

مطالعه تحلیل استاتیکی غیرخطی (بار افزون) در تعیین نقطه عملکرد

سازه (کد 5A)

سید علی موسوی داودی

فارغ التحصیل کارشناسی مهندسی عمران- دانشکده فنی ساری (امام محمد باقر (ع)

Email: Ali_mousavii@yahoo.com

چکیده: امروزه به منظور ارزیابی لرزه ای و مقاوم سازی سیستم های مختلف سازه ای از روش های تحلیل غیر خطی استفاده می شود. روش های تحلیل غیرخطی به دو نوع استاتیکی و دینامیکی تقسیم می شوند که در این بین استفاده از روش های تحلیل استاتیکی غیر خطی به دلیل سادگی و سرعت بالا و حجم کم محاسبات بر روش های تحلیل دینامیکی غیر خطی برتری دارند. همچنین به منظور بررسی و مطالعه عملکرد دقیق ساختمان ها در هنگام زلزله و ایجاد طرحی بهینه از لحاظ اقتصادی باید تحلیل غیرخطی صورت گیرد، در تحلیل غیر خطی باید تغییر مکانها، محل تشکیل مفاصل پلاستیک و نحوه توزیع آن ها مشخص شود. از آنجاییکه در روش طراحی لرزه ای براساس عملکرد، برای سطوح مختلف عملکرد مورد انتظار، مرتبط با سطوح مختلف خطر زلزله طراحی می گردد، یک گام مهم در طراحی لرزه ای براساس عملکرد، تعیین و محاسبه دقیق پاسخ لرزه ای غیرخطی سازه ها می باشد. برای این منظور چند روش وجود دارد که از جمله آن عبارتند از: تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی که از دسته تحلیل های دینامیکی می باشد و تحلیل استاتیکی غیر خطی (بار افزون) تحلیل تاریخیچه زمانی غیر خطی به لحاظ حجم زیاد محاسبات از کاربرد کمتری نسبت به تحلیل استاتیکی غیر خطی برخوردار است و با توجه به این نکته که تحلیل بار افزون دارای مشکلات مربوط به تحلیل دینامیکی غیرخطی نبوده، با انجام آن می توان با استفاده از طیف پاسخ به عنوان منحنی نیاز، تخمین مناسبی از پاسخ لرزه ای سازه بدست آورد. نکته دیگر اینکه روش تحلیل استاتیکی غیر خطی دارای دقت بیشتری در تخمین پاسخ و ظرفیت سازه می باشد که در سال های اخیر مورد توجه محققین زمینه علم طراحی سازه قرار گرفته است. در این مقاله نیز سعی شده است، نکات مهمی در زمینه استفاده عملی از تحلیل استاتیکی غیر خطی (بار افزون) و تعیین طیف ظرفیت در ارزیابی لرزه ای سازه ها جهت مقاوم سازی سازه مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد.

واژه های کلیدی: تحلیل استاتیکی غیر خطی ، طیف ظرفیت، آسیب پذیری لرزه ای، مقاوم سازی لرزه ای

The Study Nonlinear static (pushover) in determining the performance point (Code 5A)

Seyed Ali Mousavi Davoudi

Graduate of Civil Engineering - Technical University of Sari

Abstract: The seismic evaluation and retrofit of systems of nonlinear structural analysis methods used, nonlinear static and dynamic analysis methods are divided into two types who In the meantime, using non-linear static analysis because of the simplicity and high speed and low volume calculations based nonlinear dynamic analysis methods are superior, in order to study the exact performance of buildings during an earthquake and economically optimal design should be non-linear analysis Non-linear analysis should shift, plastic hinges and its distribution to be specified, Since the seismic design methods based on structural function, for different levels of expected performance, associated with the different levels of the design earthquake. An important step in seismic design based on performance, determination and calculation of non-linear seismic response of structures is accurate. For this purpose, there are a number of ways, including the following: Non-linear time history analysis that the category is the dynamic analysis and nonlinear static analysis (pushover) non-linear time history analysis in terms of high volume computing applications is less than the non-linear static analysis And due to the fact that no pushover analysis problems related to nonlinear dynamic analysis ,By doing that can be used to call the whole curve as needed, to obtain a good estimation of the seismic response of structures, Another point is that non-linear static analysis method is more accurate in estimating the response and structural capacity, which in recent years an increasing interest in the field of structural design in the world, In this article we have tried implications in the field of practical use of nonlinear static analysis (pushover) and spectrum capacity in the evaluation of seismic retrofitting structures to be studied.

Keywords: Non-linear static analysis, Spectrum capacity, Seismic Vulnerability, Seismic Retrofitting

● مقدمه

در طراحی لرزه ای براساس عملکرد، سازه برای سطوح مختلف عملکرد مورد انتظار مرتبط با سطوح مختلف خطر لرزه ای طراحی می گردد. برای رسیدن به این هدف ناگزیر باید از تحلیل های غیر خطی استفاده شود. در حال حاضر این روش در آیین نامه ها و پیش استانداردهای متعددی توصیه شده است. یک گام مهم در طراحی لرزه ای براساس عملکرد، تخمین پاسخ لرزه ای غیرخطی سازه ها می باشد. برای این منظور دو روش وجود دارد :

تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی و تحلیل استاتیکی غیرخطی بار افزون. با در نظر گرفتن جنبه های مختلف استفاده از تحلیل دینامیکی غیر خطی مانند، حساسیت زیاد پاسخ ها به رکورد ورودی، عدم انطباق شرایط ساختگاهی محل ثبت رکورد با محل سازه مورد بررسی، وجود پارامترهای متنوع موثر بر پاسخ سازه (نظیر محتوای فرکانسی، پیروید خاک، مدت زمان زلزله، رفتارهای کاهنده سازه)، که منجر به لزوم تحلیل های متعدد و بهره گیری از نتایج آماری آنها شده است، می توان گفت که این روش، نسبتاً مشکل و پرهزینه می باشد. تحلیل بار افزون دارای مشکلات مربوط به تحلیل دینامیکی غیرخطی نبوده و با انجام آن می توان با استفاده از طیف پاسخ به عنوان منحنی نیاز، تخمین مناسبی از پاسخ لرزه ای سازه بدست آورد و همچنین روش تحلیل بار افزون مودی که دارای دقت بیشتری در تخمین پاسخ و ظرفیت سازه می باشد در سال های اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته است. استفاده از این روش در بررسی آسیب پذیری انواع سازه ها باعث رسیدن به نتایج منطقی با صرف هزینه و زمان اندک می باشد.

