



دانشگاه کردستان  
University of Kurdistan  
زانکۆی کوردستان

# Structural Control

## Basic concepts of structural control

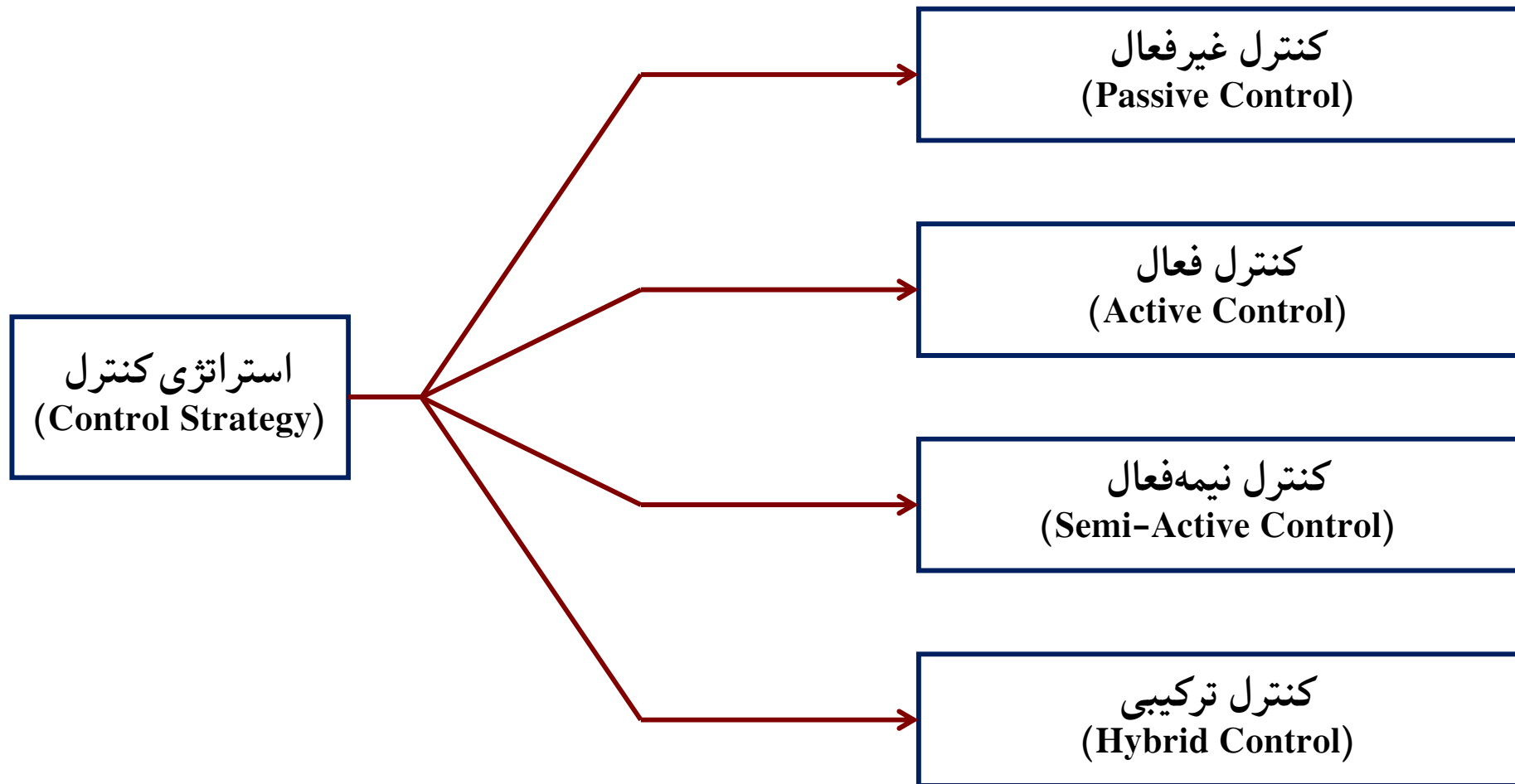
**By: Kaveh Karami**

**Associate Prof. of Structural Engineering**

**<https://prof.uok.ac.ir/Ka.Karami>**

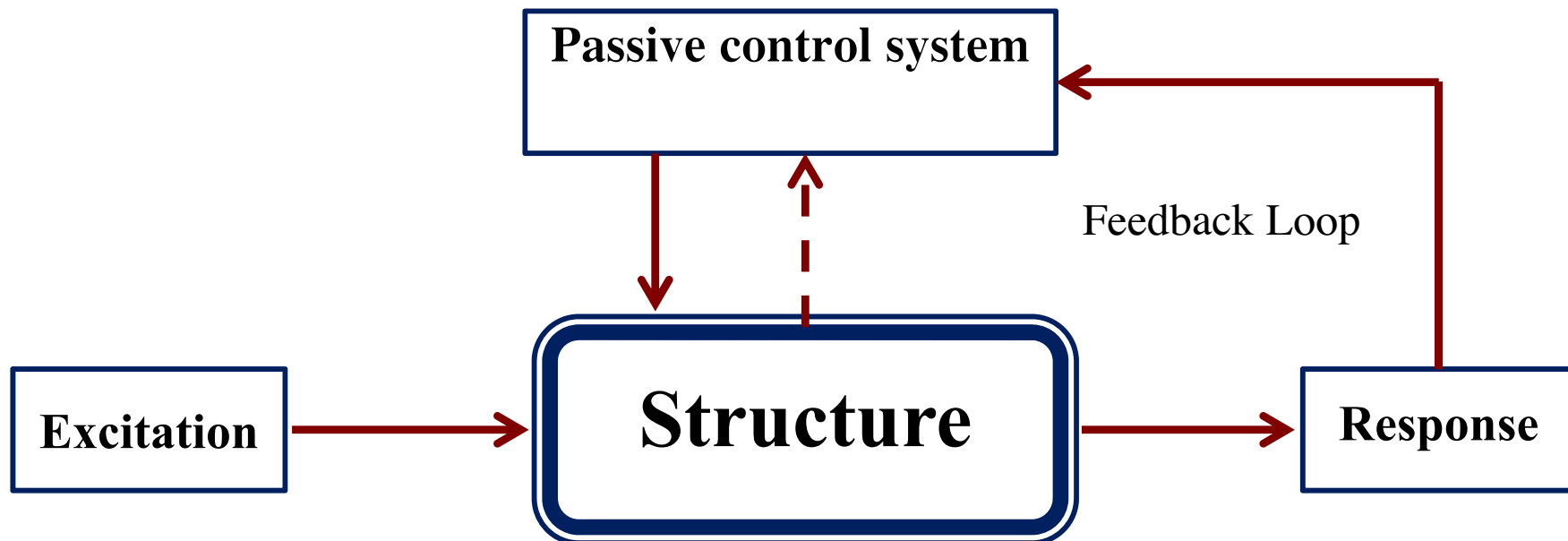
## □ مفهوم کنترل سازه‌ها و انواع آن

استراتژی کنترل در چهار گروه طبقه‌بندی می‌گردد.



## ▪ کنترل غیرفعال (Passive Control)

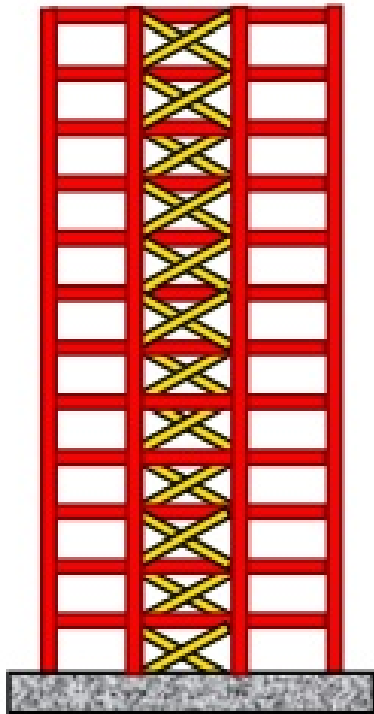
مفهوم کنترل سازه آن است که سازه آنچنان طراحی شود که در مقابل بارهای وارده مقاوم باشد؛ در این صورت ممکن است علاوه بر اجزای سازه‌ای، ابزار و سیستم‌هایی نیز به سازه اضافه گردد. این نوع کنترل‌ها را، کنترل غیرفعال (Passive control) می‌نامند. به عبارت دیگر این نوع کنترل به انرژی خارج از سازه نیازی ندارد و برای تولید نیرو از حرکت سازه استفاده می‌کند.



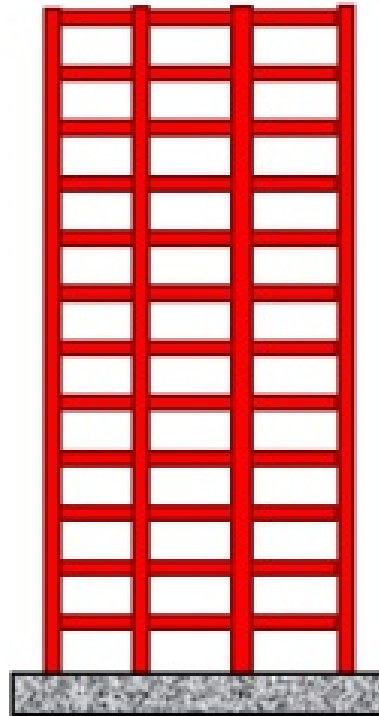
## □ مفهوم کنترل سازه‌ها و انواع آن

### ▪ کنترل غیرفعال (Passive Control)

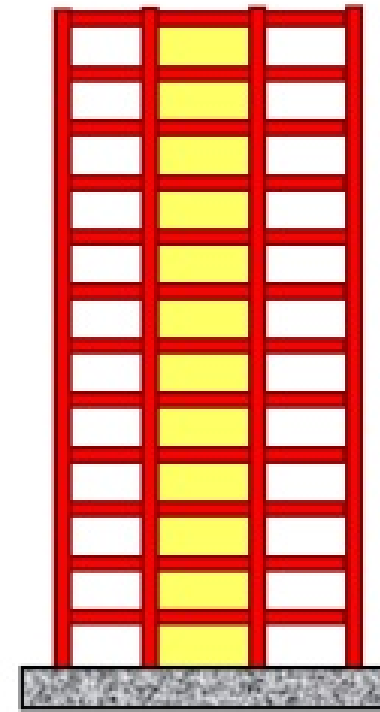
تجهیزات متعارف کنترل غیرفعال:



بادبندها  
(Braces)



سیستم قاب خمشی  
(Moment resisting frame)



دیوارهای برشی  
(Shear walls)

# Basic concepts

## □ مفهوم کنترل سازه‌ها و انواع آن

جداگر پایه (Base Isolation)

▪ کنترل غیرفعال (Passive Control)

تجهیزات مدرن کنترل غیرفعال:

جداگرهای پایه، نوعی سیستم کنترلی است که در حین ارتعاش با جدا کردن سازه از شالوده برش پایه ساختمان را کاهش می‌دهد.



# Basic concepts

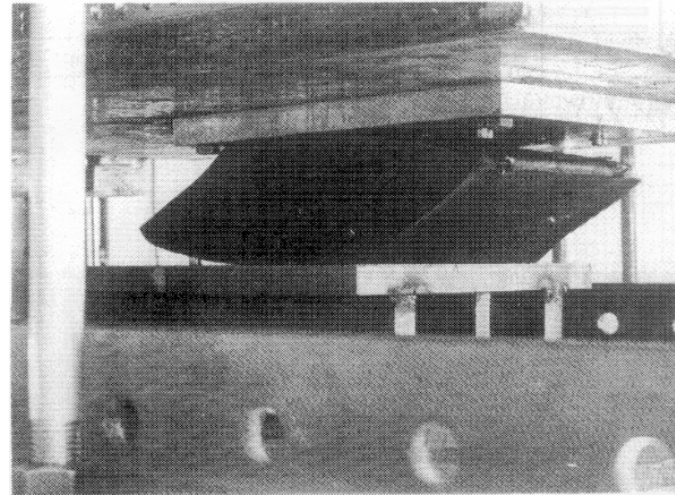
## □ مفهوم کنترل سازه‌ها و انواع آن

جداگر پایه (Base Isolation)

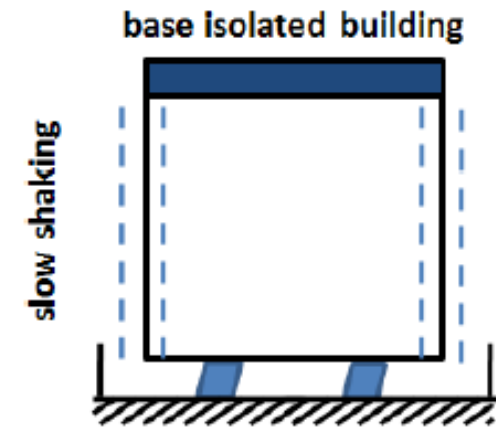
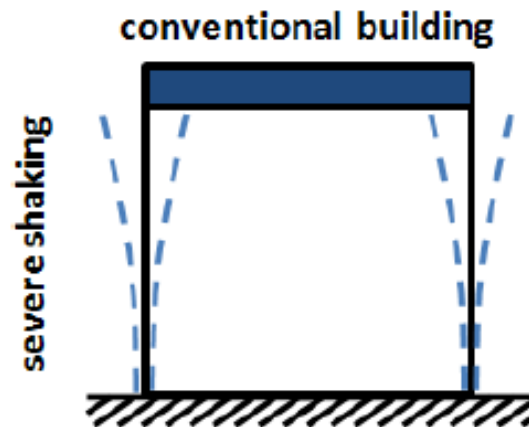
▪ کنترل غیرفعال (Passive Control)

تجهیزات مدرن کنترل غیرفعال:

اغلب جداگرها دارای رفتار غیرخطی می‌باشند



اعضای جداگر مابین شالوده و سازه قرار می‌گیرند



# Basic concepts

## □ مفهوم کنترل سازه‌ها و انواع آن

### ▪ کنترل غیرفعال (Passive Control)

تجهیزات مدرن کنترل غیرفعال:

جداگر پایه (Base Isolation)




# Basic concepts

□ مفهوم کنترل سازه‌ها و انواع آن

جداگر پایه (Base Isolation)

▪ کنترل غیرفعال (Passive Control)

تجهیزات مدرن کنترل غیرفعال:



**2007 Pisco Earthquake in Peru**  
Recorded at Ica Station 140%  
Base Isolated Configuration  
**UC San Diego** Englekirk Structural Engineering Center  
**April 2012**

# Basic concepts

جداگر پایه (Base Isolation)

- 12-story building models
- Fixed Period equals 1.2s
- Isolated period equals 5.0s

□ مفهوم کنترل سازه‌ها و انواع آن

▪ کنترل غیرفعال (Passive Control)

تجهیزات مدرن کنترل غیرفعال:

**TESTING OF NEW LINE  
OF  
SEISMIC BASE ISOLATORS  
STEP 3  
CSUN - UCSD**

**DECEMBER 5 - 6, 2006**

# Basic concepts

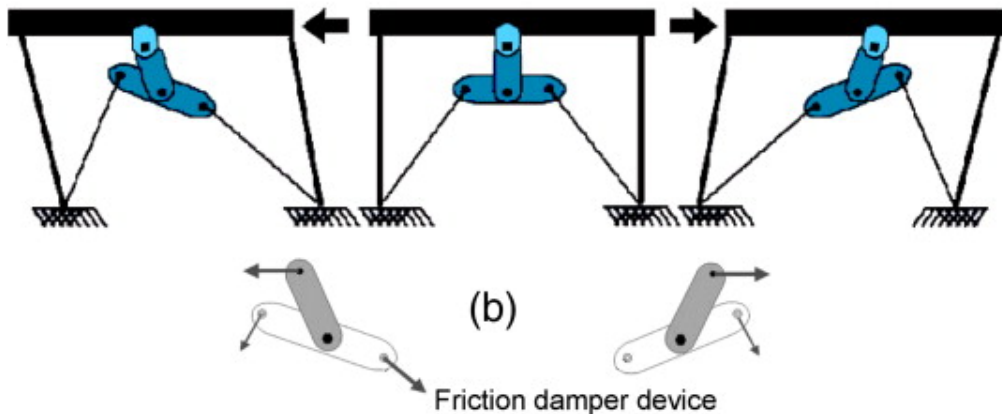
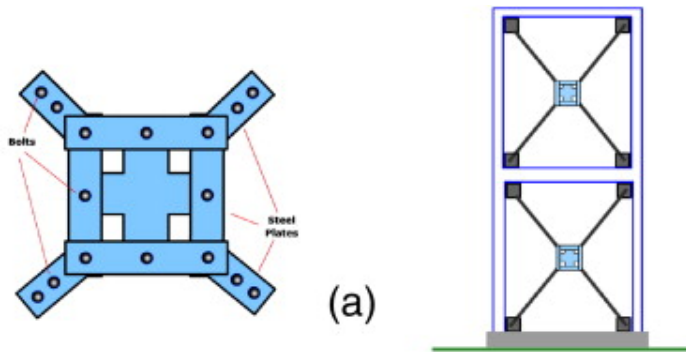
## □ مفهوم کنترل سازه‌ها و انواع آن

میراگر اصطکاکی (Friction Connection)

▪ کنترل غیرفعال (Passive Control)

تجهیزات مدرن کنترل غیرفعال:

میراگرهای اصطکاکی از یک سری قطعات فولادی تشکیل شده‌اند که حین زلزله‌های قوی این قطعات حرکت کرده و بر روی هم می‌لغزند. در اثر این لغزش انرژی وارد شده به سازه به صورت انرژی گرمایی ناشی از اصطکاک مستهلک می‌گردد.



