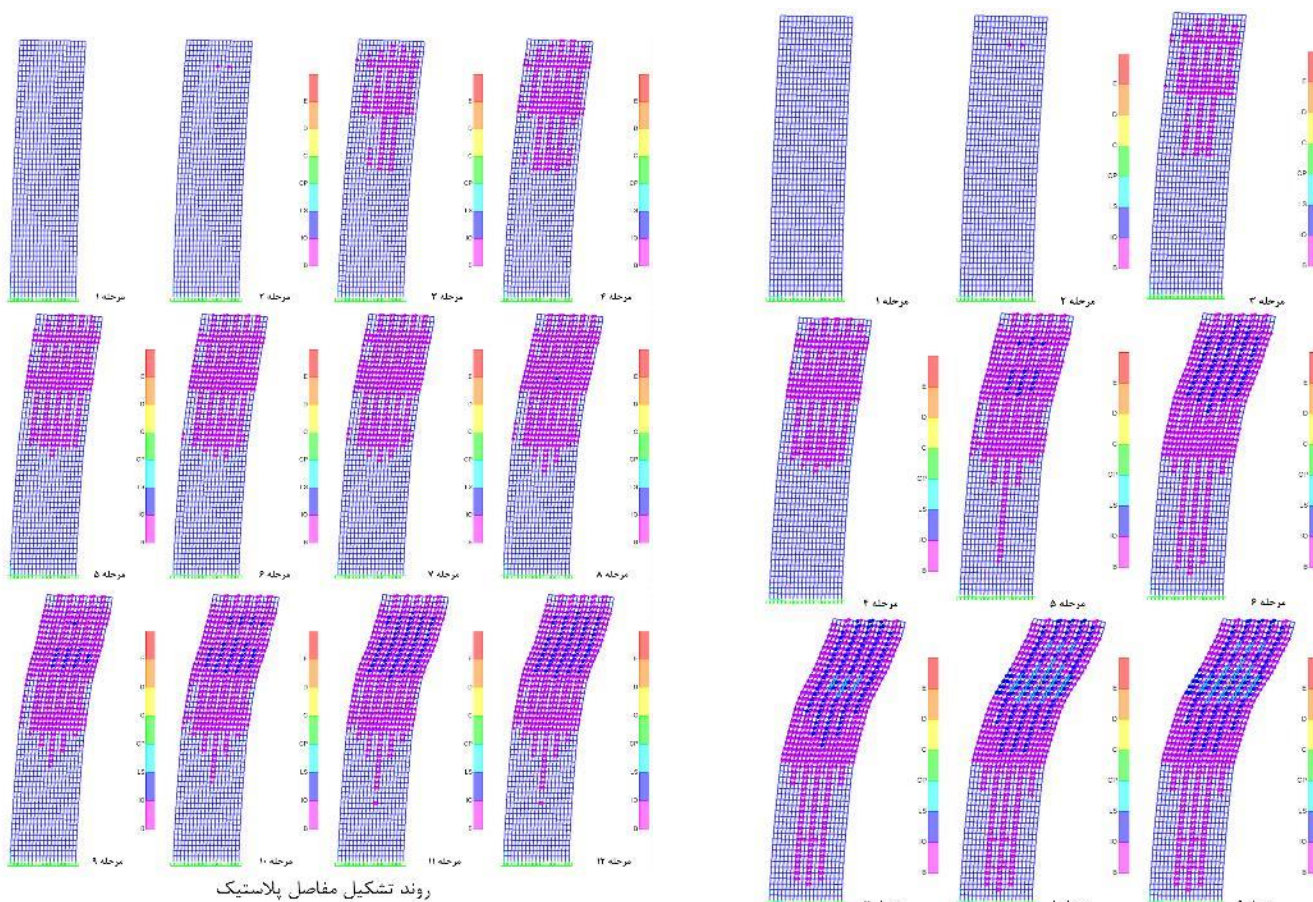
در تحلیل بارافزون استاتیکی غیرخطی، ابتدا بارهای ثقلی به سازه وارد می‌شوند و در ادامه بارهای جانبی در چند مرحله اعمال می‌شوند تا زمانی که سازه به حد خرابی برسد. بررسی نتایج در هر مرحله نشان می‌دهد که سازه تا قبل از گسیختگی چه روندی را طی کرده‌است. یکی از نتایجی که می‌تواند رفتار سازه در این مراحل را به خوبی نشان دهد نحوه تشکیل مفصل‌های پلاستیک است. شکل‌هایی که در ادامه مشاهده می‌شوند روند تشکیل مفصل‌های پلاستیک در تحلیل‌های انجام‌شده را نشان می‌دهند (شکل ۱۲ و شکل ۱۳).

