

به نام خدا



علیرضا فاروقی

کارشناسی ارشد مهندسی زلزله

Management@ISTAins.com

عضو انجمن مهندسين عمران آمریکا ASCE
عضو انجمن مهندسان ایرانی محاسب ساختمان
عضو انجمن مهندسی زلزله ایران

تحلیل مرتبه دوم (P-Delta) و برنامه های سازه ای - معرفی ترکیب بار (ویرایش دوم - بخش اول)

چکیده

آنچنان که می دانیم آنالیز یک سازه عبارت است از برآورد پاسخهای آن بر اثر بارهای وارده. آنالیز سازه به چندین روش و صور مختلف انجام می پذیرد که هر کدام شرایط مربوط به خود و نتایج مجزا از یکدیگر خواهد داشت. چه بسیار سازه هایی هستند که تحت شرایط خاصی تحلیل های مختلفی را برای درک هرچه بهتر رفتار اجزای آن باید انجام داد و در انتها با تطبیق و در برخی از موارد برهم نهی نتایج باید به درک کامل تری از پاسخها رسید. یکی از این تحلیل ها تحلیل مرتبه دوم یا P-Delta است. انجام این تحلیل برای تمامی سازه ها لزومی ندارد ولی برای آندسته از سازه هایی که این تحلیل می بایست انجام پذیرد بررسی چند نکته حائز اهمیت است. یکی از آن موارد ترکیب بار موثر بر سازه در تحلیل P-Delta است. این مقاله سعی دارد تا با معرفی پارامترهای موثر در این تحلیل به ترکیب بار صحیح برای تحلیل اشاره شده برسد.

کلمات کلیدی

تحلیل مرتبه دوم، سختی، سختی هندسی، سیستم تک درجه آزادی، رفتار خطی، رفتار غیر خطی

برای معرفی تحلیل مرتبه دوم ابتدا به معرفی چند نکته پرداخته می شود:

۱- انواع تحلیلهای سازه ای

۲- شرایط و ضوابط تحلیل

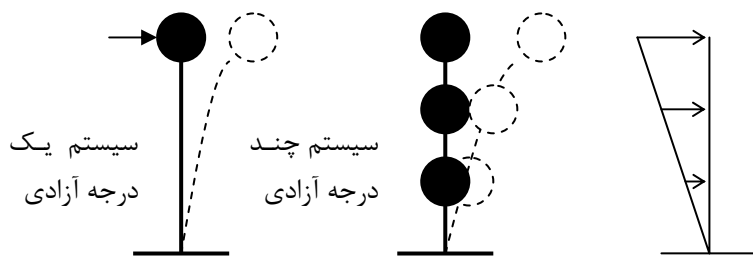
۱- انواع تحلیلهای سازه ای

آنچنانکه می دانیم تحلیلهای سازه به دو دسته کلی خطی و غیرخطی تقسیم می شوند. تحلیلهای خطی به آن دسته از تحلیلهایی اطلاق می شود که رفتار سازه را در مرحله خطی (Linear) بررسی می کنند این تحلیلهای نیز بر دو نوع هستند:

الف - تحلیل استاتیکی خطی

ب - تحلیل دینامیکی خطی

تحلیل استاتیکی خطی که متداولترین نوع تحلیل سازه است برای بررسی رفتار سازه تحت بارهای ثقلی و جانبی در مرحله رفتار خطی اجزای سازه استفاده شده و با فرضیات ساده شده تحلیلی می تواند دید اولیه بسیار خوبی از رفتار سازه به ما بدهد ولی این تحلیل برای سازه هایی که اولاً رفتار بسیار متفاوتی در مرحله غیرخطی دارند و ثانیاً برای سازه هایی که ارتعاش آنها تحت بار جانبی متفاوت از سیستم های تک درجه آزادی ساده شده می باشد با واقعیت فاصله بسیار دارد. سیستم تک درجه آزادی میله ای است که به انتهای آن یک گوی جرم دار متصل شده و تحت بارگذاری و ارتعاش، اشکال مودی (ارتعاشی) خاصی ارائه دهد.