● تحلیل بار افزون

تحلیل غیر خطی بار جانبی بار افزون یا تحلیل مود خرابی (collapse mode) یک روش ساده و مفید برای پیش بینی پاسخ لرزه ای در کنار تحلیل دینامیکی غیر خطی می باشد. با استفاده از تحلیل بار جانبی فزاینده می توان ترتیب و توالی تسلیم شدن ها، ظرفیت شکل پذیری و مقاومت جانبی سازه را تعیین کرد. در تحلیل بار جانبی فزاینده سازه تحت بار جانبی افزایشی به صورت گام به گام مورد تحلیل قرار می گیرد. معادلات حاکم به صورت زیر می باشد.

$$[Kt] \{u\} = \{\Delta F\} \quad (1)$$

که در آن $[Kt]$ ماتریس سختی مماسی، $\{\Delta u\}$ بردار میزان افزایش تغییر مکان های جانبی و $\{\Delta F\}$ بردار میزان افزایش نیروهای جانبی می باشد. تحلیل بار افزون ممکن است به صورت کنترل نیرو یا کنترل جابجایی باشد. تحلیل بار افزون معمولاً نیاز به زمان قابل ملاحظه ای داشته و در عمل پیچیده تر از آن است که برخی از مهندسين فکر می کنند، در نتیجه در اثنای این تحلیل باید صبر و حوصله خاصی داشت. راهنما ها و مراجع اصلی در تحلیل غیرخطی، گزارش های FEMA-273 و ATC-33 بوده و همچنین یک سری مطالعات موردی بر روی برخی از ساختمان ها وجود دارد. علاوه بر اینها از گزارش ATC-40 نیز می توان برای ساختمان های بتنی استفاده نمود.

● مقاومت سازی سازه

در جدول ۱ کلیات روش های طراحی بر اساس نیرو و جابجایی آورده شده است.

در جدول (۱) کلیات روش های طراحی بر اساس نیرو و جابجایی آورده شده است.

زمینه کاربرد	سازه های نو	سازه های موجود
اهداف عملکردی	ضمنی	صریح
سطوح عملکردی	ایمنی جانی $I=1.0$	ایمنی جانی، عملکرد بی وقفه، فروریزش
سطوح زلزله	زلزله پایه طرح DBE برای سازه های ایزوله (MCE)	DBE و MCE و سطوح دیگر
پارامتر های طراحی	نیروی کاهش یافته (ضریب R)	جابجایی واقعی
معیار پذیرش	محدودیت های نیرو (مقاومت)	جابجایی های محدودیت (رفتار غیر خطی)

در کنار جدول فوق به دو نکته اساسی زیر نیز توجه گردد:

- در روش نیرو، جابجایی های سازه کنترل میگردند.
 - در روش جابجایی برخی از اعضای سازه به دلیل ماهیت نیروی آن ها به صورت نیرو- کنترل می باشند.
- بسیاری از سازه هایی که براساس نیرو طراحی شده اند، الزامات مربوط به روش جابجایی را نیز برآورده می نمایند و بر عکس در فرآیند تحلیل های غیر خطی باید توجه نمود که در خصوصیات سازه ای و تحریک زمین همواره مجموعه ای از عدم قطعیت ها

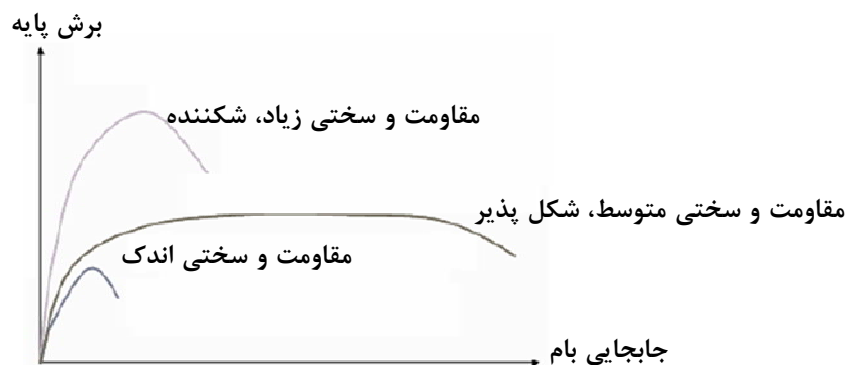
وجود دارد. در جدول (۲) الزامات و محدودیت های طراحی روش های مختلف ارائه شده است. مطابق شکل (۱) ملاحظه می شود که می توان سه نوع رفتار برای سازه ها فرض نمود.

- نوع اول : سازه های دارای مقاومت و شکل پذیری اندک بوده که در زلزله رفتار بسیار نامطلوبی دارد.
- نوع دوم : سازه های دارای مقاومت متوسط و شکل پذیری بالا بوده که در زلزله رفتار مطلوبی دارد.
- نوع سوم: سازه های دارای مقاومت بالا و شکل پذیری اندک بوده که در صورت طراحی لرزه ای به منظور مقاومت کافی ممکن است رفتار لرزه ای مناسبی داشته باشد.