برای نمونه در شکل ۱۲-الف که روند تشکیل مفصل‌های پلاستیک در تحلیل غیرخطی بدون P-Delta بر روی مدل تکیه‌گاه‌های گیردار را نشان می‌دهد می‌توان مشاهده کرد که در مرحله اول و دوم اعمال بارهای جانبی، تقریباً هیچ مفصل پلاستیکی تشکیل نشده‌است به این دلیل که طبق منحنی بارافزون متناظر با همین تحلیل سازه هنوز در محدوده رفتار خطی قرار دارد و وارد محدوده غیرخطی نشده‌است. از مرحله سوم اعمال بارهای جانبی، سازه وارد محدوده رفتار غیرخطی می‌شود و مفصل‌های پلاستیک حد IO در نیمه بالایی ساختمان تشکیل می‌شوند. در مرحله چهارم اختلاف زیادی با مرحله سوم وجود ندارد و فقط بر تعداد مفصل‌های حد IO افزوده می‌شود.

در مرحله پنجم تعداد کمی از مفصل‌ها از حد IO به حد LS می‌رسند و اولین مفصل‌های پلاستیک در طبقات پایین ساختمان با حد IO و در تیرهای محیطی قسمت میانی قاب جان تشکیل شده‌اند. در مرحله ششم تعداد زیادی از مفصل‌ها در نیمه بالایی ساختمان از حد IO به حد LS می‌رسند همچنین مفصل‌های پلاستیک تشکیل شده در طبقات نیمه پایین ساختمان با حد IO گسترش می‌یابند و به‌طور کلی مفصل‌های پلاستیک به سمت پایین سازه کشیده می‌شوند. در مرحله هفتم تعداد بسیار کمی مفصل در طبقات پایین اضافه می‌شوند و در نیمه بالایی تعداد نسبتاً زیادی مفصل پلاستیک از حد IO به حد LS می‌رسند درحالی‌که تعداد کمتری از مفصل‌ها نیز از حد LS به حد CP می‌رسند که اولین مفصل‌های پلاستیک با سطح عملکرد CP در سازه هستند. این تعداد از مفصل‌ها همان دسته از مفصل‌هایی هستند که در مرحله پنجم زودتر از سایر مفصل‌ها از حد IO به حد LS رسیده بودند. در مرحله هشتم در طبقات پایین تعداد کمی مفصل جدید تشکیل می‌شود و در طبقات بالایی حد رفتار پلاستیک تعداد زیادی از مفصل‌ها از حد IO به حد LS و از حد LS به حد CP افزایش یافته‌است. در مرحله نهم مفصل‌های پلاستیک تغییری نمی‌کنند ولی طبق منحنی بارافزون برش پایه و جابه‌جایی کمی کوچکتر شده‌اند و در واقع سازه حد مقاومت نهایی خود را پشت سر گذاشته و به مرحله شکست رسیده‌است. همانطوری که انتظار می‌رود از مرحله سوم تا مرحله آخر یا بر تعداد مفصل‌های پلاستیک افزوده می‌شود و یا حد رفتار پلاستیک این مفصل‌ها بالاتر می‌رود. با دقت در روند تشکیل مفصل‌های پلاستیک مشاهده می‌شود که اولین مفصل‌ها در تیرهای محیطی قسمت میانی قاب جان در طبقات سی‌وپنجم تا چهل‌وپنجم تشکیل شده‌اند و این مفاصل تا مرحله آخر همواره در حد رفتار پلاستیک بالاتری نسبت به سایر مفصل‌ها قرار داشته‌اند.

