

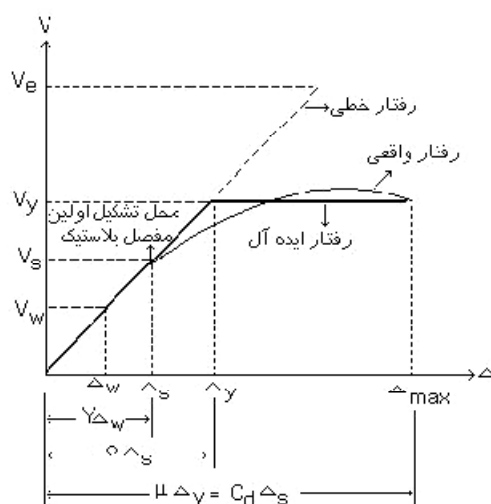
نحوه استخراج ضریب رفتار از تحلیل های غیر خطی و غیر الاستیک

در هنگام وقوع زلزله ها سازها معمولاً دارای رفتار غیر خطی بوده و با تحمل تغییر شکل‌های غیر ارتجاعی مقدار زیادی از انرژی زلزله را جذب میکنند. بنابراین سازه ها می توانند برای نیروی زلزله بسیار کمتر از نیروی لازم در حالت خطی طراحی گردند. اما سهولت و گستردگی روش های تحلیل و طراحی خطی، استفاده از آن را متداول کرده است. نیروی زلزله برای طراحی خطی سازه ها، از یک طیف خطی زلزله بدست می آید و به منظور اعمال کاهش که در نیروی اعمالی زلزله بدلیل عواملی مانند شکل پذیری، اضافه مقاومت، میرایی و... بوجود می آید نیروی خطی محاسبه شده از طیف خطی بوسیله ضریبی بنام ضریب رفتار، کاهش پیدا میکند. به لحاظ اصولی بایستی چیدمان عناصر برابر جانی بگونه ای باشد که سازه دارای بیشترین شکل پذیری، کمترین جابجایی، متعادلترین توزیع نیرو در اعضا در اثر بارهای لرزه ای بوده و، از ایجاد مفصل در ستونها جلوگیری شده و به عملکرد مناسب دیافراگم بیانجامد. تاکنون پژوهشگران با ملیت های مختلف برای محاسبه ضرایب رفتار، روشهای متفاوتی را مورد استفاده قرار داده اند. با مقایسه این روشها می توان آنها را در دو گروه کلی تقسیم بندی کرد. یکی روشهای پژوهشگران آمریکایی و دیگری روشهای پژوهشگران اروپایی. عموماً روشهای آمریکایی مبانی تئوری ساده تری دارند، ولی با وجود این کاربردی تر هستند، در حالی که روشهای اروپایی دارای مبانی تئوری و تحلیلی پیچیده تری بوده و استفاده از آنها در عمل دشوار است.

روشهای آمریکایی - ۱: طیف ظرفیت فریمن - ۲: ضریب شکل پذیری یوانگ

روشهای اروپایی - ۱: تئوری شکل پذیری - ۲: روش انرژی

که در این بین، روش یوانگ دارای مبانی ساده تر و سهولت بیشتری است



شکل 1 - رفتار کلی یک سازه متعارف

به این ترتیب که با معادل کردن منحنی ظرفیت بصورت یک نمودار دوطرفی کلیه مشخصات مربوط به رفتار سازه از آن استخراج می گردد.

ضریب رفتار:

ضریب رفتار سازه ضریبی است که عملکرد غیر ارتجاعی سازه را در بر دارد و نشانگر مقاومت پنهان سازه در مرحله غیر ارتجاعی است. به همین دلیل مقاومت مورد نیاز سازه از تقسیم مقاومت مورد نیاز در حالت کاملاً ارتجاعی بر ضریب فوق محاسبه می گردد. ضریب رفتار یا ضریب کاهش نیرو به عنوان ضریبی که در برگیرنده عملکرد غیر ارتجاعی سازه ها در برابر زلزله های شدید می باشد، به پارامترهایی نظیر ضریب شکل پذیری، زمان تناوب اصلی سازه، ضریب میرایی سازه، مشخصات خاک، مشخصات زلزله، رفتار بار - تغییر شکل، ضریب مقاومت افزون، مشارکت موده های بالا و ضریب اطمینان طراحی بستگی دارد.