توزیع خطی نیرو با فرض ارتعاش مشابه سیستم یک درجه آزادی که در آن تمام درجات آزادی در امتداد ارتعاشات زمین و شکل ارتعاشی روبرو شده اند. (تغییر مکان همجهت)

به طور مثال در سازه های نامنظم که در اثر تغییر سختی و یا اثر مدهای مختلف، توزیع نیروی جانبی آنها مانند بالا خطی و یکنواخت نباشد انجام آنالیز دینامیکی که نشان دهنده توزیع صحیح نیرو خواهد بود اجباری می نماید. حال به همین ترتیب تحلیلهایی که رفتار سازه را در مرحله غیر خطی (Nonlinear) بررسی می کنند نیز به دو دسته تقسیم می شوند:

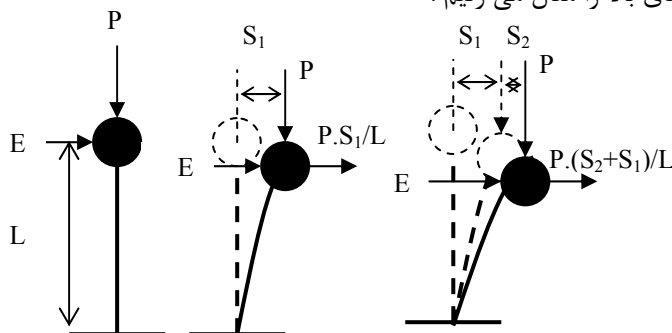
ج- تحلیل استاتیکی غیر خطی

د - تحلیل دینامیکی غیر خطی

این تحلیلهای نیز به بررسی رفتار سازه در مرحله غیر خطی می پردازند. هدف این مقاله بررسی و تشریح این تحلیلهای نیست چرا که در این موضوع بسیار مطالب مشروح و مبسوطی در کتب مختلف سازه ای یافت می شود. هدف اشاره به نکاتی خاص در این میان است:

در تمامی این تحلیلهای معمولاً یک نکته اشتراک وجود دارد و آن انجام تحلیل سازه تحت بار جانبی همزمان با بار ثقلی است. به این معنا که بار جانبی بر سازه ای اعمال می شود که در همان لحظه در حال تحمل بار ثقلی است و لذا از قبل تحت اثر بار خاصی نبوده است. به این نوع تحلیل، **تحلیل مرتبه اول** می گویند. (بجز استاتیکی غیر خطی) آنچه‌آنکه مشخص است بارگذاری ثقلی سازه باعث تغییر شکل و در نتیجه تغییر سختی اعضای سازه ای شده لذا در اثر اعمال بار جانبی دو نتیجه حاصل می گردد:

۱- **تغییر مکان نقطه اثر نیرو (اثر خطی-ارتجاعی)**: در اثر نیروی جانبی نقطه اثر نیروی ثقلی جابجا شده و ایجاد یک ممان ثقلی ثانویه می کند، خود این تغییر شکلها ممکن است بر اثر تغییر سختی ها (که در ادامه تشریح می گردد) تشدید گردد، برای مثال همان سیستم یک درجه آزادی بالا را مثال می زنیم:



در اینجا می بینیم که بر اثر تغییر مکان ناشی از بار جانبی، بار ثقلی نیز ایجاد ممان ثانویه و در نتیجه برش ثانویه کرده $(P.(S_2+S_1)/L)$ و این خود نیز باعث ایجاد تغییر مکان بیشتری می کند و این کار تا همگرایی و رسیدن به پایداری ادامه دارد. (از تغییر شکل عضو بین دو انتهایش - انحنای - صرف نظر می گردد)

۲- **تغییر سختی (اثر غیر خطی-ارتجاعی)**: ستون یک درجه آزادی تحت اثر بار ثقلی فشاری که در ابتدا وارد شده نرم تر می گردد یا به عبارتی **سختی هندسی** آن تغییر کرده لذا تغییر مکان ناشی از بار جانبی که مستقیماً به سختی جانبی آن بستگی دارد افزایش می یابد. نتیجتاً این عامل باعث افزایش تغییر مکانها و بعضاً نیروهای سازه شده و با حالتی که سازه هیچ تغییر سختی نداده است متفاوت خواهد بود. این اثر به **تحلیل مرتبه دوم غیر خطی** - یعنی تحلیل پس از بارگذاری و تغییر شکل و نوشتن روابط تعادل برای هندسه تغییر شکل یافته عضو - معروف است. در یک سازه و برای محاسبه سختی کل داریم:

$$[K] = [K_f] - [K_g]$$

در رابطه بالا K_f ماتریس سختی مرتبه اول استاندارد و K_g ماتریس سختی هندسی است که به میزان P و طول عضو L بستگی دارد. تا قبل از انجام تحلیل، مقدار نیروی محوری P مشخص نبوده و برابر صفر منظور می گردد و داریم: $[K] = [K_f]$