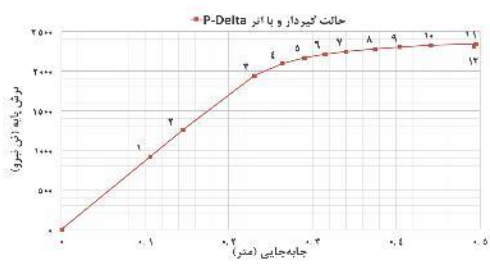
اثر P-Delta

برای تعیین اثر P-Delta بر روند تشکیل مفصل‌های پلاستیک، مراحل تشکیل مفصل‌ها در تحلیل‌های انجام‌شده بر روی مدل تکیه‌گاه‌های گیردار با هم مقایسه می‌شوند. برای مقایسه باید مراحل از دو تحلیل استفاده شوند که دارای برش پایه یکسانی هستند زیرا مراحل تحلیل بارافزون استاتیکی غیرخطی در هر حالت به شرایط مدل‌سازی و بارگذاری بستگی دارد و به همین دلیل یک تحلیل در ۹ مرحله و تحلیل دیگر در ۱۲ مرحله انجام شده‌است. بنابراین نمی‌توان یک مرحله مشخص از هر دو تحلیل را با هم مقایسه کرد و بهترین روش، مقایسه بین مراحل است که برش پایه یکسانی دارند.



