به نام خدا

تحلیل دینامیکی غیر خطی افزایشی IDA

(Incremental Dynamic Analysis)

(Dynamic PushOver curves) و منحنی های DPO

INCREMENAL DYNAMIC ANALYSIS

Or

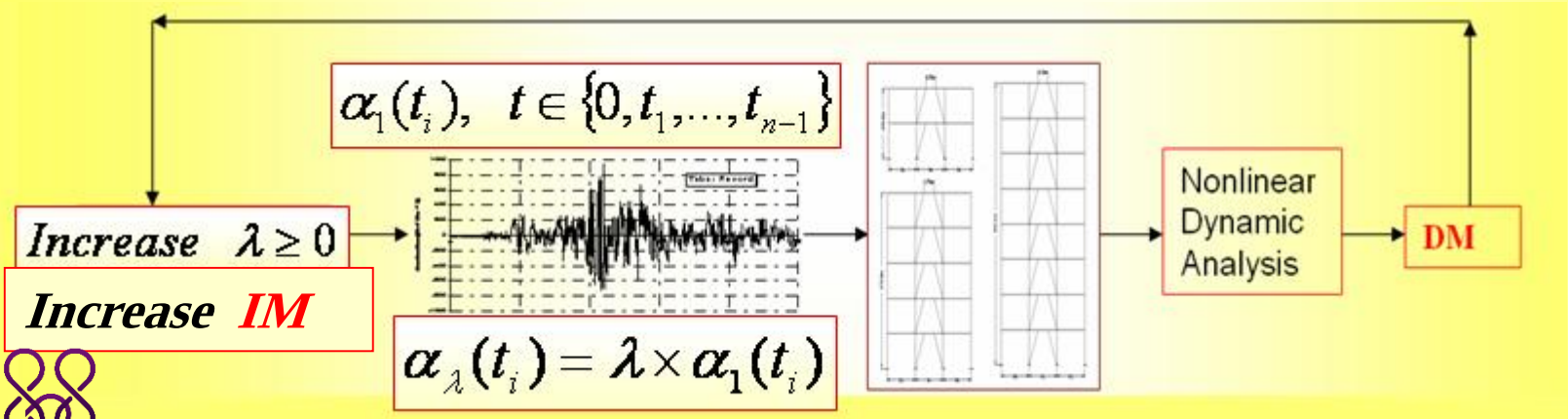
Dynamic Push Over Analysis

رفتار واقعی سیستمهای مختلف سازه ای تحت تاثیر زلزله، از طریق انجام آنالیز های تاریخچه زمانی غیر خطی که معمولاً در آن پایه سازه در معرض شتابنگاشت زمین لرزهٔ مورد نظر قرار داده می شود، تعیین می گردد . در این راستا چنانکه قبلاً توضیح داده شد، تحلیل های استاتیکی غیر خطی بارافزون (SPO) نیز روش تحلیل ساده ای را به منظور تخمین رفتار و پاسخهای لرزه ای سیستم های سازه ای ارائه می دهند که معمولاً تحت شرایط خاصی به جوابهای قابل قبولی نیز منجر می گردند. اما در هر حال تحلیل استاتیکی غیر خطی بارافزون (SPO) روشی تقریبی بوده و فرضیات انجام گرفته در آن گاه به نتایج کم و بیش نادرستی خواهد انجامید.

(Incremental Dynamic Analysis (IDA)) تحلیل های دینامیکی غیر خطی افزایشی و (Dynamic PushOver curves (DPO)) منحنیهای رفتاری حاصل از این تحلیل ها ، اخیراً به عنوان ابزار قدرتمندی جهت ارزیابی نیازهای لرزه ای سیستمهای مختلف سازه ای مورد توجه محققین مختلف قرار گرفته اند.

تعریف *IDA*

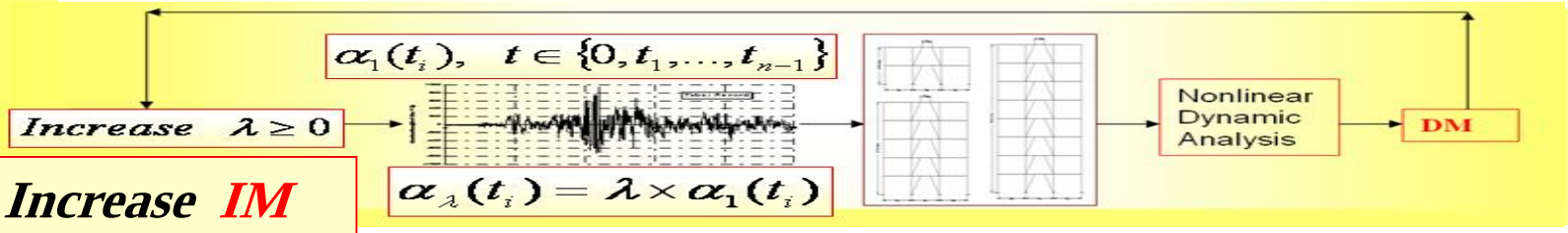
روش تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی ***IDA*** شامل مجموعه ای از چندین تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی است. مدل تحلیلی سازه تحت یک زمین لرزه با شدتهای مختلف قرار گرفته و حداکثر مقادیر یک پاسخ مورد نظر (مثلا حداکثر ***drift*** طبقه ای یا تغییر مکان بام) در هر مرحله تحلیل ثبت می شوند. افزایش شدت زمین لرزه از طریق ضرب اسکالر و ساده یک عدد در تمامی مقادیر تاریخچه زمانی شتاب آن زمین لرزه و با استفاده از یک "ضریب مقیاس" انجام می گیرد. افزایش مقیاس شتابنگاشت تا جایی ادامه می یابد که یک کمیت بحرانی مورد نظر (مثلا حداکثر ***drift***) به مقدار غیر قابل قبولی برسد. ضریب مقیاسی که در آن رفتار غیر قابل قبولی از سازه مشاهده می گردد، به عنوان "حد ظرفیت" سازه برای تحمل زمین لرزه مورد نظر، در سطح مشخصی از رفتار (مانند سطوح عملکردی ضوابط ***FEMA273***) در نظر گرفته می شود.



معرفی آنالیزهای افزایشی دینامیکی:(IDA)

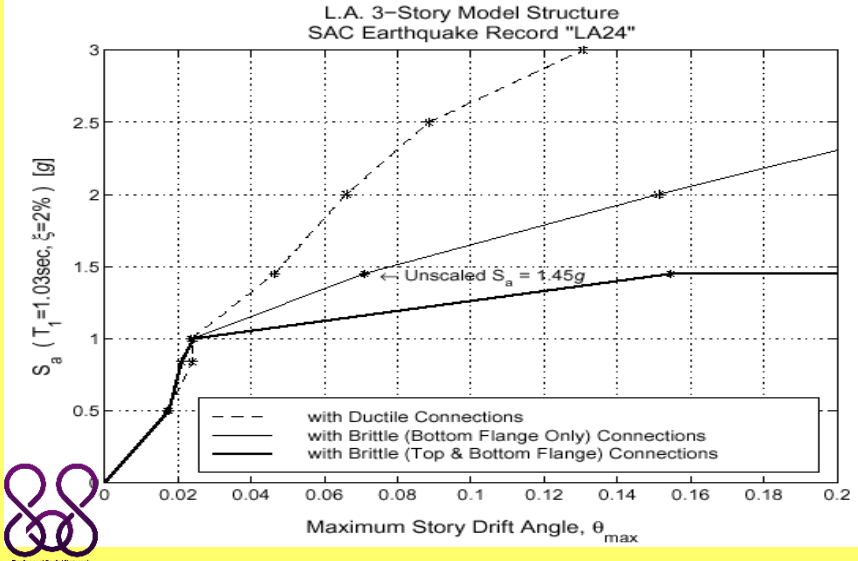
در این روش آنالیز که مجموعه ای از چند آنالیز تاریخچه زمانی غیر خطی است، مدل تحلیلی سازه تحت یک زمین لرزه با شدتهای مختلف قرار گرفته و حداکثر مقادیر یک پاسخ مورد نظر (مثلا حداکثر drift طبقه ای یا تغییر مکان بام) در هر مرحله آنالیز ثبت می شوند .

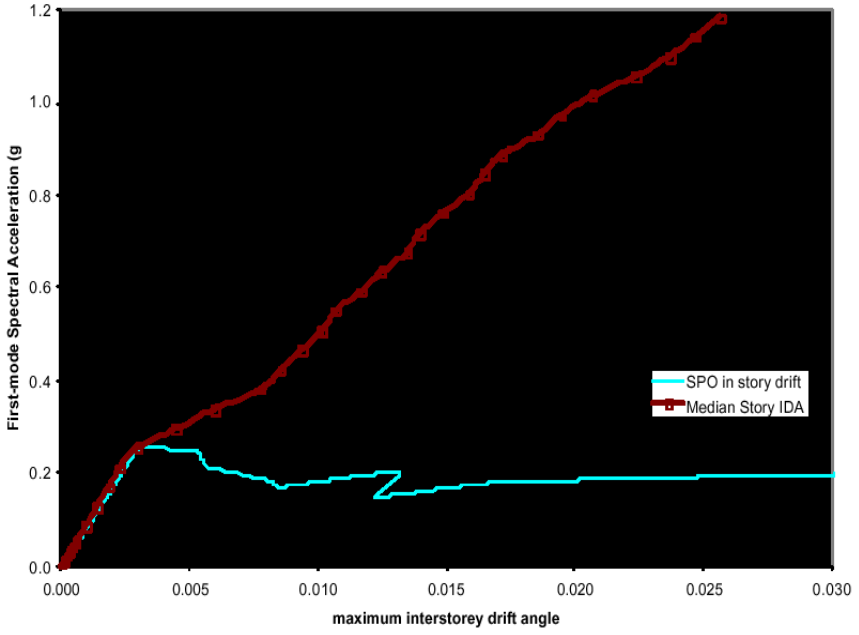
در مقابل منحنیهای رفتاری Push Over استاتیکی ، منحنی هایی رانیز میتوان با استفاده از آنالیزهای افزایشی دینامیکی ،(IDA) ترسیم نمود. بعلت ماهیت افزایشی آنالیزهای IDA بسیاری از محققین منحنی های حاصل از این روش آنالیز را منحنیهای Push Over دینامیکی یا DPO نامیده اند.