(تحلیل مرتبه اول). در ادامه با مشخص شدن P ماتریس سختی هندسی [Kg] (نیز محاسبه شده و باعث کاهش سختی کل می گردد و چنانچه با افزایش P داشته باشیم: $[Kg] = [Kf]$ سختی کل برابر صفر شده و کمانش اتفاق می افتد. برنامه هایی که قادر به انجام تحلیل های غیر خطی هندسی باشند مانند SAP,ETABS قادر به در نظر گرفتن هر دو اثر هستند و حالا سوال اصلی اینجاست که مقدار P چقدر است و چگونه به برنامه معرفی می گردد؟

۲- شرایط و ضوابط تحلیل

برای معرفی شرایط و ضوابط تحلیل و محاسبه مقدار P ذکر چند مطلب مهم است :

۱- آنچنانکه مسلم است تحلیل همیشه به وسیله بارهای بدون ضریب انجام می پذیرد و این نتایج تحلیل یعنی M, P, V, \dots هستند که با توجه به ضوابط مختلف آیین نامه های طراحی در ترکیبات مختلف بزرگنمایی می شوند و آنچنانکه می دانیم در برنامه های ذکر شده می توان ترکیبات بار را پس از انجام تحلیل اضافه نمود! لذا آن چنانکه از نام آن پیوسته تحلیل P-Delta باید با بارهای بدون ضریب باشد.

۲- آنچنانکه از درک درست بدست می آید بار (P) می بایست بار قائم و دائمی باشد که بتواند بر سختی هندسی سازه تاثیر بگذارد پس می بایست با توجه به عبارت بار دائمی بودن این بار را تمامی بار مرده و قسمتی از بار زنده بنامیم.

۳- حال به توضیح یکی از مراجع نگاهی می اندازیم:

دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمانهای موجود: بند ۳-۲-۵-۱

در این بخش به طور شفاف داریم:

(اثرات P-Delta در محدوده رفتار خطی مصالح)

P: بخشی از وزن سازه شامل بار مرده و بار زنده دائم و ۲۵٪ بار زنده متحرک

به طور مثال اگر بار مرده سازه ای ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مربع و بار زنده وسایل ثابت ۱۵۰ و بار افراد و غیره ۱۰۰ کیلوگرم بر متر مربع خواهیم داشت:

$$P=500+150+0.25 \times 100=675 \text{ Kg/m}^2 \sim D.L+0.7L.L$$

یعنی ترکیب بار تحلیل P-Delta خواهد بود :

$$D.L+0.7L.L$$

۴- در ادامه ببینیم برخورد آیین نامه های طراحی با این تحلیل چگونه است :

در آیین نامه بتن آمریکا ویرایش های ۹۵ به بعد داریم :

۱- تفسیر بند ۱۰-۱۱-۱: (ACI 318 -2005)

در تفسیر این بند در بیان ضوابط بندهای ۱۰-۱۱ تا ۱۰-۱۳ آمده است : بارهای بهره برداری و تغییرشکل‌های تشدید یافته توسط یک تحلیل مرتبه دوم می بایست با استفاده از بارهای بهره برداری (بدون ضریب) محاسبه شوند.

در اینجا به وضوح به بدون ضریب بودن بارهای تحلیل مرتبه دوم P-Delta اشاره شده است.

حال به بررسی علت بروز اشتباه در معرفی ترکیب بار می پردازیم :

۲- در بند ۱۰-۱۳-۶ ویرایش ۲۰۰۲ و ماقبل آمده است :

هنگام محاسبه ضریب افزایش ممان های جانبی ($\delta_s M_s$) - همان اثر P-Delta - نسبت تغییر مکانهای جانبی مرتبه دوم به تغییر مکانهای مرتبه اول برای ۱.۴ بار مرده و ۱.۷ بار زنده به اضافه بار جانبی وارد بر سازه نباید از ۲.۵ بزرگتر گردد.

