

## تعیین ضریب رفتار قاب های خمشی فولادی با استفاده از روش های مختلف تحلیل استاتیکی غیر خطی

محسن گرامی

دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان  
آدرس الکترونیکی: [mgerami@semnan.ac.ir](mailto:mgerami@semnan.ac.ir)

امیر حسام مشایخی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش زلزله، دانشگاه سمنان  
[amh.civil\\_m@yahoo.com](mailto:amh.civil_m@yahoo.com)

نوید سیاه پلو

دانشجوی دکترای مهندسی زلزله، دانشگاه سمنان  
[n\\_siahpolo@yahoo.com](mailto:n_siahpolo@yahoo.com)

کلید واژه‌ها: ضریب رفتار، تحلیل استاتیکی غیرخطی تطبیقی، شکل پذیری، ضریب اضافه مقاومت، الگوهای بار جانبی

### چکیده

در هنگام وقوع زلزله های شدید، سازه ها با ورود به ناحیه غیر ارتجاعی، رفتار غیرخطی داشته و با جذب انرژی زیاد قادر به تحمل نیروهای بیشتری خواهند بود. ضریب رفتار یکی از پارامترهای طراحی لرزه ای می باشد که عملکرد غیرخطی سازه ها را حین زلزله های شدید لحاظ می کند. به دلیل پیچیدگی های روش تحلیل دینامیکی غیر خطی و همچنین صرف زمان زیاد، امروزه از روش های تحلیل استاتیکی غیرخطی به عنوان روشی جایگزین استفاده می شود. هدف این پژوهش بررسی توانایی روش های مختلف تحلیل پوش آور (سنتی و پیشرفته) در تعیین ضریب رفتار قاب های خمشی فولادی با شکل پذیری متوسط می باشد. به همین منظور از ۳ قاب خمشی فولادی با تعداد طبقات ۱۰، ۷، ۴ استفاده شده است. کلیه تحلیل های غیر خطی با استفاده از نرم افزار OpenSees انجام شده است. نتایج نشان می دهد که ضریب رفتار حاصل از کلیه ی روش های تحلیل پوش اور، با افزایش ارتفاع سازه کاهش می یابد.

### مقدمه

در هنگام وقوع زلزله های شدید به علت ایجاد مفاصل پلاستیک، سازه ها رفتار غیرخطی خواهند داشت و با تحمل تغییرشکل های غیر ارتجاعی انرژی بیشتری را حین زلزله جذب می کنند. به علت سهولت و گستردگی استفاده از روش های خطی تحلیل سازه ها در آیین نامه های مختلف از این روش برای طراحی سازه استفاده شده است. این در حالی است که نیروی زلزله ی مورد نیاز برای طراحی سازه ها بسیار کمتر از نیروی حاصل از تحلیل های خطی می باشد. علت این اختلاف منظور نکردن رفتار غیرخطی سازه ها در حین زلزله می باشد. به همین دلیل در آیین نامه های طراحی لرزه ای سازه ها از ضریبی تحت عنوان ضریب رفتار به منظور در نظر گرفتن رفتار غیرخطی سازه ها استفاده شده است. ضریب رفتار سازه، ضریبی است که نشانگر مقاومت سازه در مرحله غیر ارتجاعی می باشد. ضریب رفتار یا ضریب کاهش نیرو به عوامل مختلفی از جمله زمان تناوب اصلی سازه، میرایی، مشخصات خاک محل، ضریب شکل پذیری، ضریب اضافه مقاومت و منحنی رفتاری سازه، وابسته می باشد. به منظور بررسی نیازهای فرار ارتجاعی سازه ها، روش دینامیکی غیرخطی به عنوان روش دقیق مورد استفاده قرار می گیرد که البته این روش مستلزم صرف زمان و هزینه زیادی می باشد. در سال های اخیر روش تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش اور) به عنوان روشی جایگزین مورد استفاده قرار می گیرد. روش های پوش اور سنتی به دلیل در نظر نگرفتن زوال سختی سازه و همچنین اثر موده های بالاتر در فرآیند تحلیل، دارای نواقصی می باشند به منظور رفع نواقص موجود، در سال های اخیر روش های پیشرفته تحلیل پوش اور توسط محققین مختلف ارائه شده است که از جمله آن ها می توان به روش های پوش اور تطبیقی بر اساس نیرو (FAPA) و بر اساس جابجایی (DAPA) اشاره کرد که توسط آنتونیو و پینهو (۲۰۰۵) ارائه شده است. در این پژوهش ضریب رفتار حاصل از روش های تحلیل استاتیکی غیرخطی سنتی (با الگوهای بار جانبی مختلف شامل طیفی، موداول، یکنواخت