Increase IM

"DYNAMIC PUSHOVER" ANALYSIS





بعضی از مزیت ها و اهداف روش IDA

۱. درک کاملی از محدوده تقاضای سازه(نیازها) در محدوده ای از سطوح پتانسیل یک زلزله

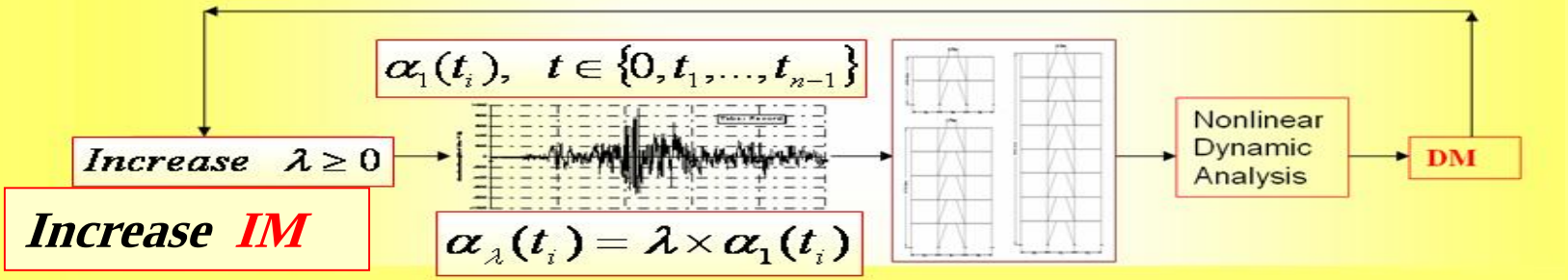
۲. درک بهتر از اثرات سازه ای سطوح بسیار شدید ونادر یک زلزله

۳. درک بهتر تغییرات پاسخ طبیعی سازه وقتی که شدت زلزله افزایش می یابد.(تغییرات تغییر مکان حداکثر در ارتفاع سازه و ارتباط آن با سختی و مقاومت و بزرگی زلزله،شروع کاهش سختی و...)

۴. محاسبه ظرفیت دینامیکی کلی سیستم سازه ای

۵. مطالعه منحنی های *IDA* چندگانه که تمام پارامترهای مذکور را برای هر زلزله مشخص می کند و چگونگی تغییرات پارامترها را از یک شتابنگاشت به شتابنگاشت دیگر را بیان میکند.

۶. در نهایت می توان نتایج حاصل از روش *IDA* را با نتایج حاصل از تحلیل خطر لرزه ای احتمالاتی ترکیب کرد و فراوانی میانگین سالیانه فراگذشت حالات حدی را که از اهداف نهایی مهندسی زلزله بر اساس عملکرد می باشد، محاسبه کرد.



The **IDA** study is now a multi-purpose and widely applicable method and its objectives, only some of

بعضی از مزیت ها و اهداف روش IDA

۱. درک کاملی از محدوده تقاضای سازه(نیازها) در محدوده ای از سطوح بتانسیل یک زلزله

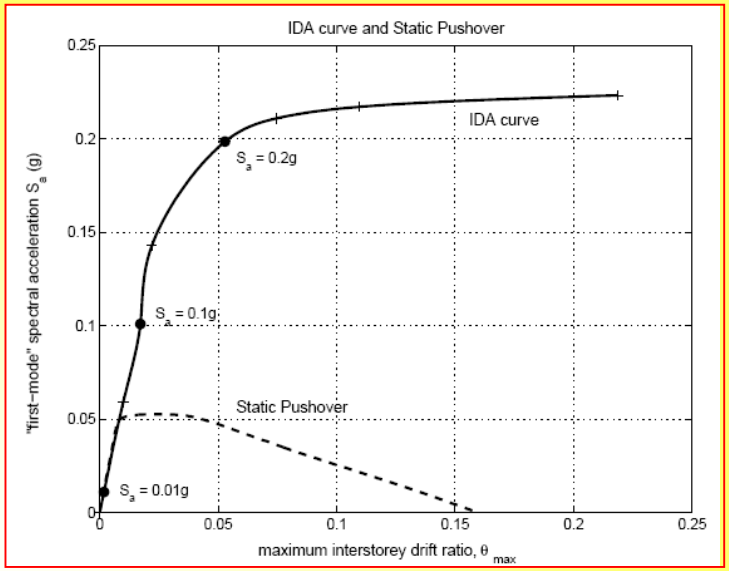
۲. درک بهتر از اثرات سازه ای سطوح بسیار شدید ونادر یک زلزله

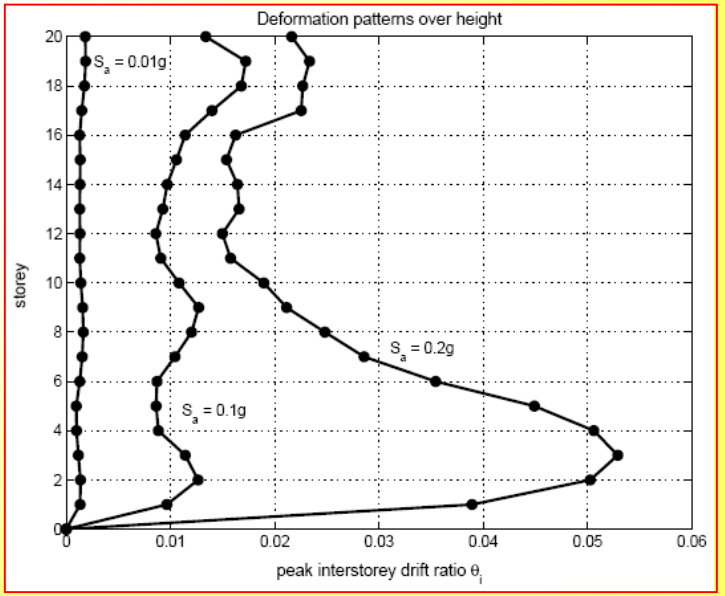
۳. درک بهتر تغییرات باسخ طبیعی سازه وقتی که شدت زلزله افزایش می یابد.(تغییرات تغییر مکان حداکثر در ارتفاع سازه و ارتباط آن با سختی و مقاومت و بزرگی زلزله،شروع کاهش سختی و...)

۴. محاسبه ظرفیت دینامیکی کلی سیستم سازه ای

۵. مطالعه منحنی های *IDA* چندگانه که تمام پارامترهای مذکور را برای هر زلزله مشخص می کند و چگونگی تغییرات پارامترها را از یک شتابنگاشت به شتابنگاشت دیگر را بیان میکند.

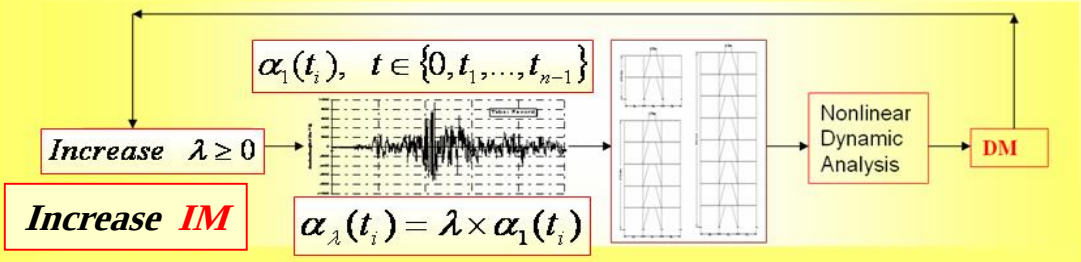
۶. در نهایت می توان نتایج حاصل از روش *IDA* را با نتایج حاصل از تحلیل خطر لرزه ای احتمالاتی ترکیب کرد و فراوانی میانگین سالیانه فراگذشت حالات حدی را که از اهداف نهایی مهندسی زلزله بر اساس عملکرد می باشد، محاسبه کرد.





global structural system

5. finally, given a multi-record IDA study, how stable (or variable) all these items are from one ground motion record to another.



اصول روش تحلیل دینامیکی فزاینده تحت یک شتابنگاشت

1 - Single Record IDAs

یک شتابنگاشت مقیاس نشده از یک دستگاه شتابنگار انتخاب میشود و عملیاتی از قبیل فیلتر کردن و درست کردن خط مبنا و... بروی انجام میشود و به صورت زیر نشان داده میشود:

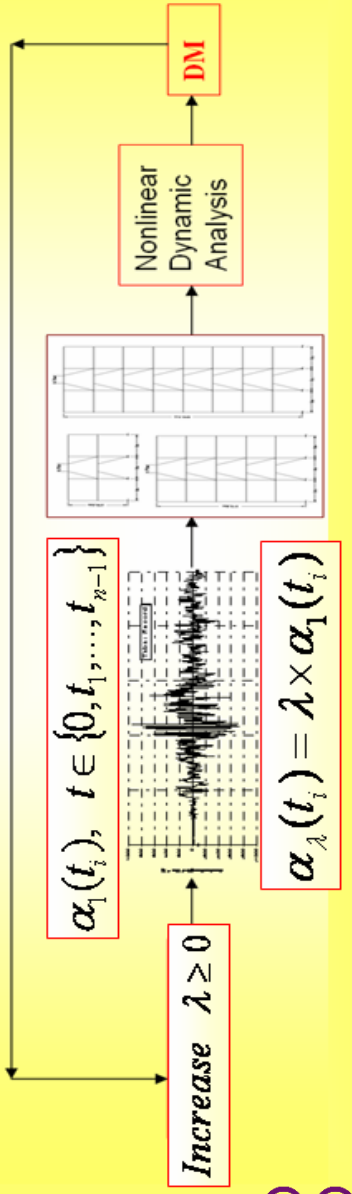
$$\alpha_1(t_i),\quad t \in \{0, t_1, \ldots, t_{n-1}\}$$

2 - Scale Factor

پارامتر مقیاس[۲]

با در نظر گرفتن یک شتابنگاشت زلزله ، پارامتر مقیاس یک عدداسکالر مثبت مانند λ است که در مقادیرشتابنگاشت اولیه ضرب شده و شبانگاشت مقیاس شده را بدست می دهد و دارای مقادیر شتابهایی خواهد بود که هر یک بصورت $a=\lambda a_1$ قابل تعریف هستند. بدین وسیله میتوان اثرات زمین لرزه های شدیدتر و ملایم تر را بررسی کرد.

$$\alpha_\lambda(t_i) = \lambda \times \alpha_1(t_i)$$



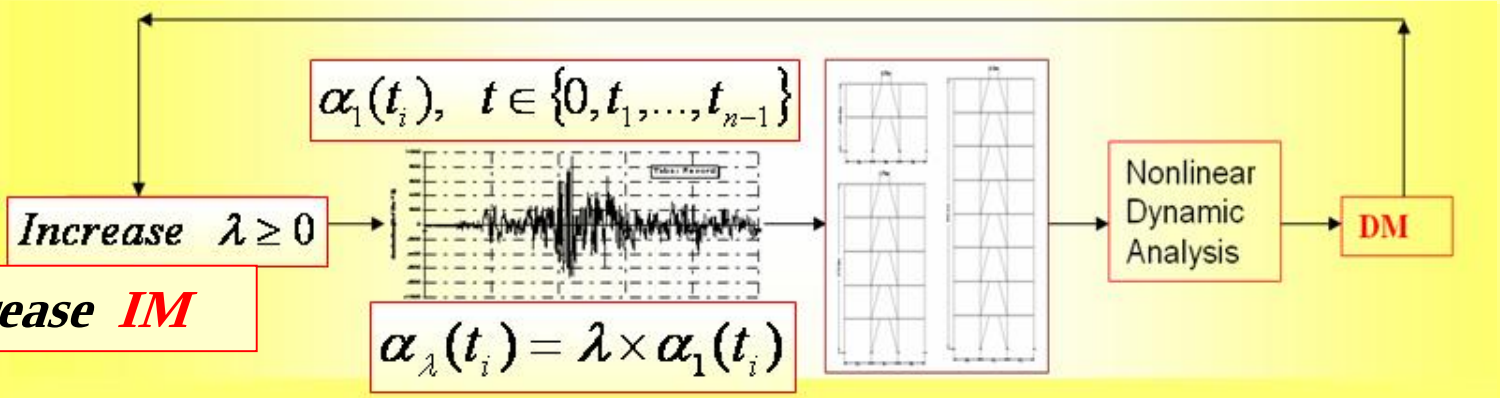
3 - Intensity Measure (IM)