# Basic concepts

میراگر اصطکاکی (Friction Connection)

□ مفهوم کنترل سازه‌ها و انواع آن

▪ کنترل غیرفعال (Passive Control)

تجهيزات مدرن کنترل غیرفعال:



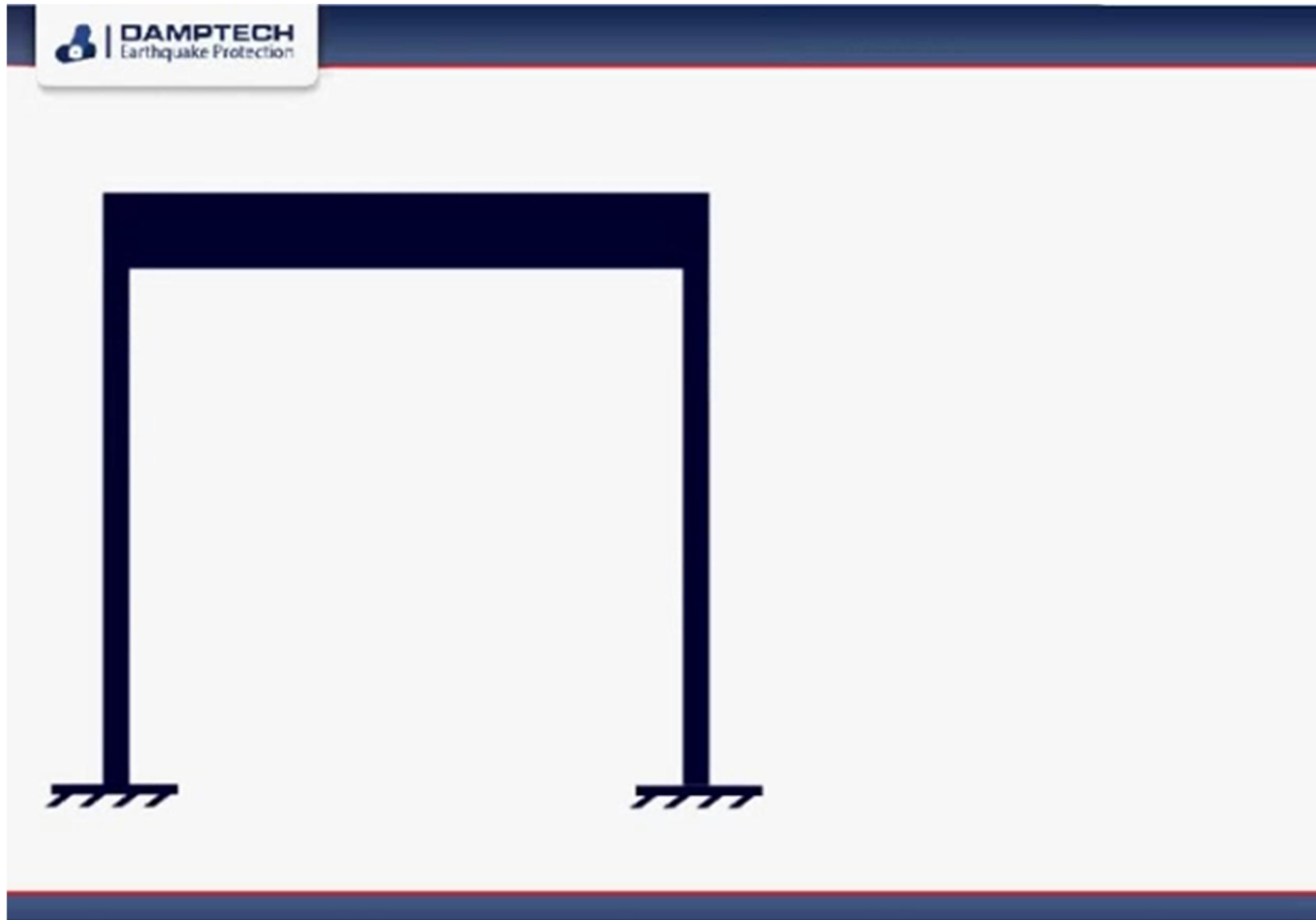
# Basic concepts

میراگر اصطکاکی (Friction Connection)

□ مفهوم کنترل سازه‌ها و انواع آن

▪ کنترل غیرفعال (Passive Control)

تجهیزات مدرن کنترل غیرفعال:



# Basic concepts

## مفهوم کنترل سازه‌ها و انواع آن

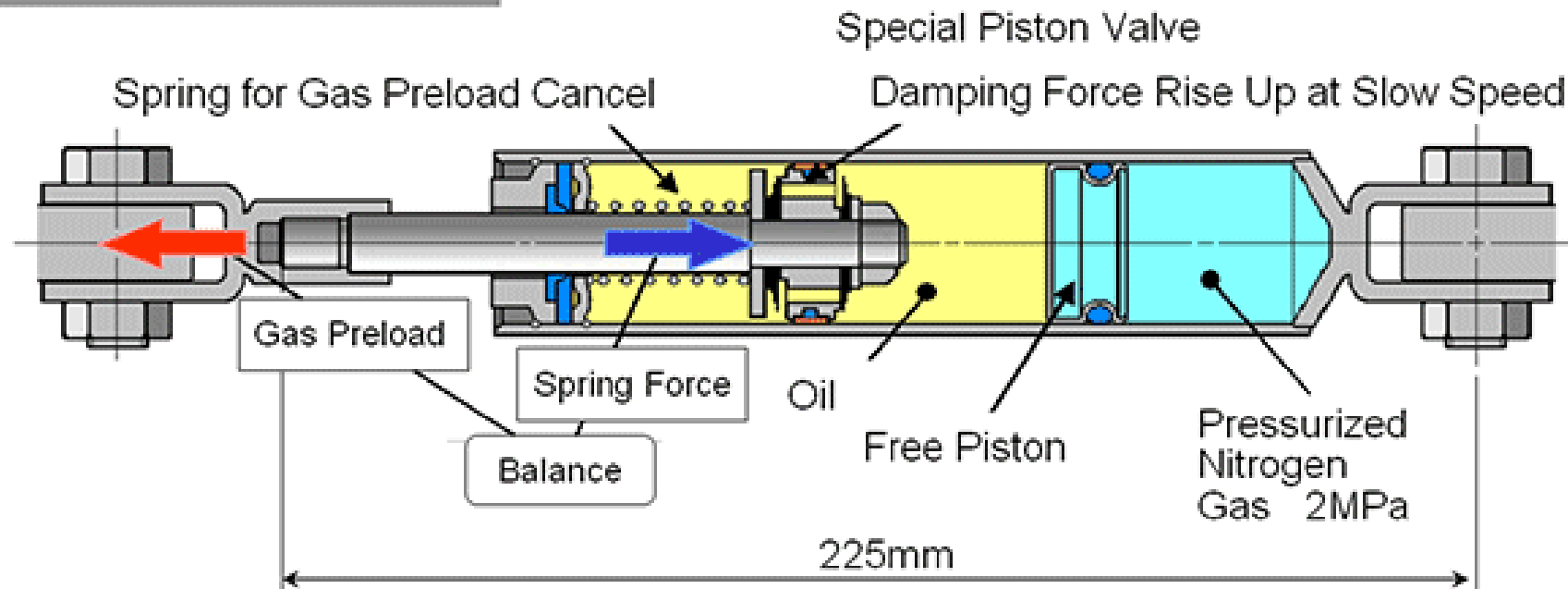
میراگر ویسکوز (Viscous Damper)

### کنترل غیرفعال (Passive Control)

تجهیزات مدرن کنترل غیرفعال:

میراگرهای ویسکوز معمولا دارای یک سیلندر هیدرولیکی می‌باشند که به وسیله یک پیستون، محفظه درون سیلندر به دو بخش مجزا از هم تبدیل می‌شود. زمانی که پیستون حرکت می‌کند سیال درون میراگر (معمولا روغن با ویسکوزیته بالا) از یک سوراخ ریز درون پیستون بین دو محفظه داخلی سیلندر با سرعت بالا جابجا می‌شود.

## STRUCTURE



# Basic concepts

## □ مفهوم کنترل سازه‌ها و انواع آن

### ▪ کنترل غیرفعال (Passive Control)

تجهیزات مدرن کنترل غیرفعال:

میراگر ویسکوز (Viscous Damper)



## Basic concepts

□ مفهوم کنترل سازه‌ها و انواع آن

▪ کنترل غیرفعال (Passive Control)

تجهیزات مدرن کنترل غیرفعال:

میراگر ویسکوز (Viscous Damper)



# Basic concepts

میراگر ویسکوز (Viscous Damper)

□ مفهوم کنترل سازه‌ها و انواع آن

▪ کنترل غیرفعال (Passive Control)

تجهیزات مدرن کنترل غیرفعال:



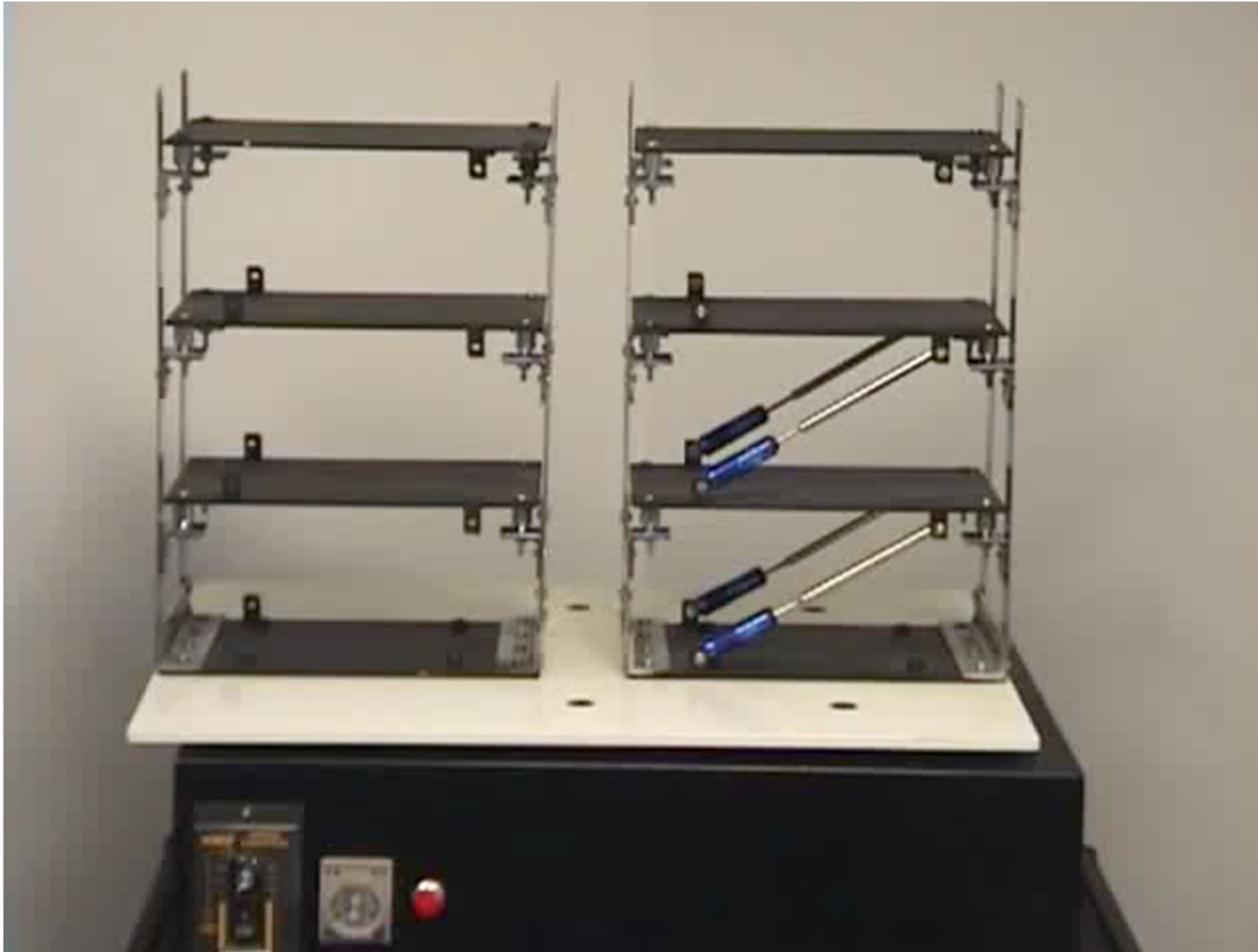
## Basic concepts

## □ مفهوم کنترل سازه‌ها و انواع آن

### ▪ کنترل غیرفعال (Passive Control)

تجهیزات مدرن کنترل غیرفعال:

میراگر ویسکوز (Viscous Damper)