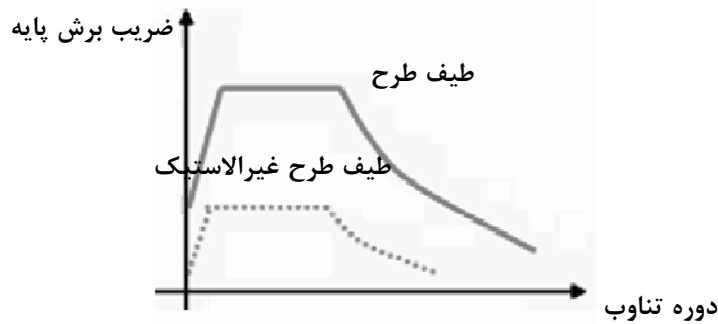
در شکل (۲) نمودار طیف طراحی که در فرآیند طراحی به روش نیرو استفاده می شود نشان داده شده است. در این شکل ملاحظه می شود که طیف طرح کشسان با یک ضریب رفتار R تبدیل به طیف طرح غیر کشسان شده و براساس آن نیروهای طراحی لرزه ای بدست می آیند. در شکل (۳) نمودار طیف نیاز کشسان که در تحلیل بار افزون مورد استفاده قرار می گیرد نشان داده شده است. به همراه این طیف از نمودار ظرفیت سازه (منحنی پوش اور تبدیل شده به شتاب طیفی بر حسب جابجایی طیفی، (ADRS) نیز استفاده می شود.

جدول ۲ : الزامات و محدودیت های طراحی روشهای مختلف

الزامات و محدودیت ها				روش تحلیل
آیا قابلیت لحاظ کردن اثرزلزله حوزه نزدیک را دارد؟	آیا لحاظ کردن اثر مودهای بالاتر تا حدی دارای محدودیت می باشد؟	آیا باید هندسه سازه ساده باشد؟	آیا پاسخ غیر خطی سازه متناسب با پاسخ خطی آن است؟	
خیر	بله	بله	بله	استاتیکی خطی
خیر	خیر	خیر	بله	دینامیکی خطی (طیف طرح)
خیر	بله	خیر	خیر	استاتیکی غیرخطی (پوش اور)
بله	خیر	خیر	خیر	دینامیکی غیرخطی (تاریخچه زمانی)



شکل ۱: رفتار سازه های مختلف



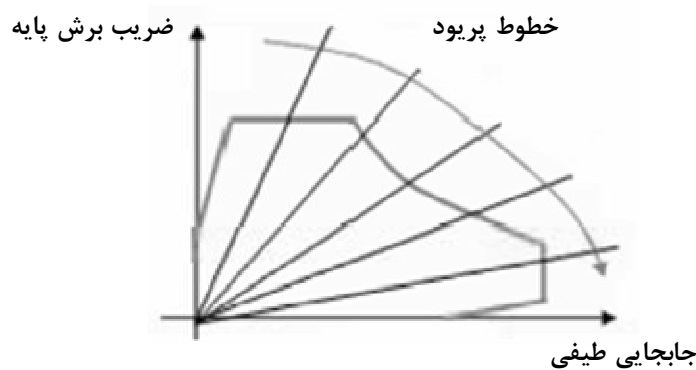
شکل ۲: طیف طرح

تحلیل بار افزون در حقیقت تحلیل فرآیند تسلیم شدن گام به گام نقاط بحرانی سازه می باشد. که در دهه اخیر به شدت مورد توجه محققین و مهندسیین به منظور ابزاری قدرتمند برای بررسی رفتار واقعی سازه تحت زلزله مورد توجه قرار گرفته است. این روش یکی از سه روش پیشنهاد شده توسط FEMA-273/274 بوده و مباحث مربوط به طیف در ATC-40 آورده شده است. در صورت مدلسازی و تحلیل صحیح می توان به نتایج ارزشمندی به منظور بررسی عملکرد سازه در زلزله رسید. البته باید توجه نمود که فرآیند مدلسازی دارای نکات بسیار زیاد و ظریفی می باشد.

در تحلیل بار افزون سازه تحت یک بار به شکل مشخص به صورت جانبی قرار می گیرد. سپس به تدریج این نیرو افزایش می یابد و فرایند تشکیل ترک، تسلیم شدن نقاط و تشکیل مفاصل پلاستیک مورد بررسی قرار می گیرد و در انتها مکانیزم شکست سازه تعیین می شود. با این تحلیل می توان نقاط ضعیف سازه را تعیین نمود. معمولاً معیار عملکردی سازه برای تحلیل بار افزون بر اساس جابجایی طیفی بام می باشد. به منظور انجام تحلیل بار افزون از نرم افزارهای مختلفی از جمله: (ETABS2000) (PERFORM-2D)، (IDARC-3D)، (IDARC-2D)، (ANSR)، (DRAIN-3DX)، (DRAIN-2DX)

(PERFORM-3D)، (SAP2000)، (NL-PUSH) می توان استفاده نمود. محل تلاقی طیف ظرفیت و منحنی نیاز، نقطه عملکرد سازه در زلزله می باشد. در صورت وجود نقطه عملکرد می توان با یکی از روش های زیر آن را تعیین نمود:

روش ضریب R (رینهورن و همکاران)، روش ضریب جابجایی (FEMA-273)، روش طیف ظرفیت (ATC-40)، اگر نقطه عملکرد وجود داشته باشد و شرایط خرابی های ایجاد شده در سازه متناظر با آن تغییر شکل، در حد قابل قبولی باشد. آنگاه سازه شرایط مربوط به تحلیل بار افزون را ارضا می کند. در صورت عدم وجود نقطه عملکرد باید سازه را تقویت نمود.



شکل ۳: طیف نیاز الاستیک

• انواع روش های تعیین نقطه عملکرد

۱- روش سکانتی ۳ یا وتری

در این روش ابتدا مدل الاستیک سازه با یکی از شیوه های خطی آنالیز می گردد، سپس سختی هر المان براساس رابطه بار-جابجایی و تغییر شکل های حاصل در آن المان، با یک سختی وتری جایگزین شده و سازه جایگزین دوباره تحلیل میگردد. این روند تا جایی ادامه می یابد که جابجایی های حاصل از دو تکرار متوالی به تقریب قابل قبول یکسانی برسند. در

روش دوم یک فرم دو خطی از منحنی ظرفیت ساخته می شود سپس بر اساس فرمول های یا دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمانهای موجود، جابجایی هدف تعیین میشود.