شاخص شدت مقیاس شده حرکت زمین [۳]

شاخص شدت (IM) یک شتابنگاشت مقیاس شده (a_1) یک مقدار مثبت می باشد که از رابطه $IM=f(a_1,\lambda)$ تبعیت میکند و به شتابنگاشت مقیاس نشده وابسته است و به صورت یکتوا با ضریب λ افزایش می یابد. مثال هایی برای IM های قابل مقیاس : PGV, PGA شتاب طیفی برای مودال ارتعاش سازه $S_a(T_1,\%5)$ ، مدت زمان لرزش و... می باشند. حال که ورودی مطلوب برای اعمال به سازه را تعریف شد، به روشی برای کنترل پاسخ سازه به بار لرزه ای نیز احتیاج است.

An IDA CURVE *is a plot of a state variable (*DM*) recorded in an IDA study versus one or more* IM *that characterize the applied scaled accelerogram.*

Possible choices for IM could be maximum base shear, first mode spectral acceleration Sa{ T_1 , ξ }, PGA, PGV, ...



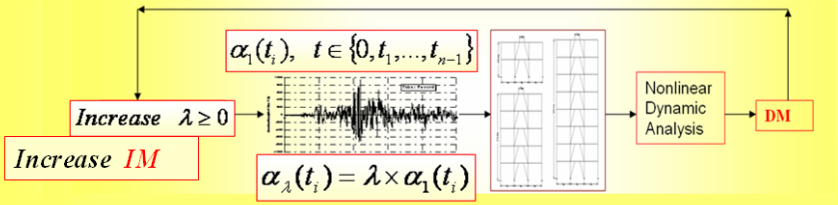
Increase IM

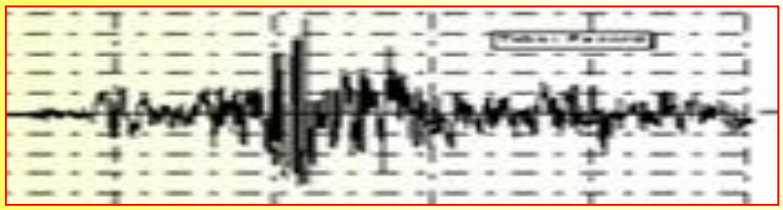
3 - Intensity Measure (IM) شاخص شدت مقیاس شده حرکت زمین ۳

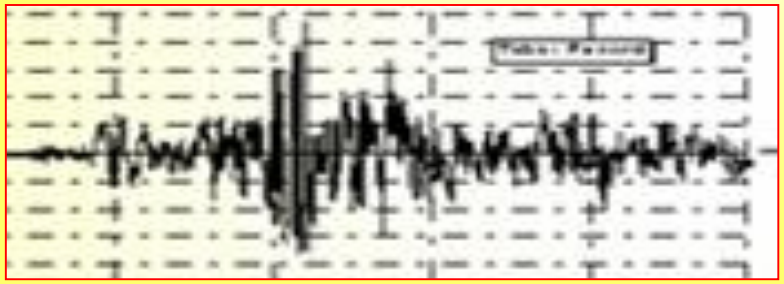
شاخص شدت ***(IM)*** یک شتابنگاشت مقیاس شده ***(a_i)*** یک مقدار مثبت می باشد که از رابطه ***$IM=f(a_i,\lambda)$*** تبعیت میکند و به شتابنگاشت مقیاس نشده وابسته است و به صورت یکتوا با ضریب λ افزایش می یابد. مثال هایی برای ***IM*** های قابل مقیاس : ***PGV, PGA*** شتاب طیفی برای مواول ارتعاش سازه ***$S_a(T_1,\%5)$*** ، مدت زمان لرزش و... می باشند. حال که ورودی مطلوب برای اعمال به سازه را تعریف شد، به روشی برای کنترل باسخ سازه به بار لرزه ای نیز احتیاج است.

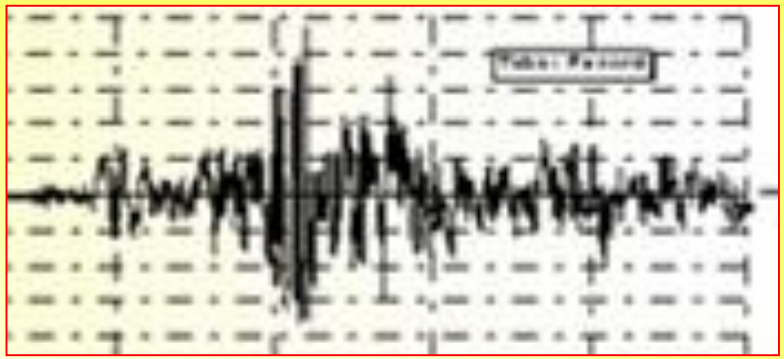
An IDA CURVE *is a plot of a state variable* (DM) *recorded in an IDA study versus one or more* **IM** *that characterize the applied scaled accelerogram.*

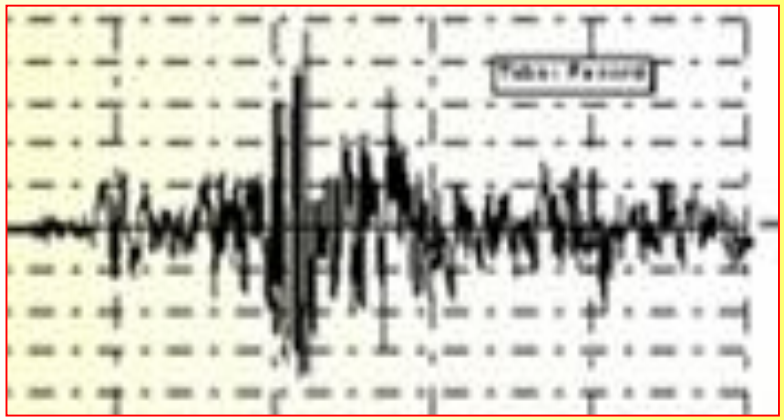
Possible choices for IM could be maximum base shear, first mode spectral acceleration Sa{ T_1 , ξ }, PGA, PGV, ……

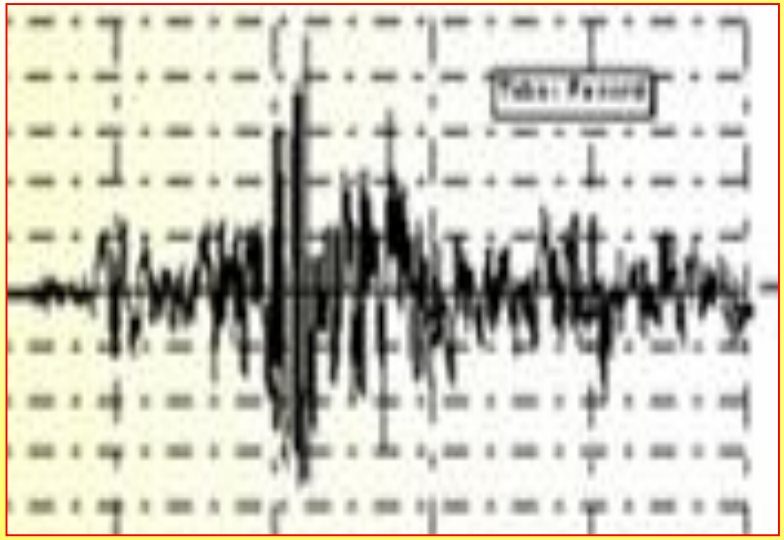










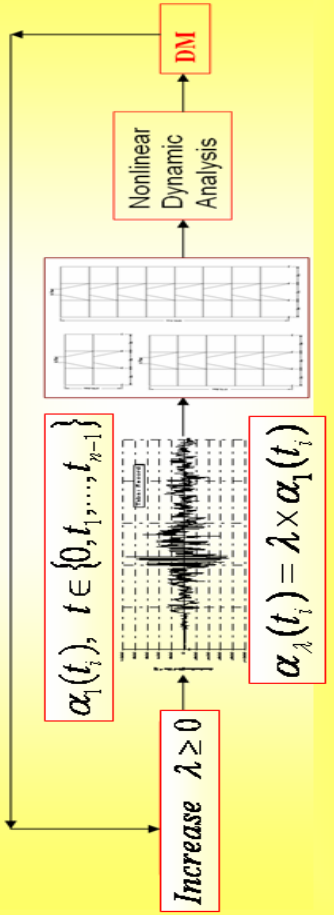


4 - Damage Measure

شاخص خسارت[۴]

شاخص خسارت یک مقدار مثبت اسکالر است که مشخص کننده پاسخ یک سازه در برابر بارهای لرزه ای ورودی می باشند. به عنوان تعریفی دیگر ***DM*** کمیت قابل مشاهده‌ای است که از خروجی تحلیل دینامیکی غیرخطی نتیجه‌گیری می‌شود. در این زمینه گزینه مناسب می‌تواند ماکزیمم برش پایه، چرخش‌های گره، حداکثر شکل‌پذیرهای طبقه، شاخص‌های متفاوتی از خرابی پیشنهاد شده، حداکثر انحراف بام، حداکثر زوایای انحراف میان طبقه ای $(\theta_1, \theta_2, \ldots, \theta_n)$ یک سازه n طبقه یا بیشینه آنها، بیشینه حداکثرهای زاویه انحرافی میان طبقه $\theta_{max}=max(\theta_1, \theta_2, \ldots, \theta_n)$ باشد.

انتخاب یک شاخص خسارت مناسب بستگی به نوع سازه و مشخصات آن دارد و بسته به کاربرد سازه ممکن است از دو یا چند شاخص خسارت برای ارزیابی حالات حدی در طراحی بر اساس عملکرد استفاده شود بطورمثال اگر خسارت وارده به اجزاء غیر سازه ای مورد مطالعه است ، یک انتخاب می تواند حداکثر شتاب مطلق طبقات باشد.