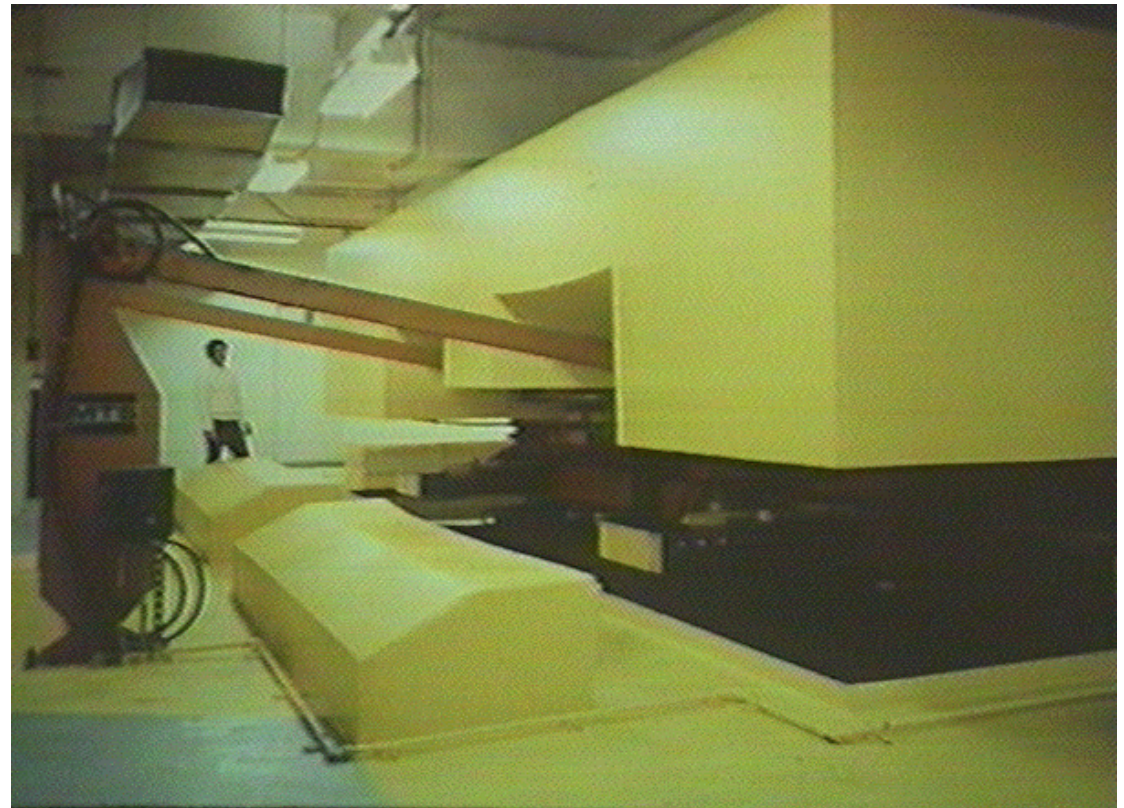
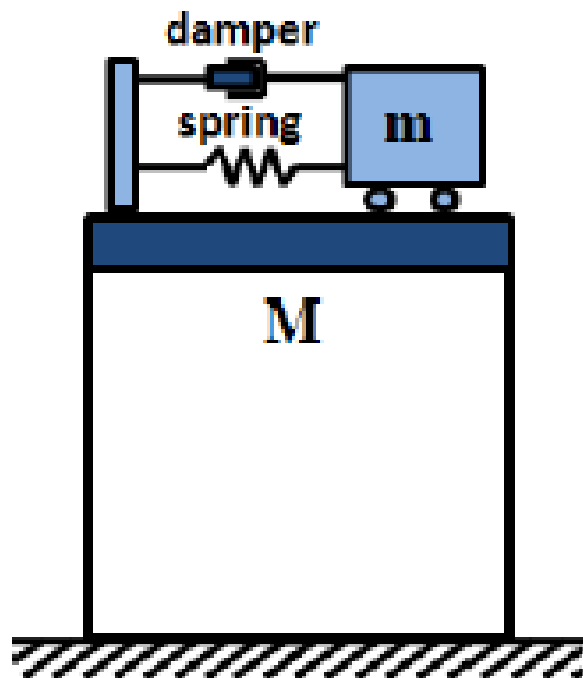
## Basic concepts

میراگر جرمی تنظیم شونده  
(TMD: Tuned Mass Damper)

## □ مفهوم کنترل سازه‌ها و انواع آن ▪ کنترل غیرفعال (Passive Control)

تجهیزات مدرن کنترل غیرفعال:

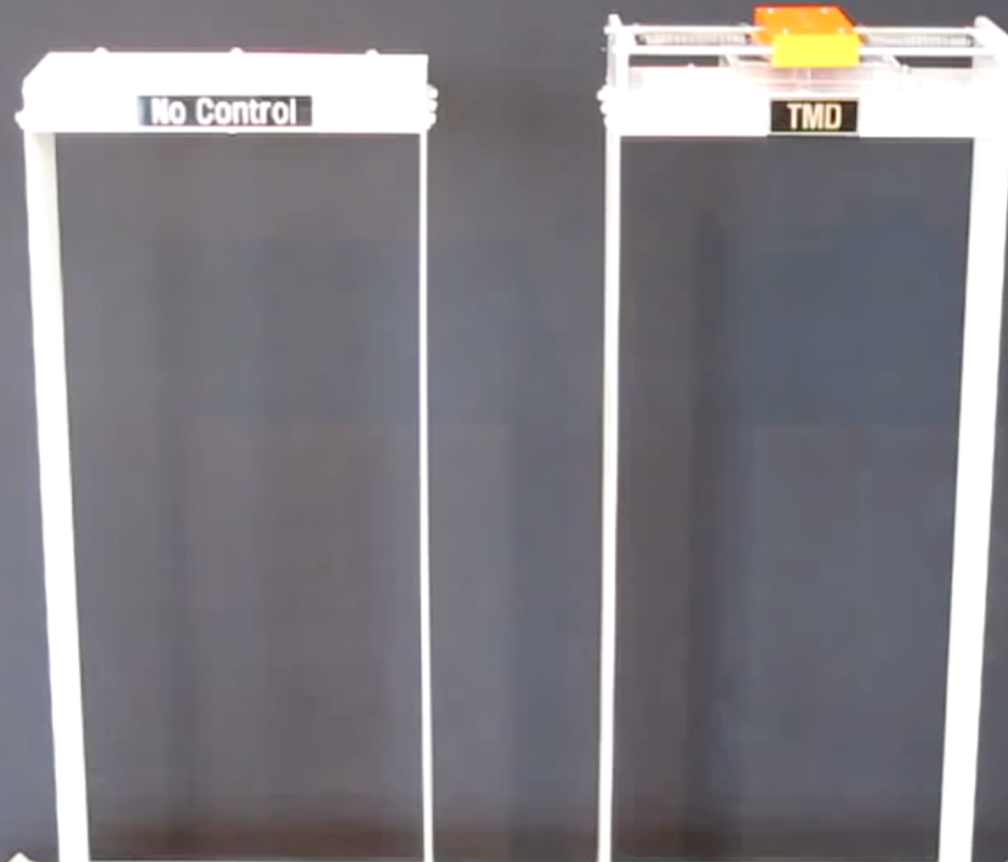
میراگر جرمی تنظیم شونده (TMD) شامل یک جرم (کمتر از یک درصد وزن کل سازه) است که توسط یک فنر و یک میراگر به منظور کاهش ارتعاش سازه به آن متصل می‌شود.



## Basic concepts

میراگر جرمی تنظیم شونده  
(TMD: Tuned Mass Damper)

□ مفهوم کنترل سازه‌ها و انواع آن  
▪ کنترل غیرفعال (Passive Control)  
تجهیزات مدرن کنترل غیرفعال:



## Basic concepts

میراگر جرمی تنظیم شونده  
(TMD: Tuned Mass Damper)

□ مفهوم کنترل سازه‌ها و انواع آن  
▪ کنترل غیرفعال (Passive Control)  
تجهیزات مدرن کنترل غیرفعال:

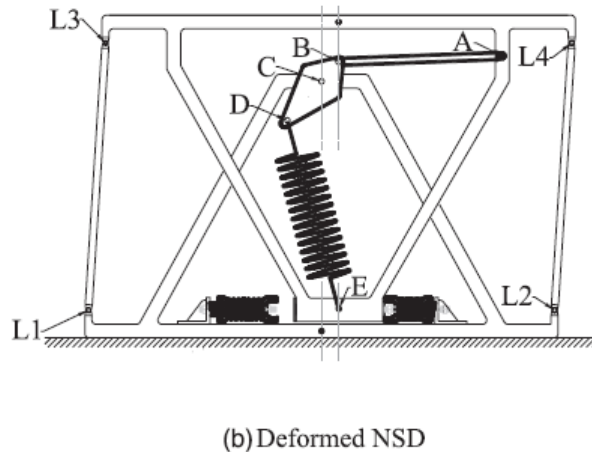
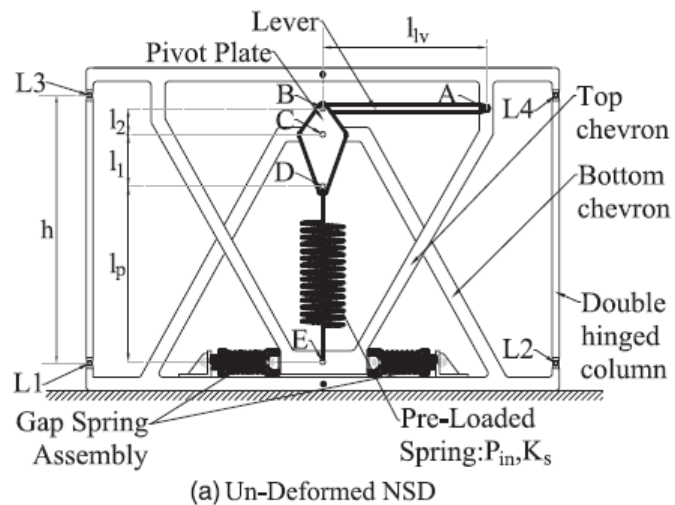
# Basic concepts

# مفهوم کنترل سازه‌ها و انواع آن

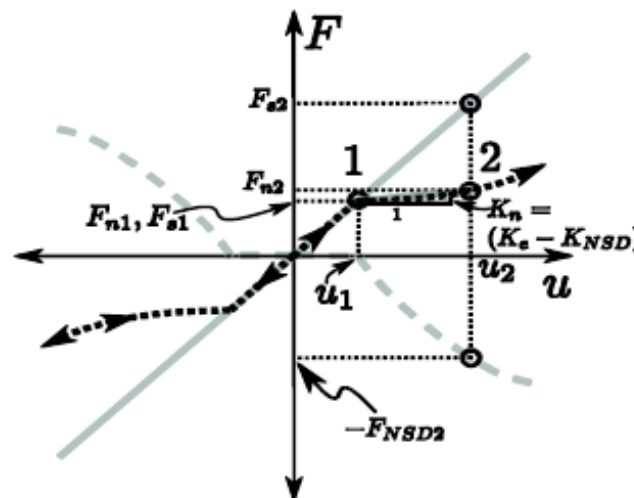
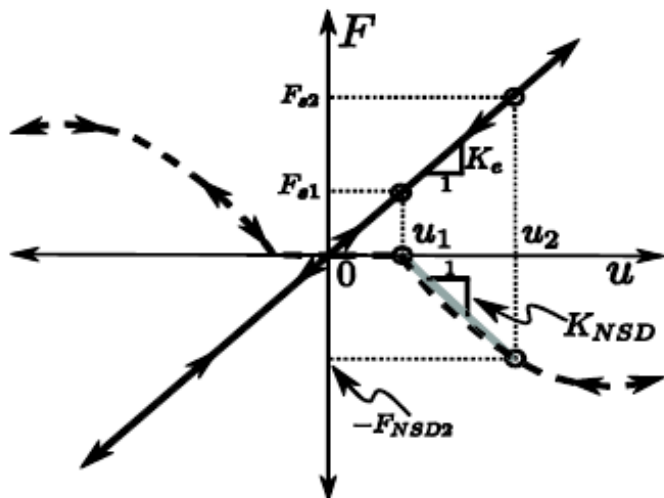
دستگاه دارای سختی منفی  
(NSD: Negative stiffness device)

## کنترل غیرفعال (Passive Control)

### تجهیزات مدرن کنترل غیرفعال:



دستگاه NSD توسط Nagarajaiah و همکاران در سال 2011 در دانشگاه buffalo ساخته شد. این دستگاه ترکیبی از یک فنر عمودی فشرده شده و دو جفت فنر افقی می‌باشد. فنر عمودی با ایجاد نیرویی در جهت موافق با حرکت سازه منجر به تولید سختی منفی شده و سختی سازه کاهش می‌یابد. ترکیب منحنی‌های رفتار سازه و دستگاه باعث ایجاد تسلیم ظاهری در کل سیستم می‌شود، درحالی که خود سازه تسلیم نشده است. با طراحی متناسب این دستگاه پاسخ‌های شتاب و دررفت و نیروی برشی در طبقات به اندازه‌ی قابل توجهی کاهش می‌یابد.



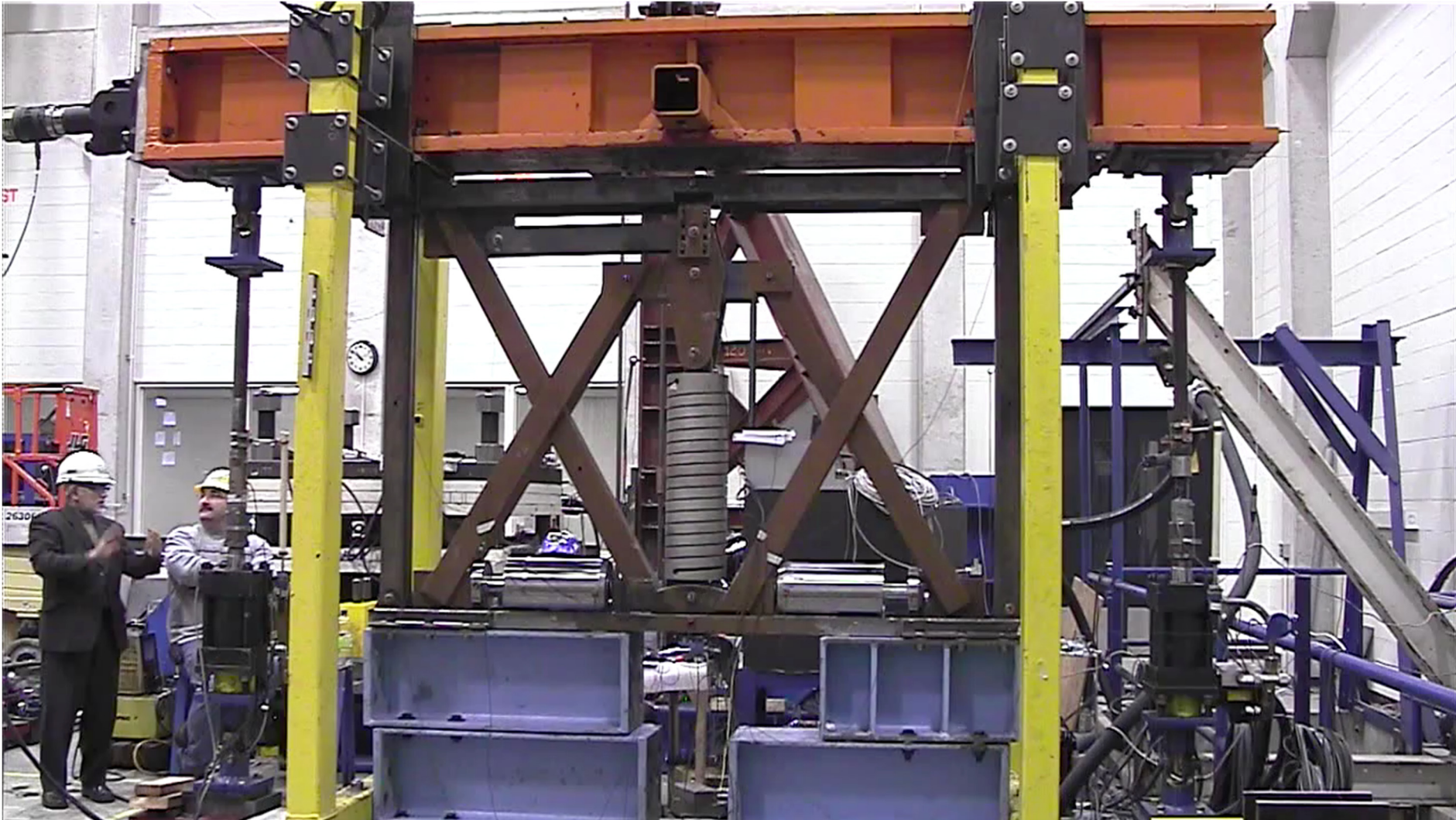
# Basic concepts

## □ مفهوم کنترل سازه‌ها و انواع آن

دستگاه دارای سختی منفی  
(NSD: Negative stiffness device)

### ▪ کنترل غیرفعال (Passive Control)

تجهیزات مدرن کنترل غیرفعال:

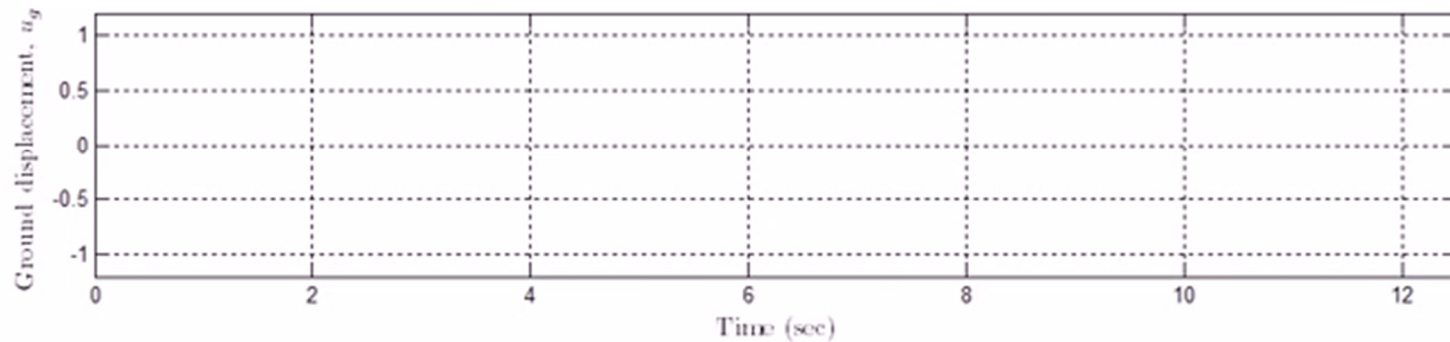
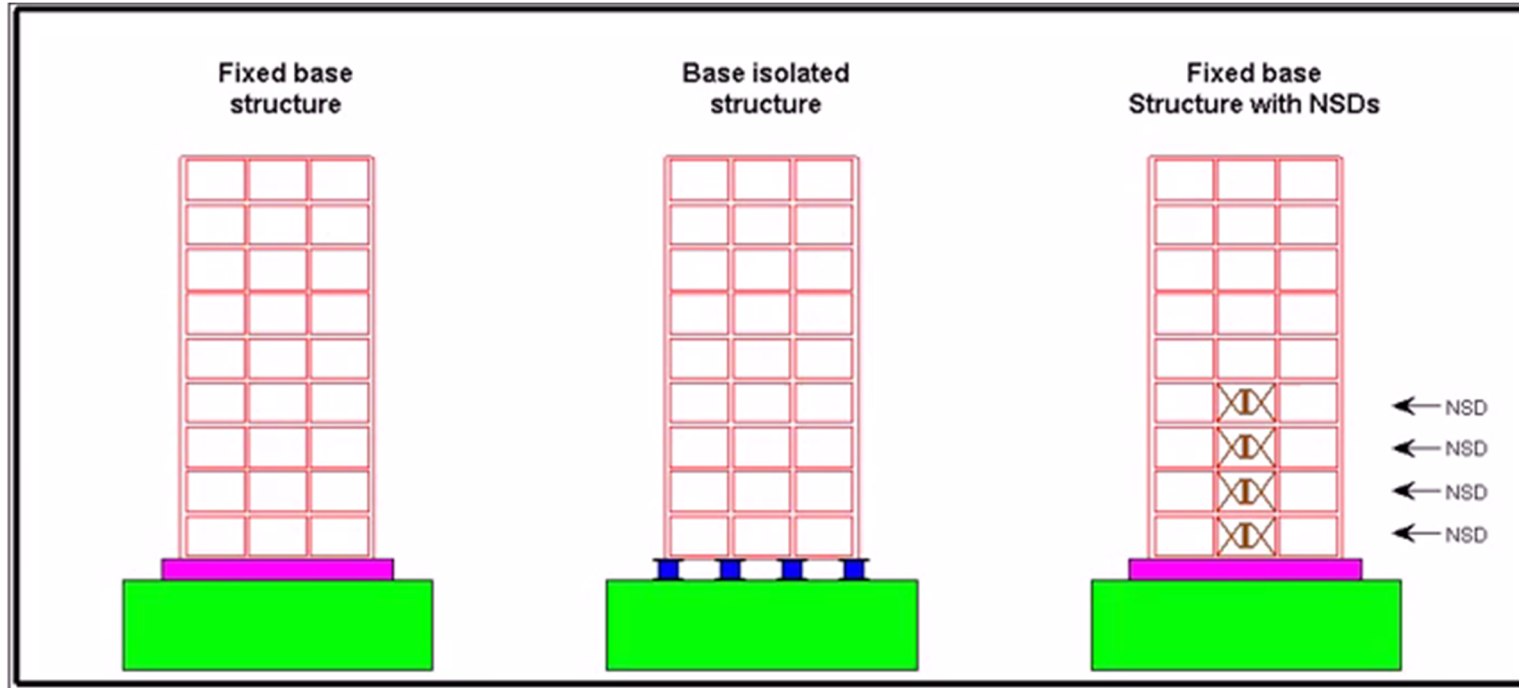


# Basic concepts

## مفهوم کنترل سازه‌ها و انواع آن

### کنترل غیرفعال (Passive Control)

تجهیزات مدرن کنترل غیرفعال:

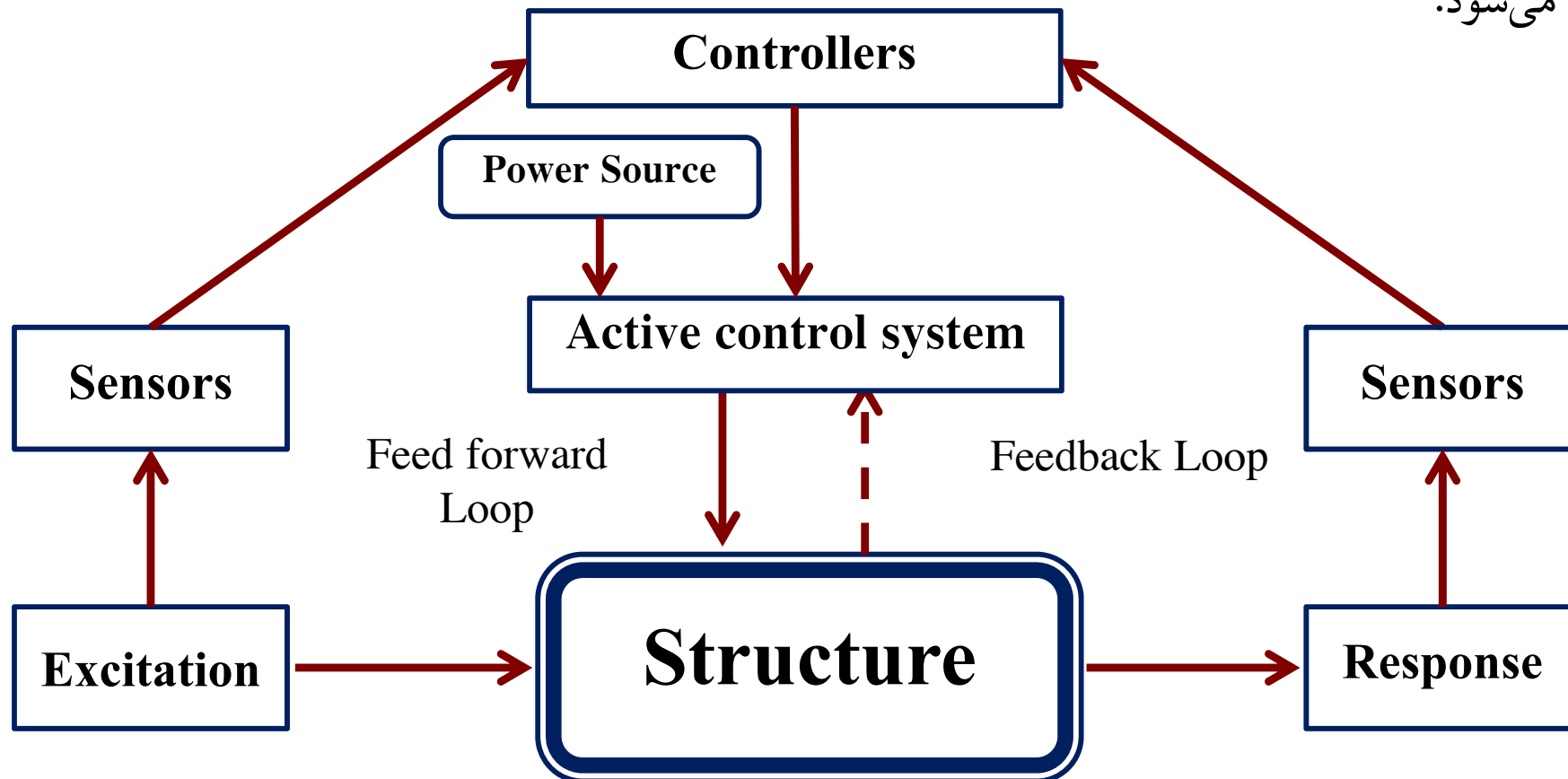


## Basic concepts

## □ مفهوم کنترل سازه‌ها و انواع آن

### ▪ کنترل فعال (Active Control)

ممکن است در هنگام وقوع زلزله نیروهایی که توسط یک دستگاه مولد نیرو (راه‌انداز، محرک یا Actuator که مفهوم تولید نیروی منفی را دارد) تولید می‌شود، به سازه اعمال کنیم تا رفتار سازه متعادل گردد. در این صورت از کنترل فعال استفاده کرده‌ایم. بنابراین در کنترل فعال سازه‌ها (Active control)، نیرویی خارج از سازه تولید و به آن اعمال می‌شود.



# Basic concepts

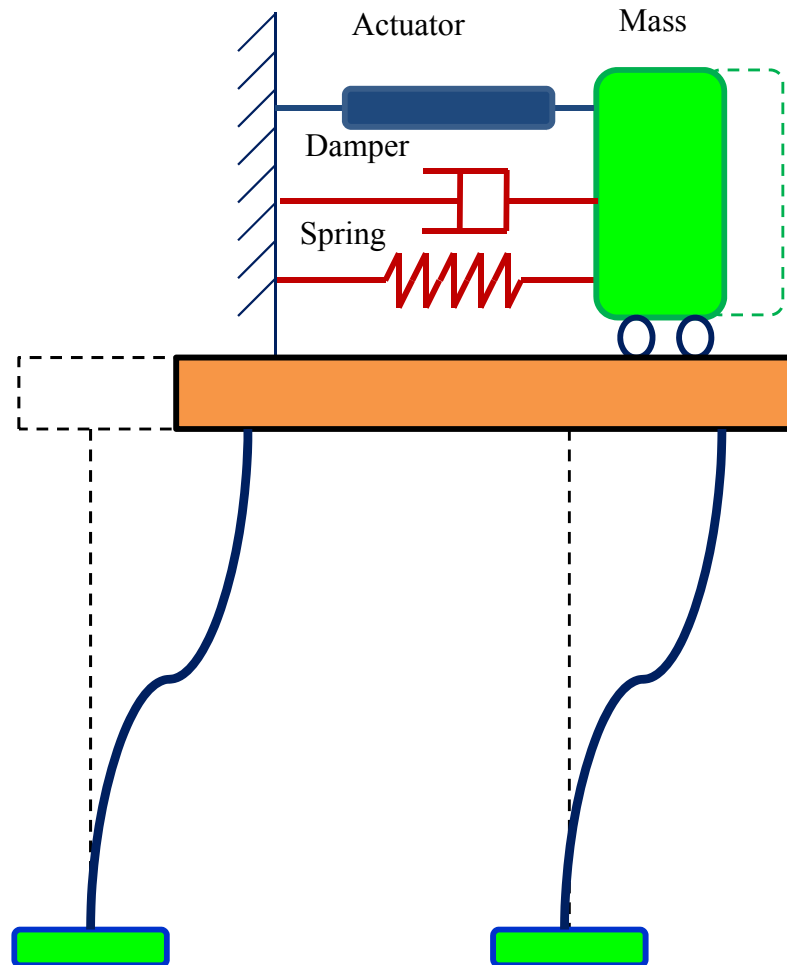
## □ مفهوم کنترل سازه‌ها و انواع آن

### ▪ کنترل فعال (Active Control)

تجهیزات کنترل فعال:

میراگر جرمی تنظیم شونده فعال  
(ATMD: Active Tuned Mass Damper)

میراگر جرمی تنظیم شده فعال همان TMD است که حرکت آن توسط نیروی یک محرک کنترل می‌شود.



# Basic concepts

## □ مفهوم کنترل سازه‌ها و انواع آن

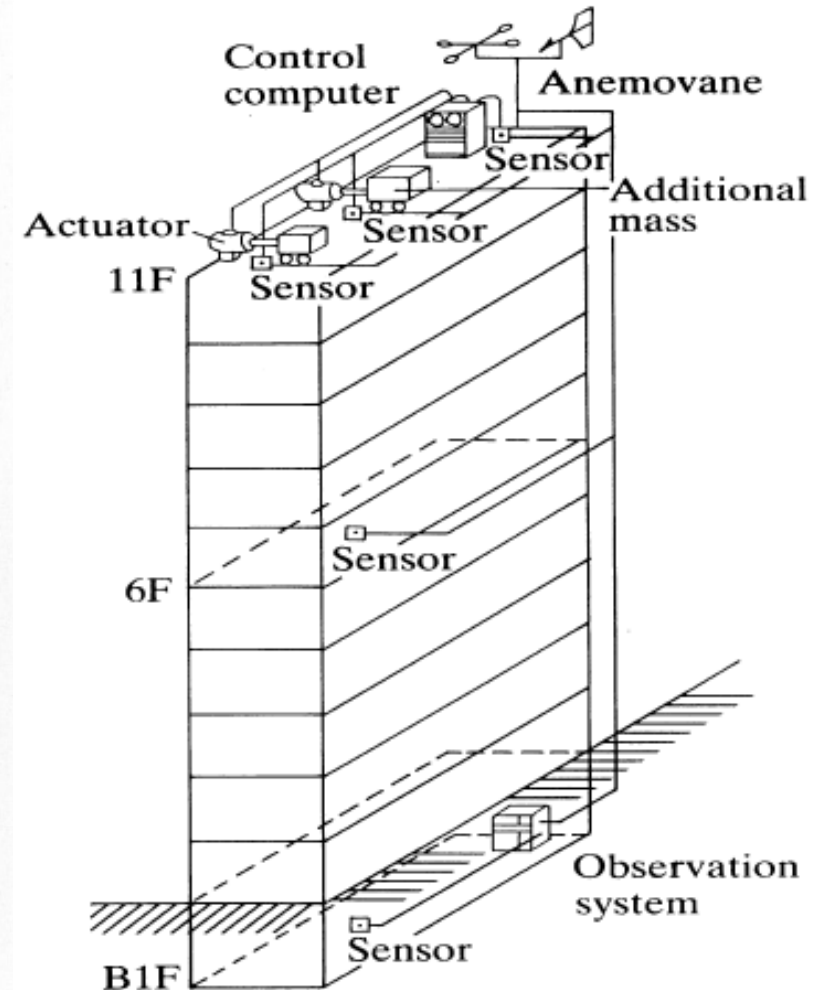
### ▪ کنترل فعال (Active Control)

تجهیزات کنترل فعال:

میراگر جرمی تنظیم شونده فعال  
(ATMD: Active Tuned Mass Damper)

## Kyobashi Center Building

- 11-story.
- Consists of two AMDs 4 and 1 tons



# Basic concepts

## □ مفهوم کنترل سازه‌ها و انواع آن

### ▪ کنترل فعال (Active Control)

تجهیزات کنترل فعال:

**TAIPEI FINANCIAL CENTER**

میراگر جرمی تنظیم شونده فعال  
(ATMD: Active Tuned Mass Damper)

first natural vibration period of 6.8 seconds.

Total height to 508m.