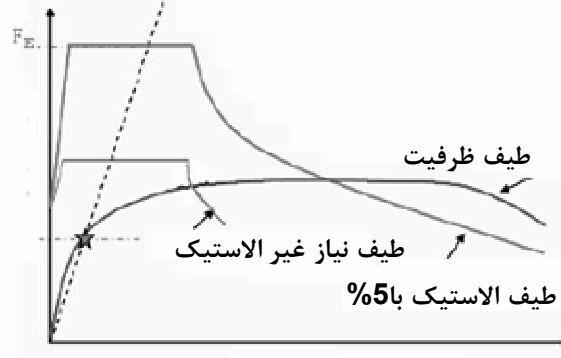
۲- روش اصلاح جابجایی یا ضریب جابه جایی (FEMA-273)

در روش ضریب جابجایی، برای به دست آوردن جابجایی نیاز، ابتدا جابه جایی نیاز کشسان به دست آمده و سپس با اعمال ضرایبی جابجایی نیاز غیر کشسان محاسبه می شود .

• مبانی روش اصلاح جابجایی یا ضریب جابجایی (FEMA-273)

در شکل (۵) منحنی ظرفیت و نیاز و محل تقاطع آن ها یعنی نقطه عملکرد نشان داده شده است. در این شکل نقطه عملکرد با استفاده از روش ضریب R تعیین شده است. در شکل (۶) روش تعیین نقطه عملکرد براساس روش FEMA-273 ملاحظه می گردد. در این روش ابتدا تخمینی از جابجایی کشسان سازه بدست آمده و سپس با استفاده از ضرایب اصلاح مقدار جابجایی اصلاح می شود.

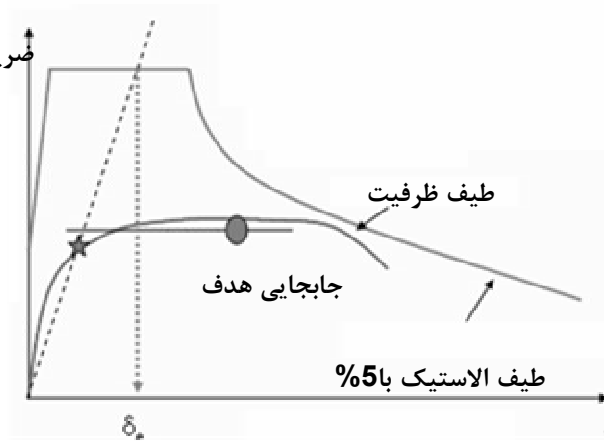
ضریب برش پایه



جابجایی بام

شکل ۵: طیف های ظرفیت و نیاز

ضریب برش پایه



جابجایی بام

شکل ۶: روش تعیین نقطه عملکرد براساس روش FEMA-273

جابجایی هدف (δ_t) به صورت زیر تعیین می شود:

$$\delta_t = C_0 C_1 C_3 S_a \cdot (T_e^2 / 4\pi^2) \cdot g \quad (2)$$

که در آن T_e = پریود اصلی موثر می باشد و C_0 = ضریب اصلاح برای ارتباط دادن جابجایی طیفی با جابجایی واقعی در بام سازه می باشد.

C_0 = ضریب اصلاح برای ارتباط دادن بین بیشینه جابجایی غیر کشسان مورد انتظار با جابجایی های محاسبه شده با فرض رفتار الاستیکی سازه می باشد :

$$T_e < T_o \quad \text{و} \quad C_1 = 1 \quad T_e \geq T_o$$

$$C_1 = \frac{[1.0 + (R - 1)T_o / T_e]}{R} \quad (۳)$$

T_o = پریود مشخصه طیف پاسخ بوده. (محل انتقال از منطقه شتاب ثابت طیف به منطقه سرعت ثابت)
 R = نسبت مقاومت نیاز الاستیک به مقاومت تسلیم :

$$R = \frac{S_a}{V_y / w} 1 / C_0 \quad (۴)$$

مقادیر C_2 از FEMA- 273 تعیین می گردد.

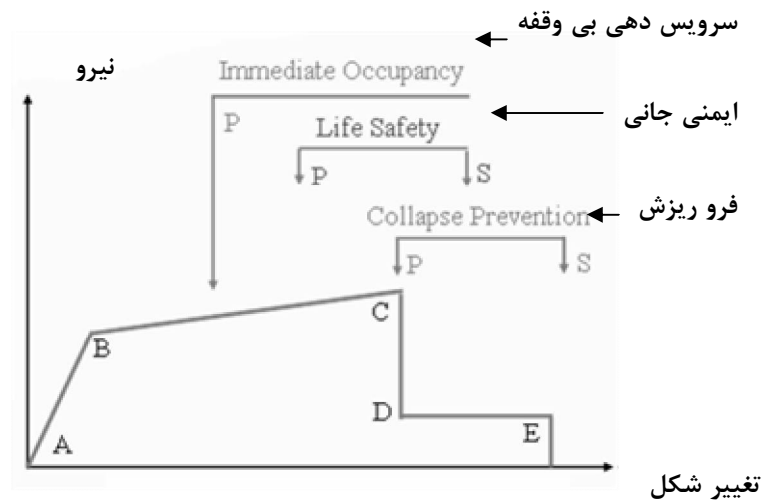
C_3 ضریب اصلاح برای لحاظ نمودن افزایش جابجایی به علت اثرات ثانویه برای ساختمان هایی که سختی فرا- تسلیم آن ها مقدار مثبتی باشد می توان مقدار این ضریب را برابر واحد در نظر گرفت. در مورد ساختمان هایی که سختی فرا- تسلیم آن ها مقدار منفی باشد این ضریب به صورت زیر محاسبه می گردد:

$$C_3 = \frac{1 + |a| \cdot (R - 1)^{3/2}}{T} \quad (۵)$$

که در آن α مقدار نسبت سختی فرا- تسلیم به سختی اولیه می باشد.
 T_o = پریود اساسی موثر بوده و مطابق زیر محاسبه می گردد:

$$T_e = T_1 \sqrt{K_1 / K_e} \quad (۶)$$

که در آن T_1 پریود اصلی سازه کشسان در راستای مورد نظر و K_1 سختی جانبی موثر سازه در راستای مورد نظر می باشد. در شکل (۷) قسمت های مختلف منحنی نیرو - تغییر شکل نشان داده شده است.