Definition. DAMAGE MEASURE *(DM)* *or* STRUCTURAL STATE VARIABLE *is a positive scalar that characterizes the additional response of the structural model due to a prescribed seismic loading.*

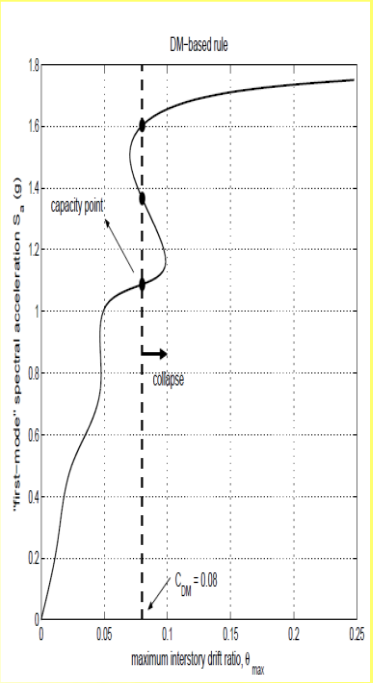
Possible choices could be maximum base shear, node rotations, peak storey ductilities, various proposed damage indices (e.g., a global cumulative hysteretic energy, peak roof drift, the floor peak interstorey drift angles of an n-storey structure, or their maximum, the maximum peak interstorey drift angle. $DM \in \{0, +\infty\}$

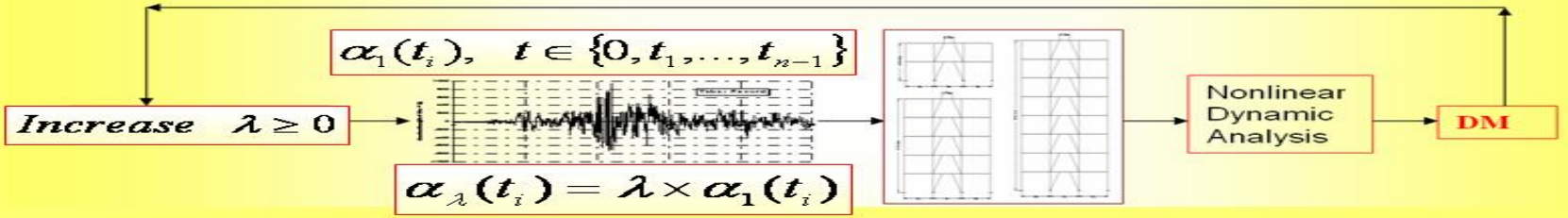
منحنی IDA یگانه [5]

5 - Singel Record IDA

تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی شامل یک سری تحلیل های دینامیکی غیر خطی برای سطوح مختلف یک شتابنگاشت مقیاس شده می باشد که رفتار سازه را در مرحله الاستیک تا غیر خطی شدن سازه و در مرحله پایانی فروریزش سازه مورد ارزیابی قرار می دهد.

یک منحنی *IDA* که به آن *DPO* نیز میگویند، منحنی می باشد که مقادیرشاخص خسارت *DM* را برحسب یک یا چند شاخص شدت *IM* نشان می دهد. یک منحنی *IDA* می تواند به صورت دو یا چند بعدی (بسته به تعداد *IM* ها) رسم شود. در هر منحنی *IDA* محور افقی بیان کننده شاخص خسارت *DM* و محور قائم مشخص کننده شاخص شدت زلزله *IM* می باشد.



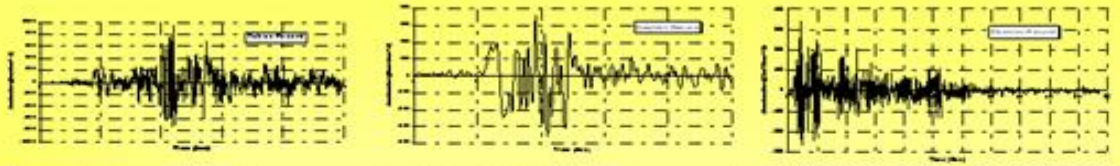


شاخص شدت مقیاس شده حرکت زمین [3]

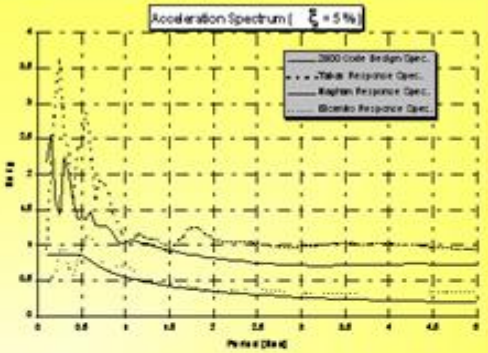
شاخص شدت (*IM*) یک شتابنگاشت مقیاس شده (a_i) یک مقدار مثبت می باشد که از رابطه $IM=f(a_i,\lambda)$ تبعیت میکند و به شتابنگاشت مقیاس نشده وابسته است و به صورت یکتوا با ضریب λ افزایش می یابد. مثال هایی برای *IM* های قابل مقیاس : *PGV, PGA*، شتاب طیفی برای مودال ارتعاش سازه $S_a(T_1,\%5)$ ، مدت زمان لرزش و... می باشند. حال که ورودی مطلوب برای اعمال به سازه را تعریف شد، به روشی برای کنترل پاسخ سازه به بار لرزه ای نیز احتیاج است.

شاخص خسارت [4]

شاخص خسارت یک مقدار مثبت اسکالر است که مشخص کننده پاسخ یک سازه در برابر بارهای لرزه ای ورودی می باشند. به عنوان تعریفی دیگر *DM* کمیت قابل مشاهده‌ای است که از خروجی تحلیل دینامیکی غیرخطی نتیجه‌گیری می‌شود. در این زمینه گزینه مناسب می‌تواند ماکزیمم برش پایه، چرخش‌های گره، حداکثر شکل‌پذیرهای طبقه، شاخص‌های متفاوتی از خرابی پیشنهاد شده، حداکثر انحراف بام، حداکثر زوایای انحراف میان طبقه ای ($\theta_1, \theta_2, \ldots, \theta_n$) یک سازه n طبقه یا بیشینه آنها، بیشینه حداکثرهای زاویه انحرافی میان طبقه $\theta_{max}=max(\theta_1, \theta_2, \ldots, \theta_n)$ باشد.



نام زلزله	PGA(g)	مدت زمان تکان قوي زلزله (Sec)	پريود غالب (Sec)
طبس	۰/۹۳	۲۵/۰۰	۰/۷۴۹
ناغان	۰/۷۲	۵/۰۰	۰/۷۴۲
السنترو	۰/۳۲	۱۲/۱۰	۰/۵۵۵

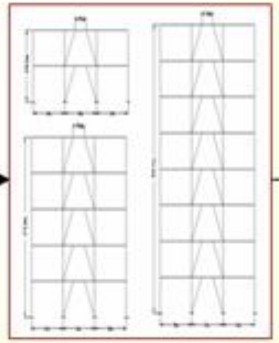


$$\alpha_{\lambda}(t_i) = \lambda \times \alpha_1(t_i)$$

Increase **IM > 0**

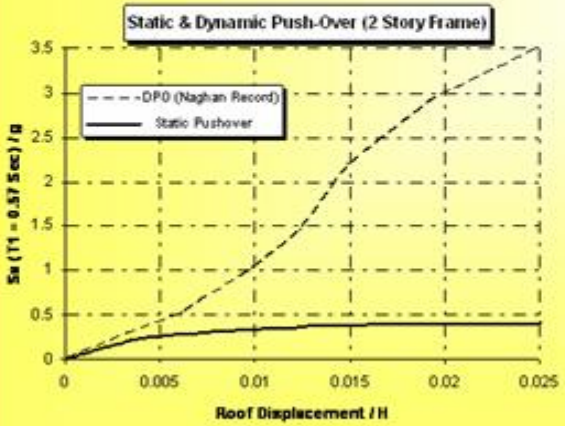
Increase λ

$$\alpha_1(t_i), \quad t \in \{0, t_1, \ldots, t_{n-1}\}$$



Nonlinear Dynamic Analysis

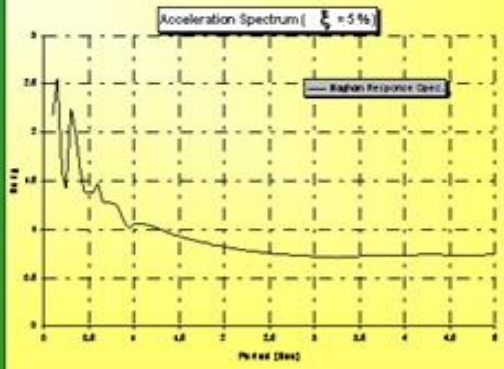
DM



repeat

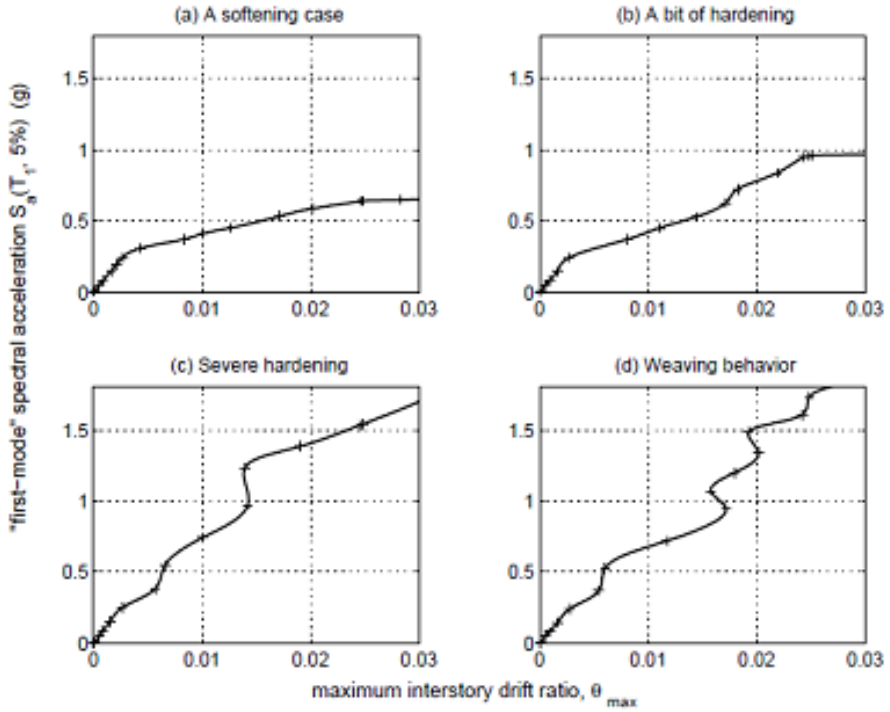
Increase **IM** by specified step
and scale record
run analysis
and extract **DM**