عوامل مؤثر بر ضریب رفتار:

ضریب کاهش بر اثر شکل پذیری R_{μ} :

در سازه ها، ظرفیت تغییر شکل غیر ارتجاعی آنها به کمک ضریب شکل پذیری بیان می گردد، بدین ترتیب ضریب رفتار سازه مستقیماً به ضریب شکل پذیری آن بستگی پیدا می کند. هر چه ظرفیت شکل پذیری سازه μ بیشتر باشد، میزان جذب انرژی بالاتر بوده و در نتیجه مقدار ضریب

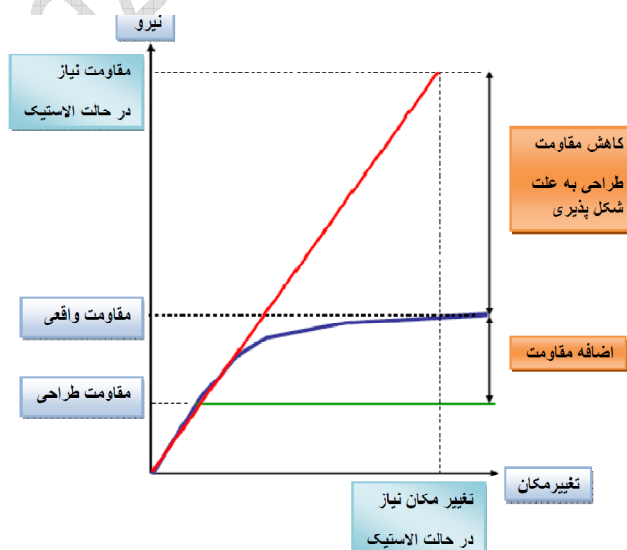
رفتار بزرگتر خواهد بود. نحوه ارتباط R و μ به عوامل مختلفی بستگی دارد. در سیستمهای یکدرجه آزادی، نوع مصالح، زمان تناوب سیستم، میرائی سیستم، نوع بارگذاری، مدل بار-تغییر شکل، عامل ناپایداری $P-\Delta$ وضعیت تکیه گاه (نوع خاک) و میزان زیان قابل قبول در سیستم بر رابطه R ، μ موثر می باشند. با توجه به شکل (۱) ضریب شکل پذیری کلی سازه به صورت حداکثر تغییر مکان جانبی نسبی Δ_{max} به تغییر مکان جانبی نسبی تسلیم Δ_y تعریف می شود:

$$\mu_s = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_y}$$

ضریب کاهش بر اثر شکل پذیری از روشهای مختلفی بدست می آید. بطور مثال این ضریب از روش ویدیک بصورت زیر بدست می آید.
برای زمینهای سخت (سنگی) و نیم سخت (رسوبی)

$$\left. \begin{aligned} R_\mu &= (\mu_s - 1) \frac{T}{T_0} + 1 & T \leq T_0 \\ R_\mu &= \mu_s & T > T_0 \end{aligned} \right\}$$

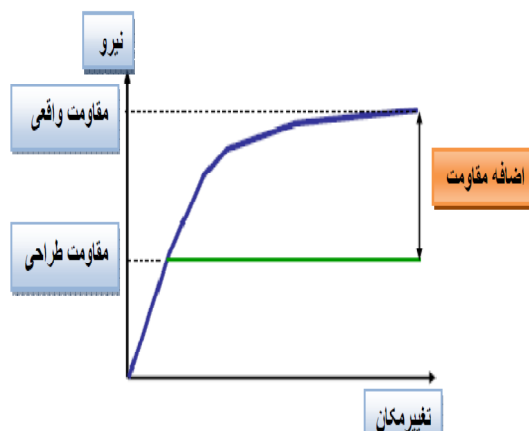
که در این رابطه T زمان تناوب سازه و T_0 زمان تناوب خاک می باشد.