شکل ۷: قسمت های مختلف منحنی نیرو- تغییر شکل

۳- روش خطی سازی معادل یا طیف ظرفیت (CSM)

یکی از روش های بر آورد نقطه عملکردی روش طیف ظرفیت (CMS) می باشد که تیم پروژه ATC بیشتر بر این روش متمرکز شده اند. فرض اساسی در این تکنیک این است که تغییر شکل غیر کشسان ماکزیمم یک سیستم SDOF می تواند از تغییر شکل ماکزیمم یک سیستم SDOF که دارای پیروید و نسبت میرایی بزرگتر از مقادیر اولیه آنها برای سیستم غیر خطی می باشد تقریب زده شود. برای استفاده از روش طیف ظرفیت می بایست منحنی ظرفیت سازه را که منحنی نیرو- تغییر مکان می باشد به طیف ظرفیت در مختصات ADRS (شتاب طیفی در برابر تغییر مکان طیفی) با استفاده از روابط زیر تبدیل کرد.

$$S_a = \frac{(V / W)}{\alpha 1}$$

$$S_d = \frac{\Delta_{roof}}{PF1 \phi_{roof} 1} \quad (7)$$

$$PF1 = \frac{\sum_{i=1}^N (W_i \phi_i) / g}{\sum_{i=1}^N (W_i \phi_i^2) / g} \quad (8)$$

$$\alpha 1 = \frac{\sum_{i=1}^N [(W_i \phi_i) / g]^2}{[\sum_{i=1}^N (W_i / g)]. [\sum_{i=1}^N (W_i \phi_i^2) / g]} \quad (9)$$

از طرفی طیف پاسخ را که در فرمت S_a در برابر T می باشد را با رابطه $S_d = S_a.T^2 / 4\pi^2$ به طیف نیاز که در فرمت S_a در برابر S_d (ADRS) می باشد تبدیل کرد. حال با ساخت منحنی دو خطی با تخمین اولیه نقطه عملکردی، میرایی کاهش یافته را بدست آورده و با استفاده از آن ضرایب کاهش را بدست آورده و طیف نیاز کاهش یافته را بدست می آوریم. اگر جابجایی نقطه تلاقی طیف نیاز کاهش یافته با طیف ظرفیت کمتر از ۵٪ با نقطه عملکردی قبلی تفاوت داشته باشد این نقطه به عنوان نقطه عملکرد قابل قبول می باشد در غیر این صورت مراحل با انتخاب نقطه جدید تکرار می شود.

• روش های اصلاح روندهای ATC40 و FEMA365

۱- اصلاح روند FEMA365

۱-۱-۱ بیانات پیشنهاد شده برای ضرایب در این بخش بر اساس اطلاعات تجربی می باشد.

۱-۱-۱ ماکزیمم نسبت جابجایی (C1)

FEMA365 به سازه هایی با پیروید کوتاه اجازه می دهد که ضریب C1 محدود شود اما در FEMA440 پیشنهاد شده که این محدود سازی برداشته شود و عبارت ساده سازی شده زیر برای C1 ارائه کرده است:

$$C1 = 1 + [(R 21) / aTe^2] \quad (10)$$

که Te پیروید اصلی موثر مدل Sdof سازه در ثانیه ها می باشد و R نسبت مقاومت محاسبه شده با معادله ۱۶-۳ در FEMA365 می باشد. ثابت a برابر با ۱۳۰ و ۹۰ و ۶۰ برای سایت کلاسه های D و C و B می باشد. برای پیروید های بلندتر از ۱ ثانیه می توان ضریب C1 را برابر ۱ فرض کرد.

۱-۱-۲- تعدیل برای کاهش سیکلیک (C2)

دو نوع کاهش سختی و یا مقاومت می تواند بر پاسخ اثر کند. همچنین اثرات هر نوع دیگری متفاوت می باشد. برای این منظور برای اصلاح FEMA365 پیشنهاد شده که ضریب C2 فقط اثرات کاهش سختی را ارائه دهد. اثرات کاهش مقاومت توسط محدودیت پیشنهادی انجام می شود. توصیه شده که ضریب C2 به صورت زیر باشد:

$$C2 = 1 + 1/800 \left[(R - 1) / T \right]^2 \quad (11)$$

برای پیوند کمتر از واحد ۰,۲ مقدار ضریب C2 برای واحد ۰,۲ می تواند محاسبه شود. برای پیوند های بزرگتر از واحد ۰,۷ C2 برابر ۱ فرض می شود.

۱-۱-۳- محدودیت بر مقاومت برای جلوگیری از ناپایداری دینامیکی

توصیه شده که ضریب C3 حذف و با یک محدودیت بر حداقل مقاومت (ماکزیمم مقدار R) که برای جلوگیری از ناپایداری دینامیکی می باشد جایگزین شود. اگر این محدودیت ارضا نشود آنگاه یک تحلیل دینامیکی غیر خطی با استفاده از رکورد های حرکت زمین برای ساختگاه برای بررسی پتانسیل ناپایداری دینامیکی انجام شود. محدودیت توصیه شده برای نیروی کاهش یافته طراحی RMAX به صورت زیر است:

$$R_{max} = \frac{(\Delta d / \Delta y) + (\alpha_2^{-1})}{4} \quad (12)$$

• اصلاح روند ATC-40

این بخش یک روند خطی سازی معادل بهبود یافته را به عنوان یک اصلاح برای روش منحنی ظرفیت ATC40 (CMS) ارائه می دهد و بر قسمت هایی که تغییر می کند متمرکز می شود. همچنین عبارت جدیدی برای تعیین پیوند موثر و میرایی موثر ارائه می دهد و محدودیت های قبلی برای میرایی موثر ATC40 برای روند جدید بکار برده نمی شود.