until collapse or a limit state reached



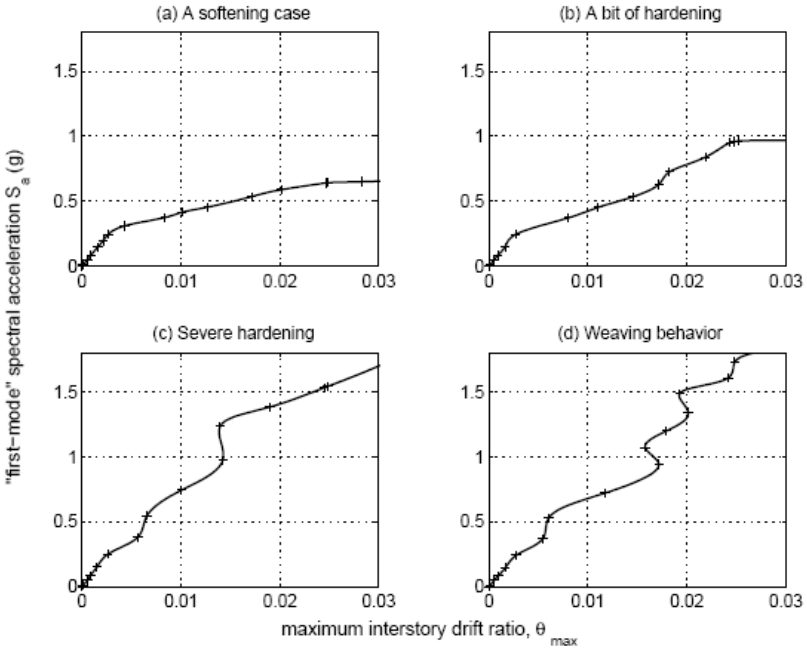
برخی از مشخصات عمومی منحنی های IDA

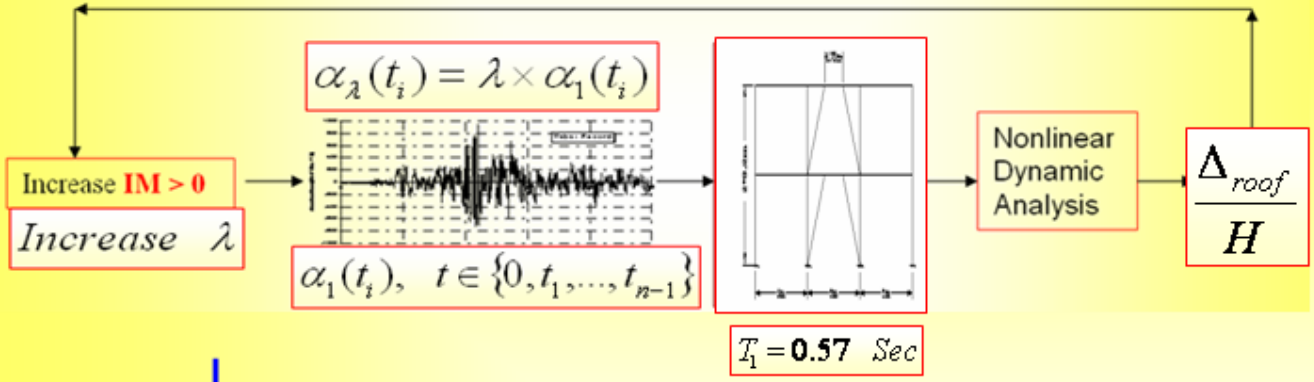
رفتار منحنی های *IDA* شدیداً بستگی به رکورد انتخاب شده دارد. یک سازه تحت رکوردهای مختلف می‌تواند دارای خصوصیات متفاوتی باشد و در هر کدام از آنها سازه در اندازه شدت متفاوتی به مرحله ویرانی کلی می‌رسد.



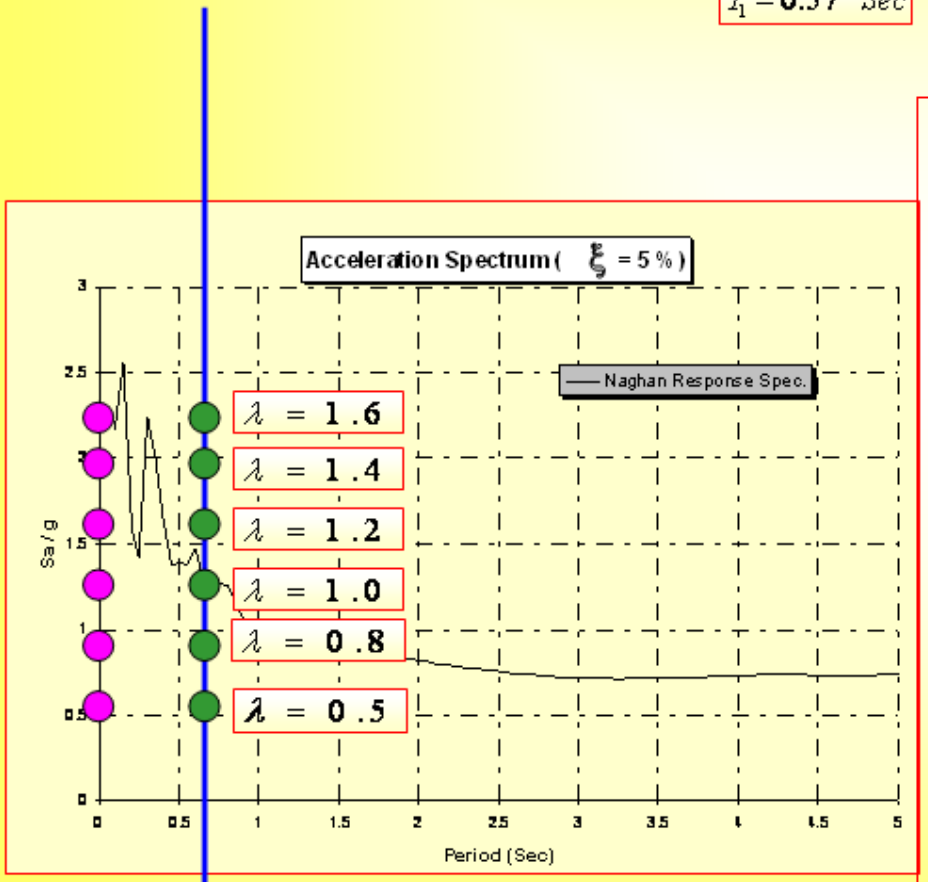
منحنیهای IDA یک قاب مهاربندی شده فولادی ۵ طبقه با پریود ۱٫۸ ثانیه تحت ۴ زلزله مختلف

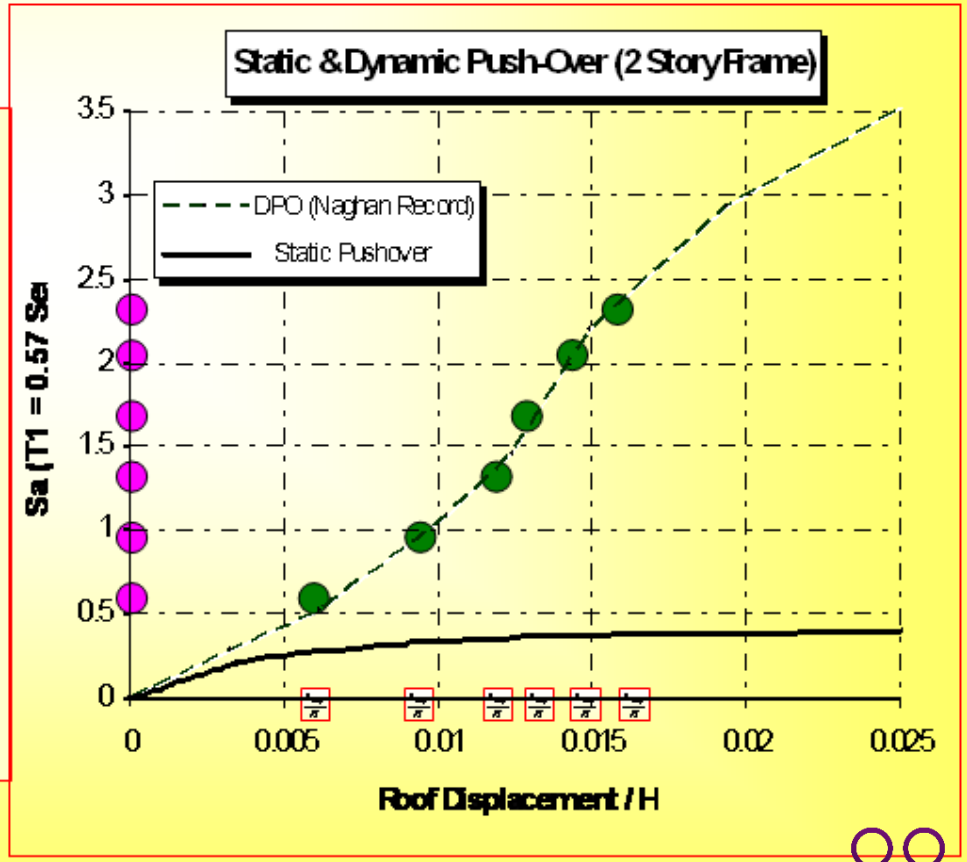
بطور مثال همانگونه که در شکل برای یک قاب مهاربندی شده فولادی ۵ طبقه با پریود ۱٫۸ ثانیه تحت ۴ زلزله مختلف نشان داده شده است، کلیه منحنی ها بوضوح یک ناحیه الاستیک خطی را نشان می دهند که تامقادیر $0.2g$ برای شتاب طیفی و 0.2 درصد برای θ_{max} ادامه می یابد که دراین نقطه اولین کمانش بادبندی رخ می دهد در حقیقت تمامی مدل های سازه ای با المان های الاستیک خطی اولیه این رفتار را از خود نشان می دهند و تا وقتی که اولین غیر خطی شدن در سیستم اتفاق بیفتد ادامه دارد. نسبت IM/DM دراین قسمت برای هر منحنی IDA به نام سختی الاستیک برای IM و DM مفروض درآن منحنی خوانده می شود . درحالت کلی این نسبت از یک شتابنگاشت به شتابنگاشت دیگر فرق می کند ولی چنانچه اثر مودهای بالاتر در شاخص شدت به حساب آید این نسبت برای شتابنگاشت های مختلف یکی می شود.