اکثر کتب آموزش نرم افزار های SAP,ETABS با اشاره به همین بند آیین نامه طراحی و به اشتباه ترکیب بار تحلیل

P-Delta را $1.4D.L+1.7L.L$ معرفی می کنند!

در اینجا ذکر چند نکته لازم است :

۱- خود آیین نامه بتن آمریکا در سال ۲۰۰۵ این ترکیب بار را از متن آیین نامه حذف کرده و تنها به عبارت

ضریبدار بودن آن اشاره می کند، در ضمن در اینجا تنها بحث کنترل تغییر مکان است نه محاسبه نیروها. !

۲- آنچنانکه در ابتدا توضیح داده شد بحث تحلیل از طراحی جداست، لذا هیچ دلیلی در وارد کردن این ترکیب در بحث تحلیل وجود ندارد.

۳- این بند تنها به ضرورت کنترل سختی کاهش یافته عضو و تغییر مکان تشدید یافته پس از تحلیل P-Delta می پردازد نه معرفی تحلیل و ترکیبات آن .

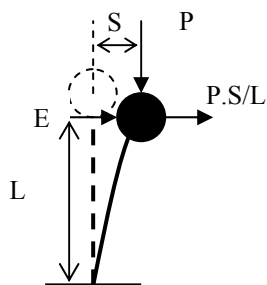
۴- در صورت استفاده از این ترکیب خواهیم داشت:

(با توجه به این نکته که این اثرات (P-Delta) به ممانهای حالات بار جانبی افزوده گردیده و حالات بار جانبی مجدداً در ترکیبات طراحی ضریب دار خواهند شد باید از چند بار ضریب دار شدن بارهای ثقلی پرهیز کرد):
برای ممان داریم:

$$1.4M_{D.L} + 1.7M_{L.L} + 1.87M_E^{se} \quad : (بدون 0.75)$$

$$M_E^{se} = M_E + 1.4M_{D.L}^{se} + 1.7M_{L.L}^{se}$$

که در رابطه بالا $M_{L.L}^{se}, M_{D.L}^{se}$ ممانهای ثانویه حاصل از خروج از مرکزیت بارهای ثقلی هستند که به ممان حاصل از خود نیروی جانبی اضافه می گردد:



$$M_{L.L}^{se} = \frac{P_{L.L} \times S}{L} \times L$$

$$M_{D.L}^{se} = \frac{P_{D.L} \times S}{L} \times L$$

$$M_E = E \times L$$

آنچنانکه مشاهده می شود چنانچه بارهای ضریب دار به جای P وارد شوند ممانهای حاصله نیز بزرگنمایی خواهند شد:

$$\frac{1.7P_{L.L} \times S}{L} \times L = 1.7M_{L.L}^{se}$$

$$\frac{1.4P_{D.L} \times S}{L} \times L = 1.4M_{D.L}^{se}$$

$$\Rightarrow 1.87M_E^{se} = 1.87M_E + 2.62M_{D.L}^{se} + 3.18M_{L.L}^{se} \dots!!$$

پس می بینیم که آن دسته از ممانهایی که حاصل از خروج از مرکزیت بارهای ثقلی هستند بیش از اندازه و نظر آیین نامه های طراحی بزرگنمایی می شوند لذا به علل یاد شده باید از بزرگنمایی بیش از حد آنها پرهیز کرده و تنها ذکر ترکیب بار مطابق با بار دائمی بدون ضریب منطقی می باشد.

نحوه اعمال اثرات P-Delta و بررسی آیین نامه ۲۸۰۰ ویرایش سوم

بند ۲-۶ اثر P-Delta

"در کلیه سازه ها تاثیر بار محوری در عناصر قائم بر روی تغییر مکانهای جانبی آنها ، برش ها و لنگرهای خمشی موجود در اعضا و نیز تغییر مکان های جانبی طبقات را افزایش می دهد. این افزایش به اثر ثانویه و یا P-Delta معروف است . در اینجا آیین نامه مشخصاً فقط به اثر خطی P-Delta در بزرگنمایی "تغییر مکانهای جانبی و نیروهای ناشی از آن" اشاره کرده و در مورد کاهش سختی بحثی مطرح نمی کند لذا به علت بررسی سازه در محدوده خطی و ارتجاعی در استاندارد ۲۸۰۰ و محاسبه نیروهای جانبی بر حالت تنش مجاز و نیز عدم دستیابی به روشهای ساده و کاربردی برای منظور کردن اثرات کاهش سختی ، از اثر دوم (غیرخطی) صرف نظر می شود و فقط به اهمیت در نظر گرفتن اثر اول یا افزایش نیروهای جانبی به علت تغییر نقطه اثر نیرو و ایجاد برشهای جانبی ثانویه ثقلی اشاره می شود.