Total weight: 95,000 tones



# Basic concepts

## □ مفهوم کنترل سازه‌ها و انواع آن

### ■ کنترل فعال (Active Control) تجهيزات کنترل فعال:

میراگر جرمی تنظیم شونده فعال  
(ATMD: Active Tuned Mass Damper)

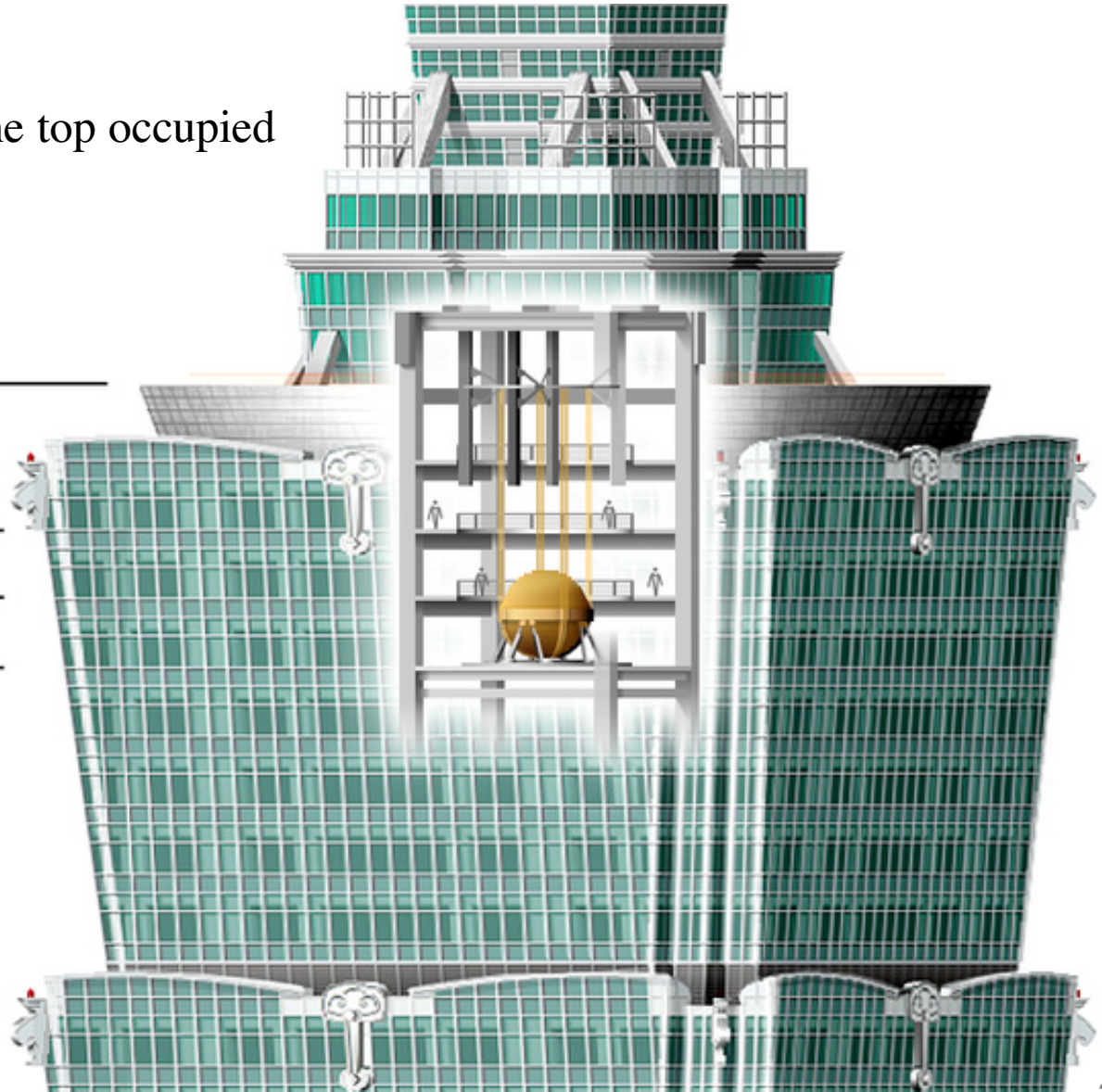
- A pendulum that spans 5 floors.
- 660 tonne steel ball
- Reduce the peak acceleration of the top occupied floor from 0.079g to 0.05g.

91st Floor [390.60 m]  
(Outdoor Observation Deck)

89th Floor [382.20 m]  
(Indoor Observation Deck)

88th Floor

87th Floor



## Basic concepts

□ مفهوم کنترل سازه‌ها و انواع آن

▪ کنترل فعال (Active Control)

تجهیزات کنترل فعال:

میراگر جرمی تنظیم شونده فعال  
(ATMD: Active Tuned Mass Damper)

### TAIPEI FINANCIAL CENTER



## Basic concepts

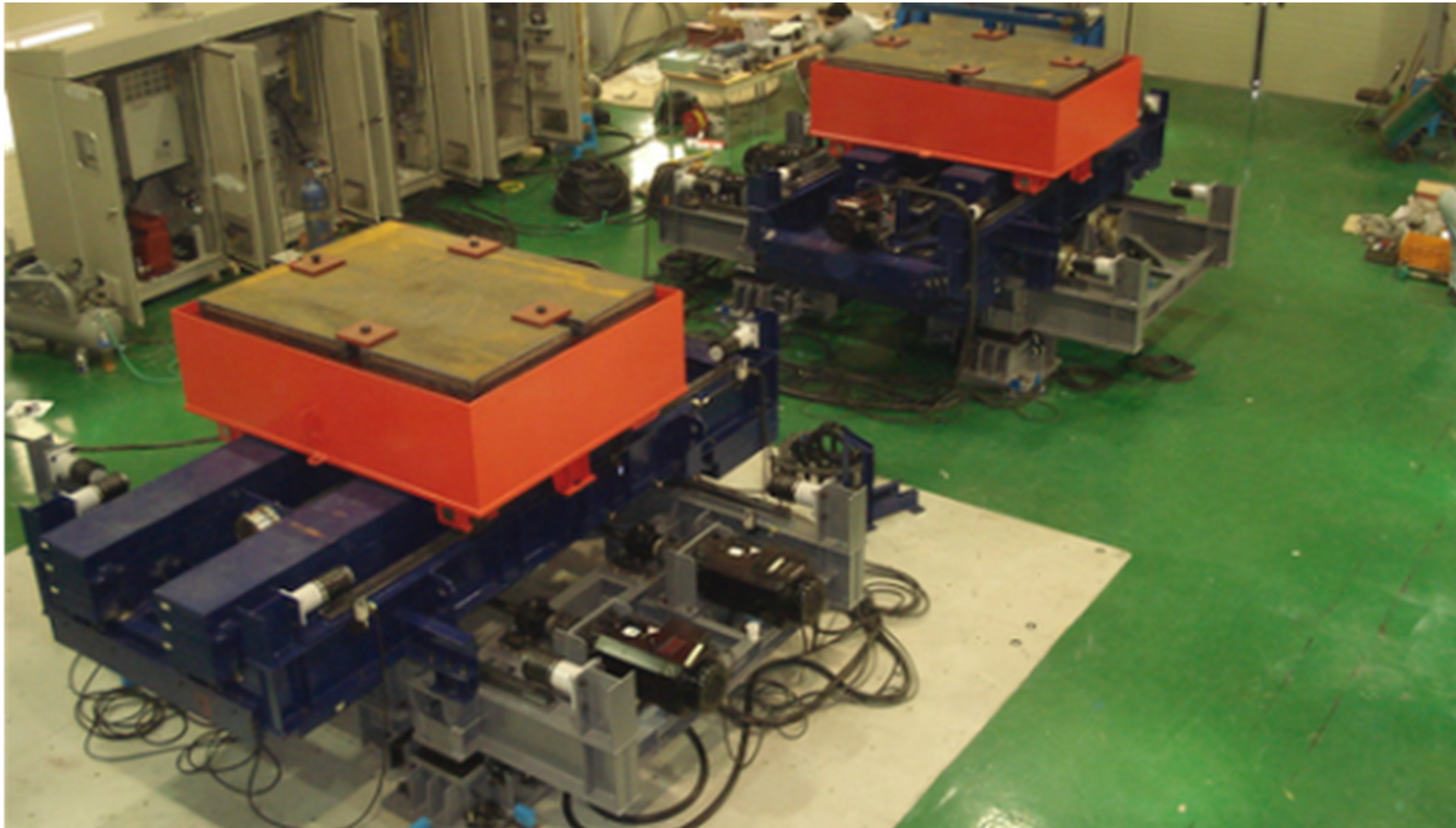
میراگر جرمی فعال  
(AMD: Active Mass Damper)

□ مفهوم کنترل سازه‌ها و انواع آن

▪ کنترل فعال (Active Control)

تجهیزات کنترل فعال:

میراگر جرمی فعال همان دارای یک جرم است که حرکت آن توسط نیروی یک محرک کنترل می‌شود.



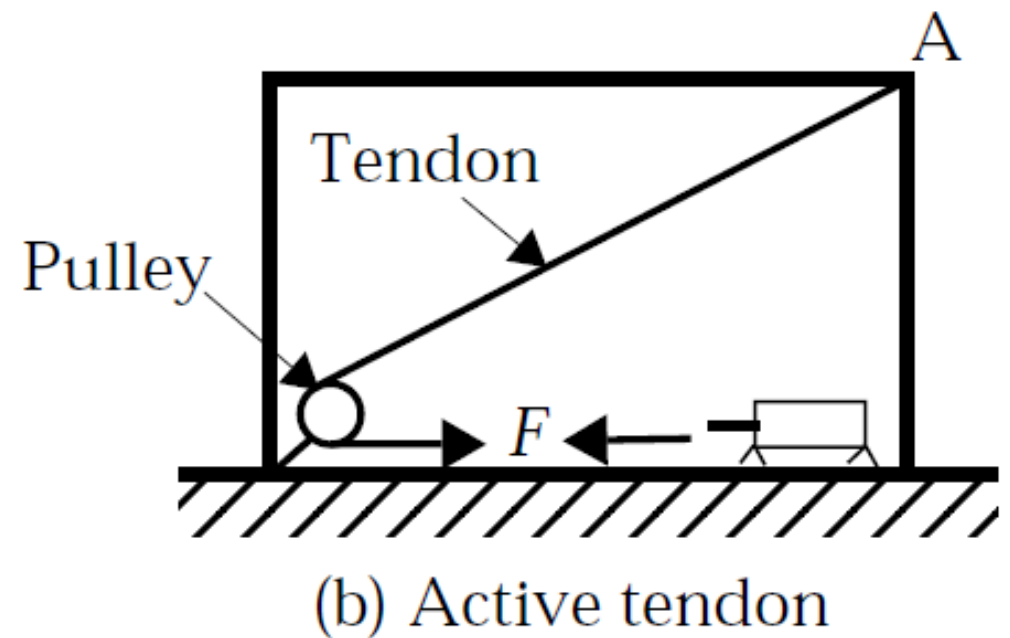
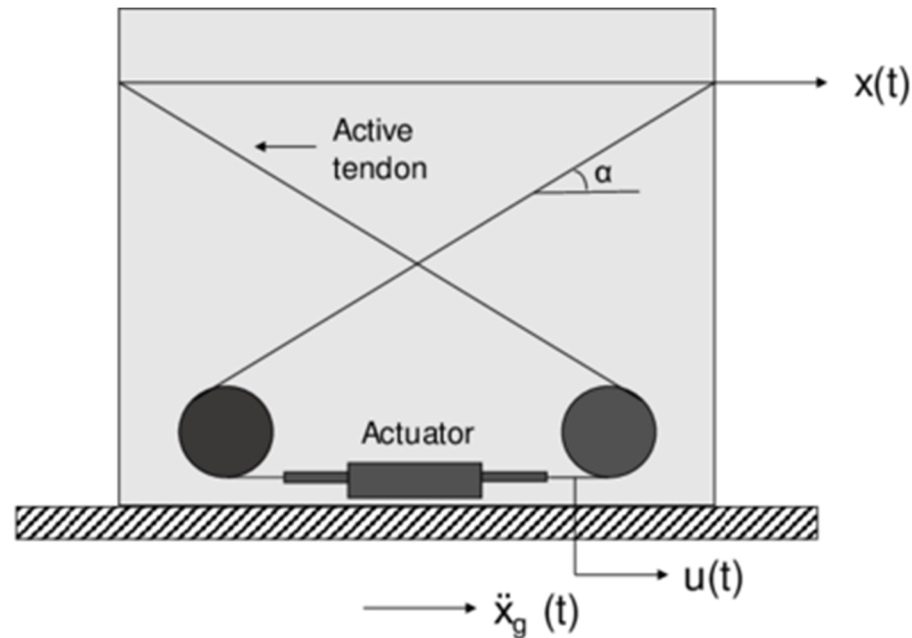
# Basic concepts

## □ مفهوم کنترل سازه‌ها و انواع آن

### ▪ کنترل فعال (Active Control)

تجهیزات کنترل فعال:

تاندون‌های فعال متشکل از کابل‌هایی هستند که توسط یک محرک کشیده شده و همانند یک بادبند فعال عمل می‌کند.



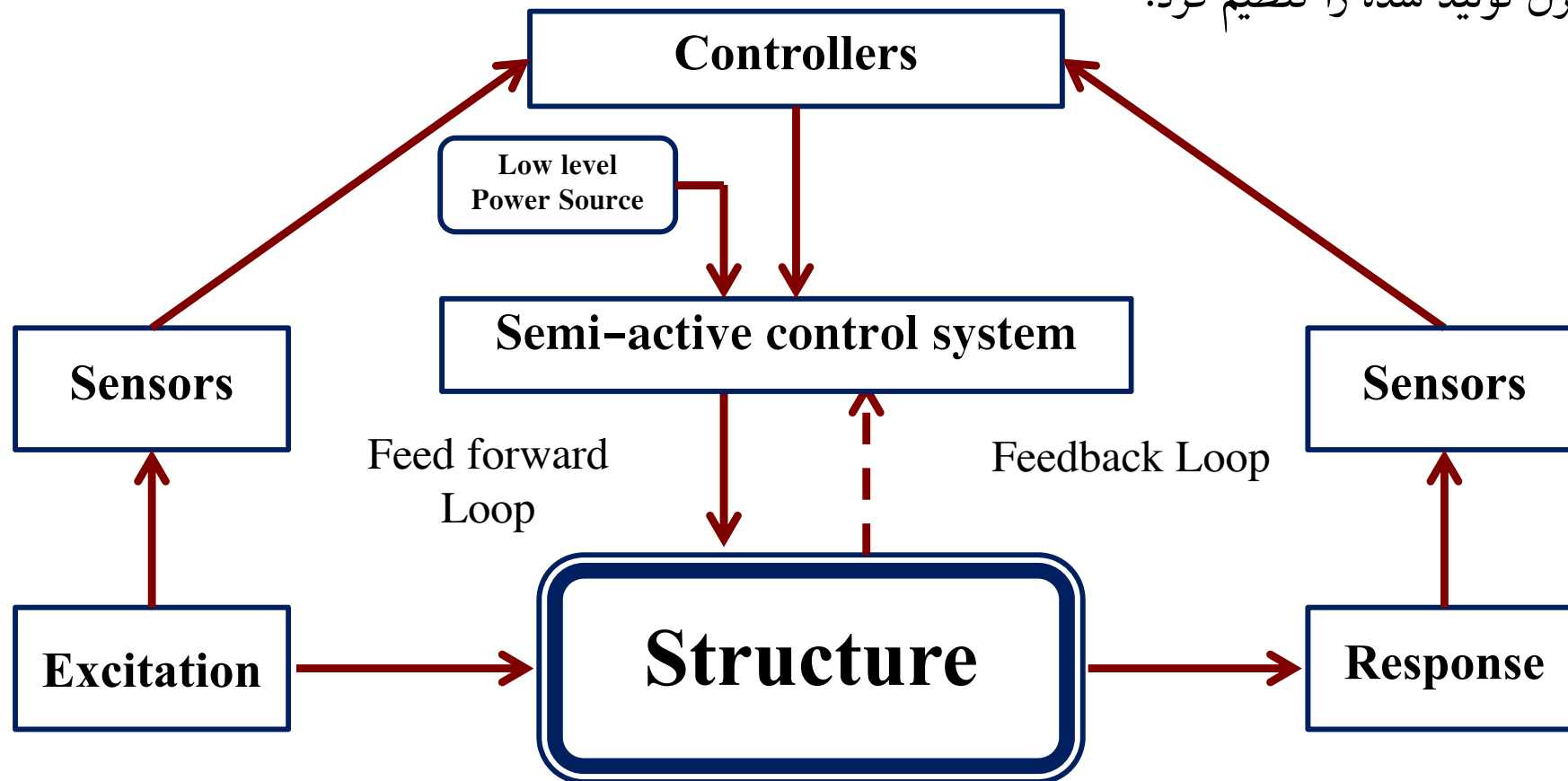
(اولین بار توسط عبدالرحمان در دهه 1970 ارائه شد.)

## Basic concepts

## مفهوم کنترل سازه‌ها و انواع آن

### کنترل نیمه‌فعال (Semi-active Control)

در صورتیکه هنگام وقوع زلزله اجزای سازه و یا ابزارهایی که به آن‌ها اضافه کرده‌ایم در اثر اعمال شرایط خاصی (نظیر ایجاد میدان مغناطیسی و یا میدان الکتریکی) نیروی متغیر و مناسب به سازه اثر دهند؛ در این صورت اصطلاحاً گفته می‌شود که کنترل نیمه‌فعال (Semi-active control) داریم. معمولاً این تجهیزات برای تولید نیرو از حرکات سازه استفاده کرده و نیازمند انرژی خارجی کمی (در حد باتری ساده) می‌باشند. با تغییر انرژی ورودی (برق) می‌توان نیروی کنترل تولید شده را تنظیم کرد.