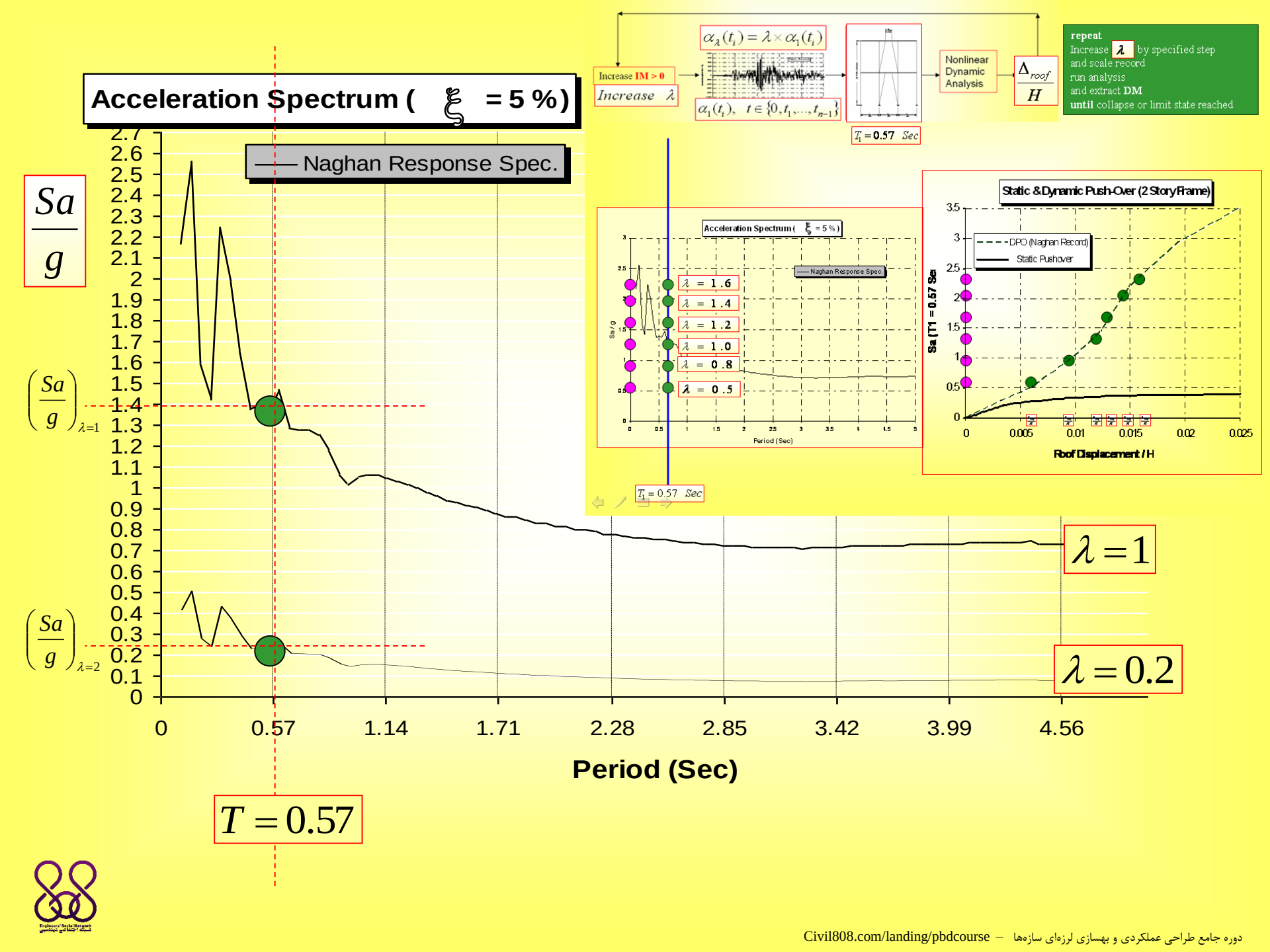




repeat
Increase λ by specified step
and scale record
run analysis
and extract **DM**
until collapse or limit state reached



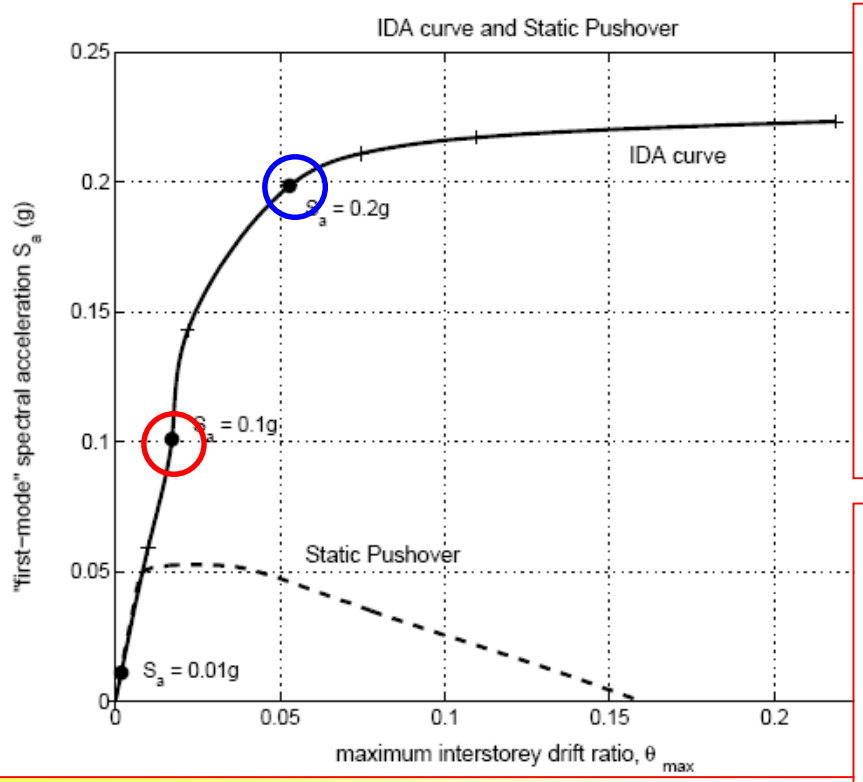


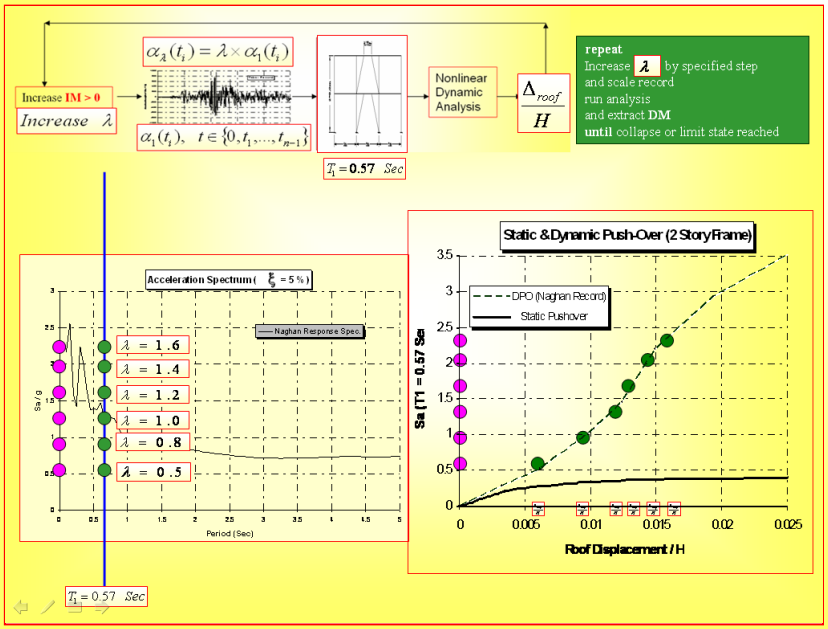

Acceleration Spectrum (ξ = 5 %)
Naghan Response Spec.
Sa / g
$\left(\frac{Sa}{g}\right)_{\lambda=1}$
$\left(\frac{Sa}{g}\right)_{\lambda=2}$
$\lambda = 1$
$\lambda = 0.2$
$T = 0.57$
Period (Sec)
0 0.57 1.14 1.71 2.28 2.85 3.42 3.99 4.56
0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1 1.1 1.2 1.3 1.4 1.5 1.6 1.7 1.8 1.9 2 2.1 2.2 2.3 2.4 2.5 2.6 2.7
Increase IM > 0
Increase λ
$\alpha_\lambda(t_i) = \lambda \times \alpha_1(t_i)$
$\alpha_1(t_i),\ t \in \{0, t_1, \ldots, t_{n-1}\}$
Nonlinear Dynamic Analysis
$\frac{\Delta_{roof}}{H}$
repeat
Increase λ by specified step
and scale record
run analysis
and extract DM
until collapse or limit state reached
$T_1 = 0.57$ Sec
Acceleration Spectrum (ξ = 5 %)
Naghan Response Spec.
λ = 1.6
λ = 1.4
λ = 1.2
λ = 1.0
λ = 0.8
λ = 0.5
Sa / g
Period (Sec)
$T_1 = 0.57$ Sec
Static & Dynamic Push-Over (2 Story Frame)
DPO (Naghan Record)
Static Pushover
Sa [T1 = 0.57 Sec]
Roof Displacement / H
0 0.5 1 1.5 2 2.5 3 3.5
0 0.005 0.01 0.015 0.02 0.025

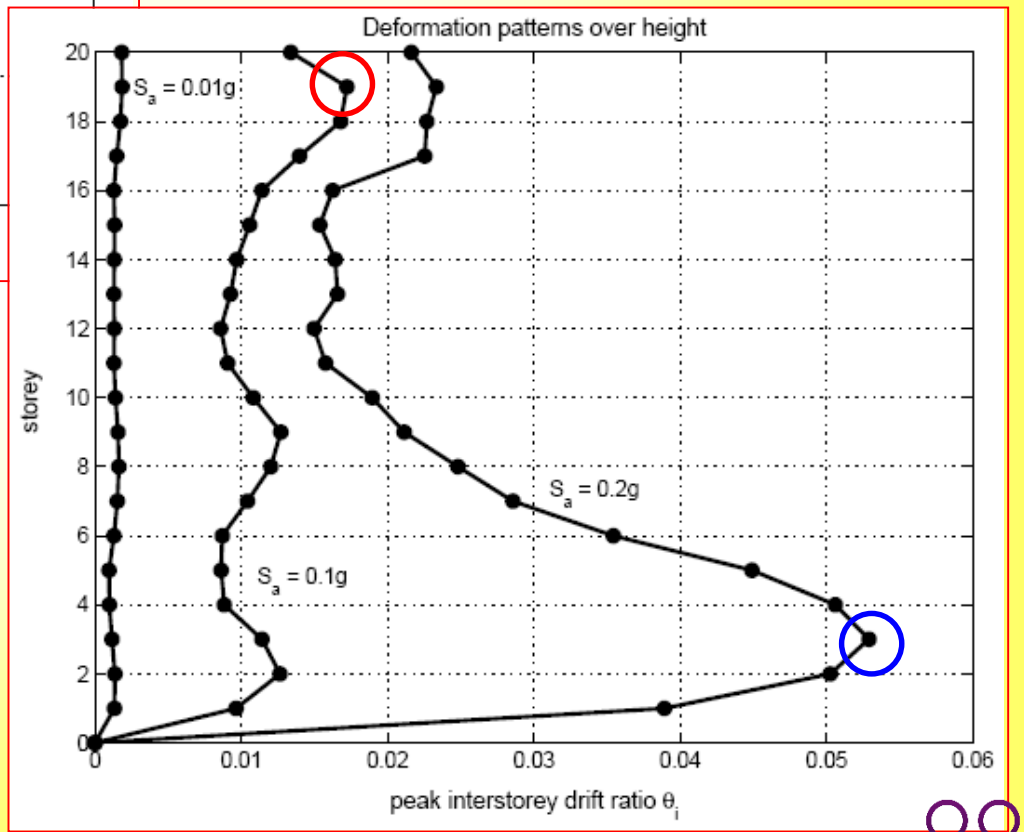
شاخص شدت مقیاس شده حرکت زمین [۳]