ومثلثی) و پیشرفته (شامل روش‌های بر مبنای جابجایی DAP و APAM)، به روش یانگ (۱۹۹۱) محاسبه می‌شوند و در نهایت نتایج مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. کلیه ی تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی توسط نرم افزار (2008) OpenSees انجام شده است. این نرم افزار قابلیت انجام تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی را به صورت مستقیم دارا نمی‌باشد به همین دلیل کد هایی که توانایی انجام تحلیل‌های مذکور را ایجاد می‌کنند، تهیه شده است. در کلیه ی سازه‌های مورد بررسی در این تحقیق، بار جانبی تا رسیدن حداکثر دوران گره‌های سازه به مقدار  $0.02$  رادیان معرف حد پایین سطح عملکرد آستانه فروریزش براساس دستورالعمل (SEAOC)، افزایش داده می‌شود که نوآوری این پژوهش می‌باشد. دوران یک گره با نسبت تغییر مکان نسبی طبقه فوقانی آن گره به ارتفاع طبقه تعریف می‌شود که این تعریف همان زاویه دریافت بین طبقه‌ای می‌باشد.

### تحلیل استاتیکی غیر خطی (پوش اور)

یکی از روش‌های مرسوم در تخمین پارامترهای لرزه ای سازه و بررسی عملکرد غیرخطی و غیرارتجاعی سازه ها، روش تحلیل استاتیکی غیرخطی تحت بارهای جانبی افزایشی می‌باشد. در این روش سازه تحت الگوی بار جانبی مشخص قرار می‌گیرد و این بار تا رسیدن نقطه کنترل سازه به یک تغییر مکان هدف از پیش تعیین شده با آهنگ ثابت افزایش می‌یابد. اصلی ترین محصول این روش تحلیل سازه، منحنی تغییرات روش پایه در مقابل تغییر مکان بام می‌باشد که به آن منحنی ظرفیت سازه گفته می‌شود. در این پژوهش از روش تحلیل استاتیکی غیرخطی سنتی با الگوهای بار جانبی مختلف شامل مود اول ارتعاش سازه (M1)، مثلثی (TR)، یکنواخت (Uniform) و الگوی حاصل از تحلیل دینامیکی طیفی (SPEC) استفاده شده است. در روش تحلیل استاتیکی غیرخطی پیشرفته تحت عناوین روش پوش اور تطبیقی بر اساس جابجایی (DAP) و روش پوش اور تطبیقی با لحاظ کردن اندرکنش بین مودی (APAM) که هر یک با استفاده از طیف پاسخ جابجایی حاصل از ۳ رکورد مختلف محاسبه می‌شوند، نیز مورد ارزیابی قرار می‌گیرند و در مجموع تعداد ۱۰ تحلیل بر روی هر قاب صورت می‌گیرد و مقادیر ضریب رفتار برای هر یک محاسبه می‌شوند.

### روش پوش اور تطبیقی بر اساس جابجایی (DAP)

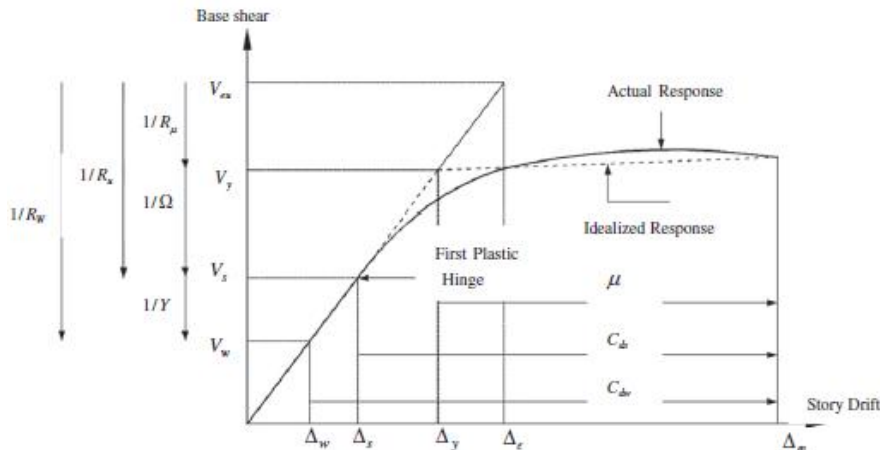
در این روش که در سال ۲۰۰۴ توسط آنتینیو و پینهو (2005) ارائه شده است، در هر مرحله با توجه به زوال سختی اعضای سازه، ناشی از نیروهای داخلی، ماتریس سختی و مشخصات تغییر یافته ی سازه تعیین می‌شود و در نهایت الگوی جابجایی با توجه به بردار جابجایی اولیه و بردار جابجایی مودی بر اساس روابط ارائه شده توسط محققین مذکور، تصحیح می‌شود. توضیحات تکمیلی پیرامون این روش در مرجع ذکر شده است.