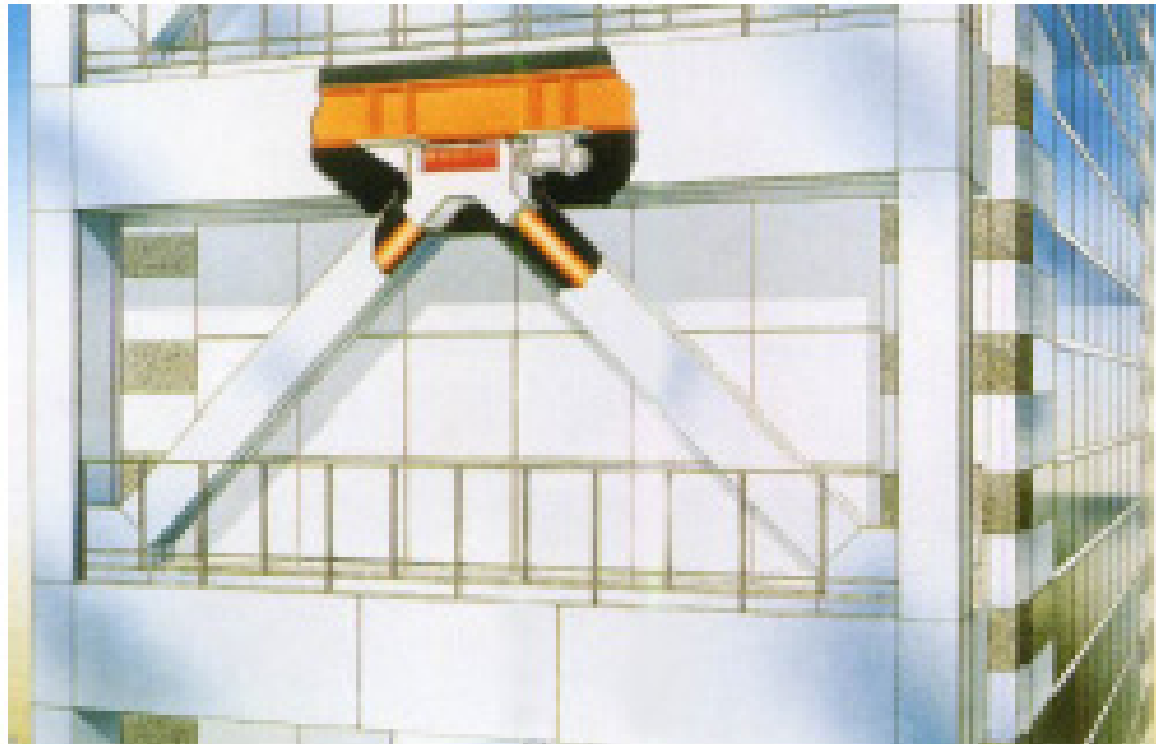
تجهیزات با میرایی متغیر  
(Variable Damping Device)

### ▪ کنترل نیمه‌فعال (Semi-active Control)

تجهیزات کنترل نیمه‌فعال:

میراگرهای هیدرولیکی نیمه‌فعال (SHD-Semi-active hydraulic Dampers)

میراگر SHD را شرکت Kajima ژاپن تولید می‌کند. ضریب میرایی این دستگاه به صورت لحظه‌ای از طریق باز و بسته شدن یک روزنه کوچک که دو بخش محفظه هیدرولیکی را به هم مرتبط می‌کند تنظیم می‌شود. این دستگاه قادر است با مصرف 70 watt برق نیروی 100 kN تولید نماید.



# Basic concepts

# مفهوم کنترل سازه‌ها و انواع آن

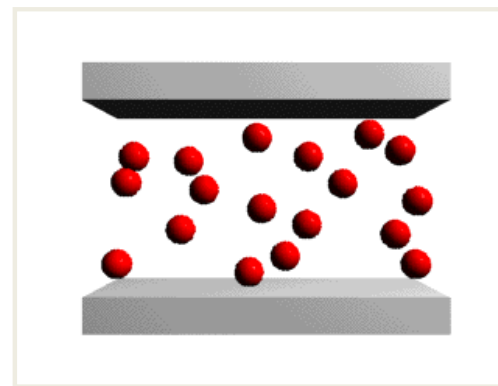
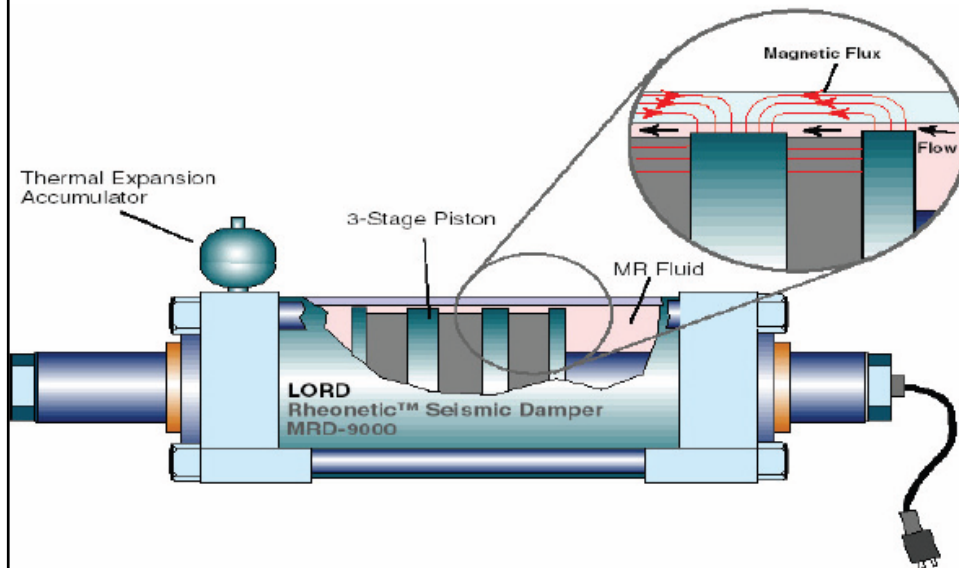
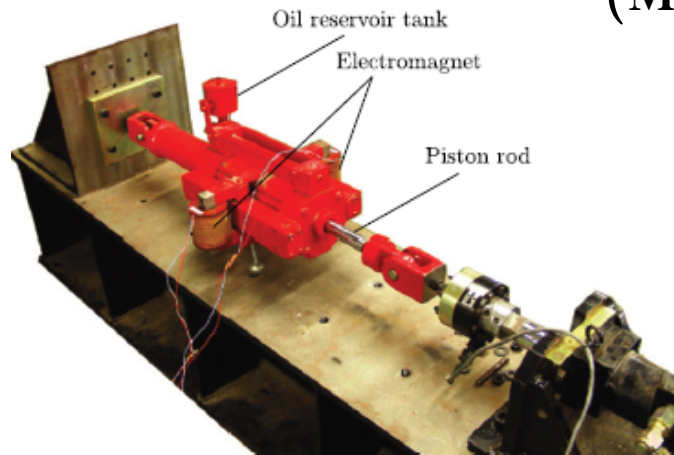
تجهیزات با میرایی متغیر  
(Variable Damping Device)

## کنترل نیمه‌فعال (Semi-active Control)

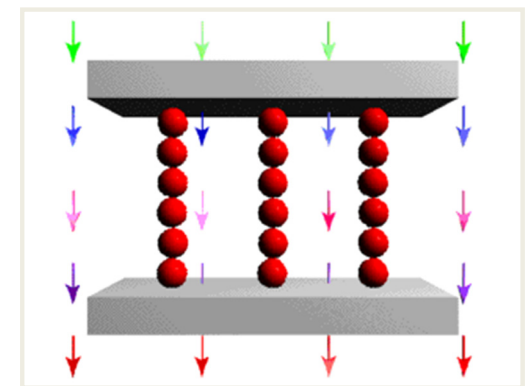
تجهیزات کنترل نیمه‌فعال:

میراگر حاوی سیال رئو مغناطیسی (MR-Magneto-Rheological Dampers)

میراگر MR توسط Yang و همکارانش در سال 2002 در دانشگاه Lord-Notre Dame ساخته شد. این میراگر شامل یک سیلندر هیدرولیکی حاوی ذرات قطب‌پذیر معلق در یک سیال است. در صورتی که سیال در معرض میدان مغناطیسی قرار گیرد سیال از حالت مایع به حالت نیمه جامد تبدیل می‌گردد. این میراگر قادر است با صرف 20-50 Watt برق نیرویی معادل 200 kN تولید نماید.



Without Magnetic Fields



With Magnetic Fields

# Basic concepts

# مفهوم کنترل سازه‌ها و انواع آن

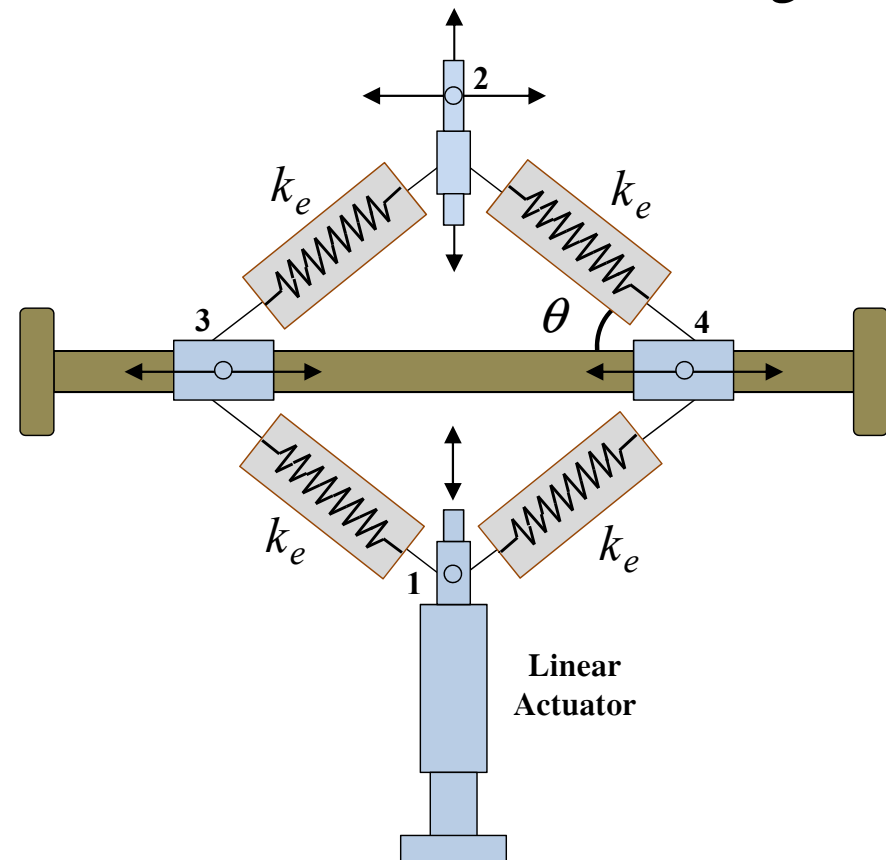
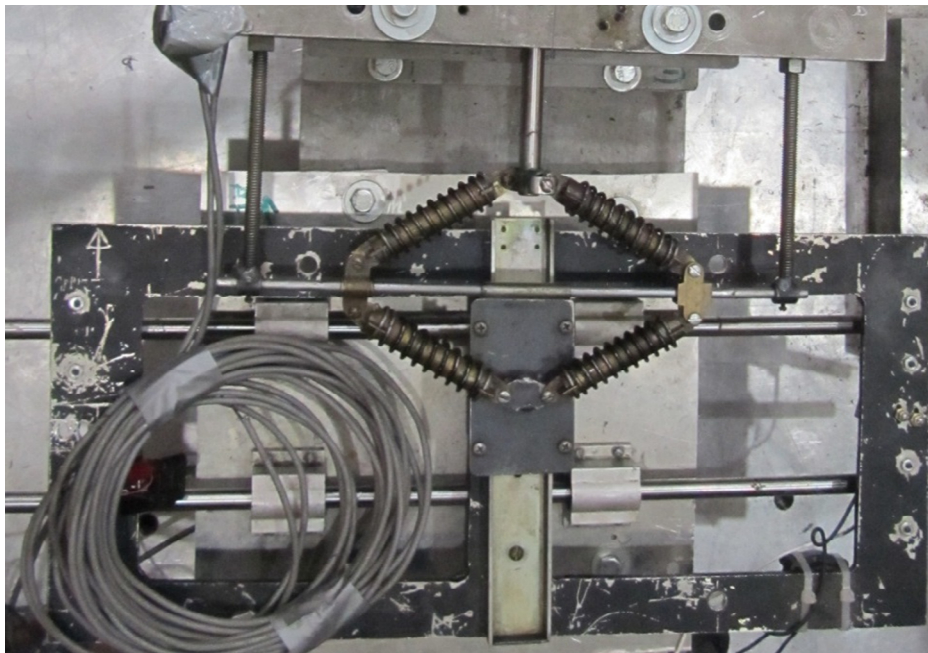
## کنترل نیمه‌فعال (Semi-active Control)

تجهیزات با سختی متغیر  
(Variable Stiffness Device)

تجهیزات کنترل نیمه‌فعال:

دستگاه نیمه‌فعال با سختی متغیر (SAIVS-Semi-active variable stiffness device)

دستگاه SAIVS توسط Nagarajaiah در سال 2000 در دانشگاه Rice ساخته شد. سختی در این دستگاه بین دو حد ماکزیمم و مینیمم بطور پیوسته، مستقل و با رفتار منحنی نیرو-جابجایی صاف تغییر می‌کند.