الف (میرایی موثر

مقادیر میرایی ویسکوز موثر به صورت درصدی از میرایی بحرانی برای همه ی مدل های رفتاری و مقادیر α که دارای فرم زیر می باشند بیان شده است:

$$\beta_{eff} = A(\mu - 1)^2 + B(\mu - 1) + \beta_0 \quad (13) \quad \text{برای } \mu < 0.4$$

$$\beta_{eff} = C + D(\mu - 1) + \beta_0 \quad (14) \quad \text{برای } 0.4 \leq \mu \leq 6.5$$

$$\beta_{eff} = E \cdot [F(\mu - 1) - 1 / F(\mu - 1)^2] \cdot (T_{eff} / T_0)^2 + \beta_0 \quad (15) \quad \text{برای } \mu \geq 6.5$$

مقادیر ضرایب در معادله برای میرایی موثر مدل های نوسانگرها در جدول ۳ جدول بندی شده است. توجه شود که این ها توابعی از مشخصه های منحنی ظرفیت برای نوسانگر در شرایط نوع هیستریزس اصلی و سختی بعد از الاستیک α می باشد. باید توجه شود که این ضرایب برای نوسانگر های مدل بهینه شده و نه برای مدل واقعی ساختمان.

جدول ۳ ضرایب مورد استفاده در روابط ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ برای میرایی موثر

MODEL	% α	A	B	C	D	E	F
Bilinear hysteretic	0	3.2	-0.66	11	0.12	19	0.73
Bilinear hysteretic	2	3.2	-0.64	9.4	1.1	19	4.2
Bilinear hysteretic	5	4.2	-0.83	10	1.6	22	0.40
Bilinear hysteretic	10	5.1	-1.1	12	1.6	24	0.36
Bilinear hysteretic	20	4.6	-0.99	12	1.1	25	0.37
Stiffness degrading	0	5.1	-1.1	12	1.4	20	0.62
Stiffness degrading	2	5.3	-1.2	11	1.6	20	0.51
Stiffness degrading	5	5.6	-1.3	10	1.8	20	0.38
Stiffness degrading	10	5.3	-1.2	9.2	1.9	21	0.37
Stiffness degrading	20	4.6	-1.0	9.6	1.3	23	0.34
Stiffness degrading	-5	5.6	-1.3	14	0.61	22	0.90
Stiffness degrading	-3	5.3	-1.2	14	0.69	24	0.90

ب) پیوند موثر :

مقادیر پیوند موثر برای همه انواع مدل های هیستریزس و مقادیر α به صورت زیر می باشد :

$$T_{eff} = [G(\mu - 1)^2 + H(\mu - 1)^3 + 1]T_0 \quad (16) \quad \text{برای } \mu < 0.4$$

$$T_{eff} = [I + J(\mu - 1) + 1]T_0 \quad (17) \quad \text{برای } 0.4 \leq \mu \leq 6.5$$

$$T_{eff} = K \cdot \left[\sqrt{\frac{(\mu - 1)}{1 + L(\mu - 2)}} - 1 \right] + 1 T_0 \quad (18) \quad \text{برای } \mu \geq 6.5$$

مقادیر ضرایب در معادله ها برای پریود موثر و مدل نوسانگر در جدول ۴ جدول بندی شده است. توجه شود که این ها تابعی از مشخصه های ظرفیت در شرایط نوع هیستریزس اصلی و سختی بعد الاستیک α می باشد.

جدول ۴ : ضرایب مورد استفاده در روابط ۱۶ و ۱۷ و ۱۸ برای پریود موثر

MODEL	% α	A	B	C	D	E	F
Bilinear hysteretic	0	0.11	-0.017	0.27	0.396	0.57	0.00
Bilinear hysteretic	2	0.10	0.04	0.17	0.12	0.67	0.02
Bilinear hysteretic	5	0.11	-0.08	0.09	0.14	0.77	0.10
Bilinear hysteretic	10	0.13	0.022	0.27	0.10	0.87	0.10
Bilinear hysteretic	20	0.10	0.045	0.10	0.9	0.85	0.00
Stiffness degrading	0	0.17	-0.037	12	1.4	20	0.62
Stiffness degrading	2	0.18	-0.334	0.22	0.49	0.88	0.02
Stiffness degrading	5	0.18	-0.307	0.15	0.46	0.92	0.03
Stiffness degrading	10	0.17	-0.307	0.15	0.46	0.92	0.05
Stiffness degrading	20	0.10	-0.027	0.11	0.11	1.0	0.20
Stiffness degrading	-5	0.23	-0.008	0.25	0.17	0.71	0.20
Stiffness degrading	-3	0.18	0.088	0.17	0.18	0.76	0.03

• کاهش طیف برای میرایی موثر

روند های خطی سازی معادل در نیاز معمول استفاده از ضریب کاهش طیف برای تطبیق طیف پاسخ اولیه به سطح مناسب میرایی موثر کاربرد دارد. همچنین یک راه کاربردی برای تعدیل میرایی پی در نظر گرفته می شود. در مورد میرایی پی، مقدار اولیه میرایی βI اصلاح شده است. این ضرایب تابعی از میرایی موثر هستند و ضرایب میرایی $B(\beta_{eff})$ نامیده می شوند. همچنین برای تطبیق مختصات طیف شتاب به صورت زیر می باشند :

$$(S_a) = \frac{(S_a) 5\%}{B(\beta_{eff})} \quad (19)$$

$$B = \frac{4}{5.6 - Ln \cdot \beta_{eff} (in \%)} \quad (20)$$

۱-۲-۴ - روند حل

از میان ۳ روش کاربردی ارائه شده در FEMA440 روش A در این مقاله آورده شده است. روش A دارای مراحل زیر می باشد:

- ۱- انتخاب یک حرکت زمین نماینده طیفی دلخواه با یک میرایی اولیه βI (معمولاً ۰.۵٪). ممکن است این طیف طرح یک طیف طرح از ATC40 و FEMA356 باشد، یا یک طیف قطعی سایت مشخص یا یک طیف احتمالی خطر معادل.
- ۲- تبدیل طیف انتخاب شده به فرمت طیف پاسخ شتاب-جابجایی مطابق با ATC40 مناسب باشد. این طیف تقاضای ADSR اولیه می باشد.
- ۳- تهیه منحنی ظرفیت برای سازه برای اینکه تحلیل شود .

