

به نام خدا



علیرضا فاروقی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله
دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرکرد

Management@ISTAins.com

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

تحلیل مرتبه دوم (P-Delta) و برنامه‌های سازه‌ای - اشتباه در معرفی ترکیب بار

آنچنان که می‌دانیم آنالیز یک سازه عبارت است از برآورد پاسخ‌های آن بر اثر بارهای وارده. آنالیز سازه به چندین روش و صور مختلف انجام می‌پذیرد که هر کدام شرایط مربوط به خود و نتایج مجزا از یکدیگر خواهد داشت. چه بسیار سازه‌هایی هستند که تحت شرایط خاصی تحلیل‌های 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. در اینجا ذکر چند نکته اهمیت دارد:

۱- انواع تحلیلهای سازه ای

۲- شرایط و ضوابط تحلیل

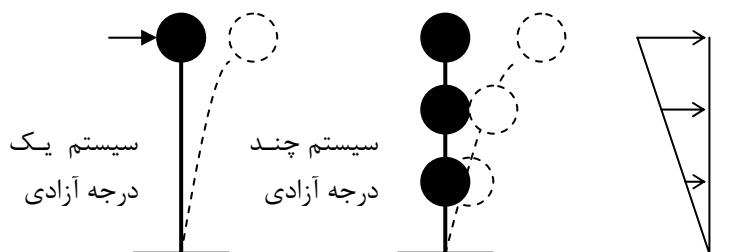
۱- انواع تحلیلهای سازه ای

آنچنانکه می‌دانیم تحلیلها به دو دسته کلی خطی و غیرخطی تقسیم می‌شوند. تحلیلهای خطی به آن دسته از تحلیلهایی اطلاق می‌شود که رفتار سازه را در مرحله خطی (Linear) بررسی می‌کنند این تحلیلها 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 می‌تواند دید اولیه بسیار خوبی از رفتار سازه به ما بدهد ولی این تحلیل برای سازه‌هایی که اولاً رفتار بسیار متفاوتی در مرحله غیرخطی دارند و ثانیاً برای سازه‌هایی که ارتعاش آنها تحت بار جانبی متفاوت از سیستم‌های تک درجه آزادی ساده شده می‌باشد با واقعیت فاصله بسیار دارد. سیستم آزادی تک درجه 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.

به طور مثال در سازه‌های 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 می‌نماید.

حال به همین ترتیب تحلیلهایی که رفتار سازه را در مرحله غیر خطی (Nonlinear) بررسی می کنند نیز به دو دسته تقسیم می شوند:

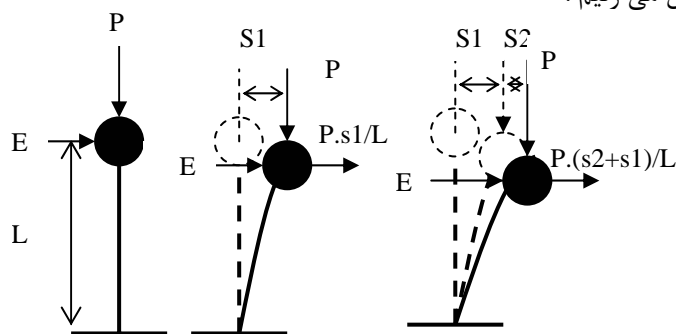
ج- تحلیل استاتیکی غیر خطی

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) آنچنانکه 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: در اثر نیروی جانبی نقطه اثر نیروی ثقلی جابجا شده و این نیرو 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 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 -انحنا- صرف نظر می گردد)

۲- تغییر سختی: ستون یک درجه آزادی تحت اثر بار ثقلی 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 ($[K_g]$) نیز محاسبه شده و باعث کاهش سختی کل می گردد و چنانچه با افزایش P داشته باشیم: $[K_g] = [K_f]$ 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؟ در پاسخ به این سوال 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 پیداست 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 بارمرده 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 :

بند ۱۰-۱۳-۶ ویرایش ۲۰۰۲ و ماقبل :

هنگام محاسبه ضریب افزایش ممان های جانبی ($\delta_s M_s$) 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 برسازه 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 بار در بحث تحلیل وجود ندارد.