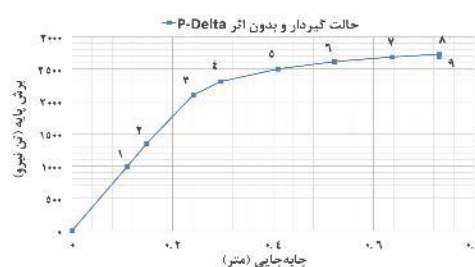
روند تشکیل مفاصل پلاستیک

روند تشکیل مفاصل پلاستیک



منحنی بارافزون بدست آمده از تحلیل غیرخطی

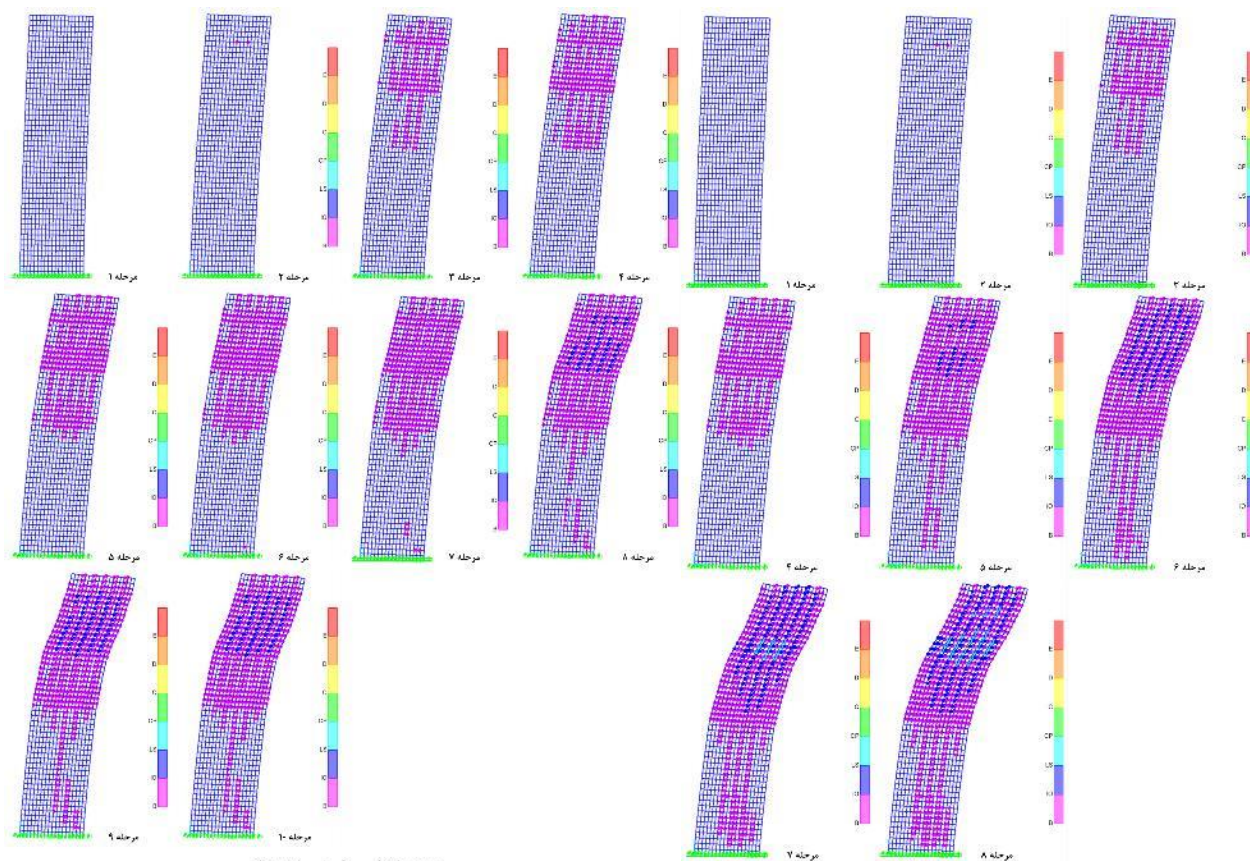
(ب)



منحنی بارافزون بدست آمده از تحلیل غیرخطی

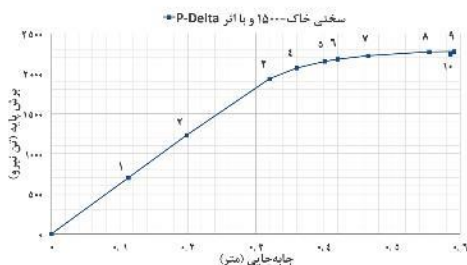
(الف)

شکل ۱۲: مقایسه روند تشکیل مفاصل پلاستیک با منحنی بارافزون pushover در مدل تکیه‌گاه‌های گیردار در الف) تحلیل غیرخطی بدون در نظر گرفتن P-Delta و ب) تحلیل غیرخطی با در نظر گرفتن P-Delta



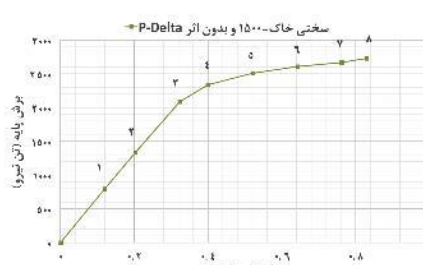
روند تشکیل مفاصل پلاستیک

روند تشکیل مفاصل پلاستیک



منحنی بارافزون بدست آمده از تحلیل غیرخطی

(ب)