ضریب مقاومت افزون Ω :

در آیین نامه های طراحی، سازه ها به گونه ای طراحی می گردند که هیچ یک از آنها از مرحله ارتجاعی بالاتر نروند. در غیر این صورت در آنها مفصل پلاستیک تشکیل خواهد شد در نتیجه سختی کلی سازه کاهش پیدا می کند ولی سازه همچنان قادر به مقاومت خواهد بود تا اینکه تشکیل مفاصل سبب ایجاد مکانیزم گردیده و سختی سازه به سمت صفر میل کند. در این مرحله در صورتی که ظرفیت شکل پذیری نیز به انتها رسیده باشد سازه منهدم خواهد شد. سازه ها در طی این روند، مقاومت اضافه ای را تحمل خواهند کرد که در طراحی اولیه سازه به حساب نیامده و به مقاومت افزون معروف است که عبارت است از نیروی متناظر با حد تسلیم کلی سازه (V_y) به نیروی متناظر با تشکیل اولین لولای خمیری در سازه (V_s):

$$\Omega = \frac{V_y}{V_s}$$



ضریب تنش مجاز γ :

این ضریب، بر اساس نحوه برخورد آیین نامه ها با تنشهای طراحی (بار مجاز یا بار نهایی) تعیین می

شود و مقدار آن عبارت است از نسبت نیرو در حد تشکیل اولین لولای خمیری (V_S) به نیرو در حد تنشهای مجاز (V_W):

$$Y = \frac{V_S}{V_W}$$

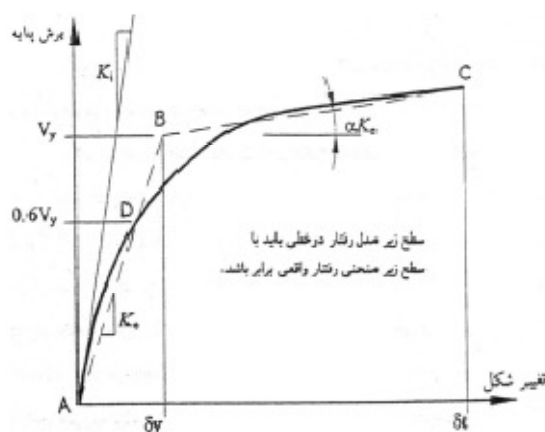
تعیین ضریب رفتار

ضریب رفتار سازه ها با توجه به عوامل مؤثر بر آن از رابطه زیر بدست می آید:

$$R = R_{\mu} \cdot \Omega \cdot Y$$

تحلیل استاتیکی غیرخطی (Pushover):

در این روش نیروها یا جابجایی های جانبی وارد بر مدل سازه به طور تدریجی افزایش داده شده و در هر گام کاهش سختی ناشی از المانها یا افت مقاومت در مفاصلهای پلاستیک منظور گردد. افزایش بار تا حدی ادامه می یابد که المانهای دیگر نیز جاری شوند. در تحلیل استاتیکی غیرخطی به روش ساده دسده، مدل رفتار اعضا بصورت دو خطی در نظر گرفته می شود. برای این منظور بر اساس دستورالعمل بهسازی لرزه ای ایران، مطابق شکل (۲) نقطه B باید چنان انتخاب شود که:



شکل (۲) منحنی پوش آور و مدل رفتار دوخطی

۱- سطح زیر منحنی رفتار غیرخطی، برابر سطح زیر دو خط BC و AB باشد.

۲- خط AB باید منحنی غیرخطی را در 0.6 طول خط قطع کند. نقطه D در شکل 2

برای تحلیل استاتیکی غیر خطی ابتدا باید مشخصات مفاصل پلاستیک را تعریف نمود و سپس به محل های مورد نظر اختصاص داد. از این رو، جهت معرفی مفاصل، از پیش فرض برنامه ETABS2000 یا SAP که منطبق بر دستورالعمل بهسازی لرزه ای می باشد، استفاده میگردد.