### روش پوش اور تطبیقی با لحاظ کردن اندرکنش بین مودی (APAM)

روش پوش اور تطبیقی APAM اثر اندرکنش بین مودها را بر اساس جرم موثر مودی و با در نظر گرفتن علامت لحاظ می‌کند و تغییر در مشخصات مودال سازه ناشی از تسلیم اعضا و زوال سختی را نیز در نظر گرفته و منحنی ظرفیت سازه را با استفاده از مفهوم انرژی تخمین می‌زند. (Abbasnia et al., 2013)

### ضریب رفتار (R)

تا کنون روش‌های مختلفی برای محاسبه ضریب رفتار توسط محققین مختلف ارائه شده است. این روش‌ها به طور کلی در دو گروه اصلی اروپایی و آمریکایی طبقه بندی می‌شوند. در این مطالعه از یکی روش‌های آمریکایی تحت عنوان یوانگ (Uang)، استفاده می‌شود. پارامترهای استفاده شده در روش یوانگ در شکل (۱) نمایش داده شده است. (Izadinia et al., 2012)



شکل ۱- منحنی ظرفیت واقعی و دوخطی ایده‌ال شده سازه به منظور محاسبه پارامترهای لرزه ای [۵]

شکل (۱) منحنی تغییرات برش پایه‌ی سازه در مقابل جابجایی نسبی، حاصل از تحلیل پوش اور را نشان می‌دهد. این منحنی به صورت یک منحنی دوخطی ایده آل سازی شده است. ضریب رفتار به پارامترهای مختلفی وابسته می‌باشد که در مرجع (Izadinia et al., 2012) به آن اشاره شده است.

## معرفی مدل‌ها

به منظور بررسی ضریب رفتار حاصل از روش‌های مختلف تحلیل پوش اور، از مدل‌های ۴، ۷ و ۱۰ طبقه با ارتفاع طبقات ۴ متر و تعداد ۵ دهانه به طول ۵ متر استفاده شده است. قاب‌های مورد نظر قاب خمشی با شکل‌پذیری متوسط می‌باشند. به منظور طراحی سازه‌ها از آیین‌نامه AISC-ASD 89 و آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰ (۱۳۸۴)) استفاده شده است و فرضیات طراحی شامل خاک نوع III و منطقه با خطر نسبی خیلی زیاد می‌باشد. مقاطع مورد استفاده در این قاب‌ها شامل مقاطع جعبه‌ای و تیر ورق به ترتیب برای ستون‌ها و تیرها می‌باشد.

به منظور انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی از نرم افزار (OpenSees (2008) استفاده شده است. در جداول ۱ تا ۳ مقاطع مورد استفاده برای سازه‌های مختلف ارائه شده است.

جدول ۲- مقاطع مدل ۷ طبقه

ستون‌ها	تیرها	طبقات
BOX 40x15	PG 40x20	اول تا سوم
BOX 40x10	PG 40x15	چهارم و پنجم
BOX 30x10	PG 40x10	ششم و هفتم

جدول ۱- مقاطع مدل ۴ طبقه

ستون‌ها	تیرهای کناری	تیرهای میانی	طبقات
BOX 40x10	PG 40x15	PG 40x10	اول و دوم
BOX 30x10	PG 40x10	PG 40x10	سوم و چهارم

جدول ۳- مقاطع مدل ۱۰ طبقه

ستون‌ها	طبقات	تیرها	طبقات
BOX 40x20	اول تا سوم	PG 50x20	اول و دوم
BOX 40x15	چهارم تا ششم	PG 40x20	سوم و چهارم
BOX 40x10	هفتم و هشتم	PG 40x15	پنجم تا هشتم

## معرفی شتاب نگاشت‌ها

به منظور انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی تطبیقی (DAP و APAM)، از طیف پاسخ جابجایی و شتاب حاصل از ۳ شتابنگاشت دور از گسل استفاده شده است که مشخصات آن‌ها در جدول ۴ ذکر شده است. تمامی نگاشت‌های مورد استفاده که از سایت Peer (1384) دریافت شده است، دارای مشخصات مربوط به خاک نوع III بر اساس آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) و یا خاک کلاس D بر اساس طبقه بندی دستوالعمل FEMA356 می‌باشد. برای ترسیم طیف پاسخ ارتجاعي زلزله‌های مختلف از نرم افزار SeismoSignal استفاده شده است.

جدول ۴- مشخصات رکورد‌های مورد استفاده در روش‌های DAP و APAM

Number	Earthquake name	Date (yy-mm-dd)	Station	R (Km)	PGA (g)	PGV/PGA (s)	CAV (m/s)	Tp (s)	Tm (s)
1	Chi-Chi,Taiwan,	99-09-20	CHY065	83.43	0.1	0.14	9.88	0.56	0.79
2	LomaPrieta,	89-10-18	CDMG58224	72.2	0.24	0.15	27.69	0.32	0.86
3	LomaPrieta,	89-10-18	CDMG58223	58.65	0.23	0.11	33.26	0.3	0.53

## ضریب رفتار ناشی از روش‌های مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش اور)

در این پژوهش ضریب رفتار حاصل از روش‌های مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی با استفاده از روش یانگ محاسبه شده است. به همین منظور از روش پوش اور سنتی با الگوهای مختلف بار جانبی، شامل الگوی بار طیفی (SPEC)، مثلثی (TR)، مود اول نوسان سازه (M1) و یکنواخت (Uniform) به همراه روش پوش اور تطبیقی بر مبنای جابجایی (DAP) و روش پوش اور تطبیقی با لحاظ نمودن اندرکنش بین مودها (APAM) استفاده شده است. در روش‌های پوش اور تطبیقی مذکور از طیف پاسخ ارتجاعي جابجایی و شتاب ۳ شتابنگاشت استفاده شده است. کلیه ی تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی مورد بحث، با استفاده از نرم افزار OpenSees انجام شده است. در جداول ۵ تا ۷ مقادیر ضریب رفتار و دیگر پارامترهای موثر، برای سازه‌های مختلف مورد استفاده در این مطالعه ارائه شده است.



جدول ۵- مشخصات لرزه ای حاصل از روش های مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی برای سازه ۴ طبقه

Load Pattern	$V_x$ (Ton)	$V_y$ (Ton)	$V_w$ (Ton)	$V_{max}$ (Ton)	$\Delta_y$ (m)	$\Delta_{max}$ (m)	$\mu$	$R_d$	$R$			
Uniform	76.73	111.74	23.10	136.08	0.10	0.24	1.46	2.41	3.32	0.94	2.50	12.08
SPEC	60.49	87.25	23.10	117.02	0.10	0.25	1.44	2.51	2.62	0.94	2.60	9.82
TR	61.69	89.10	23.10	117.52	0.10	0.24	1.44	2.41	2.67	0.94	2.50	9.63
M1	60.32	87.14	23.10	115.29	0.10	0.24	1.44	2.41	2.61	0.94	2.50	9.42
DAP_G1	62.03	91.31	23.10	117.01	0.11	0.25	1.47	2.37	2.68	0.94	2.46	9.73
DAP_G2	59.80	91.47	23.10	119.03	0.11	0.26	1.53	2.43	2.59	0.94	2.52	9.98
DAP_G3	62.89	92.46	23.10	128.29	0.11	0.26	1.47	2.49	2.72	0.94	2.58	10.33
APAM_G1	61.17	88.35	23.10	116.02	0.10	0.25	1.44	2.51	2.65	0.94	2.60	9.96
APAM_G2	61.69	89.06	23.10	117.05	0.10	0.25	1.44	2.51	2.67	0.94	2.60	10.04
APAM_G3	63.40	91.60	23.10	119.53	0.10	0.24	1.44	2.41	2.74	0.94	2.50	9.92

جدول ۶- مشخصات لرزه ای حاصل از روش های مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی برای سازه ۷ طبقه

Load Pattern	$V_x$ (Ton)	$V_y$ (Ton)	$V_w$ (Ton)	$V_{max}$ (Ton)	$\Delta_y$ (m)	$\Delta_{max}$ (m)	$\mu$	$R_d$	$R$			
Uniform	120.85	168.37	41.51	201.34	0.17	0.34	1.39	2.04	2.91	0.78	2.34	9.47
SPEC	104.39	149.81	41.51	175.91	0.20	0.41	1.44	2.05	2.51	0.78	2.35	8.47
TR	105.15	150.90	41.51	175.45	0.20	0.41	1.44	2.05	2.53	0.78	2.35	8.53
M1	104.39	137.36	41.51	172.35	0.18	0.40	1.32	2.19	2.51	0.78	2.51	8.32
DAP_G1	109.76	142.19	41.51	176.48	0.19	0.42	1.30	2.19	2.64	0.78	2.53	8.65
DAP_G2	115.52	145.79	41.51	183.04	0.20	0.46	1.26	2.34	2.78	0.79	2.70	9.50
DAP_G3	111.30	141.28	41.51	188.40	0.19	0.40	1.27	2.12	2.68	0.78	2.43	8.26
APAM_G1	115.90	143.37	41.51	175.97	0.18	0.40	1.24	2.19	2.79	0.78	2.51	8.69
APAM_G2	109.38	143.80	41.51	177.27	0.18	0.40	1.31	2.19	2.63	0.78	2.51	8.71
APAM_G3	114.75	151.47	41.51	181.26	0.18	0.38	1.32	2.08	2.76	0.78	2.38	8.67

جدول ۷- مشخصات لرزه ای حاصل از روش های مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی برای سازه ۱۰ طبقه

Load Pattern	$V_x$ (Ton)	$V_y$ (Ton)	$V_w$ (Ton)	$V_{max}$ (Ton)	$\Delta_y$ (m)	$\Delta_{max}$ (m)	$\mu$	$R_d$	$R$			
Uniform	147.74	189.73	59.17	238.45	0.22	0.45	1.28	2.08	2.50	0.77	2.40	7.68
SPEC	112.44	157.21	59.17	188.96	0.25	0.49	1.40	1.96	1.90	0.77	2.25	5.97
TR	108.52	149.72	59.17	187.04	0.23	0.48	1.38	2.06	1.83	0.77	2.37	6.00
M1	113.10	148.45	59.17	182.12	0.23	0.46	1.31	1.97	1.91	0.77	2.26	5.67
DAP_G1	115.71	150.21	59.17	197.65	0.24	0.51	1.30	2.11	1.96	0.77	2.44	6.19
DAP_G2	119.63	160.20	59.17	227.71	0.26	0.63	1.34	2.48	2.02	0.78	2.91	7.87
DAP_G3	132.05	167.98	59.17	226.50	0.27	0.50	1.27	1.88	2.23	0.77	2.14	6.07
APAM_G1	119.63	155.55	59.17	198.65	0.23	0.47	1.30	2.02	2.02	0.77	2.32	6.09
APAM_G2	124.86	154.38	59.17	204.40	0.23	0.46	1.24	1.97	2.11	0.77	2.26	5.90
APAM_G3	137.94	171.00	59.17	219.77	0.23	0.45	1.24	1.93	2.33	0.77	2.21	6.38

بر اساس توصیه ایین نامه های مختلف، حداقل مقادیر ضریب رفتار حاصل از روش های مختلف، به عنوان ضریب رفتار سازه شناخته می شود. مقادیر حداقل ضریب رفتار حاصل از روش های تحلیل استاتیکی غیرخطی سنتی و پیشرفته در جداول ۸ تا ۱۲ ارائه شده است.