منحنی بارافزون بدست آمده از تحلیل غیرخطی

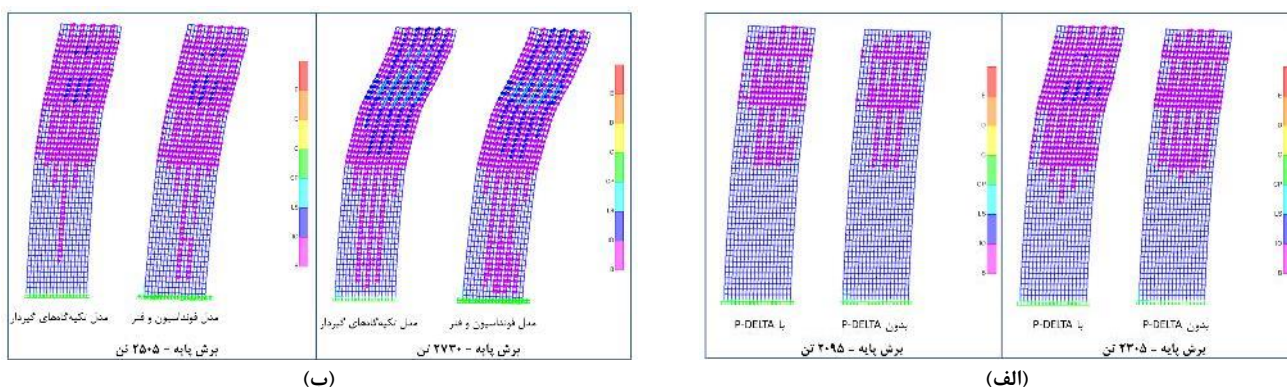
(الف)

شکل ۱۳: مقایسه روند تشکیل مفاصل‌های پلاستیک با منحنی pushover در مدل فونداسیون و فنر در الف) تحلیل غیرخطی بدون در نظر گرفتن P-Delta و ب) تحلیل غیرخطی با در نظر گرفتن P-Delta

در شکل ۱۴-الف مقایسه بین مفاصل‌های پلاستیک تشکیل شده در مدل گیردار انجام شده است. مراحل اعمال بار جانبی در این دو تحلیل طوری بوده است که در دو مرحله برش پایه‌ها یکسان شده است. برش پایه در این دو مرحله به ترتیب ۲۰۹۵ تن و ۲۳۰۵ تن است. این مقایسه نشان می‌دهد که در برش پایه یکسان، اثرات P-Delta باعث می‌شود که مفاصل‌های پلاستیک بیشتری تشکیل شوند و یا مفاصل‌ها در حد رفتار پلاستیک بالاتری قرار گیرند. به‌طور کلی با در نظر گرفتن اثرات P-Delta روند رسیدن به حد نهایی مقاومت سازه سریع‌تر انجام می‌گیرد و برش پایه نهایی ۲۳۴۵ تن است در حالی که بدون در نظر گرفتن اثرات P-Delta این مقدار ۲۷۳۰ تن می‌شود.

اثر اندرکنش خاک و سازه

در شکل ۱۴-ب مقایسه‌ای بین مفصل‌های پلاستیک تشکیل شده در قاب جان مدل فونداسیون و فنر و مدل تکیه‌گاه‌های گیردار با برش پایه‌های ۲۵۰۵ تن و ۲۷۳۰ تن صورت گرفته است. در این شکل مشاهده می‌شود که در برش پایه یکسان اندرکنش خاک و سازه باعث شده است در طبقات بالایی تعداد کمی از مفصل‌های پلاستیک تشکیل شده به سطح عملکرد بالاتری برسند. در پایین ساختمان اثر اندرکنش خاک و سازه قابل ملاحظه‌تر است به طوری که تعداد مفصل‌ها را افزایش می‌دهد و باعث می‌شود که مفصل‌های پلاستیک چند طبقه به سمت پایین کشیده شوند. همچنین در ده طبقه پایه مفصل‌های پلاستیک در سمتی از قاب جان که قسمت تحت فشار است متمرکز می‌شوند. به طور کلی اندرکنش خاک و سازه باعث افزایش تغییرشکل‌ها می‌شود ولی در برش پایه تغییر زیادی ایجاد نمی‌کند و مقدار آن از ۲۷۳۵ تن به ۲۷۳۰ تن می‌رسد.



شکل ۱۴: تاثیر اندرکنش خاک و سازه و P-Delta بر روند تشکیل مفاصل پلاستیک؛ (الف) اثر P-Delta؛ (ب) اثر اندرکنش خاک و سازه

۴- جمع بندی و نتیجه گیری

در این تحقیق با استفاده از مدل سازی اثرات خاک زیر فونداسیون بر سازه توسط سیستم فنرهای گسترده، تاثیر اندرکنش خاک و سازه بر پدیده لنگی برشی، توزیع نیروها، مقدار تغییرشکل‌ها و تشکیل مفصل‌های پلاستیک تعیین شده است. همچنین تاثیر تشکیل مفصل‌های پلاستیک و اثرات ثانویه P-Delta بر تغییرشکل‌ها و رفتار کلی سازه بررسی شده و نتایج زیر بدست آمده است.