تحلیل Pushover بگونه ای تعریف میگردد که با حالت واقعی زلزله همخوانی داشته باشد. بدلیل آنکه در زمان وقوع زلزله، سازه تحت اثر بارهای ثقلی قرار داشته لذا در مدلسازی و تحلیل باید بگونه ای عمل شود تا محاسبات به واقعیت نزدیکتر گردد. در نتیجه ابتدایک بار ترکیب بار ثقلی بصورت زیر طبق دستورالعمل بهسازی لرزه ای به سازه اعمال میگردد و پس از محاسبه سختی سازه در اثر آن بار، بار جانبی (زلزله) به سازه اعمال می شود.

$$Q_G = 1.1(Q_D + Q_L)$$

Q_D : بار مرده

Q_L : بار زنده

الگوی بار گذاری جانبی

توزیع بار جانبی بر مدل سازه باید تا حد امکان شبیه به آنچه که هنگام زلزله رخ خواهد داد، باشد و حالت های بحرانی تغییر شکل و نیروهای داخلی را در اعضا ایجاد نماید. به همین جهت توزیع بار جانبی نیز متناسب با توزیع بار جانبی در روش استاتیکی خطی یعنی مطابق رابطه زیر انتخاب میگردد:

$$F_i = \frac{W_i h_i^k}{\sum W_j h_j^k} V$$

در رابطه فوق F_i نیروی جانبی وارد بر طبقه i ، W_i وزن طبقه i ، h_i ارتفاع طبقه i و V نیروی برشی پایه است و مقدار k برابر است با:

$$k = 0.5T + 0.75$$

T زمان تناوب اصلی ساختمان است. به ازای $T \leq 0.5$ مقدار k برابر یک و برای $T \geq 2.5$

مقدار k برابر 2 انتخاب می شود.

تعیین تغییر مکان هدف

روشهای مختلفی برای تعیین تغییر مکان هدف وجود دارد که تنها تفاوت در آنها اختلاف در روش تعیین نیاز و ظرفیت سازه است. در انجام اولین آنالیز غیرخطی تغییر مکان هدف بر اساس استاندارد 2800 زلزله ایران (ویرایش سوم) انتخاب شد:

$$\Delta_M = 0.7R\Delta_w$$

Δ_M تغییر مکان جانبی نسبی واقعی طرح در طبقه، Δ_w تغییر مکان جانبی نسبی طرح در طبقه و R ضریب رفتار می باشد. نمودار رفتار غیر خطی (برش پایه - تغییر مکان) بعد از رسیدن تغییر مکان نقطه کنترل (مرکز جرم بام) به $1/5$ برابر تغییر مکان هدف بدست آمده. سپس این نمودار با یک مدل رفتار دو خطی ساده جایگزین شده و تغییر مکان هدف واقعی طبق دستورالعمل بهسازی لرزه ای از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g$$

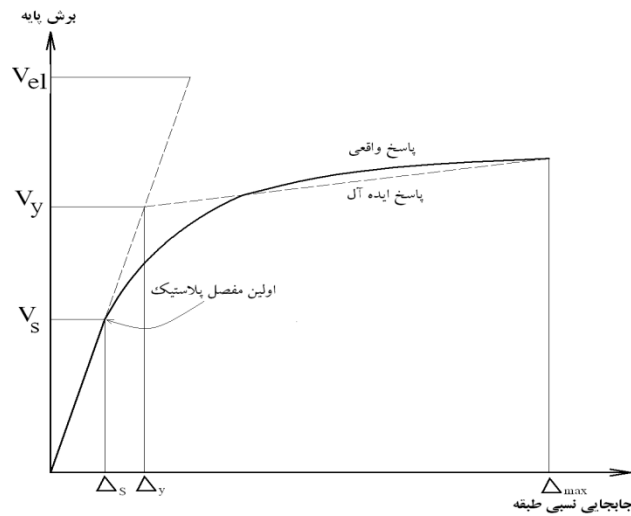
پارامترهای بکار رفته در رابطه فوق، مطابق دستورالعمل بهسازی لرزه ای می باشد. در جدول (1) تغییر مکان هدف واقعی برای ساختمانها آورده شده است بعداز محاسبه تغییر مکان هدف واقعی، تغییر مکان نقطه کنترل (مرکز جرم بام) برابر این مقدار داده شده و دوباره سازه ها آنالیز غیر خطی میگردد.