۳ - 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 این 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:

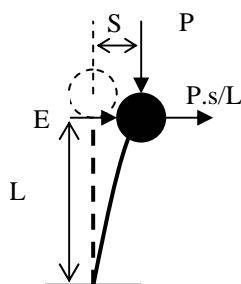
یکی از ترکیبات بار طراحی برای تحلیل مرتبه دوم (بدون ۰,۷۵):

$$1.4M_{D.L} + 1.7M_{L.L} + 1.87M^{se}_E$$

$$M^{se}_E = M_E + 1.4M^{se}_{D.L} + 1.7M^{se}_{L.L} \rightarrow$$

$$1.87M^{se}_E = 1.87M_E + 2.62M^{se}_{D.L} + 3.18M^{se}_{L.L} \dots!!$$

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



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

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

$$M_E = E \times L$$

آنچنانکه مشاهده شد چنانچه بارهای ضریبدار 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 و در صورت لزوم همراه با ضرایب بزرگنمایی 0.7R (طبق ویرایش سوم آیین نامه ۲۸۰۰) باید در قسمت ترکیب بار تحلیل P-Delta وارد شود. در اینجا لازم به ذکر است که به علت عدم امکان ضرب تغییر مکانها در آنالیز P-Delta در عدد 0.7R، در برنامه های متداول این عدد به ناچار در بار ضرب می شود. این عمل (ضرب 0.7R در نیروها) اغلب باعث افزایش نرمی ستون و در نتیجه افزایش تغییر مکانها می شود. لذا در این حالت تغییر مکانها و نیروهای ناشی از تحلیل P-Delta بیش از اندازه بزرگنمایی شده و نتایج اندکی دست بالا خواهد بود.

روش اعمال تحلیل P-Delta در برنامه های SAP,ETABS نیز به قرار زیر است:
SAP2000 - 1 (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:

Analysis Case Data - Nonlinear Static

Analysis Case Name: P-Delta

Analysis Case Type: Static

Analysis Type: Nonlinear

Initial Conditions: Zero Initial Conditions

Modal Analysis Case: MODAL

Load Type	Load Name	Scale Factor
Load	LIVE	0.7*0.7*8
Load	DEAD	1*0.7*8
Load	LIVE	0.7*0.7*8

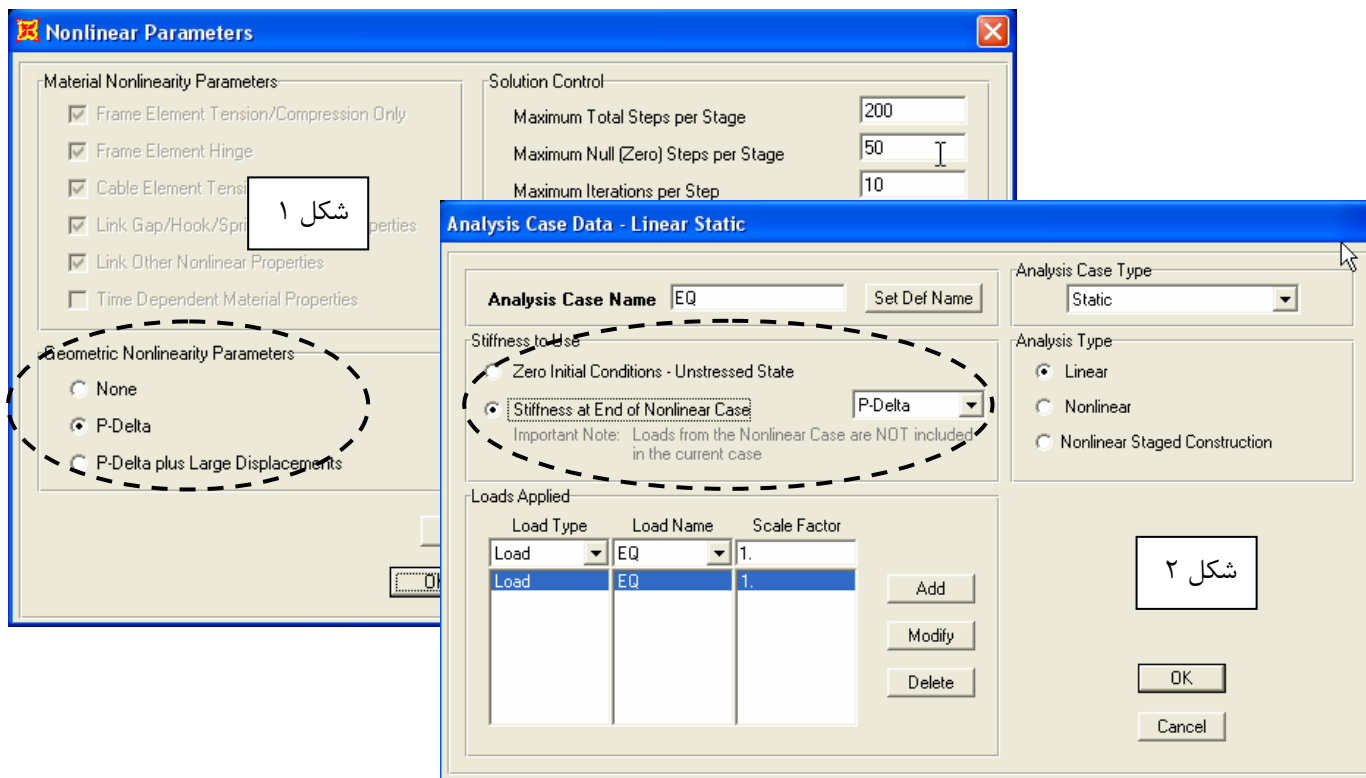
Other Parameters: Nonlinear Parameters: User Defined