- ۴- انتخاب یک نقطه عملکرد اولیه (شتاب ماکزیمم α_{pi} و جابجایی d_{pi}) این انتخاب می تواند براساس تغییر مکان مساوی و یا هر نقطه ای بر مبنای قضاوت مهندسی.
- ۵- ایجاد یک نماینده دو خطی طیف ظرفیت مطابق روندهای ATC40 این منحنی دو خطی پرپود اولیه T_0 و جابجایی تسلیم d_y و شتاب تسلیم α_y را مشخص می کند.
- ۶- برای منحنی و خطی ایجاد شده در مرحله ۶، مقادیر سختی بعد الاستیک α و شکل پذیری μ به صورت زیر محاسبه می شوند :

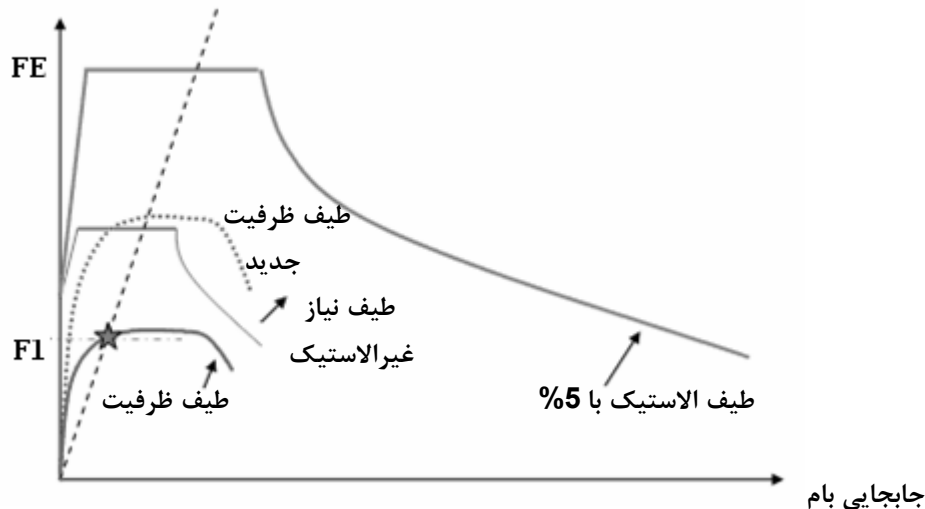
$$\alpha = \frac{(\alpha_{pi} - \alpha_y)}{\frac{d_{pi} - d_y}{\alpha_y}} \quad \mu = \frac{d_{pi}}{d_y} \quad (21)$$

- ۷- با استفاده از مقادیر محاسبه شده برای سختی بعد الاستیک α و شکل پذیری μ از مرحله ۶ میرایی موثر متناظر β_{eff} محاسبه می شود.
- ۸- استفاده از میرایی موثر تعیین شده از مرحله ۷، تعدیل ADSR اولیه با β_{eff}
- ۹- تعیین ماکزیمم جابجایی تخمین زده شده d_i با استفاده از تلاقی پرپوده‌های موثر شعاعی T_{eff} با ADRS برای β_{eff} ، شتاب ماکزیمم تخمین زده شده a_i متناظر با d_i بر منحنی ظرفیت می باشد.
- ۱۰- مقایسه ماکزیمم جابجایی تخمین زده شده d_i با فرض اولیه (یا قبلی). اگر رواداری آن ۵٪ باشد قابل قبول می باشد و نقطه عملکرد متناظر با a_i و d_i می باشد. اگر رواداری قابل قبول نباشد سپس مراحل را از مرحله ۴ با استفاده از a_i و d_i یا فرض انتخاب شده دیگر به عنوان نقطه شروع تکرار می کنیم.

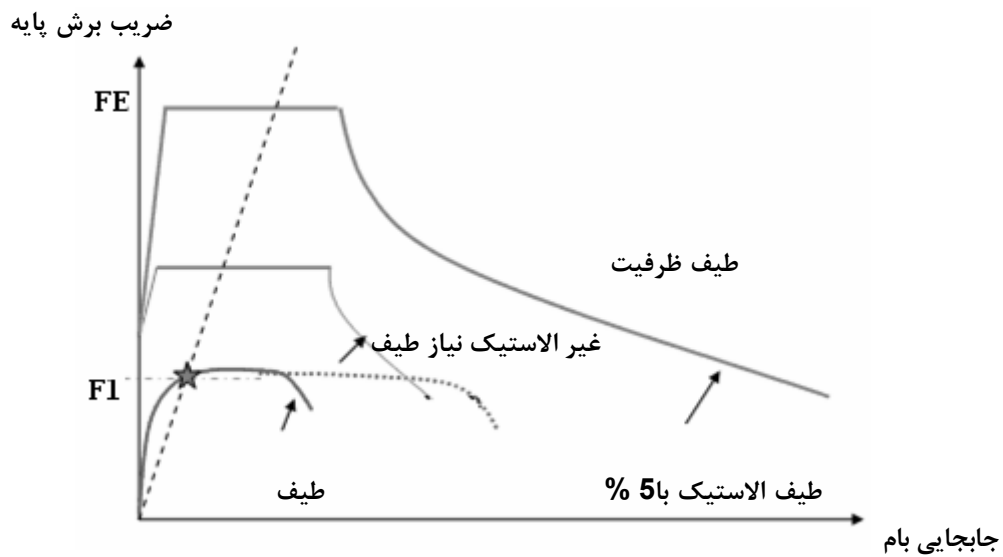
• **عدم وجود نقطه عملکرد**

- در صورت عدم وجود نقطه عملکرد یا عدم ارضای شرایط در نقطه موجود باید سازه مورد بررسی و تقویت گردد. به منظور تقویت سازه موجود راه های مختلفی وجود دارد :
- افزودن مقاومت یا سختی یا هر دو (شکل ۸)
 - افزودن شکل پذیری (شکل ۹)
 - کاهش نیاز لرزه ای (شکل ۱۰)
- انتخاب یک راه مناسب یا ترکیبی از روشهای مختلف باید براساس قضاوت مهندسی و با توجه به مطالعات اقتصادی و امکان سنجی انجام گردد.