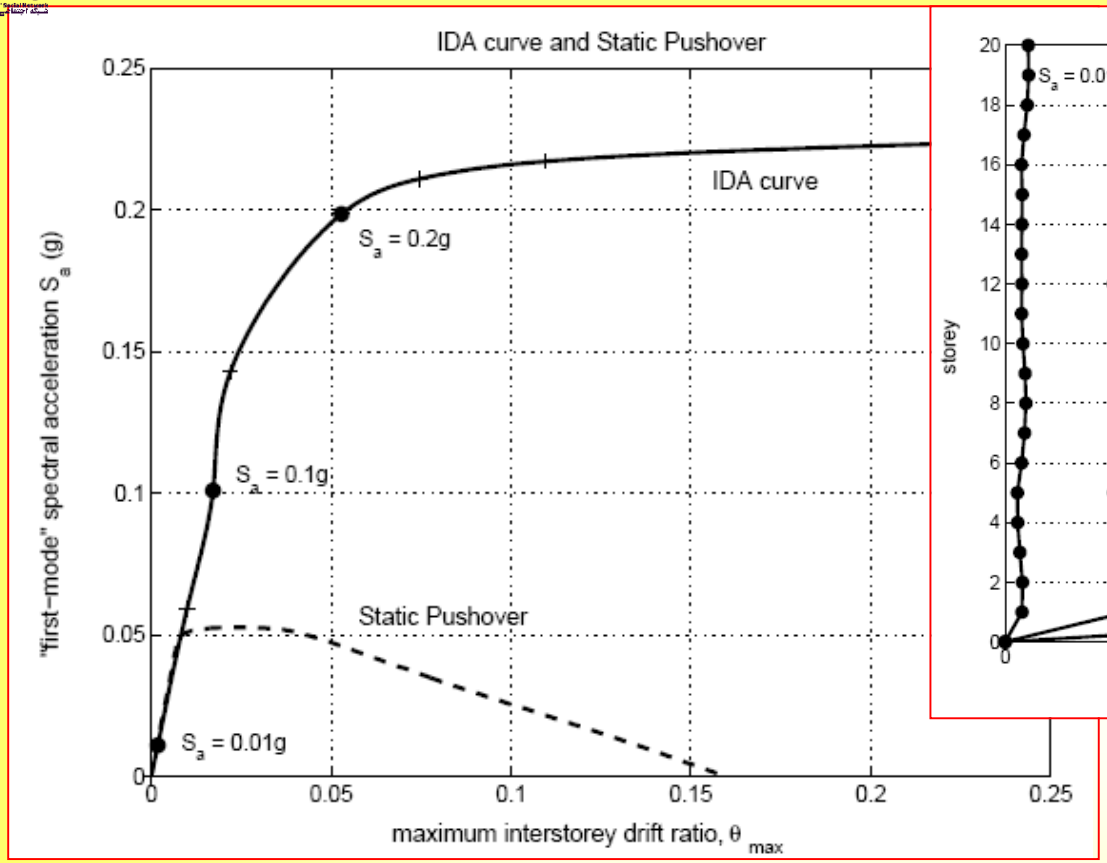
شاخص شدت (*IM*) یک شتابنگاشت مقیاس شده (a_i) یک مقدار مثبت می باشد که از رابطه $IM=f(a_i,\lambda)$ تبعیت میکند و به شتابنگاشت مقیاس نشده وابسته است و به صورت یکتوا با ضریب λ افزایش می یابد. مثال هایی برای *IM* های قابل مقیاس : *PGV, PGA* شتاب طیفی برای مودال ارتعاش سازه $S_a(T_1,\%5)$ ، مدت زمان لرزش و... می باشند. حال که ورودی مطلوب برای اعمال به سازه را تعریف شد، به روشی برای کنترل پاسخ سازه به بار لرزه ای نیز احتیاج است.

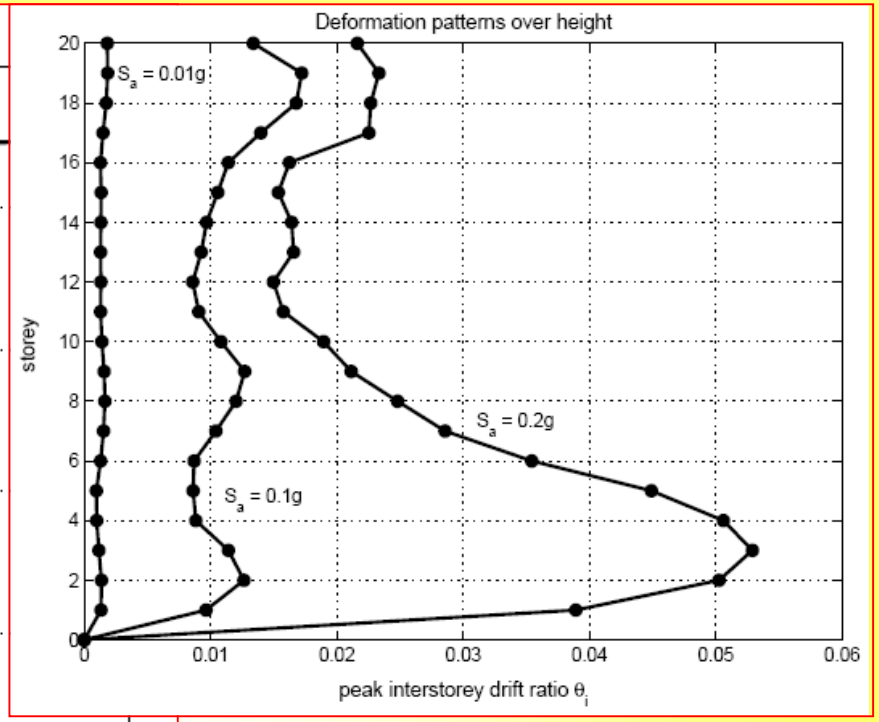
3 - Intensity Measure (IM)

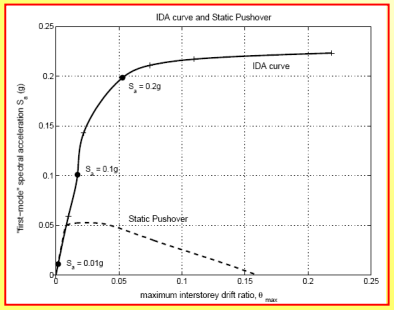


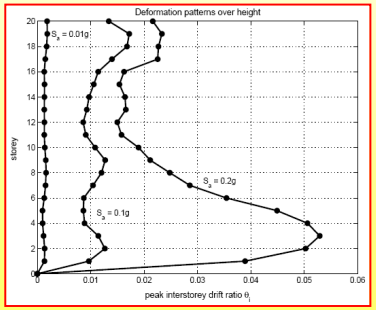


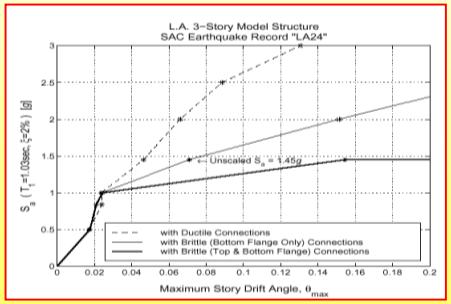


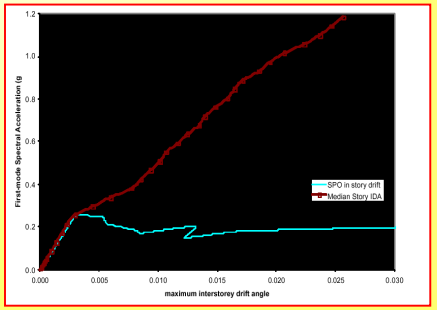

IDA curve and Static Pushover
IDA curve
S_a = 0.2g
S_a = 0.1g
Static Pushover
S_a = 0.01g
"first−mode" spectral acceleration S_a (g)
maximum interstorey drift ratio, θ_{max}


Deformation patterns over height
S_a = 0.01g
S_a = 0.2g
S_a = 0.1g
storey
peak interstorey drift ratio θ_i



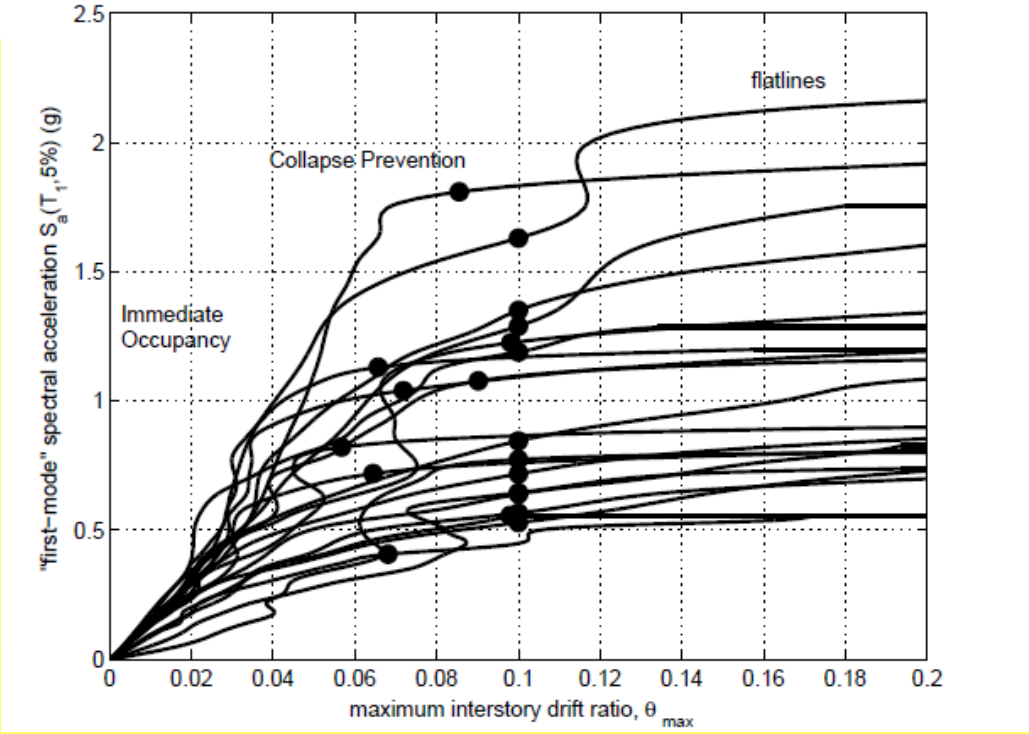



L.A. 3−Story Model Structure
SAC Earthquake Record "LA24"
Unscaled S_a = 1.46g
with Ductile Connections
with Brittle (Bottom Flange Only) Connections
with Brittle (Top & Bottom Flange) Connections
Maximum Story Drift Angle, θ_{max}