جدول 1. تغییر مکان هدف واقعی طبق دستورالعمل بهسازی لرزه ای

تعداد طبقات ساختمان	C_0	C_1	C_2	C_3	S_a	T_e	تغییر مکان هدف واقعی (δ_t) بر حسب متر
n طبقه

بررسی پارامترهای لرزه ای موردنظر

رفتار کلی سازه ها شامل رفتار خطی و غیر خطی واقعی آنها مطابق نمودار زیر است. رفتار واقعی غیر خطی سازه با یک رابطه دو خطی معادل می شود بنحویکه سطح زیر منحنی واقعی و منحنی ایده آل شده یکسان گردد.



ضریب رفتار کلی سازه (R)

ضریب رفتار کلی سازه که در واقع نیروی خطی اعمالی به سازه را به نیروی خطی طراحی کاهش می دهد عبارت است از حاصلضرب ضریب کاهش مقاومت در اثر شکل پذیری در ضریب اضافه مقاومت

$$R = R_{\mu} \times R_s$$

در این رابطه (R_{μ}) ضریب کاهش مقاومت در اثر شکل پذیری عبارت است از خارج قسمت نیروی نهایی وارده به سازه V_{el} (در صورتیکه رفتار سازه الاستیک باقی بماند) به نیروی متناظر با حد تسلیم عمومی سازه در هنگام تشکیل مکانیزم خرابی V_y :

$$R_{\mu} = \frac{V_{el}}{V_y}$$

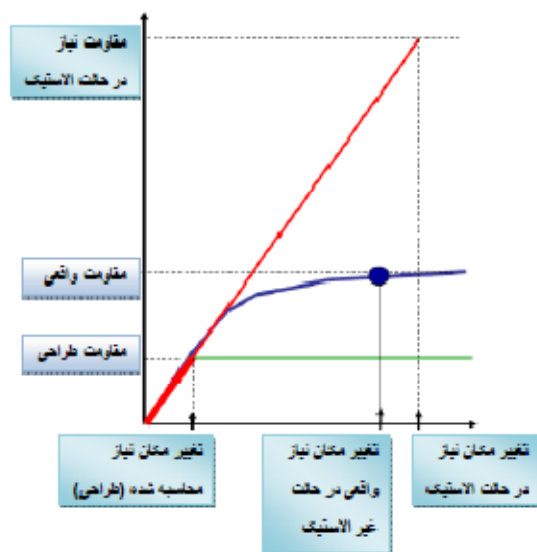
و همچنین ضریب اضافه مقاومت عبارت است از خارج قسمت نیروی متناظر با حد تسلیم کلی سازه در هنگام تشکیل مکانیزم خرابی V_y به نیروی متناظر با تشکیل اولین مفصل پلاستیک در سازه V_s :

$$R_s = \frac{V_y}{V_s}$$

ضریب بزرگنمایی جابجایی

در ادامه بنظر مفید باشد تا به تعریف مختصری از ضریب بزرگنمایی جابجایی که در آیین نامه 2800 برای همه سیستم های تعریف شده پردازیم.

لرزه بر برابر با $0.7R$



در ادامه ضریب های فوق به نقل از نشریه ASCE 7-0.5 برای ساختمانهای بتنی و فولادی در جدول هایی آورده شده است. تنها ذکر این نکته مهم میباشد که ضرایب در جدول زیر برای ساختمانهایی میباشد که به روش حالات حدی طراحی شده اند نه به روش تنش های مجاز

ساختمان های فولادی

	R	Ω_o	R_d	C_d
Special Moment Frame	8	3	2.67	5.5
Intermediate Moment Frame	4.5	3	1.50	4.0
Ordinary Moment Frame	3.5	3	1.17	3.0
Eccentric Braced Frame	8	2	4.00	4.0
Eccentric Braced Frame (Pinned)	7	2	3.50	4.0
Special Concentric Braced Frame	6	2	3.00	5.0
Ordinary Concentric Braced Frame	3.25	2	1.25	3.25
Not Detailed	3	3	1.00	3.0

Note: R_d is ductility demand ONLY IF Ω_o is achieved.