حال در این قسمت دو ضریب معرفی می شود :

۱- ضریب بزرگنمایی (اثر خطی P-Delta) در محدوده رفتار ارتجاعی سازه و برای در نظر گرفتن اثرات تغییر در محل نقطه اثر نیرو با نام θ_i

۲- ضریب بزرگنمایی در محدوده رفتار غیرارتجاعی سازه و برای در نظر گرفتن اثرات شکل پذیری، اضافه مقاومت و غیره با عبارت $0.7R$

رابطه ضریب اول به قرار زیر است :

$$\theta_i = \left[\frac{P_i \Delta_{wi}}{V_i h_i} \right]$$

P_i : مجموع بارهای مرده و زنده موجود در طبقه i ام.

Δ_{wi} : تغییر مکان نسبی اولیه (از تحلیل اولیه خطی) در طبقه i ام .

V_i, h_i : برش و ارتفاع طبقه i ام.

در اینجا نیز P مجموع بارهای مرده و زنده بدون اشاره به ضریب دار بودن معرفی شده است و این مطلب ذکر شده که چنانچه ضریب اول کمتر از ۱۰ درصد باشد احتیاجی به انجام تحلیل P-Delta نیست.

یاد آوری می گردد که ضریب دوم ربطی به تحلیل ثانویه یا مرتبه دوم ندارد بلکه فقط نمایانگر تغییر مکان واقعی سازه در هنگام زلزله طرح بدون در نظر گرفتن کاهشهای آیین نامه ای برای نیروی جانبی می باشد و آنچنانکه در صفحه ۳۷ استاندارد ۲۸۰۰ نیز آمده است ضریب اول در تمامی نتایج تحلیل اعم از تغییر مکانها و نیروها ضرب می گردد ولی ضریب دوم (مطابق پیوست ۵ صفحه ۱۲۳) تنها برای کنترل تغییر مکان و فقط در تغییر مکانهای تحلیل خطی ضرب می گردد.

حال برای منظور نمودن اثر اول داریم : (اثر خطی P-Delta)

تغییر مکان افزایش یافته جانبی نسبی طبقه که در محاسبات نیروهای داخلی به کار برده می شود برابر است با:

$$\bar{\Delta}_{wi} = \frac{\Delta_{wi}}{1 - \theta_i}$$

و برای منظور نمودن اثر دوم داریم : (اثر رفتار غیر خطی سازه بر تغییر مکان)

تغییر مکان نسبی واقعی طبقه که تنها برای کنترل با تغییر مکان مجاز محاسبه می شود برابر است با :

