

تحلیل مرتبه دوم در سازه‌های فضایی با در نظر گرفتن اثر ارتفاع سازه

بهزاد حاصلی *

* کارشناس ارشد، گروه مهندسی عمران - زلزله، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

* std_haseli@khu.ac.ir

تاریخ دریافت: [۹۸/۱۰/۳]

تاریخ پذیرش: [۹۹/۳/۲۱]

چکیده

در سال‌های اخیر، سازه‌ها بنا به دلایل اقتصادی و زیبایی‌شناسی، روز به روز عظیم‌تر و لاغرتر شده‌اند و این موضوع منجر به رفتار غیرخطی سازه‌ها شده است. پس به کارگیری روش‌های مختلف برای در نظر گرفتن آثار تحلیل مرتبه دوم در بررسی رفتار سازه‌ها، همواره مورد توجه طراحان قرار گرفته است. بنابراین در این مطالعه به منظور بررسی آثار $P-\Delta$ ، به تحلیل رفتار غیرخطی سازه‌های فضایی با تعداد طبقات مختلف می‌پردازیم. روش‌های مد نظر برای برآورد آثار تحلیل مرتبه دوم شامل روش‌های ماتریس سختی، توابع پایداری و روش بار جانبی فرضی است. هدف اصلی در این پژوهش، بررسی اثر پارامتر ارتفاع سازه بر دقت روش‌های محاسبه آثار تحلیل مرتبه دوم و مقایسه دقت روش‌های ارائه شده برای تحلیل مرتبه دوم سازه‌های فضایی است.

نتایج نشان می‌دهد، صرف نظر از ارتفاع سازه، دقیق‌ترین روش برای برآورد آثار $P-\Delta$ در تحلیل مرتبه دوم انواع سازه، روش ماتریس سختی است. اگر چه تحلیل غیرخطی مرتبه اول عموماً می‌تواند ضرایب بار نهایی سازه‌ها را با دقت خوبی برآورد نماید، اما استفاده از تحلیل‌های غیرخطی مرتبه دوم در برآورد ضرایب بار نهایی سازه‌های با ارتفاع مختلف منجر به افزایش دقت این برآورد می‌شود. بر اساس نتایج به دست آمده مشاهده شد، تعداد طبقات سازه دقت روش‌های تحلیل مرتبه دوم را تحت تاثیر قرار می‌دهد. به شکلی که با افزایش ارتفاع سازه، شاهد افزایش اختلاف نتایج حاصل از هر سه روش تحلیل مرتبه دوم با نتایج به دست آمده از تحلیل مرتبه اول هستیم، این افزایش در راستای عرضی سازه نمود بیشتری دارد. در سازه‌های بیش از سه طبقه، از میان سه روش تحلیل مرتبه دوم در برآورد آثار $P-\Delta$ ، اختلاف نتایج حاصل از روش بار جانبی فرضی با نتایج تحلیل مرتبه اول، به شدت افزایش یافته و بیش‌ترین همبستگی با ارتفاع سازه، در این روش مشاهده شده است. همچنین در بین روش‌های تحلیل مرتبه دوم در سازه‌های بلندمرتبه و مرتفع، بالاترین دقت مربوط به روش ماتریس سختی است.

واژگان کلیدی: سازه فضایی، اثرات $P-\Delta$ ، روش ماتریس سختی، روش توابع پایداری، روش بار جانبی فرضی، ارتفاع سازه.

۱- مقدمه

ایجاد لنگرهای مضاعفی در پای ستون می‌شود که به آن اثر $P\Delta$ می‌گویند. برای تحلیل و پیش‌بینی رفتار غیرخطی هندسی ساختمان‌ها از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. صرف نظر

اعمال بارهای جانبی به صورت همزمان با بارهای ثقلی بر سازه، علاوه بر ایجاد یک تغییر مکان جانبی قابل توجه، سبب

های فولادی ارائه دهند. جیانگ [9] در پژوهشی، به آنالیز با پلاستیسیته گسترده قاب‌های فولادی سه‌بعدی پرداخت. برای این کار یک برنامه با قابلیت توزیع گسترده پلاستیسیته و تحلیل مرتبه دوم توسعه داده شد. مقایسه نتایج دقت قابل قبول روش پیشنهادی در این مطالعه را نشان می‌دهد. تای و همکاران در مطالعه‌ای دیگر [10] در سال ۲۰۱۱ پژوهشی در مورد تحلیل غیرالاستیک و غیرخطی قاب‌های فضایی به انجام رساندند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد، با استفاده از تنها یک المان برای هر عضو در مدل سازه‌ای، پاسخ‌های غیرخطی پیش بینی شده در مقایسه با پاسخ‌های بدست‌آمده از مدل‌های المان محدود، مناسب است.

حجت الله ورع و قادر باقری در سال ۱۳۹۱ در پژوهشی [11] ضمن بکارگیری روابط شیب‌افت توسعه یافته و استفاده از ماتریس سختی مماسی برای تحلیل قاب‌های فضایی با عناصر جدارنازک باز، روابط غیرخطی برای تحلیل پلاستیک انواع قاب را توسعه دادند. بوانو و همکاران در پژوهشی [12] در روند تحلیل مرتبه دوم یک قاب بتنی مسلح به روش ماتریس سختی هندسی، ضرایب گاما را پیشنهاد دادند. نتایج این مطالعه دقت قابل قبول ضرایب پیشنهادی را نشان می‌دهد. نتایج مطالعات گسترده [13-14-15] نشان می‌دهد، روش‌های متعددی برای تحلیل مرتبه دوم در انواع سازه‌های مهندسی انجام شده‌است. اما تاکنون دقیق‌ترین روش برای برآورد آثار $P\Delta$ در تحلیل رفتار غیرخطی سازه‌ها انجام نشده‌است. در این پژوهش، علاوه بر مقایسه دقت روش‌های تحلیل مرتبه دوم در رفتار سازه‌ها، برای نخستین بار، تاثیر ارتفاع سازه بر دقت روش‌های تحلیل مرتبه دوم سازه‌های فضایی مورد بررسی قرار گرفته‌است.

۳- فرمولاسیون روش‌های تحلیل مرتبه دوم در سازه‌های سه‌بعدی

۳-۱- روش ماتریس سختی

به منظور ارائه فرمولاسیون استفاده شده در روش ماتریس سختی [16]، یک المان تیرستون از سازه‌های مد نظر را مورد مطالعه قرار می‌دهیم. به همین منظور ستون BC شکل‌های (۸)

کردن از این رفتار غیرخطی به منظور ساده‌سازی، غالباً منجر به خطاهای محاسباتی بسیاری در تحلیل رفتار واقعی سازه می‌شود. با توجه به رفتار غیرخطی سازه‌های فضایی با تعداد طبقات زیاد، استفاده از روش‌های تجزیه و تحلیل سنتی، در مورد این نوع سازه‌ها امکان‌پذیر نیست. پس در این مطالعه، به مقایسه دقت روش‌های ماتریس سختی، توابع پایداری و بار جانبی فرضی به منظور برآورد آثار تحلیل مرتبه دوم (آثار $P-\Delta$) در سازه‌های فضایی با ارتفاع ۹/۶، ۱۶، ۲۲/۴، ۳۲ و ۴۸ متر می‌پردازیم.