جدول ۱

ساختمان های بتن آرمه

	R	Ω_o	R_d	C_d
Special Moment Frame	8	3	2.67	5.5
Intermediate Moment Frame	5	3	1.67	4.5
Ordinary Moment Frame	3	3	1.00	2.5
Special Reinforced Shear Wall	5	2.5	2.00	5.0
Ordinary Reinforced Shear Wall	4	2.5	1.60	4.0
Detailed Plain Concrete Wall	2	2.5	0.80	2.0
Ordinary Plain Concrete Wall	1.5	2.5	0.60	1.5

جدول ۲

نقاط ضعف و قدرت

بطور کلی می توان گفت که شکل پذیری، اضافه مقاومت، سختی و درجه نامعینی از عوامل مهم در ضریب رفتار می باشند خود ضریب بیانگر ظرفیت استهلاک انرژی در ناحیه غیر خطی می باشد.

این ضریب برای میرایی های معمول از حاصلضرب سه آیتم تشکیل شده است:

- 1- ضریب مقاومت وابسته به پیوند که برای لحاظ نمودن مقاومت افزون سازه در مقایسه با مقاومت طرح می باشد
- 2- ضریب شکل پذیری وابسته به تغییر مکان به منظور لحاظ نمودن ظرفیت شکل پذیری سازه در محدوده غیر خطی
- 3- ضریب مربوط به نامعینی سازه به منظور لحاظ نمودن قابلیت اعتماد سیستم لرزه بر با توجه به تعداد قابهای مقاوم در هر راستا از ساختمان

باید توجه داشت که ضریب رفتار در آئین نامه 2800 و مبحث ششم مقررات ملی بر مبنای طراحی به روش تنش مجاز می باشد و برای روش حدی و مقاومت تنظیم نگردیده است. حال که ما سازه های بتنی را بر اساس روش حدی طراحی میکنیم این مقدار چگونه باید تعیین گردد؟ به همین جهت محاسبه نیروی زلزله در سازه های فولادی و بتنی هیچ فرقی با هم در حال حاضر ندارند و طبق آیین نامه 2800 صفحه 21 برای روش های حدی یا مقاومت باید نیرو را افزایش داد (R کاهش مییابد). بنابراین عملاً نیروی زلزله در ساختمان های بتنی کمتر محاسبه می گردد و متأسفانه سازه های بتنی ما در حال حاضر دست پایین محاسبه می شوند. بنابراین باید از ضرایبی که در آیین نامه IBC در جداول قبلی ذکر گردید استفاده نماییم.

همچنین هم‌اکنون دستورالعمل بهسازی (نشریه 360) طراحی به روش عملکرد را اساس کار خود قرار داده و در صورتیکه از روشهای خطی برای طراحی سازه مطابق این دستورالعمل استفاده شود، عناصر مختلف ظرفیتهای مجاز متفاوتی را برحسب عملکرد مورد انتظار سازه خواهند داشت! در آئین نامه 2800 ضریب رفتار R و ضریب اهمیت I برای جبران کمبودهای ناشی از عدم امکان بررسی دقیق عناصر سازه‌ای بصورت تک به تک، در نظر گرفته است که با این وجود این ضرایب به هیچ عنوان نمی‌تواند رفتار واقعی یک سازه را در مدل ملحوظ نماید!

در آیین‌نامه‌های ASCE و AISC و ACI نیز این مطلب ذکر شده است ولی در آنجا موضوع برعکس است یعنی ضریب رفتار بر اساس روش حد نهایی تعیین شده است ولی برای اینکه از همین ضرایب رفتار در روش تنش مجاز بتوان استفاده کرد، مقدار نیروی زلزله برای ترکیب بارهای تنش مجاز در عدد 0.7 ضرب شده است. در UBC97 همین موضوع با تقسیم نیروی زلزله بر عدد 1.4 (که در واقع همان 0.7 می‌شود) بیان شده است.

با توجه به آئین نامه 2800 و مبحث ششم، عوامل موثر در ضریب رفتار، تنها تا حداکثر مقدار ارتفاعی قابل قبول و مورد اطمینان می‌باشند که در جدول مربوط به مقادیر ضریب رفتار در ستون Hm آورده شده است. همانطور که اشاره گردید یکی از پارامترهای تاثیرگذار در ضریب رفتار سازه، شکل پذیری می‌باشد.