۱- نوع تحلیل را استاتیکی غیر خطی انتخاب می کنیم

۲- نام تحلیل را به دلخواه وارد می کنیم

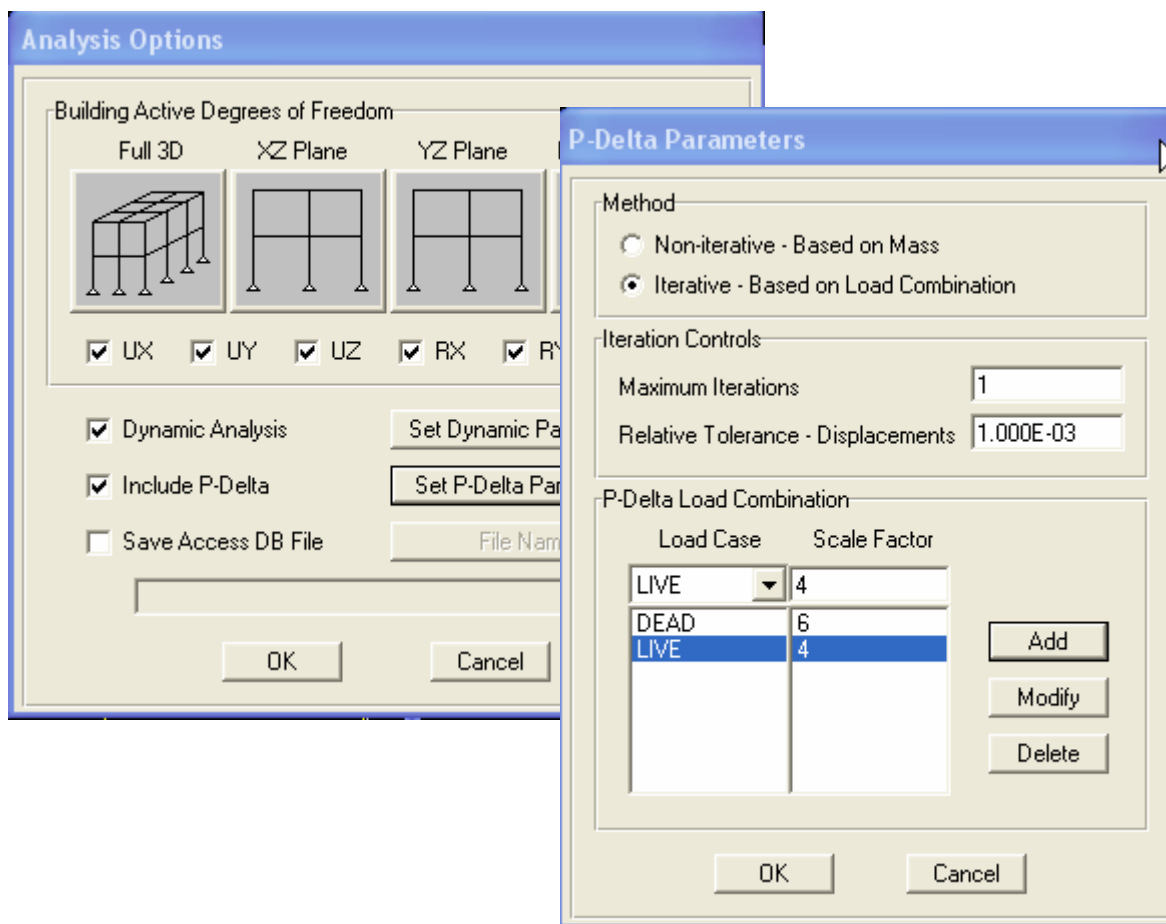
۳- در اینجا نیز ترکیب بار را مطابق آنچه گفته شد و با در نظر گرفتن ضریب بزرگنمایی 0.7R که در اینجا ۸ فرض شده وارد می کنیم:

۴- در انتها نیز نوع غیر خطی بودن تحلیل (هندسی) را مشخص می کنیم: برای اینکار عبارت Modify را در قسمت Nonlinear Parameter انتخاب کرده و طبق شکل بعد 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 بارجانبی طبق شکل شماره ۲ ، اثر تحلیل مرتبه دوم را اعمال می کنیم.

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 :



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 - تالیف: آنیل چوپرا - ترجمه: شاپور طاحونی