۲- مروری بر تاریخچه پژوهش

حسینی‌هاشمی و همکاران [1] در پژوهشی مبتنی بر روش پیشنهادی ماشاری و چن [2] به بررسی اثر $P-\Delta$ در تحلیل مرتبه دوم سازه‌ها تحت اثر بارهای دینامیکی پرداختند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد، پاسخ‌های دینامیکی ناشی از تحلیل مرتبه اول و مرتبه دوم با یکدیگر اختلاف فاز دارند که می‌تواند منجر به جذب انرژی سازه‌ها شده و رفتار سازه را نرم‌تر کند. تای و همکاران در مطالعه‌ای [3,4] یک نرم‌افزار پیشرفته کاربردی برای آنالیز دینامیکی غیرخطی سازه‌های فولادی و سازه‌های فضایی ارائه کردند. نتایج این مطالعه، یک راه‌حل تکراری و گام به گام بر اساس روش نیومارک و نیوتن رافسون برای حل پاسخ‌های غیرخطی حرکت فراهم کرده‌است که پایه گذار انجام مطالعات بیشتری [5] در این زمینه شده‌است. چیورن و همکاران [6] برای آنالیز غیرخطی و غیرالاستیک سازه‌های سه‌بعدی با اتصالات صلب، روشی ارائه کردند که در آن، هر عضو سازه با یک المان مدل می‌شود و در نتیجه درجات آزادی و زمان آنالیز سازه به شدت کاهش می‌یابد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد، تحلیل‌های انجام‌شده با این برنامه از دقت، قدرت و سرعت مناسبی برخوردار است.

کیم و همکاران [7] در مطالعه‌ای، به آنالیز غیرخطی پیشرفته قاب‌های فولادی مهاربندی‌شده پرداختند. پارامترهای بررسی شده در این مطالعه شامل تسلیم تدریجی مرتبط با خمش، تنش‌های پسماند، نقص هندسی و آثار مرتبه دوم بوده‌است. این پژوهشگران در مقاله مشابه دیگری نیز [8] توانستند یک راهنمای طراحی بر پایه LFRD برای آنالیز پیشرفته قاب

$$\{\Delta d\} = [T]_{6 \times 12} \{\Delta D\} \quad (9)$$

که در آن:

$$[T]_{6 \times 12} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{L} & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \frac{-1}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{L} & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

در نهایت ماتریس سختی هندسی مربوط به المان تیرستون مطابق با رابطه (۱۱) حاصل می شود.

$$[K]_{12 \times 12} = [T]_{6 \times 12}^T [k_e]_{6 \times 6} [T]_{6 \times 12} + [K_g]_{12 \times 12} \quad (11)$$

۳-۲- روش بار جانبی فرضی (روش تکراری)

از روش بار جانبی فرضی، تحت عنوان روش بار جانبی معادل یا روش تکراری P-Δ نیز یاد می شود [16]. در این روش از یک سری بار جانبی استفاده شده است تا اثر ناپایداری قاب شبیه سازی شود. در این روش مجموع لنگرهای انتهایی عضو طبق رابطه (۱۲) محاسبه می شود. در این رابطه v برش انتهایی عضو، h طول عضو، p نیروی محوری عضو و Δ تغییر مکان نسبی انتهایی عضو است. رابطه (۱۲) را می توان به صورت رابطه (۱۳) و بر اساس پارامتر v' (برش معادل یا برش فرضی) بازنویسی کرد. در شکل (۱) برش فرضی ایجاد شده در روش بار جانبی فرضی برای المان تیرستون BC نمایش داده شده است.

$$M = Vh + P\Delta' \quad (12)$$

$$M = Vh + \left(\frac{P\Delta'}{h}\right)h = (v + v')h \quad (13)$$

۹ (۱۰) مورد بررسی قرار می گیرد. آثار PΔ ناشی از وجود نیروی محوری (P) و تغییر مکان جانبی ایجاد شده در انتهای المان (Δ) است. پس می توان به کمک ماتریس سختی هندسی [Kg]، آثار تحلیل مرتبه دوم در یک المان تیر-ستون را مطابق با رابطه (۱) در نظر گرفت.

$$[K_g]_{12 \times 12} = \begin{bmatrix} [k_s] & -[k_s] \\ -[k_s]^T & [k_s] \end{bmatrix} \quad (1)$$

که در این رابطه [ks] مطابق با رابطه (۲) حاصل می شود:

$$[K_s] = \begin{bmatrix} 0 & a & -b & 0 & 0 & 0 \\ a & c & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -b & 0 & c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

مقادیر عددی مربوط به سه پارامتر a، b و c مطابق با روابط (۳ تا ۵) معرفی می شود:

$$a = \frac{M_{ZB} + M_{ZC}}{L^2} \quad (3)$$

$$b = \frac{M_{YB} + M_{YC}}{L^2} \quad (4)$$

$$c = \frac{P}{L} \quad (5)$$

تغییر مکان نهایی المان تیرستون مد نظر متاثر از تغییر شکل المان نیز خواهد بود. تغییر شکل المان تیر ستون {Δd} بر اساس روابط (۶ تا ۸) قابل محاسبه است.

$$\{\Delta F\} = [k_e] \{\Delta d\} \quad (6)$$

$$\{\Delta F\} = [\Delta P \quad \Delta M_{YB} \quad \Delta M_{YC} \quad \Delta M_{ZB} \quad \Delta M_{ZC} \quad \Delta T]^T \quad (7)$$

$$\{\Delta d\} = [\Delta \delta \quad \Delta \theta_{YB} \quad \Delta \theta_{YC} \quad \Delta \theta_{ZB} \quad \Delta \theta_{ZC} \quad \Delta \phi]^T \quad (8)$$

که در این روابط ΔP، ΔM و ΔT به ترتیب نیروی محوری، لنگر خمشی در دو جهت و لنگر پیچشی بوده و Δδ، Δθ و Δφ به ترتیب تغییر مکان محوری، دوران خمشی و زاویه پیچش است. رابطه بین تغییر شکل و تغییر مکان المان {ΔD} به شکل رابطه (۹) قابل بیان است.

شکل ۱. برش فرضی ایجاد شده به منظور برآورد آثار P-Δ در روش بار جانبی

$$\begin{Bmatrix} \Delta P \\ \Delta M_{yB} \\ \Delta M_{yC} \\ \Delta M_{zB} \\ \Delta M_{zC} \\ \Delta T \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{1Y} & C_{2Y} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{2Y} & C_{1Y} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{1Z} & C_{2Z} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{2Z} & C_{1Z} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} \end{bmatrix} * \begin{Bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \theta_{yB} \\ \Delta \theta_{yC} \\ \Delta \theta_{zB} \\ \Delta \theta_{zC} \\ \Delta \varphi \end{Bmatrix} \quad (15)$$

پارامترهای دو ماتریس ستونی در رابطه (۱۵) بر اساس روابط (۷ و ۸) معرفی شده‌اند.