۱. با افزایش میزان اندرکنش خاک و سازه شدت لنگی برشی کمتر می‌شود. اثر اندرکنش خاک و سازه بر لنگی برشی در طبقات پایه قابل ملاحظه است ولی در طبقات آخر کاملاً بی‌اثر می‌شود.
۲. افزایش اندرکنش خاک و سازه، تغییر مکان قائم فونداسیون و تغییر شکل قائم و جانبی سازه را افزایش می‌دهد.
۳. وجود اندرکنش خاک و سازه باعث می‌شود که تعداد مفصل‌های پلاستیک تشکیل شده بر اثر اعمال بار جانبی در طبقات پایین بیشتر شود ولی اثر زیادی بر مفصل‌های پلاستیک طبقات بالایی ساختمان ندارد.
۴. به طور کلی اندرکنش خاک و سازه بر پدیده لنگی برشی، تغییر شکل‌های قائم و جانبی سازه و توزیع نیروهای جانبی بین تیرها و ستون‌ها در ساختمان‌های بلند با سیستم سازه‌ای لوله‌ای، اثرات قابل ملاحظه‌ای دارد و نادیده گرفتن این اثرات در تحلیل و طراحی سازه‌های بلند لوله‌ای شکل باعث می‌شود رفتار سازه در واقعیت با رفتار پیش‌بینی شده در تحلیل‌ها یکسان نباشد که ممکن است مشکلاتی را در سازه ایجاد کند.
۵. اثر اندرکنش خاک و سازه در تحلیل خطی کمی بیشتر از تحلیل غیرخطی است. به طور کلی در تحلیل غیرخطی نیروها کمتر و تغییر شکل‌ها بیشتر هستند.

۶. تشکیل مفصل‌های پلاستیک در قاب جان باعث افزایش تغییرشکل‌های قائم و جانبی در طبقات بالایی ساختمان می‌شود. وجود این مفصل‌ها باعث می‌شود بار بیشتری به طبقات میانی وارد شود و نسبت لنگی‌برشی در این طبقات افزایش یابد.
۷. با توجه به کاهش نیروی برشی در طبقات بالایی ساختمان و مقاومت بالای قاب‌های واقع شده در بال ساختمان، عملاً در ۷ طبقه بالایی انحنای تغییرشکل سازه در جهت عکس ایجاد شده‌است. این پدیده سبب می‌گردد ستون‌های کناری واقع در قاب‌های جان با نیروی جهت عکس ستون‌های میانی وارد عمل گردد.
۸. در حضور بارهای ثقلی اختلاف تغییرشکل قائم بین ستون‌های داخلی و ستون‌های خارجی باعث ایجاد تناوب‌هایی در تغییرشکل سقف طبقات می‌شود که در سقف طبقات بالایی، به دلیل طول زیاد ستون‌ها، تغییرشکل‌های قائم با تناوب‌های بزرگتری همراه هستند.
۹. در حضور بارهای ثقلی اثر P-Delta باعث می‌شود مقدار جابه‌جایی نهایی و برش پایه نهایی کم شود که نشان می‌دهد سازه زودتر از حد معمول و با تغییرشکل کمتری نسبت به تحلیل‌های قبلی، به حد نهایی مقاومت خود می‌رسد و دچار گسیختگی می‌شود.