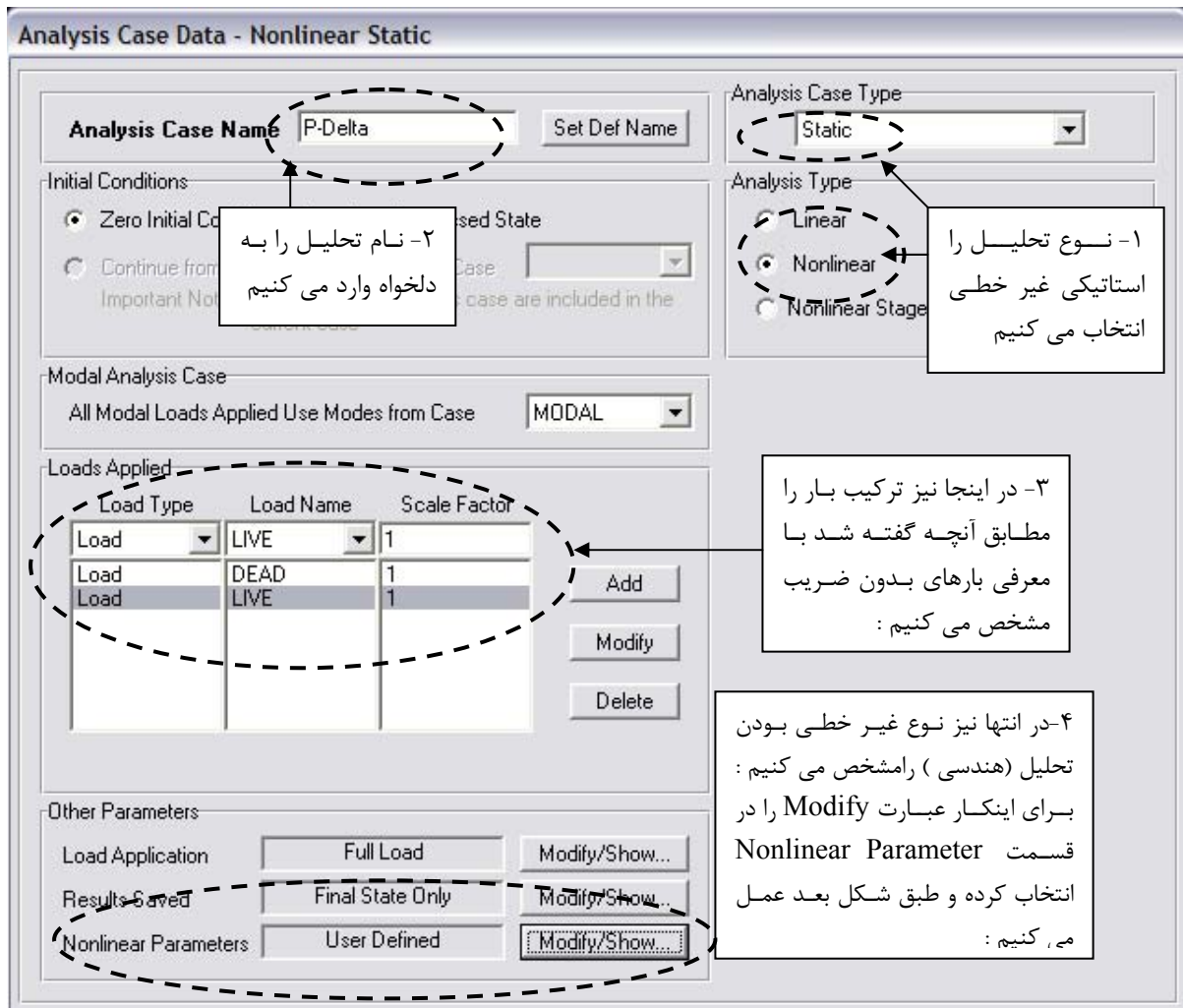
$$\bar{\Delta}_{Mi} = 0.7R \bar{\Delta}_{wi}$$

برنامه های سازه ای می توانند هر دو اثر P-Delta (خطی و غیرخطی) را لحاظ کنند به همین منظور برای محاسبات نیروهای داخلی اعضا به غیر از انجام تحلیل P-Delta احتیاج به هیچ بزرگنمایی نمی باشد ولی از آنجا که در تحلیل های خطی اثرات غیرخطی به طور کامل دیده نشده و در مدل منظور نمی گردد، تغییر مکان محاسبه شده در پایان یک تحلیل خطی همراه با اثر P-Delta برای کنترل با تغییر مکان مجاز باید با $0.7R$ بزرگنمایی شود.