ضرایب ماتریس خمشی هستند که با توجه به C_{nz} و C_{ny} تغییر شکل‌های برشی عرضی مطابق با روابط (۱۶ تا ۱۹) قابل بیان است.

$$C_{1Y} = \frac{k_{1y}^2 - k_{2y}^2 + k_{1y} A_{sz} GL}{2k_{1y} + 2k_{2y} + A_{sz} GL} \quad (16)$$

$$C_{2Y} = \frac{-k_{1y}^2 + k_{2y}^2 + k_{2y} A_{sz} GL}{2k_{1y} + 2k_{2y} + A_{sz} GL} \quad (17)$$

$$C_{1Z} = \frac{k_{1z}^2 - k_{2z}^2 + k_{1z} A_{sy} GL}{2k_{1z} + 2k_{2z} + A_{sy} GL} \quad (18)$$

$$C_{2Z} = \frac{-k_{1z}^2 + k_{2z}^2 + k_{2z} A_{sy} GL}{2k_{1z} + 2k_{2z} + A_{sy} GL} \quad (19)$$

$k_{1y,z}$ و $k_{2y,z}$ بر اساس رابطه (۲۰) قابل بیان هستند.

$$k_{1y,z} = S_{1y,z} \left(\frac{EI_n}{L} \right); k_{2y,z} = S_{2y,z} \left(\frac{EI_n}{L} \right) \quad (20)$$

توابع پایداری $S_{2n=y,z}$ و $S_{1n=y,z}$ که بر اساس روابط (۲۱ و ۲۲) محاسبه می‌شوند.

$$S_{1n} = \begin{cases} \frac{k_n L \sin(k_n L) - (k_n L)^2 \cos(k_n L)}{2 - 2 \cos(k_n L) - k_n L \sin(k_n L)} & \left\{ \begin{array}{l} \text{if } P \leq 0 \\ \text{if } P \geq 0 \end{array} \right. \\ \frac{(k_n L)^2 \cosh(k_n L) - k_n L \sinh(k_n L)}{2 - 2 \cosh(k_n L) + k_n L \sin(k_n L)} \end{cases} \quad (21)$$

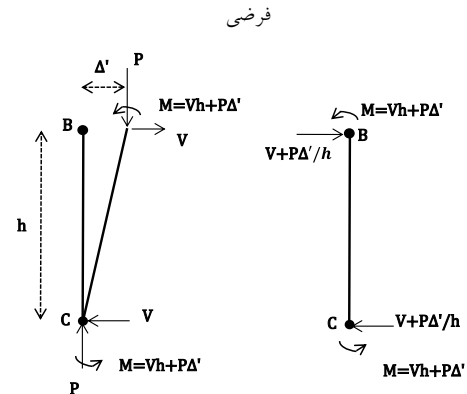


Fig. 1. Assumed shear in assume lateral load method (for consider of P-Δ effect)

با اعمال برش‌های واقعی v توام با برش‌های فرضی v' به عضو مدنظر، لنگرهای تصحیح شده انتهایی عضو را می‌توان به دست آورد و مطابق با رابطه (۱۴) آن را برای ساختمان‌های چند طبقه بسط داد.

$$v'_i = \sum \frac{P_i}{h_i} (\Delta_{i+1} - \Delta_i) \quad (14)$$

بار جانبی که به طبقه i اعمال می‌شود، به منظور ایجاد اثر P-Δ از اختلاف بین برش‌های فرضی در طبقات مجاور به دست می‌آید. از طرفی به منظور محاسبه لنگرهای تصحیح شده مرتبه دوم، روش بار جانبی فرضی باید به صورت روش تکراری به کار رود. این فرایند با تحلیل مرتبه اول قاب شروع می‌شود. تغییر شکل‌های هر طبقه از این تحلیل به دست می‌آید که برای محاسبه برش‌های فرضی، بارهای جانبی فرضی یا بارهای جانبی واقعی به قاب اعمال شده و این قاب مجدداً با تئوری مرتبه اول تحلیل می‌شود. این مرحله تا زمانی که لنگرهای به دست آمده در دو تحلیل متوالی تفاوت چندانی نداشته باشند، ادامه می‌یابد. در این مطالعه، همگرایی پاسخ‌ها در تکرار سوم و چهارم حاصل شده است.

۳-۳- روش توابع پایداری

مبنا و اساس روابط ارائه شده در روش پایداری، معادلات شیب افت است. معادله نیرو-جابجایی برای المان تیرستون BC در حالت کلی به شکل رابطه (۱۵) قابل بیان است.

این توسط تای و کیم [10] مدلسازی شده است. به منظور مقایسه دقت سه روش ماتریس سختی هندسی، توابع پایداری و بار جانبی فرضی، تحلیل غیرخطی با لحاظ آثار P-Δ روی قاب انجام شده است. شکل (۳) و جدول (۱) به ترتیب مقایسه بین منحنی‌های بار-تغییر شکل و مقادیر ضریب نهایی بار به دست آمده از روش‌های تحلیل مرتبه دوم را در مورد قاب پرتال نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود ضریب بار نهایی به دست آمده از روش ماتریس سختی تنها ۱/۰۹٪، با نتایج به دست آمده از مطالعات تای و کیم [10] اختلاف دارد. این اختلاف در مورد نتایج حاصل از روش توابع پایداری ۴/۱۳٪ و در مورد روش بار جانبی فرضی ۱۳/۴٪ است. نتایج در مورد قاب پرتال نشان می‌دهند، دقیق‌ترین روش تحلیل مرتبه دوم (آثار P-Δ)، روش ماتریس سختی است.

شکل ۲. قاب پرتال به همراه مشخصات و بارگذاری [10]

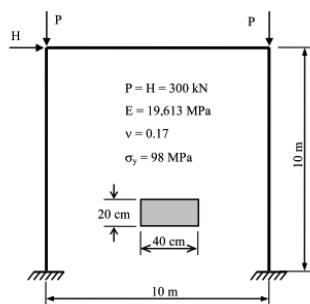


Fig. 2. Specification and loading of portal frame [10]

شکل ۳. منحنی بار-تغییر شکل قاب پرتال

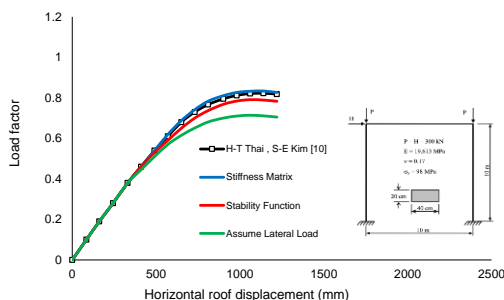


Fig. 3. Load-deflection curves of portal frame

جدول ۱: ضریب بار نهایی قاب پرتال

Method	Ultimate load factor	(%)Difference
[10] Tai and Kim	0/825	-
Stiffness Matrix	0/834	1/09
Stability Function	0/791	-4/12
Assume Lateral Load	0/714	-13/4