منظور از شکل پذیری، خاصیت تجربه تغییر شکل‌های غیرالاستیک و پایدار می‌باشد. شکل پذیری توسط رفتار چرخه‌ای اعضای خاص سازه نظیر سیستم مقاوم در برابر زلزله، و بعضاً ستون‌ها و اتصالات سازه‌ای ارزیابی می‌شود. به عبارت دیگر ارزیابی شکل پذیری با اعمال تغییر

مکان به صورت چرخه ای به سازه مورد نظر و ترسیم نمودار نیرو-جابجایی بر حسب تکرار های متعدد منحنی نیرو-تغییر مکان حاصل میگردد .

که متاسفانه نوع اتصالات و محدودیتهای آیین نامه ای که ضامن شکل پذیری و بالطبع ضریب رفتار در سازه هستند، رعایت نمی گردند.

به طور خلاصه میتوان گفت که :

در خصوص تفاوت های موجود در مقادیر ضرایب رفتار سازه ها توجه به مسائل زیر ضروری است :

1- اصولاً تعیین مقادیر نیروی زلزله در دو سطح سرویس (Service Level) و سطح مقاومت (Strength Level) امکان پذیر میباشد که بی شک هر یک از این دو مقدار قابل تبدیل به یک می باشد .

2- در آیین نامه ایران استاندارد 2800 نیروی زلزله در سطح سرویس و در آیین نامه های جدید آمریکایی از سال 1997 نیروی زلزله در سطح مقاومت تعیین میگردد و دلیل آنهم به رویکرد جدیدی است که این آیین نامه ها در طراحی سازه های خود در پیش گرفته اند. در این رویکرد که تاثیر آن علی الخصوص در طراحی سازه های فلزی دیده میشود آنچه مهم است عملکرد کل مقطع عضو و ظرفیتهای مقاومتی بالقوه موجود در آن در برابر نیروهای وارده میباشد بدین معنی که یک عضو علیرغم رسیدن برخی نقاط آن به حد تنش مجاز هنوز غیر قابل بهره برداری نبوده و همچنان دارای مقداری مقاومت میباشد. دقیقاً به همین دلیل بود که روش ASD را که بر پایه تعیین نیروهای داخلی عضو در سطح بهره برداری، تعیین تنشهای موجود در آن و مقایسه آن با تنشهای مجاز بود کم کم در آیین نامه های جدید کم رنگ میگردد که ناگهان در سال 2005 با ابتکار محققین

آمریکایی این مشکل نیز بر طرف گردید و فلسفه نیروی مجاز در کنار نیروی نهایی در آیین نامه AISC-2005 وارد گردید .

3- با توجه به آنچه گفته شد و رویکرد مقاومتی در سازه ها سبب گردید تا نیروی های زلزله در آیین نامه های آمریکایی نیز در آن سطح تعیین گردد و بدنبال آن تغییراتی در ضرایب ترکیبات بار بوجود آید که در ادامه به آن خواهیم پرداخت .

4- در مورد تبدیل این نیروها به یکدیگر نیز همانگونه که اشاره گردید از ضرایب 1.4 استفاده میشود این بدان معناست که چنانچه از آیین نامه 2800 ایران استفاده نماییم برای تبدیل نیروی وارده به سطح مقاومت آن را در 1.4 ضرب نماییم و چنانچه از آیین نامه های آمریکایی استفاده میکنیم برای تبدیل آن به سطح بهره برداری آن را در 0.7 ضرب مینماییم .

5- در مورد ضرایب موجود در ترکیبات بار آیین نامه ها هم توجه کنید در آیین نامه ACI-02 به بعد ضرایب بار بر حسب نیروی زلزله در سطح مقاومت است و در آیین نامه ACI-99 به قبل و آیین نامه های بتن و فولاد ایران ضرایب بار بر حسب نیروی زلزله در سطح سرویس است که بسته به نحوه تعیین نیروی زلزله باید از ضرایب بند 4 استفاده کرد .