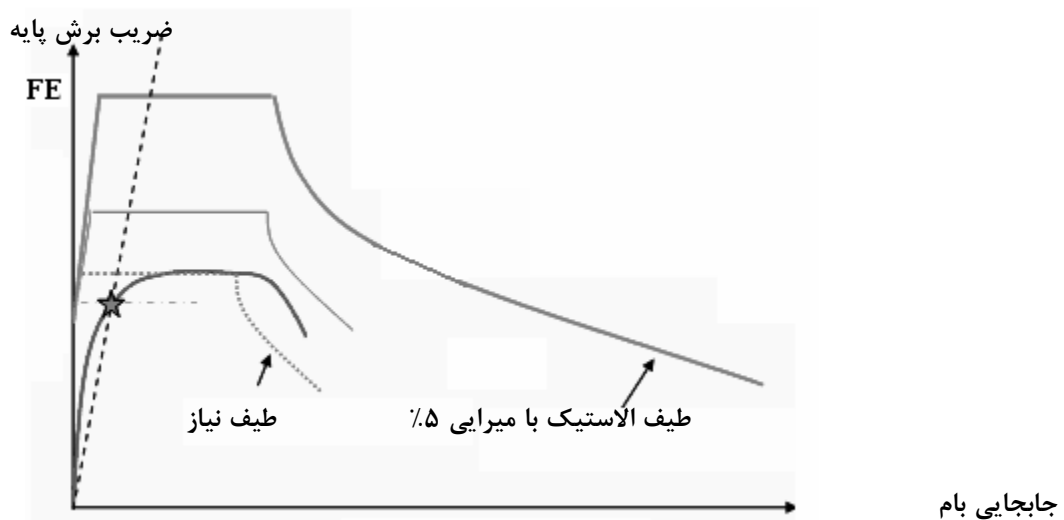
ضریب برش پایه



شکل ۸ : افزودن مقاومت یا سختی یا هر دو



شکل ۹ : افزودن شکل پذیری



شکل ۱۰ : کاهش نیاز لرزه ای با افزودن میرایی یا جداسازی لرزه ای

• نتیجه گیری :

در این مقاله ابتدا مبانی روش تحلیل استاتیکی غیر خطی بار افزون عنوان شد و بیان شد که با توجه به مشکلات فراوان تحلیل های دینامیکی غیرخطی که نیاز به حجم زیاد محاسبات تحلیلی نسبت به روش تحلیل استاتیکی غیر خطی دارد این روش بسیار می تواند کار آمد و مناسب باشد. و همچنین انواع روش های موجود در آیین نامه های مختلف که برای تعیین نقطه عملکرد موجود است عنوان شد، روشهای موجود برای اصلاح تعیین نقطه عملکرد توسط روش های ATC-40 و FEMA 365 در این مقاله عنوان شد که همگرایی بسیار نزدیکی بین این دو روش در تعیین نقطه عملکرد موجود می باشد. همچنین در ادامه نیز به این نتیجه رسیدیم، در صورتی که شرایط نقطه عملکرد برای سازه ای ارضا نگردد تقویت در بخش مقاومت یا سختی و یا افزودن شکل پذیری سازه باید صورت گیرد تا شرایط سازه از لحاظ سازه ای مطلوب گردد.

• **مراجع :**

- دستور العمل بهسازی لرزه ای ساختمان های موجود، ۱۳۸۱؛ دفتر امور فنی و تدوین معیارها، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور؛ بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله.
- مطالعه و بررسی تحلیل استاتیکی غیر خطی پوش اور- هفتمین کنفرانس ملی بتن ایران-۱۳۹۴-سید علی موسوی داودی.
- ATC , Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings ,Vol. 1 ,ATC 40 Applied Technology Council, Redwood City, 1996
- FEMA , 1997, NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation Buildings, FEMA 273, and NEHRP commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of the Building, FEMA 274, October, Federal Emergency Management Agency ,Washington ,D.C.
- SEAOC, Vision 2000, Performance based seismic engineering of building, Structural engineers Association of California , Sacramento. 1995
- Chopra AK, Goel R.A, A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings, Earthquake Engineering and structural Dynamics, 2001;31:561-582
- Tabeshpour, M. R., Bakhshi, A., and Golafshani, A. A., (2004), "Seismic vulnerability, performance and damage analysis of special structures", 13 th World Conference on Earthquake Engineering, Canada.
- Tabeshpour, M. R., Bakhshi, A., and Golafshani, A. A., (2004), " Vulnerability and damage analysis of existing buildings ", 13 th World Conference on Earthquake Engineering, Canada.
- Kalkan, E and S.K Kunnath, Adaptive Modal Combination procedure for Non liner static Analysis of building structures .Engineering Structures, 2003.132: p 1718-1739
- Applied Technology Council. Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. Report ATC-40. Redwood City (CA); 1996.
- Saiidi M, SOZEN MA . "Simple non-linear seismic analysis of RC structures", ASCE J Struct div, (1981)
- Fajfar, p. and fischer, "N2-Method for Nonlinear seismic analysis of regular structures" proceedings of the ninth world conference on Earthquake Engineering ,Tokyo-kyoto, japan(1988)
- ATC .Seismic evaluation and retrofit of concrete building "report ATC-40 Applied Technology Council(1996)
- Otani s, Hiraishi H, Midorikawa M ,Teshigawara M" New seismic design provisions in japan. proceeding of uzumeri symposium, ACI Annual Convention Canada(2000)