Table 1. Ultimate load factor of portal frame

$$S_{2n} = \begin{cases} \frac{(k_n L)^2 - k_n L \sin(k_n L)}{2 - 2 \cos(k_n L) - k_n L \sin(k_n L)} & \text{if } P \leq 0 \\ \frac{k_n L \sin(k_n L) - (k_n L)^2}{2 - 2 \cosh(k_n L) + k_n L \sinh(k_n L)} & \text{if } P \geq 0 \end{cases} \quad (22)$$

در دو روابط (۲۱ و ۲۲) EI, EA و GJ به ترتیب سختی محوری، سختی خمشی و سختی پیچشی است. همچنین توان دوم ضریب Kn به شکل رابطه (۲۳) معرفی می‌شود.

$$k_n^2 = \frac{|P|}{EI_n} \quad (23)$$

پس در این روش به دنبال محاسبه دوران (θ) و ممان انتهای ستون (M) با توجه به هندسه تغییر شکل یافته عضو خواهیم بود. بنابراین ارتباط بین دوران انتهایی و ممان انتهایی طبق روابط (۲۴ تا ۲۶) برای المان تیرستون مد نظر فرمالیزه می‌شود.

$$\begin{bmatrix} M_C \\ M_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \theta_C \\ \theta_D \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$M_C = \frac{EI}{L} (S_{11} \theta_C + S_{12} \theta_D) \quad (25)$$

$$M_D = \frac{EI}{L} (S_{21} \theta_C + S_{22} \theta_D) \quad (26)$$

۴- نمونه‌های عددی

به منظور بررسی آثار تحلیل مرتبه دوم در قاب‌های خمشی فولادی، در این مطالعه ابتدا دو نمونه سازه شبیه‌سازی شده توسط پژوهشگران مختلف، بررسی شده است. هدف از این امر مقایسه دقت روش‌های مورد مطالعه به منظور برآورد آثار تحلیل مرتبه دوم و راستی‌آزمایی نتایج است. پس در این مطالعه سازه‌هایی متفاوتی از جمله قاب پرتال [10] و سازه شش طبقه نامنظم [6] را بر اساس روش‌های تحلیل مرتبه دوم برای لحاظ کردن آثار P-Δ بررسی خواهیم کرد.

۴-۱- قاب پرتال

در اولین مورد مطالعاتی در این پژوهش، به بررسی یک نمونه قاب پرتال دو بعدی که تحت بارگذاری ثقلی و جانبی مطابق با شکل (۲) قرار دارد، می‌پردازیم. این قاب پیش از

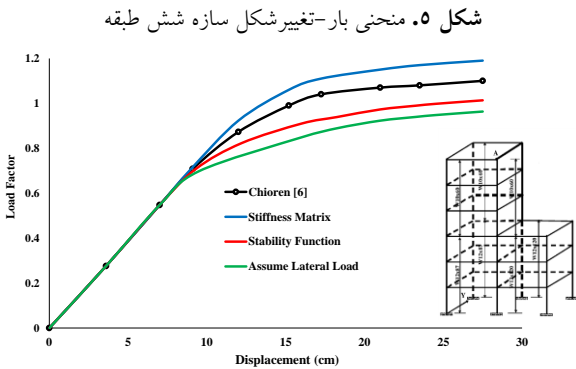


Fig. 5. Load-deflection curves of six story space frame

نتایج حاصل از دو سازه بررسی شده به خوبی نشان می‌دهد، در بین روش‌های تحلیل مرتبه دوم روش سختی هندسی، بالاترین دقت را در برآورد آثار $P-\Delta$ دارد. همچنین مشاهده شد، ارتفاع سازه دقت روش‌های تحلیل مرتبه دوم را دستخوش تغییر می‌کند. پس در ادامه به منظور بررسی دقیق اثر پارامتر ارتفاع سازه بر دقت روش‌های تحلیل مرتبه دوم، پنج سازه مشابه با تعداد طبقات متفاوت سه، پنج، هفت، ده و پانزده بررسی می‌شود.

۵- نمونه‌های مطالعاتی و نتایج تحلیل

به منظور بررسی اثر پارامتر ارتفاع سازه بر دقت روش‌های تحلیل مرتبه دوم، سازه‌های سه، پنج، هفت، ده و پانزده طبقه با پلان مشابه، مورد مطالعه قرار گرفته است. سازه‌های مطالعه شده به صورت سه‌بعدی بوده و ارتفاع طبقات در تمامی ترازهای ارتفاعی برابر با $3/2$ متر در نظر گرفته شده است. به منظور تعریف دیافراگم صلب در نرم‌افزار از المان Rigid Diaphragm در هر طبقه استفاده شده و مرکز مختصات طبقات در مرکز سطح هر طبقه تعریف شده است. مقاطع استفاده شده در تیر و ستون با استفاده از مقاطع فایبر مدلسازی شده است. غیرخطی در نظر گرفتن مقاطع به منظور افزایش دقت و به حداقل رساندن خطای تحلیل نتایج می‌باشد. برای برآورد بار وارد بر سازه، با توجه به وزن واحد حجم مقاطع مورد استفاده جرم تیرها در هر تراز ارتفاعی به علاوه نیمی از جرم ستون‌ها به عنوان بار مرده در هر تراز ارتفاعی معرفی و به صورت بار جرمی متمرکز در گره‌های

۲-۴- سازه شش طبقه سه‌بعدی

دومین سازه مطالعه شده در این پژوهش، یک سازه سه‌بعدی شش طبقه با نامنظمی در ارتفاع می‌باشد. جزئیات این سازه در شکل (۴) نمایش داده شده است. به منظور مقایسه دقت روش‌های تحلیل آثار مرتبه دوم، نتایج به دست آمده از اعمال تحلیل غیرخطی در این پژوهش با نتایج چپورن [6] مقایسه شده است. تنش تسلیم تمامی اعضا در این سازه 250MPa ، مدول الاستیسته 206850MPa و مدول برشی برابر با 79293MPa در نظر گرفته شده است. بارگذاری وارد بر سازه شامل بار ثقلی و بار باد است. بار مرده طبقات در هر مترمربع $9/6$ کیلو نیوتن و بار باد به صورت متمرکز در جهت Y برابر با $53/376$ کیلو نیوتن لحاظ شده است. شکل (۵) مقایسه منحنی‌های نیرو-جابجایی سازه مد نظر در جهت Y تحت سه روش تحلیل مرتبه دوم با نتایج حاصل از مطالعات چپورن را نشان می‌دهد. در جدول (۲) مقایسه مقادیر عددی ضریب بار نهایی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد ضریب بار نهایی محاسبه شده توسط چپورن [6] با مقادیر عددی حاصل از روش‌های ماتریس سختی، توابع پایداری و بار جانبی فرضی در این مطالعه، به ترتیب $1/8$ ، $1/10$ و $14/5\%$ اختلاف دارد.