جدول ۹- حداقل ضریب شکل پذیری ( $\mu$ )  
حاصل از روش های مختلف تحلیل استاتیکی غیر خطی

Pushover Methods	4 Story	7 Story	10 Story
CPA	2.41	2.04	1.96
DAP	2.37	2.12	1.88
APAM	2.41	2.08	1.93

جدول ۸- حداقل ضریب رفتار ( $R$ )  
حاصل از روش های مختلف تحلیل استاتیکی غیر خطی

Pushover Methods	4 Story	7 Story	10 Story
CPA	9.42	8.32	5.67
DAP	9.73	8.26	6.07
APAM	9.92	8.67	5.90

جدول ۱۱- حداقل ضریب اضافه مقاومت ( )  
حاصل از روش های مختلف تحلیل استاتیکی غیر خطی

Pushover Methods	4 Story	7 Story	10 Story
CPA	1.44	1.32	1.28
DAP	1.47	1.26	1.27
APAM	1.44	1.24	1.24

جدول ۱۰- حداقل ضریب کاهش شکل پذیری ( $R_{\mu}$ )  
حاصل از روش های مختلف تحلیل استاتیکی غیر خطی

Pushover Methods	4 Story	7 Story	10 Story
CPA	2.50	2.34	2.25
DAP	2.46	2.43	2.14
APAM	2.50	2.38	2.21

جدول ۱۲- حداقل ضریب تنش مجاز ( )  
حاصل از روش های مختلف تحلیل استاتیکی غیر خطی

Pushover Methods	4 Story	7 Story	10 Story
CPA	2.61	2.51	1.83
DAP	2.59	2.64	1.96
APAM	2.65	2.63	2.02

## نتیجه گیری

در این پژوهش پارامترهای طراحی لرزه ای قاب های خمشی فولادی با شکل پذیری متوسط، از جمله ضریب اضافه مقاومت ( )، ضریب کاهش شکل پذیری ( $R_{\mu}$ )، شکل پذیری کل ( $\mu$ )، ضریب تنش مجاز ( $Y$ ) و ضریب رفتار ( $R$ ) حاصل از تحلیلی های استاتیکی غیرخطی مورد ارزیابی قرار گرفت.

به این منظور از دو نوع تحلیل استاتیکی غیر خطی سنتی و پیشرفته استفاده شد. در روش پوش اور سنتی از ۴ الگوی بار جانبی شامل یکنواخت، مثلثی، مود اول و الگوی بار ناشی از تحلیل دینامیکی طیفی و همچنین از دو روش پوش اور پیشرفته شامل روش پوش اور تطبیقی بر اساس جابجایی ( $DAP$ ) و روش پوش اور تطبیقی با در نظر گرفتن اندرکنش بین مودی ( $APAM$ ) استفاده شده است. کلیه تحلیل های غیرخطی توسط نرم افزار OpenSees انجام شده است و در نهایت نتایج زیر در محدوده مدل های این پژوهش برای پارامترهای لرزه ای مذکور حاصل شد:

ضریب رفتار حاصل از کلیه روش های تحلیل مورد بررسی، با افزایش ارتفاع سازه کاهش می یابد. اختلاف میان روش های مختلف تحلیل استاتیکی غیرخطی در محاسبه پارامترهای ضریب رفتار و ضریب شکل پذیری با افزایش ارتفاع سازه ها افزایش می یابد.

مقادیر ضریب رفتار برای کلیه سازه های مورد بررسی حاصل از الگوهای مختلف بار جانبی در روش پوش اور سنتی، تقریباً یکسان می باشند.



Pinho R, Antoniou S; (2005) "A displacement-based assessment of vertically irregular frames"; In: Proceedings of 4th European workshop on seismic behavior of irregular and complex structures

Uang CM. Establishing R (or  $R_w$ ) and Cd factors for building seismic provisions. ASCE J Struct Eng 1991;117(1):19-28.

OpenSees Development Team (Open Source Project) (2008). OpenSees: Open system for earthquake engineering simulation. Berkeley (CA): Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California

Reza Abbasnia, Alireza Tajik Davoudi, Mohammad M. Maddah (2013)"An adaptive pushover procedure based on effective modal mass combination rule"; Engineering Structures 52, , 654–666

Mohssen Izadinia, Mohammad Ali Rahgozar, Omid Mohammadrezaei (2012) "Response modification factor for steel moment-resisting frames by different pushover analysis methods"; Journal of Constructional Steel Research 79, 83–90

آیین نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰)؛ ویرایش سوم؛ وزارت مسکن و شهرسازی؛ ۱۳۸۴

[www.peer.berkeley.edu/peer\\_ground\\_motion\\_database](http://www.peer.berkeley.edu/peer_ground_motion_database)

<http://seissoft.com/en/Download.aspx>