# Basic concepts

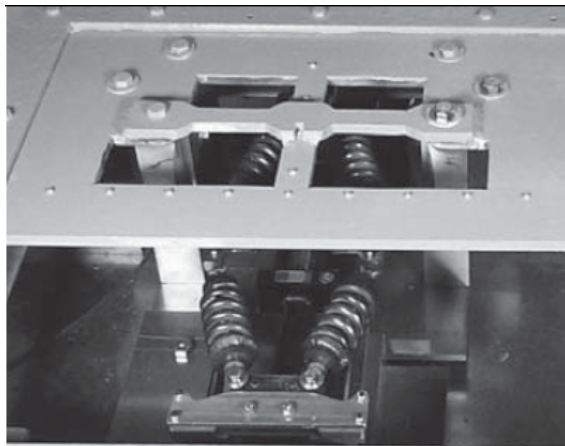
# مفهوم کنترل سازه‌ها و انواع آن

## کنترل نیمه‌فعال (Semi-active Control)

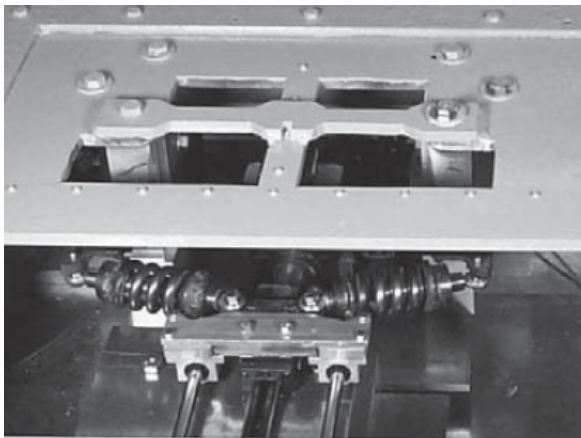
تجهیزات کنترل نیمه‌فعال:

دستگاه نیمه‌فعال با سختی متغیر (SAIVS-Semi-active variable stiffness device)

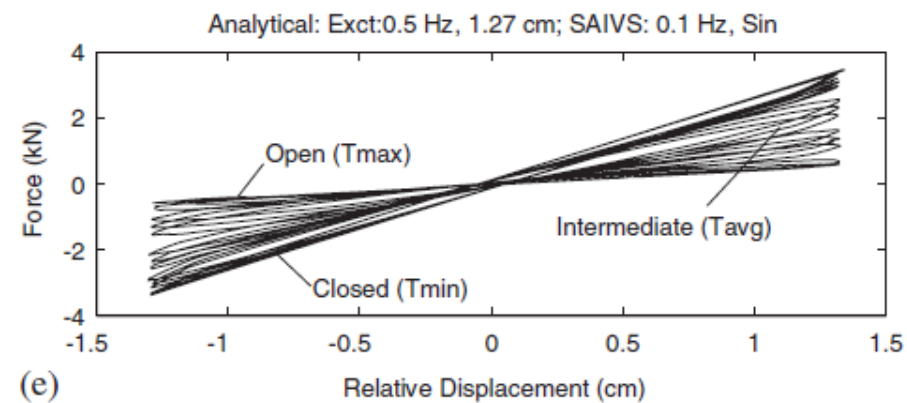
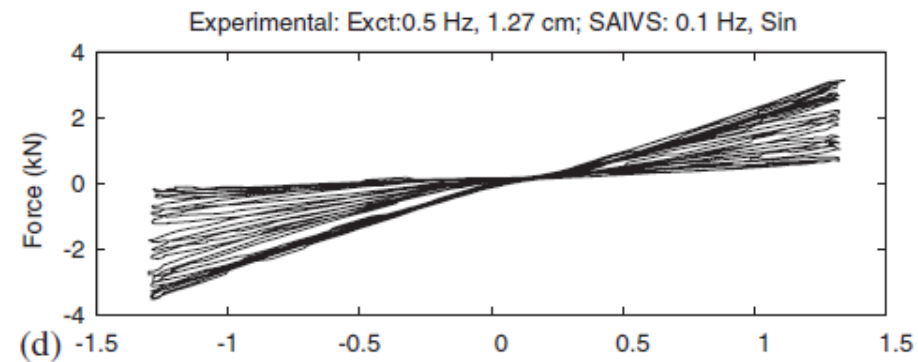
تجهیزات با سختی متغیر  
(Variable Stiffness Device)



Passive off



Passive on

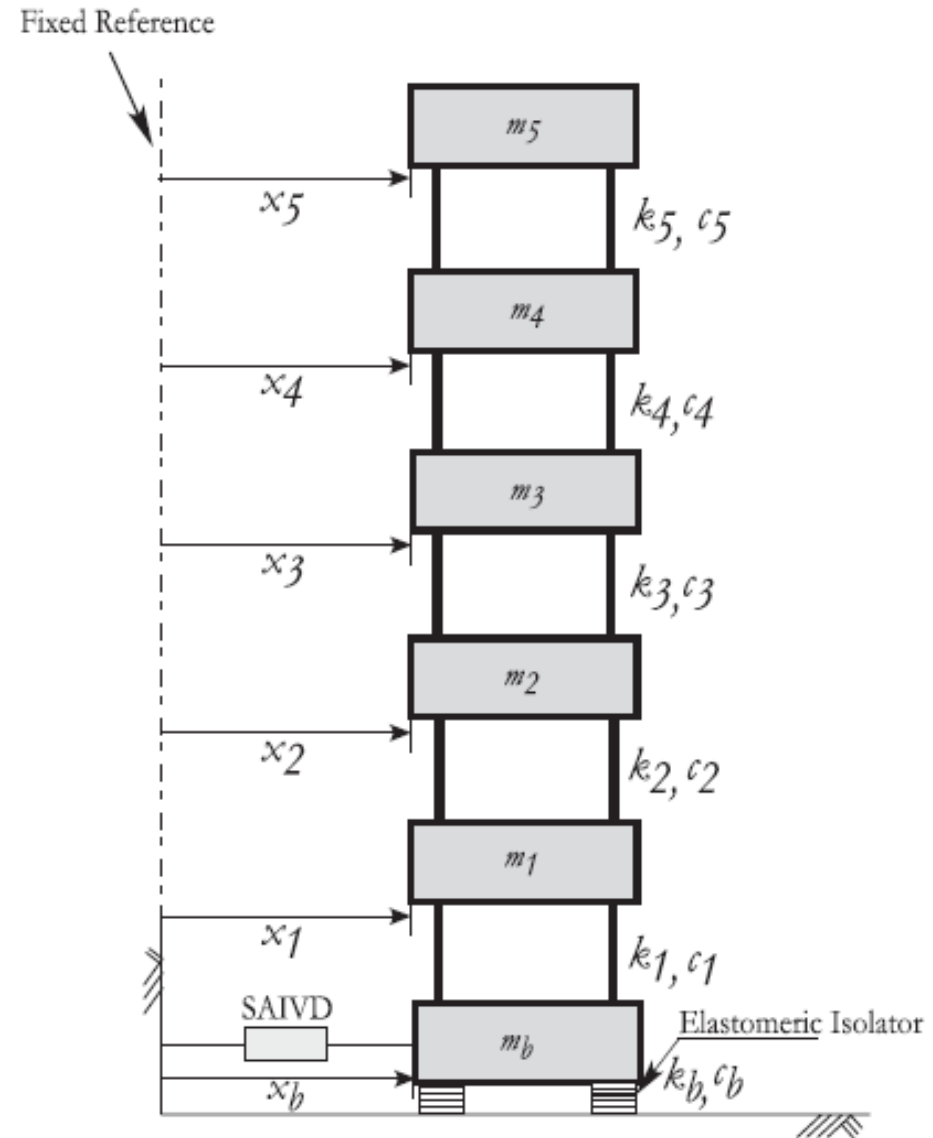
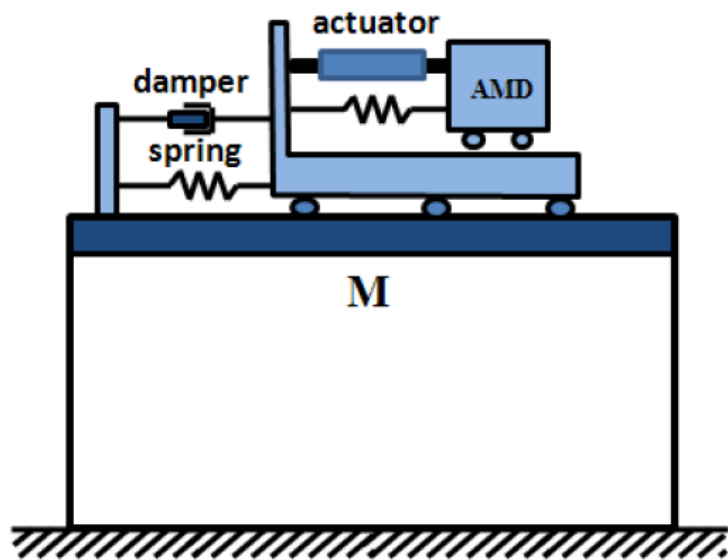


# Basic concepts

## □ مفهوم کنترل سازه‌ها و انواع آن

### ▪ کنترل ترکیبی (Hybrid control)

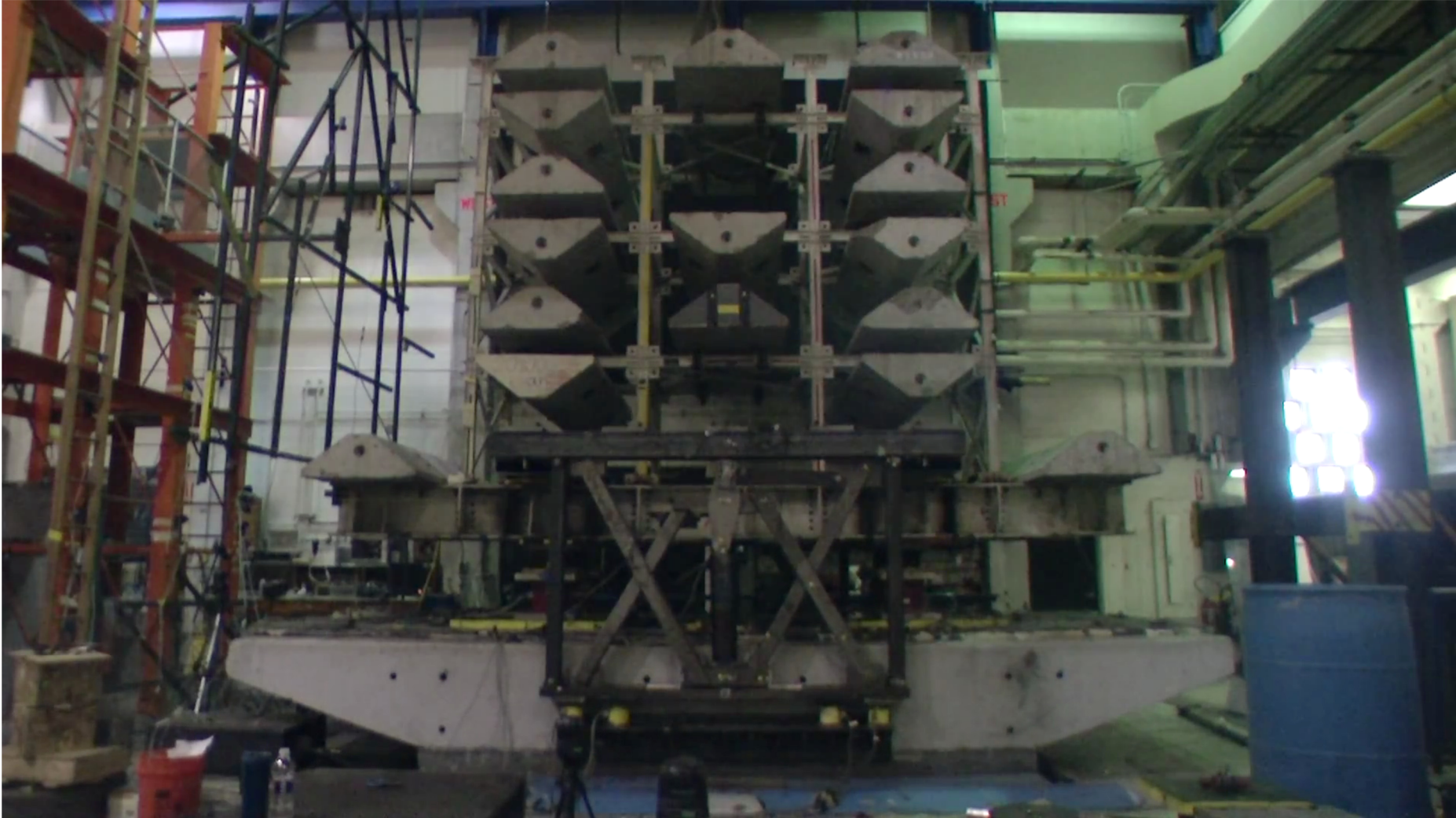
اگر از انواع کنترل غیرفعال، فعال و نیمه‌فعال استفاده می‌شود، کنترل ترکیبی (Hybrid control) ایجاد کرده‌ایم.



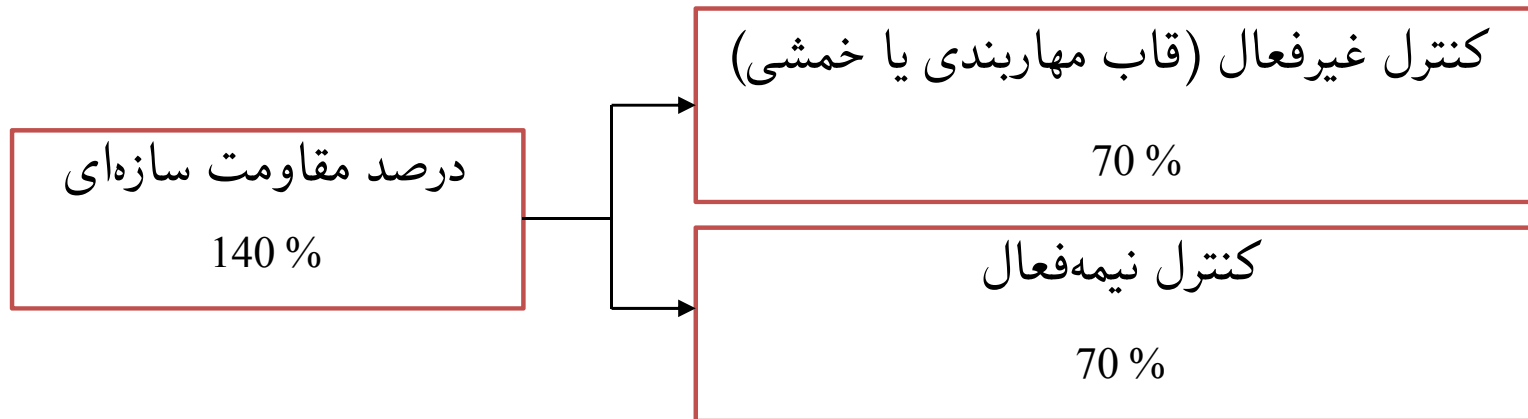
## Basic concepts

□ مفهوم کنترل سازه‌ها و انواع آن  
▪ کنترل ترکیبی (Hybrid control)

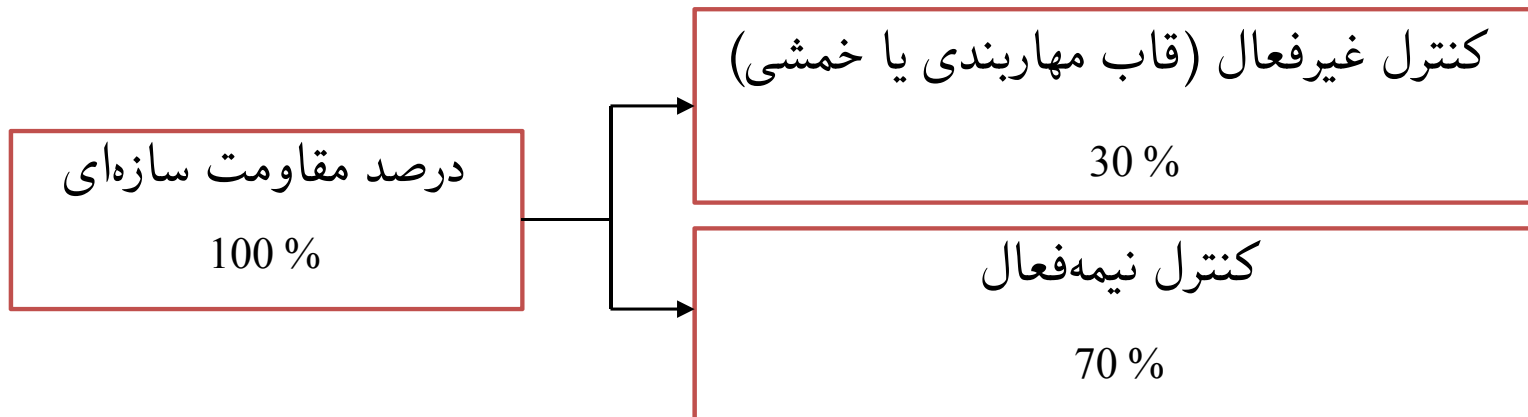
NSD with Base Isolation



اوایل در ژاپن:



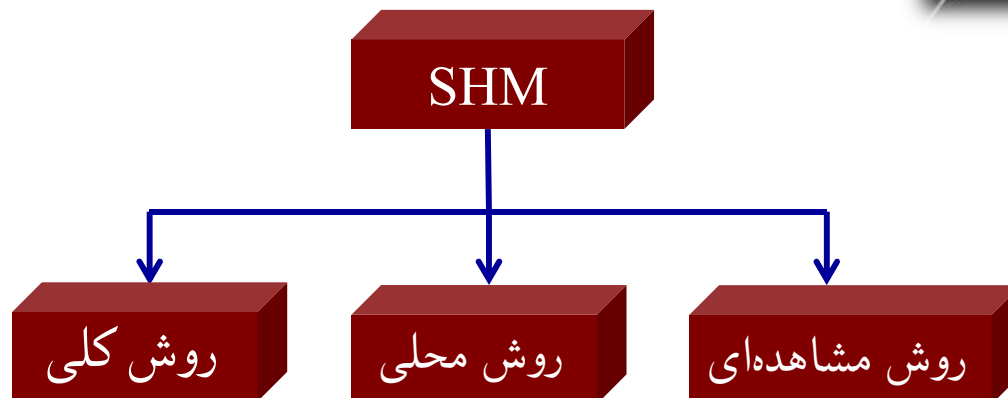
امروزه در ژاپن:



# □ بررسی سلامت سازه‌های (SHM: Structural Health Monitoring)

## Basic concepts

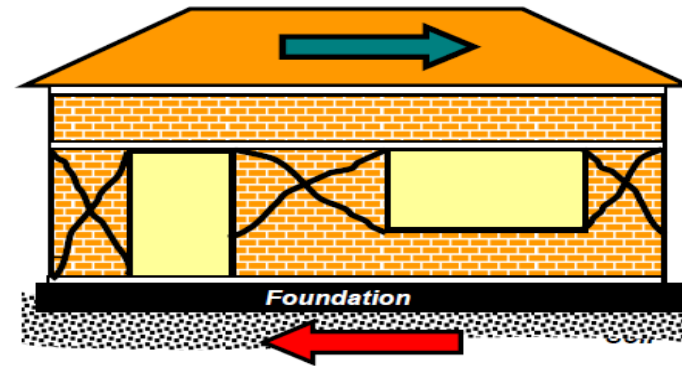
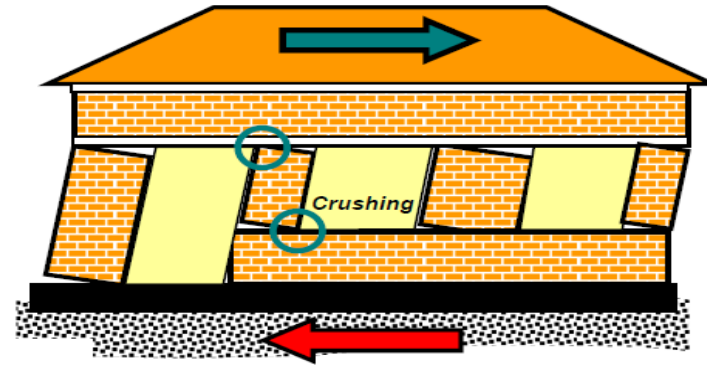
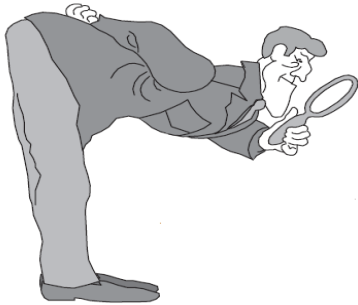
بررسی سلامت سازه‌ای، نظارت لحظه‌ای در طول عمر یک سازه است که به منظور تشخیص وجود خرابی، مقدار و مکان آن در قسمت‌های مختلف سازه صورت می‌گیرد.



## Basic concepts

### ▪ روش مشاهده‌ای

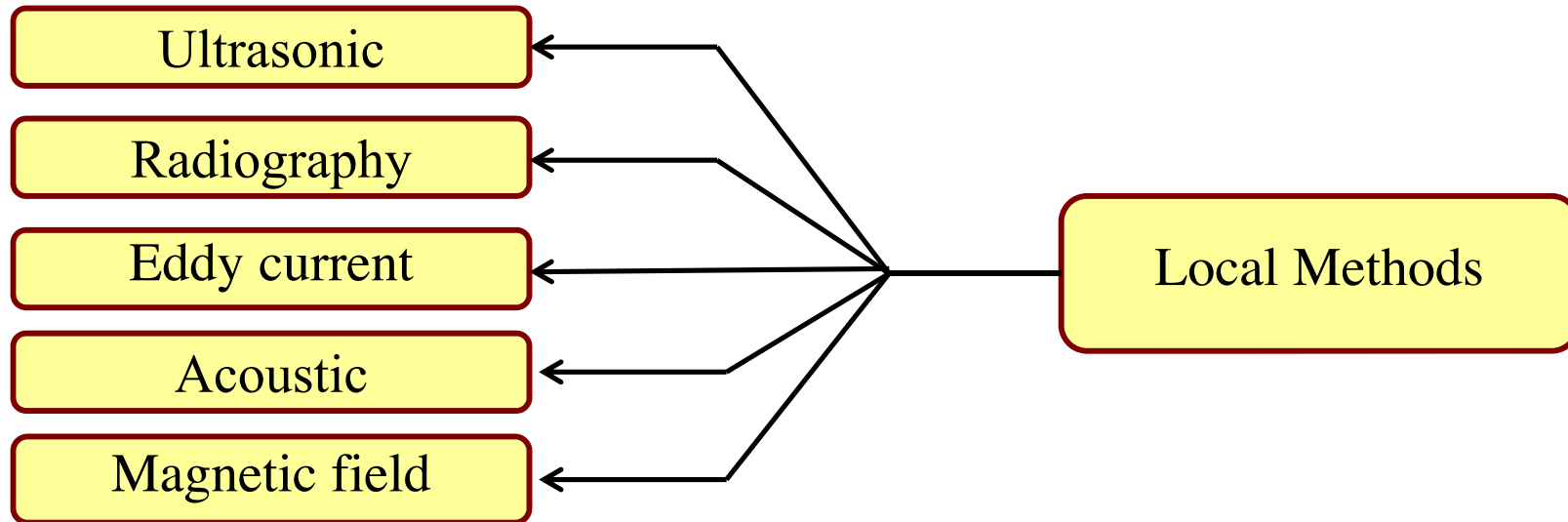
یک متخصص به بررسی ظاهری ساختمان از نظر ترک‌ها و جابجایی‌ها می‌پردازد.



## Basic concepts

### ▪ روش محلی

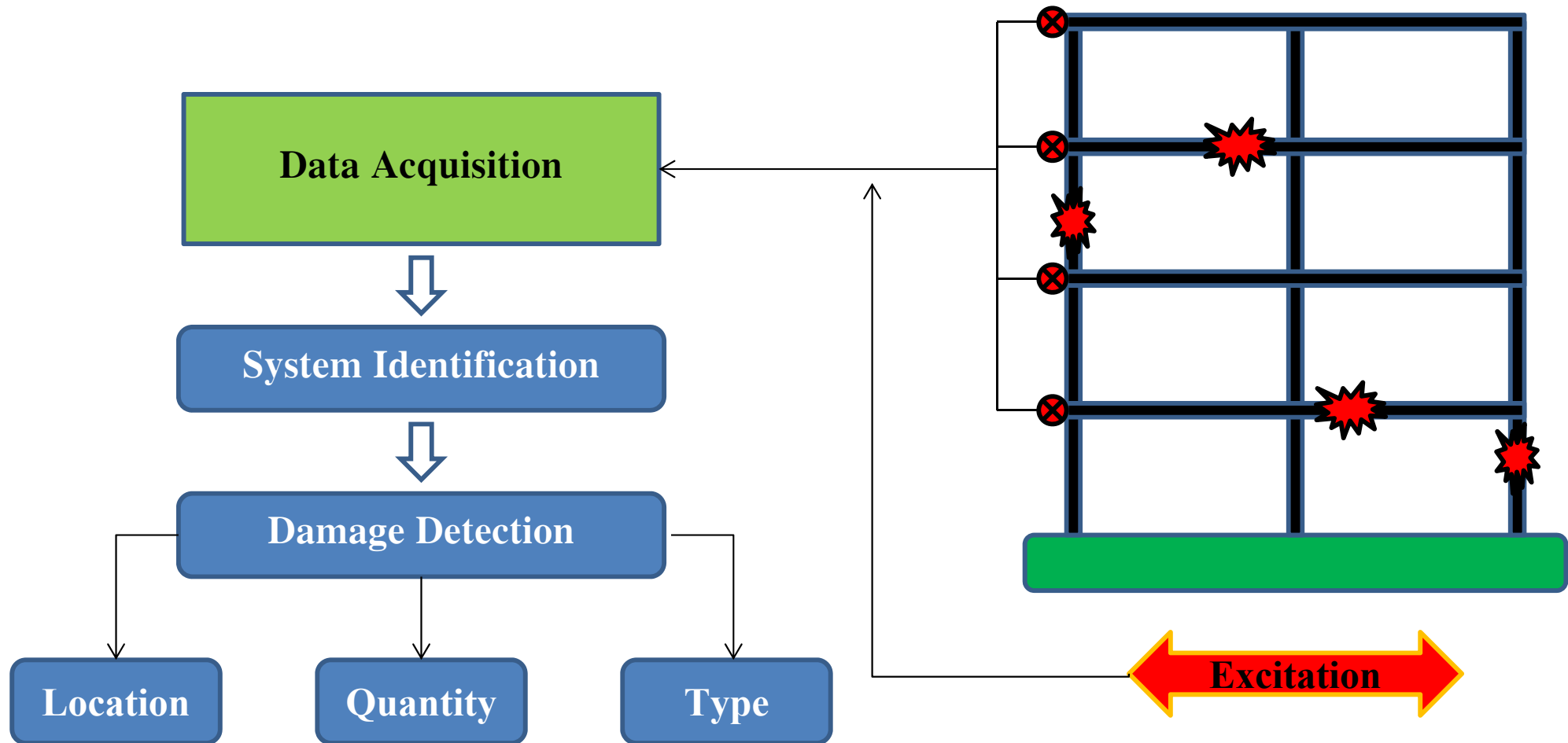
در روش‌های محلی مکان تقریبی آسیب مشخص می‌باشد؛ سازه را بصورت محلی بررسی کرده و آسیب‌های سطحی یا نزدیک سطح را آشکار می‌سازند. در این روش‌ها لازم است که منطقه مورد نظر از سازه به راحتی قابل دسترسی باشد تا بتوان آسیب را شناسایی کرد..



## Basic concepts

▪ روش کلی

شناسایی آسیب براساس ارتعاشات اندازه‌گیری شده انجام می‌شود.



## ■ گذشته

- برای اولین بار Yao در سال 1972 بحث کنترل فعال را برای سازه‌ها مطرح کرد. ( در سال‌های 60 نیز توسط Freyssinet بحث کنترل سازه‌ای مطرح شده بود.)
- اولین سازه‌هایی که مجهز به کنترل سازه‌ها است در ژاپن بین سال‌های 1982 و 1988 ساخته شد (AMD، AVS و ...)
- تئوری کنترل مدرن به شکل گسترده‌ای توسعه یافت.

---

## ■ حال

- به دلیل مشکلات اجرایی کنترل فعال، به سمت کنترل نیمه‌فعال روی آورده شد.
- انواع تئوری‌های جدید ( شبکه عصبی، الگوریتم ژنتیک و ...) مطرح شده است.
- تحقیقات فراوان بر روی میراگرهای هوشمند انجام می‌گیرد.

# □ کنترل سازه‌های گذشته، حال و آینده

## ▪ آینده

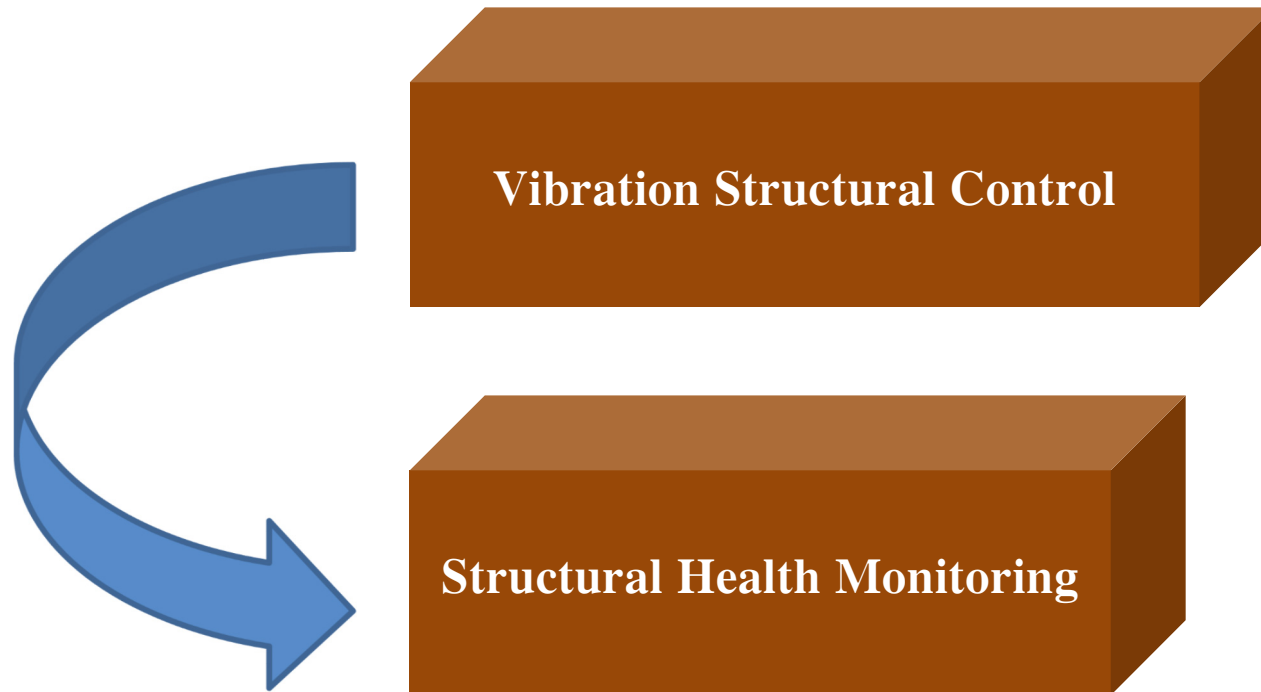
- مصالح هوشمند (مهندسی مواد).
- ارتقا سطح ایمنی.
- سازه‌های هوشمند.

---

با تعریفی که از کنترل فعال و نیمه‌فعال شد، به سازه‌هایی که دارای این نوع کنترل‌ها باشد به نحوی که در مقابل نیروهای خارجی واکنش دلخواه را از خود نشان بدهند، سازه‌های هوشمند گفته می‌شود که باید دارای حسگر (Sensor)، پردازشگر (Processor)، محرک (Actuator) و سیستم جمع‌آوری اطلاعات (Data acquisition) باشند.

**Structural Health Monitoring**

**Vibration Structural Control**

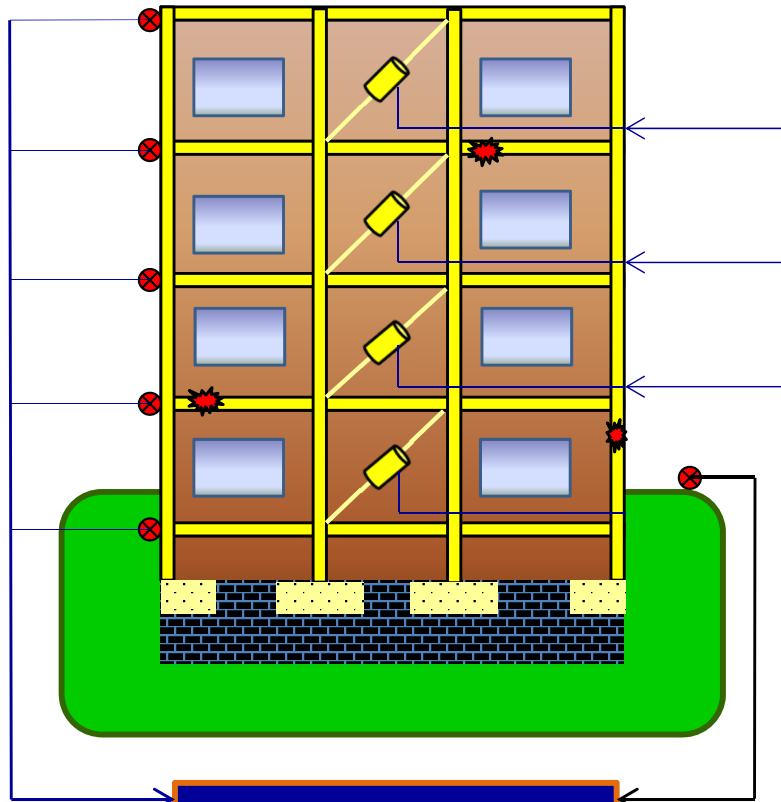


# Smart Structure

# کنترل سازه‌های گذشته، حال و آینده

آینده

# Normal Structure



Data Acquisition