شکل ۴: سازه شش طبقه به همراه مشخصات مقاطع [6]

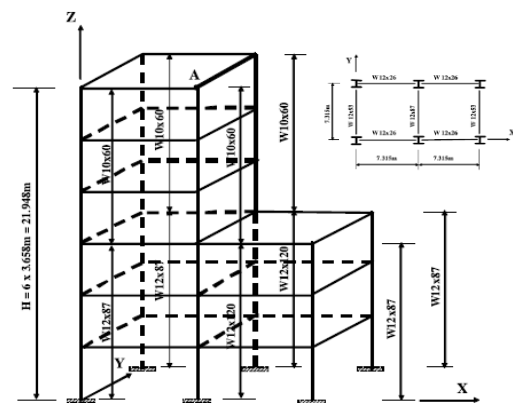


Fig. 4. Specification section of six story space frame [6]

جدول ۲. ضریب بار نهایی سازه شش طبقه

Method	Ultimate load factor	(%)Difference
[6] Chiorean	1/1	-
Stiffness Matrix	1/19	8/1
Stability Function	0/99	-10
Assume Lateral Load	0/94	-14/5

Table 2. Ultimate load factor of six story space frame

۲-۵- سازه پنج طبقه

سازه پنج طبقه مدل شده به ارتفاع ۱۶ متر دارای سه دهانه طولی و دو دهانه عرضی بر اساس مقاطع معرفی شده در شکل (۷) ارزیابی شده است. پارامترهای مدول الاستیسیته، ضریب پواسون و تنش تسلیم مقاطع سازه پنج طبقه مشابه با سازه سه طبقه انتخاب شده است. المان تیرستون BC و گره A مطابق با شکل (۷)، قابل مشاهده است.

شکل ۷. سازه پنج طبقه با مشخصات مقاطع ستون و تیر

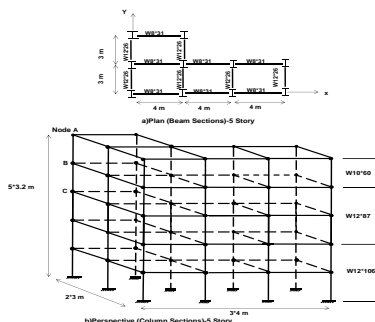


Fig. 7. Five story space frame, a) beam section b) column section

۳-۵- سازه هفت طبقه

سومین سازه مطالعه شده در پژوهش حاضر، یک سازه هفت طبقه به ارتفاع ۲۲/۴ متر، با قاب خمشی و به صورت سه بعدی مطابق با شکل (۸) است. مشخصات مصالح مورد استفاده در مورد سازه هفت طبقه، مشابه با سازه های سه و پنج طبقه است. پاسخ های تحلیل مرتبه دوم و تحلیل مرتبه اول در تمامی سازه های بررسی شده، مربوط به نقطه A واقع در تراز بام سازه هست.

۴-۵- سازه ده طبقه

یکی دیگر از سازه های مطالعه شده در این پژوهش، یک سازه ده طبقه به ارتفاع ۳۲ متر، با قاب خمشی و به صورت سه بعدی مطابق با شکل (۹) است. مشخصات مصالح مورد استفاده در مورد سازه ده طبقه، مشابه با سازه های قبلی است. پاسخ های تحلیل مرتبه دوم و تحلیل مرتبه اول در تمامی سازه های بررسی شده، در بالاترین تراز ارتفاعی (نقطه A) بررسی شده است.

اطراف توزیع شده است. پاسخ های بررسی شده در مورد سازه های سه، پنج، هفت، ده و پانزده طبقه در سه روش تحلیل ماتریس سختی هندسی، توابع پایداری و بار جانبی فرضی، شامل منحنی های بار-تغییر شکل در دو راستای طولی و عرضی سازه است. به منظور بررسی تاثیر ارتفاع سازه بر دقت روش های تحلیل مرتبه دوم، پاسخ های سازه تحت اثر تحلیل مرتبه دوم (لحاظ آثار P-Δ) با نتایج حاصل از تحلیل مرتبه اول (صرف نظر از آثار P-Δ) مقایسه شده است. لازم به ذکر است در این پژوهش، روش های بار جانبی فرضی و ماتریس سختی هندسی خارجی در محیط نرم افزار OpenSees [17-18] و روش توابع پایداری در محیط نرم افزار PAAP [19-20] تحلیل و بررسی شده است.

۱-۵- سازه سه طبقه

سازه سه طبقه مطالعه شده در این پژوهش در شکل (۶) به همراه مشخصات مقاطع تیر و ستون نمایش داده شده است. فرمولاسیون سه روش مد نظر برای تحلیل آثار مرتبه دوم برای المان تیرستون BC از این سازه تشریح شده است. سازه سه طبقه در راستای طولی سه دهانه و در راستای عرضی دارای دو دهانه، و ارتفاع سازه ۹/۶ متر است. مقادیر عددی مدول الاستیسیته، ضریب پواسون و تنش تسلیم مقاطع مورد استفاده به ترتیب برابر با $E=19 \text{ MPa}$ ، $v=0/3$ و $\delta = 98 \text{ MPa}$ در نظر گرفته شده است.

شکل ۶. سازه سه طبقه با مشخصات مقاطع ستون و تیر

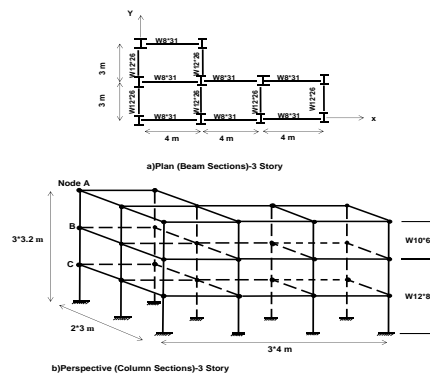


Fig. 6. Three story space frame, a) beam section b) column section

شکل ۱۰. سازه پانزده طبقه با مشخصات مقاطع ستون و تیر

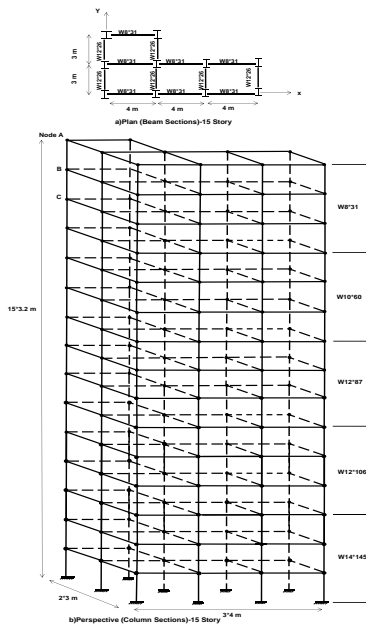


Fig. 10. Fifteen story space frame, a) beam section b) column section

شکل (۱۱) منحنی بار-تغییر شکل سازه‌های سه، پنج، هفت، ده و پانزده طبقه را به ترتیب در دو راستای X و Y نشان می‌دهد. ضریب بارهای نهایی در سازه‌های مد نظر به ازای سه روش تحلیل مرتبه دوم به همراه نتایج تحلیل مرتبه اول در جدول (۳) ارائه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود، در هر دو راستای طولی و عرض سازه، ضریب بار نهایی سازه در روش ماتریس سختی، کمترین اختلاف با ضریب بار نهایی سازه حاصل از تحلیل مرتبه اول را دارد. توجه به این نکته ضروری است که مقاومت سازه در راستای X بیشتر از راستای Y است. از این رو مقدار جابه‌جایی در راستای عرضی سازه بیش‌تر از جابه‌جایی ثبت‌شده در راستای طولی می‌باشد. به عنوان نمونه، در مورد سازه پنج طبقه مشاهده می‌شود، کمترین اختلاف بین نتایج حاصل از تحلیل مرتبه اول با نتایج روش ماتریس سختی به دست آمده است. این اختلاف در راستای X و Y به ترتیب $۰/۸\%$ و $۰/۹\%$ است. ملاحظه می‌شود با افزایش ارتفاع سازه، اختلاف نتایج حاصل از تحلیل مرتبه دوم با نتایج تحلیل مرتبه اول در هر سه روش و برای هر سه سازه افزایش داشته است. به منظور درک بهتر از آثار تحلیل مرتبه دوم، نتایج به دست‌آمده از روش‌های تحلیل مرتبه دوم، با تحلیل مرتبه اول بدون در نظر گرفتن آثار $P-\Delta$ مقایسه شده

شکل ۸. سازه هفت طبقه با مشخصات مقاطع ستون و تیر

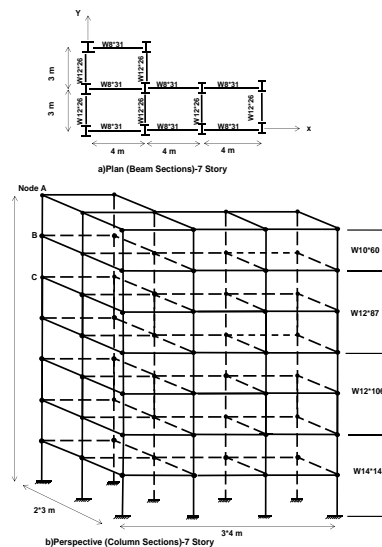


Fig. 8. Seven story space frame, a) beam section b) column section

شکل ۹. سازه ده طبقه با مشخصات مقاطع ستون و تیر

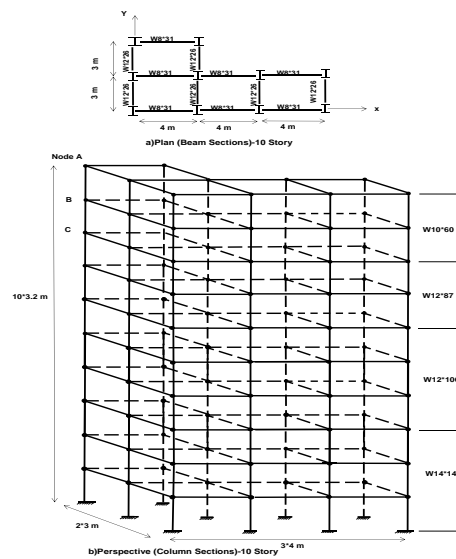


Fig. 9. Ten story space frame, a) beam section b) column section

۵-۵- سازه پانزده طبقه

آخرین نمونه مطالعاتی در این پژوهش حاضر، یک سازه پانزده طبقه با ارتفاع ۴۸ متر که دارای سه دهانه طولی و دو دهانه عرضی است، مطابق با مقاطع معرفی شده در شکل (۱۰) ارزیابی شده است. مشخصات مصالح و مقاطع سازه پانزده طبقه مشابه با سازه‌های قبلی مورد مطالعه، انتخاب شده است، با این تفاوت که مقاطع ستون در سه طبقه فوقانی مشابه با مقطع تیر در راستای X سازه انتخاب شده است.

فرضی، مستقل از ارتفاع سازه است و می‌توان نتیجه گرفت استفاده از این روش برای سازه‌های بیش از سه طبقه دقت مطلوبی ندارد. بر اساس نتایج به دست آمده، با افزایش ارتفاع سازه، کم‌ترین اختلاف نتایج حاصل از تحلیل مرتبه دوم و تحلیل مرتبه اول، در عملکرد روش ماتریس سختی مشاهده شده است. از سویی با توجه به اختلاف اندک نتایج حاصل از تحلیل مرتبه دوم به روش ماتریس سختی هندسی و نتایج تحلیل مرتبه اول، مطلوب‌ترین روش برای برآورد آثار تحلیل مرتبه دوم در سازه‌های مرتفع و بلندمرتبه، روش ماتریس سختی هندسی است.

است. بر اساس نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود، ارتفاع سازه می‌تواند دقت روش‌های تحلیل مرتبه دوم را تحت تاثیر قرار دهد. پس با افزایش ارتفاع سازه، شاهد افزایش اختلاف نتایج حاصل از هر سه روش تحلیل مرتبه دوم با نتایج به دست آمده از تحلیل مرتبه اول هستیم. شکل (۱۲) روند تاثیر پارامتر ارتفاع سازه بر دقت روش‌های تحلیل مرتبه دوم سازه را در دو راستای طولی و عرضی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود، با افزایش ارتفاع سازه، اختلاف نتایج حاصل از تحلیل مرتبه دوم با تحلیل مرتبه اول نیز افزایش می‌یابد. کم‌ترین اختلاف نتایج مربوط به روش ماتریس سختی و بیش‌ترین اختلاف مربوط به روش بار جانبی فرضی است. در سازه‌های بیش از سه طبقه، اختلاف نتایج روش بار جانبی

جدول ۳. ضریب بار نهایی سازه‌های سه، پنج، هفت، ده و پانزده طبقه در روش‌های تحلیل مرتبه دوم

	Method	Ultimate load factor (X-direction)	Difference (%)	Ultimate load factor (Y-direction)	Difference (%)
3story	First-order analysis	1	-	1/071	-
	Stiffness Matrix	1/014	1/4	1/085	1/31
	Stability Function	1/04	4	1/014	-5/3
	Assume Lateral Load	0/887	-11/3	0/923	-13/8
5story	First-order analysis	0/83	-	0/84	-
	Stiffness Matrix	0/79	-4/8	0/79	-5/9
	Stability Function	0/76	-8/4	0/76	-9/5
	Assume Lateral Load	0/715	-13/85	0/715	-14/8
7story	First-order analysis	1/09	-	1/1	-
	Stiffness Matrix	1/03	-5/5	1/02	-7/2
	Stability Function	0/99	-9/17	0/99	-10
	Assume Lateral Load	0/94	-13/76	0/93	-15/4
10story	First-order analysis	1/23	-	1/24	-
	Stiffness Matrix	1/16	-5/6	1/08	-12/9
	Stability Function	0/98	-20/32	0/90	-27/4
	Assume Lateral Load	1/01	-17/88	0/88	-29/03
15story	First-order analysis	1/49	-	1/51	-
	Stiffness Matrix	1/3	-12/7	1/28	-15/2
	Stability Function	1/06	-28/8	1/01	-33/11
	Assume Lateral Load	0/92	-38/25	0/98	-35/09