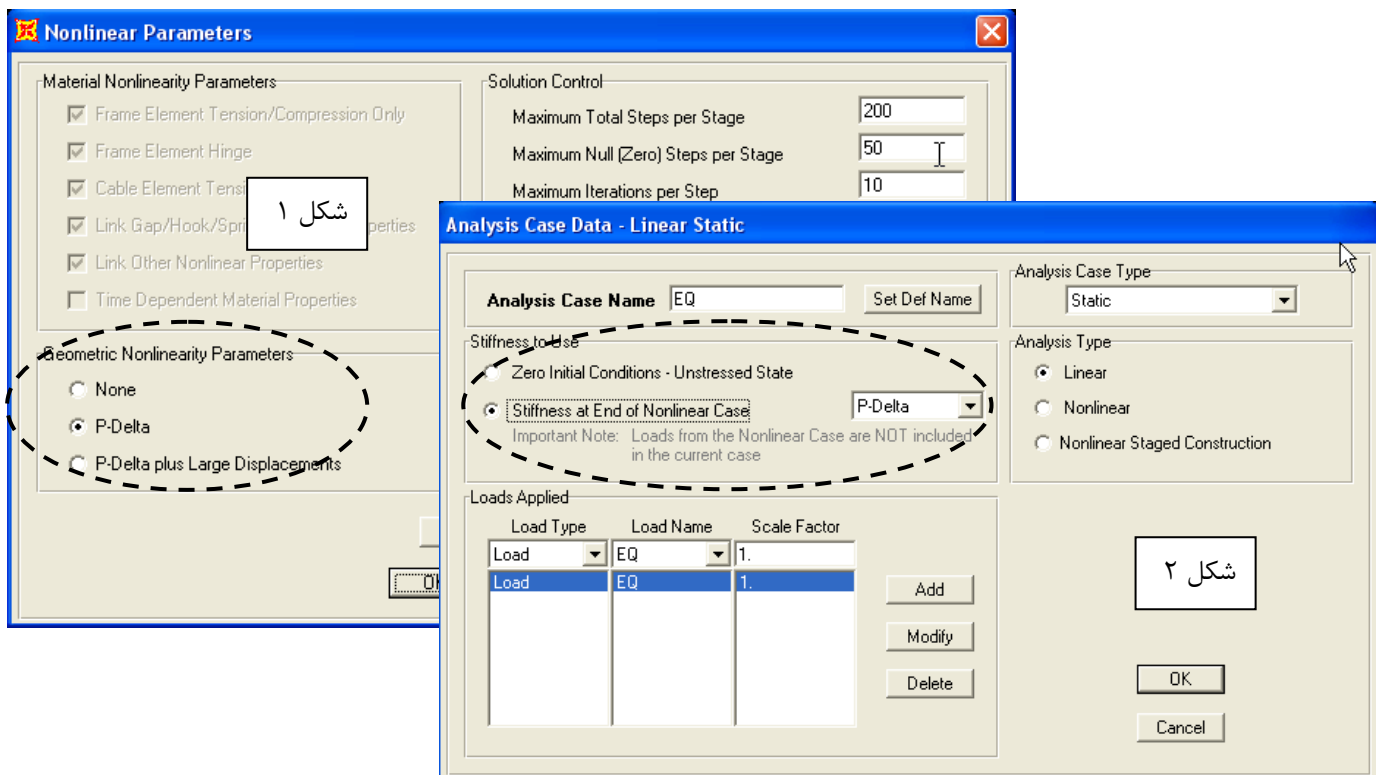
روش اعمال تحلیل P-Delta در برنامه های SAP,ETABS نیز به قرار زیر است :

۱- SAP2000 : (Ver 9.x.x,8.x.x)