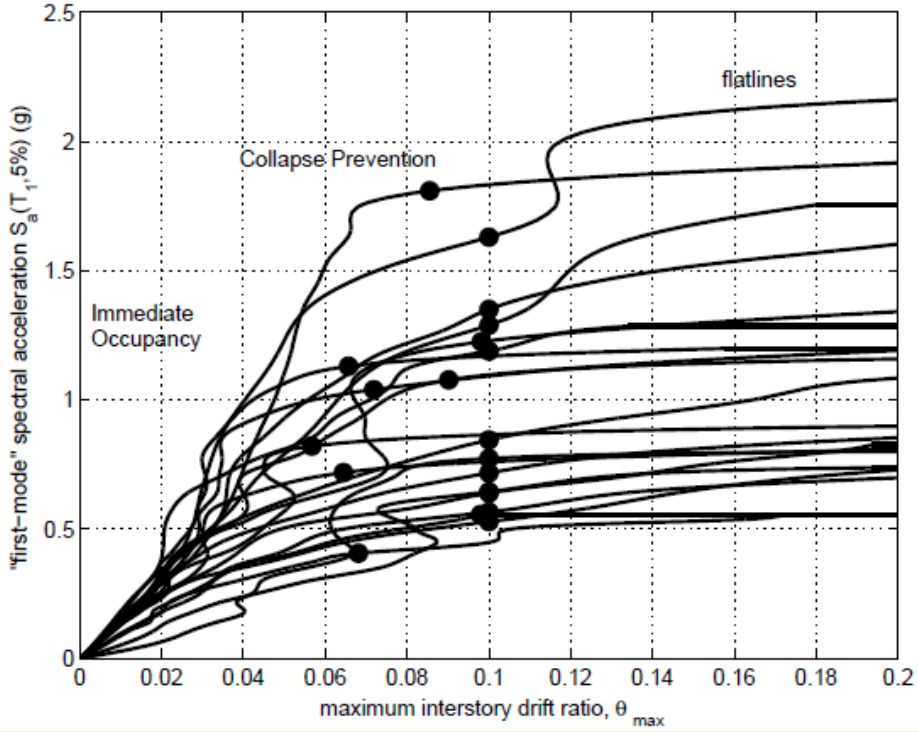

SPO in story drift
Median Story IDA
maximum interstorey drift angle

۸- Multi Record IDA منحنی IDA چند گانه ^ و نحوه خلاصه کردن آنها

همانطور که آشکاراست یک منحنی IDA یگانه نمی تواند به تنهایی رفتار یک سازه را در زلزله احتمالی بیش بینی کند. یک منحنی IDA می تواند بسیار وابسته به رکورد انتخابی باشد، از این رو برای وارد کردن خصوصیات تعداد زیادی شتابنگاشت جهت در برگرفتن محدوده کامل از پاسخ یک سازه به یک سری کافی شتابنگاشت نیاز است که نتیجه آن بوجود آمدن منحنی های IDA چند گانه می باشد . یک دسته منحنی IDA چند گانه یک استنتاج از یک سری منحنی های یگانه IDA می باشد که مربوط به تحلیل یک سازه می باشند و در مختصات یکسان IMو DM رسم شده اند.

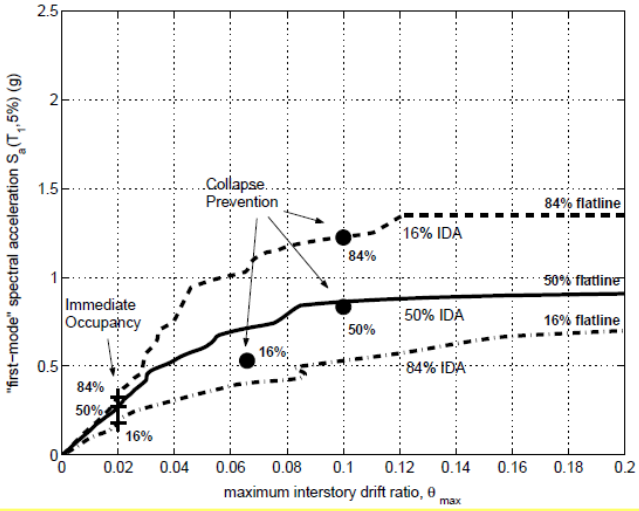


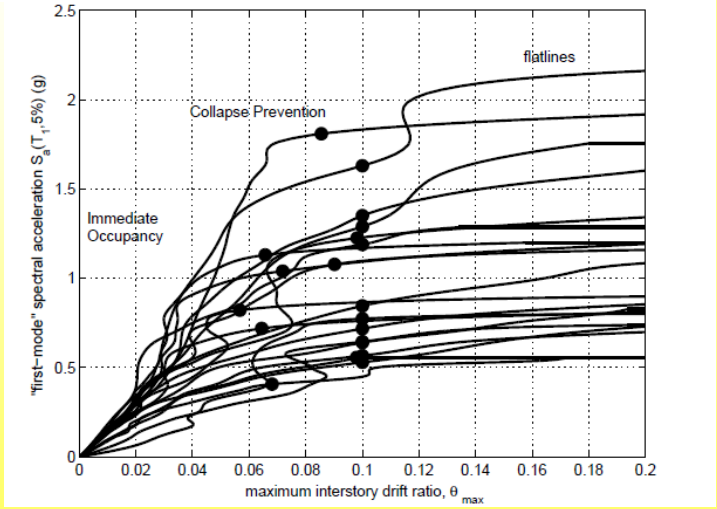
برای بررسی منحنی ها با این دید که سازه در هر سطحی از تقاضا چه پاسخی نشان می دهد، چاره ای جز استفاده از ابزار احتمالات وجود ندارد. در این حالت مدل سازه و جامعه آماری بدست آمده، از حالت قطعی خارج و به قلمرو بحث های احتمالی وارد می شوند. در این حالت هر منحنی تبدیل به یک منحنی یا تابع تصادفی $DM=f(IM)$ (خسارت بر حسب شدت) می شود، در این حالت ما نیازمند به استفاده از تکنیک های جهت مطالعات آماری می باشیم. برای خلاصه کردن وکاهش حجم اطلاعات روش های مختلفی وجود دارد. این روش‌ها به صورت مناسبی در دو رده قرار می‌گیرند.



برای خلاصه کردن منحنی ها بجای محاسبه میانگین حسابی خسارت (*DM*) در هر تراز از شدت (*IM*)، می توان اعدادی را که در میانه ساده ۵۰٪، ۱۶٪ و ۸۴٪ بازه اعداد خسارت در هر تراز شدت قرار دارند را بدست آورد. در این صورت منحنی های خلاصه شده، زمانی به سمت بینهایت میل می کنند که انهدام در ۱۶٪، ۵۰٪ و ۸۴٪ از طیف ها رخ داده باشد.

یک مزیت این روش این است که با فرضیات مناسب (بیوستگی و یکنواختی منحنی ها) منحنی حامل *X%* مقادیر *DM* بر حسب مقادیر *IM* همان منحنی حامل *(100-X%)* مقادیر *IM* بر حسب مقادیر *DM* می باشد. همانند روش ذکر شده برای خلاصه کردن منحنی های *IDA*، مقادیر عددی سطوح عملکرد قابل خلاصه کردن به چند عدد میانی به همراه شاخص پراکندگی(انحراف معیار) میباشد. بنابراین مقادیر ۱۶٪، ۵۰٪و ۸۴٪ را به عنوان مقادیر عددی خسارت ($DM^c_{16\%}, DM^c_{50\%}, DM^c_{84\%}$) واعداد ($IM^c_{16\%}, IM^c_{50\%}, IM^c_{84\%}$) برای شدت در هر سطح عملکرد محاسبه می کنیم.





مراحل کلی روش *IDA*

۱. یک مدل غیرخطی مناسب از سازه می شود.

۲. یک دسته رکورد زلزله و سطوح مقیاس انتخاب می شوند.

۳. شاخص شدت و شاخص خسارت مناسب انتخاب می شوند.

۴. ضریب شاخص شدت از طریق گام مشخص افزایش و رکورد مقیاس میشود.

۵. آنالیز دینامیکی غیرخطی با رکورد مقیاس شده صورت می پذیرد و شاخص خسارت استخراج می‌شود.

۶. تا ویرانی و یا قانون اعمال شده برای تعیین زمان توقف رخ دهد، دو مرحله بالا تکرار شود.

۷. منحنی های *IDA* پاسخ سازه در مختصات *IM* و *DM* انتخابی با استفاده از درون یابی مناسب تولید می شوند.

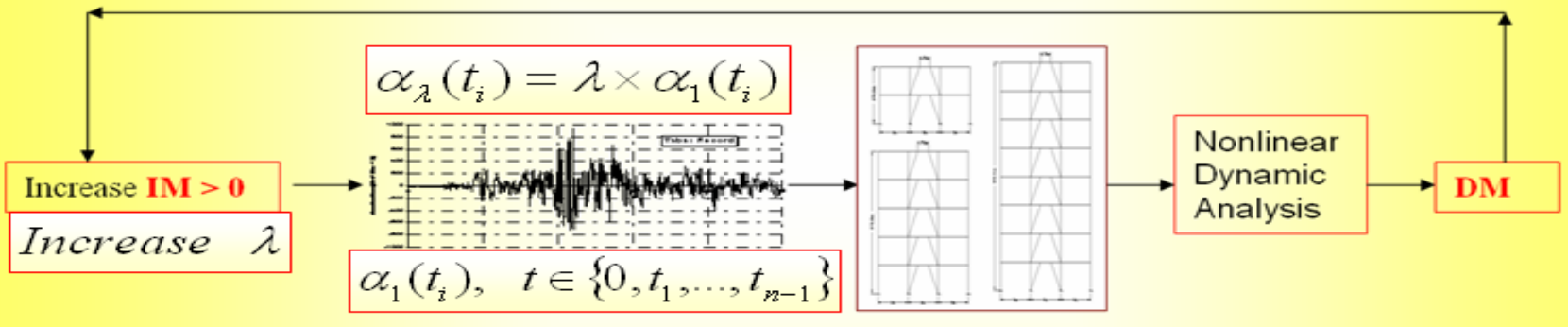
۸. منحنی های *IDA* تولید شده برای تمام رکورد ها جهت تخمین توزیع شاخص خسارت تقاضا در برابر ساخص شدت مفروض خلاصه می شوند.

۹. سطوح عملکردی مانند سطح عملکرد ایمنی جانی و سطح عملکرد جلوگیری از فروریزش بروی هر یک از منحنی های *IDA* تعریف و خلاصه می شوند.

repeat

Increase λ by specified step
and scale record
run analysis
and extract **DM**

until collapse or a limit state reached



THANK YOU FOR YOUR ATTENTION! ANY QUESTIONS?