Table 4. Ultimate load factor of three, five and seven story space frame in second-order analysis methods

شکل ۱۱. منحنی بار-تغییر شکل سازه های سه، پنج، هفت، ده و پانزده طبقه در راستای طولی و عرضی

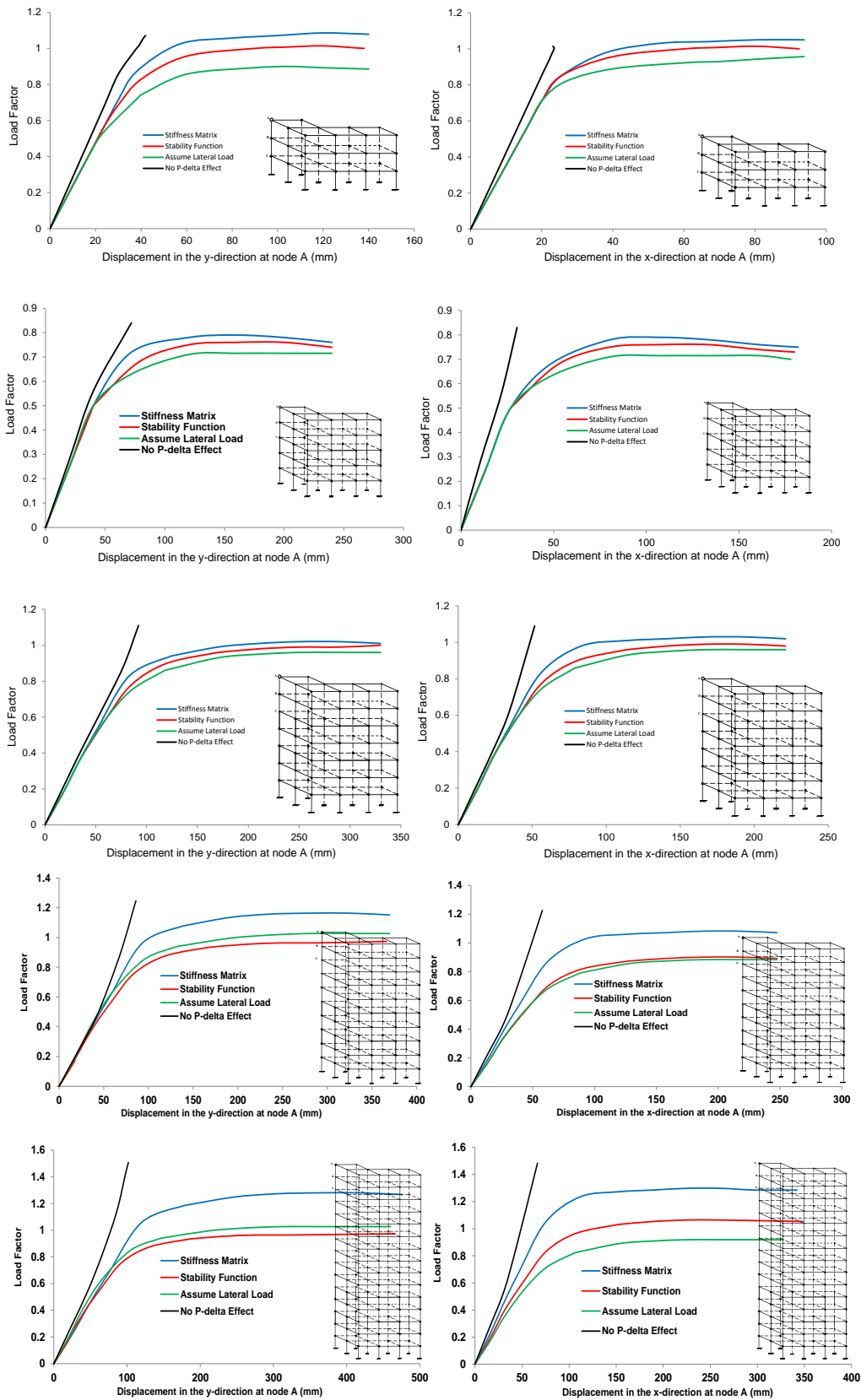


Fig. 11. Load-deflection curves of three, five, seven, ten and fifteen story space frame in x and y direction

شکل ۱۲. مقایسه اختلاف نتایج روش‌های تحلیل مرتبه دوم با تحلیل مرتبه اول در دو راستای طولی و عرضی

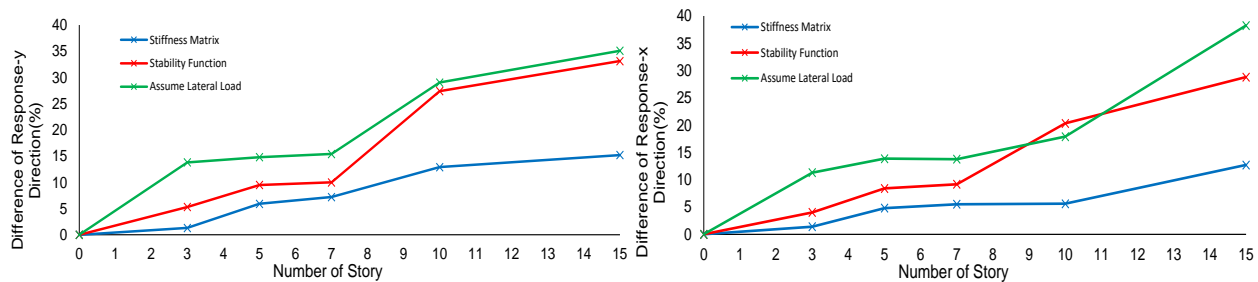


Fig. 12. Comparison of difference of the second-order and first-order analysis method's result in longitudinal and transverse direction

- 2- Al-Mashary F. & Chen W. F.1990 Elastic second-order analysis for frame design. *Journal of Construction Steel Research*, 15(4), 303-322.
- 3- Thai T. H. & Kim S. E.2009 Practical advanced analysis software for nonlinear inelastic analysis of space steel structures. *Advances in Engineering Software*, (40), 786-797.
- 4- Thai T. H. & Kim S.E.2011 Practical advanced analysis software for nonlinear inelastic dynamic analysis of steel structures. *Journal Constel Steel Res*, 67(3), 453-461.
- 5- Thai H. T. & Kim S.E.2015 Second-order distributed plasticity analysis of steel frames with semi-rigid connections. *Thin-Walled Structures*, (94), 120-128.
- 6- Chiorean C.G.2009 A computer method for nonlinear inelastic analysis of 3D semi-rigid steel frameworks. *Engineering Structures*, (31), 3016-3033.
- 7- Kim S. E. & Chen W. F.1999 Design guide for steel frames using advanced analysis program. *Engineering Structures*, (21), 352-364.
- 8- Kim S. E. & Chen W. F.1996 ASCE, Practical Advanced for Braced Steel Frame. *Journal of Structural Engineering*, 122(11), 1266-1274.
- 9- Jiang X. M., Chen H. & Richard J. Y. 2002 Spread-of-plasticity analysis of three dimensional steel. *Journal of Constructional Steel Research*, (58), 193-212.

۶- نتیجه گیری

در این مطالعه هدف اصلی بررسی تاثیر پارامتر ارتفاع سازه بر دقت روش‌های تحلیل مرتبه دوم (آثار $P-\Delta$) و ارزیابی دقت روش‌های مدنظر در سازه‌های با قاب خمشی است. با مقایسه نتایج حاصل از تحلیل غیرخطی بر اساس سه روش ماتریس سختی، توابع پایداری و بار جانبی فرضی با نتایج حاصل از مطالعات موجود، مشاهده شد در میان روش‌های تحلیل مرتبه دوم سازه، روش ماتریس سختی هندسی بالاترین دقت در تحلیل آثار $P-\Delta$ در سازه‌های با قاب خمشی را دارد. به شکلی که نتایج حاصل از این روش با مطالعات تای و کیم در مرجع [10] ۱/۰۹٪ و همچنین با مطالعات چپورن [6] ۸/۱٪ اختلاف داشته است. همچنین به منظور بررسی تاثیر ارتفاع سازه بر دقت روش‌های تحلیل مرتبه دوم، پنج سازه سه، پنج، هفت، ده و پانزده طبقه مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد، با افزایش ارتفاع سازه، اختلاف نتایج حاصل از روش‌های تحلیل مرتبه دوم با نتایج به دست آمده از تحلیل مرتبه اول، افزایش می‌یابد. به شکلی که در مورد سازه‌های بیش از سه طبقه، استفاده از روش بار جانبی فرضی دقت مطلوبی نداشته و مناسب‌ترین روش تحلیل مرتبه دوم، به منظور لحاظ کردن آثار $P-\Delta$ در سازه‌های مرتفع و بلندمرتبه، با توجه به اختلاف اندک نتایج حاصل از دو روش تحلیل مرتبه دوم و مرتبه اول در این حالت، روش ماتریس سختی هندسی است.

References

منابع

- 1- Hashemi H. B., Hosseini M. & Khanlari K.2001 Second-order analysis structure under dynamic loads. *bulletin seismology, Iran*, (4) 4. (in Persian).

- Journal of Civil Engineering*, 28(4), 640-655.
- 16- Chen W. F. & Lue E. M. 1991 Stability design of steel frames. *New Directions in Civil Engineering*, Taylor and Francis.
- 17- Denavit M. D. & Hajjar J. F. 2013 Description of geometric nonlinearity for beamcolumn analysis in OpenSees. *Department of Civil and Environmental Engineering Reports, Northeastern Uni.*
- 18- Hosseini S. M. K. & Fanai N. 2016 application of opensees software in modeling and analysis of structures. *Azadeh publisher, 4 edition*, (in Persian).
- 19- PAAP. 1996 A computer program for advanced analysis of two-dimensional steel frame. *Purdue University*.
- 20- Chen W.F. & Kim S.E. 1997 LRFD steel design using advanced analysis. *CRC Press, New York*.
- 10- Thai H. T. & Kim S.E. 2011 Nonlinear inelastic analysis of space frames. *Journal of Construction Steel Research*, (67)585-592.
- 11- Vrra H. & Bagheri G. 2003 Second-Order analysis of hinge plastic by use extended beam-column theory. 7th *National Conference Civil Engineering, Esfahan, Iran*. (in Persian).
- 12- Bueno J.R. & Loriggio D.D. 2016 Analysis of second order effects: case study. *Ibracon Structures and Materials Journal*, 9(4), 494-509.
- 13- Flores F. X., Charney F. A. & Garcia D. L. 2014 Influence of the gravity framing system on the collapse performance of special steel moment frames. *Journal of Constructional Steel*, (101), 351-362.
- 14- Shehu R., Angjeliu G. & Bilgin H. 2019 A Simple Approach for the Design of Ductile Earthquake-Resisting Frame Structures Counting for P- Δ Effect. *Buildings*, (9), 216.
- 15- Termblay R., Leger P. & Tu J. 2019 Inelastic seismic response of concrete shear walls considering Pdelta effects. *Canadian*

Second - Order Analysis of Space Frame Considering Height of the Structure Effects

Behzad Haseli

M.Sc, Earthquake Eng Dept, Faculty of Civil Eng, Kharazmi University, Tehran, Iran

*std_haseli@khu.ac.ir

Abstract:

In recent years, structures for economic and aesthetic reasons have been growing larger and thinner and this subject leading to non - linear behavior of structures. Therefore, the application of different methods for considering the effects of second order analysis in evaluation of the behavior of structures has always been considered by the designers. in this study to investigate the P- Δ effects, analyze the nonlinear behavior of multi - storey space structures. in order to estimate the effects of second order analysis in this study, methods of Stiffness Matrix, Stability Functions and Assume lateral load method have been used. in present study, in addition to comparing the accuracy of the proposed methods, examine the effect of the parameter height on the accuracy of the second order analysis. the accuracy of the second order analysis methods is investigated by comparing the results of the existing research. In the first part of the present study, after presenting the formulation of three methods of second-order analysis of stiffness matrix, stability functions and assume lateral load method, for beam-column element of a portal frame, a two-story regular structure and finally an irregular six-story structure, that studied by previous researchers, the most accurate second-order analysis is introduced by comparing the load-deformation curves. In the second part, in order to investigate the effect of height of structure on the accuracy of second-order analysis methods, similar structures of three, five, and seven floors were analyzed in two longitudinal and transverse directions and the final load coefficients obtained from the second-order analysis with The first-order analysis of the structures is compared. The analysis of three, five and seven-story structures was performed in two assume lateral load and stiffness matrix methods in OpenSees software as well as stability function analysis using Paap software. The results show that, regardless of the height of the structure, the most accurate method for estimating the effects of P - Δ in the second order analysis of different types of structures is Stiffness Matrix method. although the first - order nonlinear analysis can generally estimate the final load coefficients of the structures with good accuracy, the use of second - order nonlinear analysis in estimating the final load coefficients of structures with different height leads to an increase in the accuracy of these structures. Result show, the number of classes of structure affects the accuracy of second - order analysis methods. so that by increasing the height of the structure, the accuracy of second-order analysis methods has decreased and this reduction is more pronounced in the transverse direction of the structure. As the height of the structure increases, the accuracy of the stiffness matrix methods, stability functions and the Assume lateral load method in the second-order analysis of the transverse direction are reduced by 15.5%, 10% and 7.2%, respectively. It is observed in more than three storeys, the accuracy of the Assume lateral load method in estimating the P - Δ effects is greatly reduced and the highest correlation with the height of the structure is observed in this method. also among the second - order analysis methods in tall structures, the highest accuracy is related to the method of Stiffness Matrix.

Key Words: space frame, P - Δ effect, stiffness matrix, stability function, assume lateral load, height of structure.