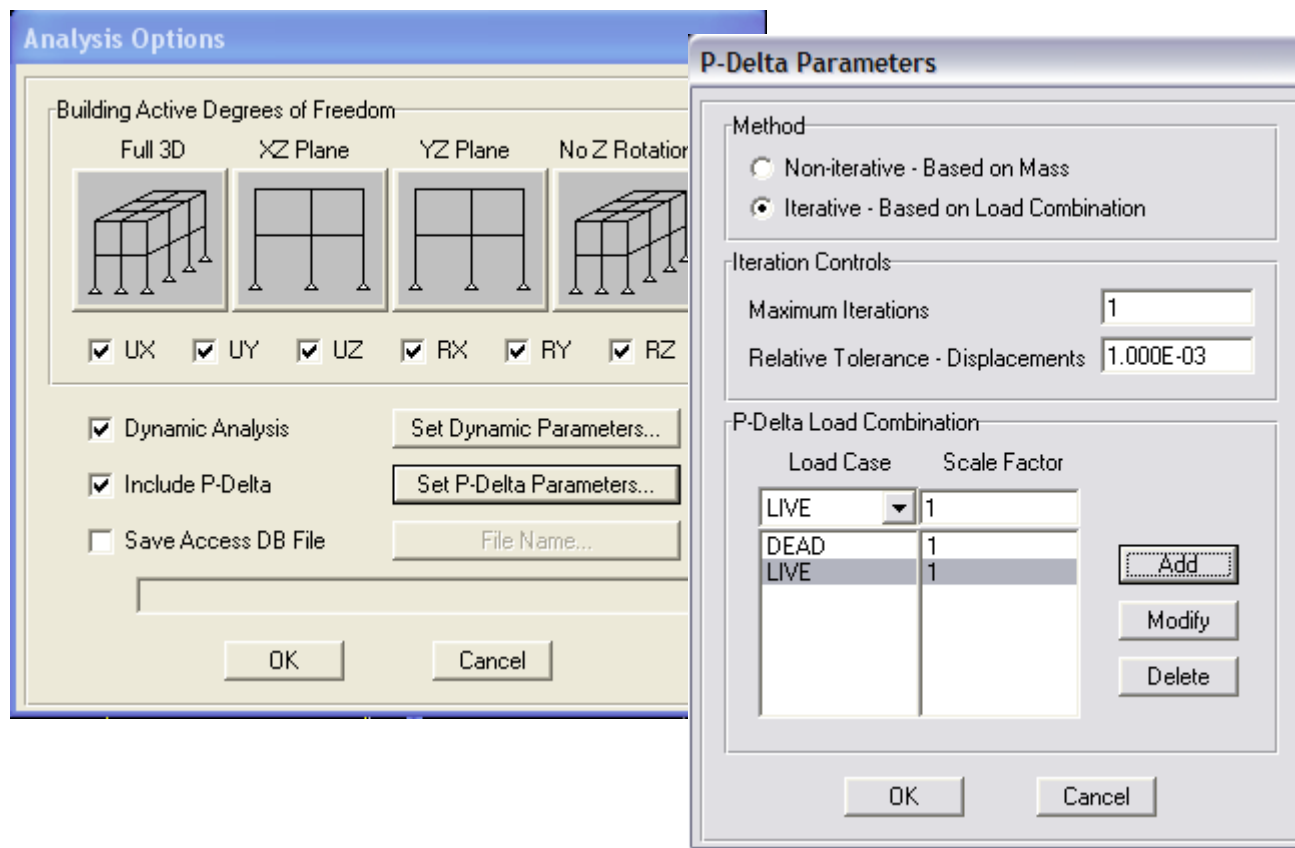
در این برنامه پس از تعریف حالات بار زنده و مرده ، از منوی Define گزینه Analysis Case را انتخاب کرده و با زدن دکمه Add New Case پنجره زیر ظاهر شده و به ترتیب زیر عمل می کنیم :



در ادامه مراحل بالا در شکل ۱، نوع غیرخطی بودن تحلیل استاتیکی را مشخص می کنیم سپس در حالت تحلیل زلزله EQ با انتخاب سختی موثر پس از اتمام تحلیل P-Delta برای شروع تحلیل بارجابنی طبق شکل شماره ۲، اثر تحلیل مرتبه دوم را اعمال می کنیم. (توجه کنید که بدون انجام این مرحله اثر P-Delta منظور نخواهد شد)



۲- در برنامه ETABS نیز در منوی Analyze در مقابل عبارت Include P-Delta تیک زده و سپس با زدن عبارت Set P-Delta Parameters ترکیب بار مورد نظر را وارد می کنیم :



در انتها نیز پس از پایان تحلیل ، تغییر مکان افزایش یافته جانبی نسبی طبقه را با $0.7R$ بزرگنمایی کرده و با تغییر مکانهای مجاز کنترل می گردد.

مراجع :

- ۱- دستورالعمل بهسازی ساختمانهای موجود - پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله
- ۲- آیین نامه بتن آمریکا ACI ویرایش های ۹۵ و ۹۹ و ۲۰۰۲ و ۲۰۰۵
- ۳- آیین نامه استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش سوم - مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن
- 4-MacGregor, J. G. and Hage, S.E., "Stability Analysis and Design of Concrete Frames," J. structural Div. ASCE 103, No. ST10, 1953-1970, Oct. 1977.
- ۵- راهنمای برنامه تخصصی تحلیل و طراحی ستونها و دیوارهای بتنی - نشر علم عمران
- ۶- دینامیک سازه ها و تعیین نیروهای زلزله - تألیف: آنیل چوپرا - ترجمه: شاپور طاحونی