مراجع

- [1] Taranath, B.S. (2010). *Reinforced Concrete Design of Tall Buildings*. Taylor & Francis.
- [2] Taranath, B.S. (2005). *Wind and Earthquake Resistant Buildings Structural Analysis and Design*. Marcel Dekker, Inc.
- [3] Smith, B.S. and Coull, A. (1991). *Tall Building Structures Analysis and Design*. John Wiley and Sons, Inc.
- [4] Günel, M.H. and Ilgin, H.E. (2014). *Tall Buildings: Structural Systems and Aerodynamic Form*. Taylor & Francis Group.
- [5] Hummelen, J. (2010). *Precast Concrete in Framed Tube High-Rise Structures*. MSc Thesis, Delft University of Technology.
- [6] Nouri, F. and Ashtari, P. (2013). Investigation of the Shear Lag Phenomenon and Structural Behavior of Framed-Tube and Braced-Tube Tall Structures. *International Conference of Civil Engineering, Iran –Tabriz*.
- [7] Lee, K.K. and Lee, L.H. and Lee, E. J. (2002). Prediction of Shear Lag Effects in Framed-Tube Structures with Internal Tube(s). *The Structural Design of Tall Buildings*, 11(2), pages 73-92.
- [8] Naderpour, H. and Kheyroddin, A. (2011). Investigation of the shear lag in RC tall buildings with tubular systems. *Journal of Modeling in Engineering*, Vol. 9, No. 26.
- [9] Leonard, J. (2004). *Investigation of Shear Lag Effect in High-rise Buildings with Diagrid System*. MSc Thesis. Illinois Institute of Technology.
- [10] Gaur, H. and Goliya, R.K. (2015). Mitigating Shear Lag in Tall Buildings. *International Journal of Advanced Structural Engineering (IJASE)*, 7(3), pages 269-279.
- [11] Mazinani, I. and Jumaatla, M.Z. and Ismail, Z. and Chao, O.Z. (2014). Comparison of Shear Lag in Structural Steel Building with Framed Tube and Braced Tube. *Structural Engineering and Mechanics*, 49(3), pages 297-309.
- [12] Hoseini Vaez, S.R. and Naderpour, H. and Kheyroddin, A. (2014). The Effect of RC Core on Rehabilitation of Tubular Structures. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*.
- [13] Kwan, A.K.H. (1994). Simple Method for Approximate Analysis of Framed Tube Structures. *Journal of Structural Engineering*, pages 1221-1239.
- [14] Wolf, J.P. (1985). *Dynamic soil-structure interaction*. Englewood Cliffs, N.J. Prentice-Hall, Inc.
- [15] Gazetas, G. (1991). *Foundation vibrations*. Foundation engineering handbook, Springer, pages 553-93.
- [16] Mylonakis, G. and Gazetas, G. (2000). Seismic soil-structure interaction: beneficial or detrimental. *Journal of Earthquake Engineering*, 4(3), pages 277-301.
- [17] Gazetas, G. and Mylonakis, G. (1998). Seismic soil-structure interaction: new evidence and emerging issues. *Geotechnical earthquake engineering and soil dynamics III*, vol.2, pages 1119-74.
- [18] Venanzi, I. and Salciarini, D. and Tamagnini, C. (2014). The effect of soil-foundation-structure interaction on the wind-induced response of tall buildings. *Engineering Structures*, Volume 79, pages 117-130.
- [19] Stewart, J.P. and Fenves, G.L. and Seed, R.B. (1999). Seismic soil-structure interaction in buildings. I: analytical methods. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(1), pages 26-37.
- [20] Mengke Lia and Xiao Lub and Xinzhen Lua and Lieping Yea. (2014). Influence of soil-structure interaction on seismic collapse resistance of super-tall buildings. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Volume 6 (Issue 5), Pages 477-485.
- [21] ACI-318-11, (2011). *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. Prepared by American Concrete Institute committee 318.

[22] FEMA 356, (2000). *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. Prepared by the SEAOC, ATC, and CUREE Joint Venture for the Federal Emergency Management Agency.

[23] NIST GCR 12-917-21, (2012). *Soil-Structure Interaction for Building Structures*. Prepared by the NEHRP Consultants Joint Venture, a partnership of the Applied Technology Council and the Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering, for the National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland.