دانشگاه کردستان
University of Kurdistan
زانکۆی کوردستان

Structural Control

Active and Semi-active Control of Structures

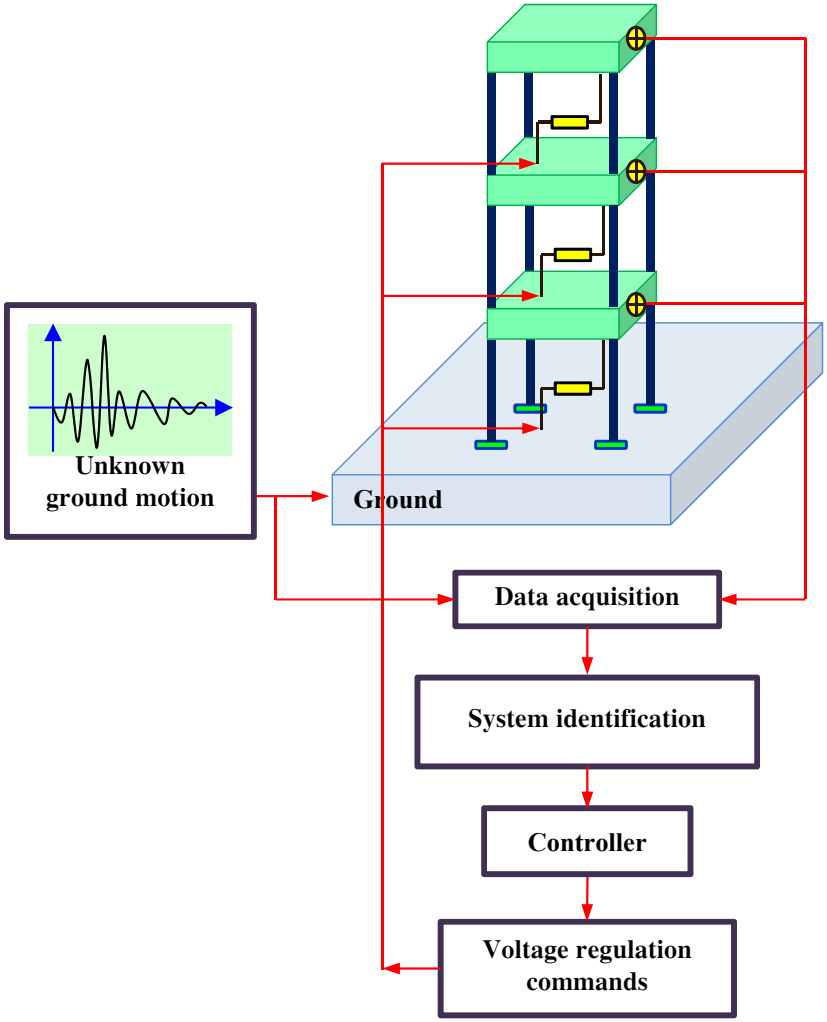
By: Kaveh Karami

Associate Prof. of Structural Engineering

https://prof.uok.ac.ir/Ka.Karami

❑کنترل فعال سازه‌ها

کنترل فعال سازه‌ها: در کنترل فعال سازه‌ها، نیروی خارجی توسط یک دستگاه مولد نیرو (Actuator) آنچنان به سازه وارد می‌شود که رفتار سازه را متعادل نماید. این در حالی است که در کنترل غیرفعال، نیروی خارجی جبران کننده‌ای به سازه اعمال نمی‌شود.



سیستم کنترل فعال در حالت کلی

سیستم کنترل فعال در حالت کلی شامل سه بخش زیر است:

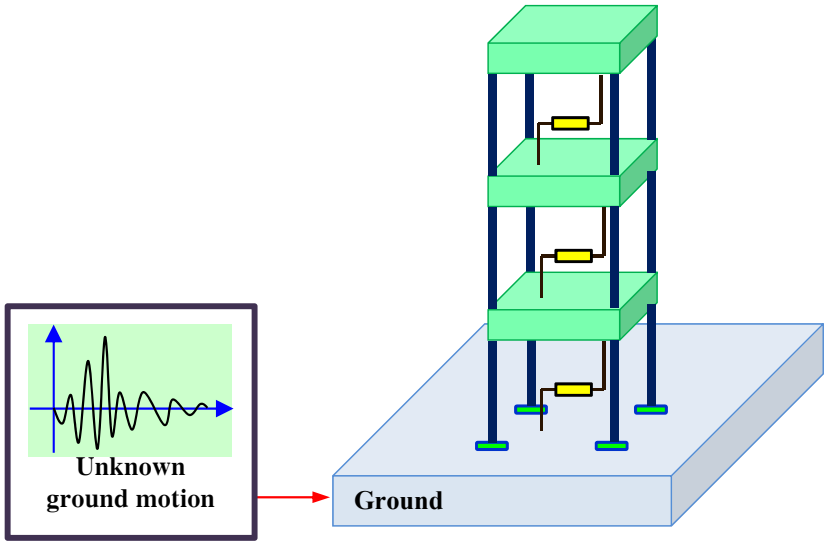
- جمع‌آوری و انتقال اطلاعات (Data Acquisition)
- کنترل کردن (Controller)
- اعمال نیرو (Actuator)

❑کنترل فعال سازه‌ها

عدم قطعیت‌ها:

عدم قطعیت‌ها در بحث کنترل سازه‌ها شامل موارد زیر است:

- تاخیر زمانی (Time delay) ناشی از محاسبات
- غیرخطی هندسی
- غیرخطی مصالح
- محاسبه اشتباه سختی و میرایی (خطا در شناسایی سیستم)
- تاخیر در اعمال نیرو توسط محرک
- نیروی ورودی مانند زلزله



سیستم کنترل غیرفعال در حالت کلی

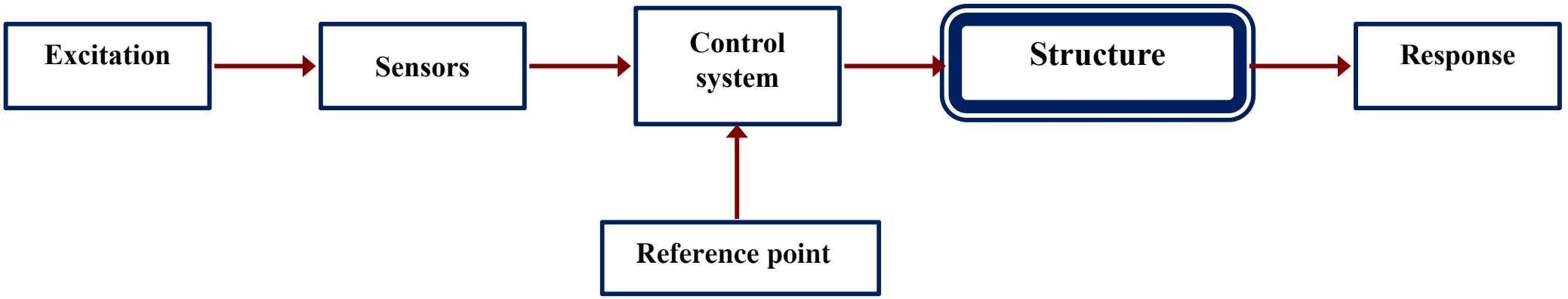
کنترل فعال یک نوع کنترل مقاوم (Robust control) است به طوری که بعد از اعمال نیروی کنترل، سازه باید مستحکم و استوار سر جای خودش باقی بماند. بنابراین از مزایای کنترل فعال نسبت به کنترل غیرفعال می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- جبران عدم قطعیت‌ها
- امکان ساخت ساختمان‌های بسیار بلند مقاوم در برابر باد و زلزله
- صرفه جویی در هزینه ساخت.

❑کنترل فعال سازه‌ها

سیستم کنترل مدار باز (Open loop)

در سیستم مدار باز، نیروی کنترل براساس نیروی خارجی نسبت به یک نقطه مرجع محاسبه و اعمال می‌گردد. در این نوع سیستم کنترلی چون نیروهای کنترل براساس نیروهای خارجی و مقادیر پاسخ هدف (مرجع) محاسبه می‌گردد به آن کنترل پیش‌خور (Feed forward control) نیز گفته می‌شود.



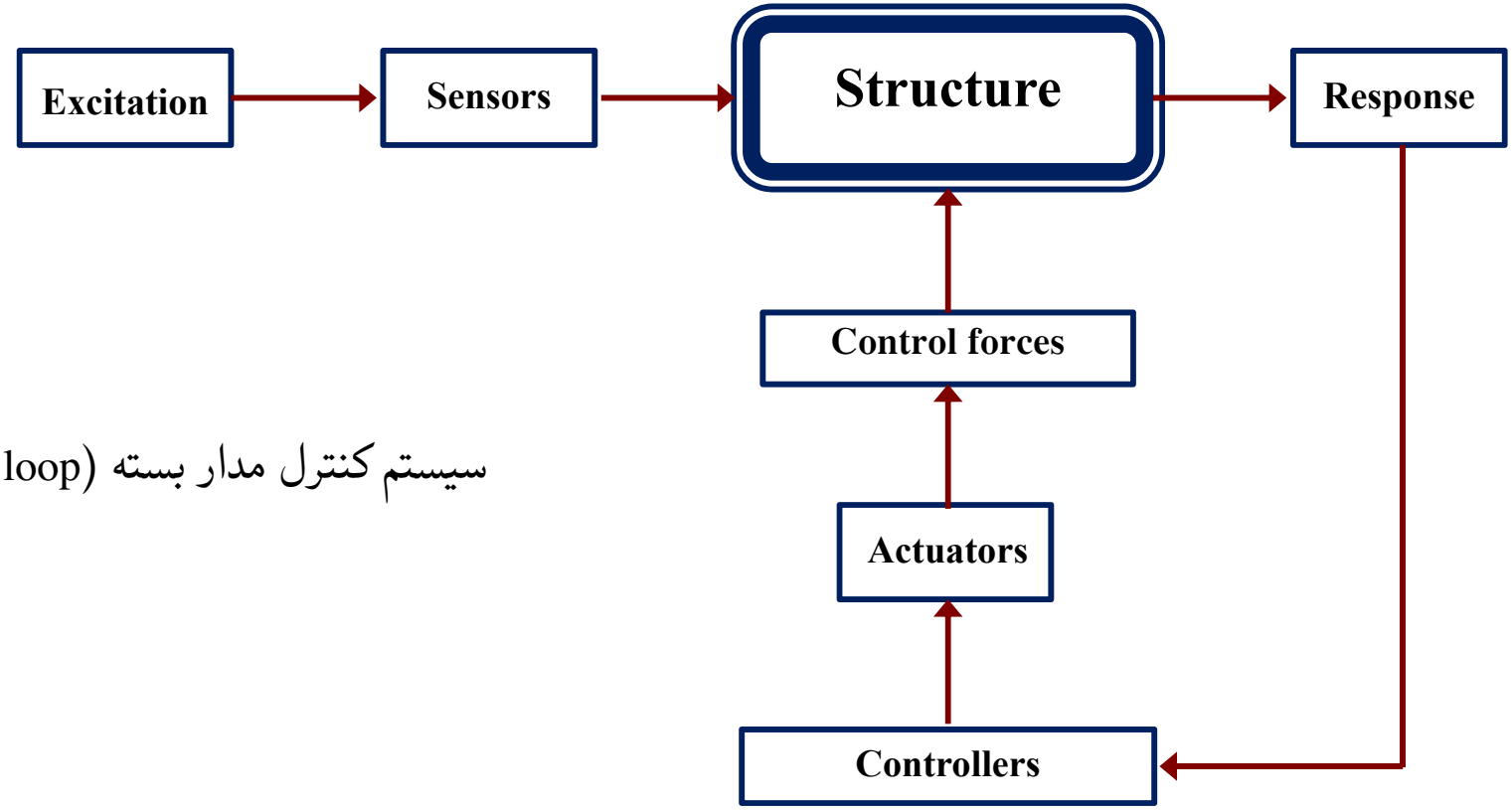
سیستم کنترل مدار باز (Open loop)

نقطه مرجع در مهندسی برق: یک سیگنال باید در زمانی به یک نقطه خاص برسد (Tracking)
نقطه مرجع در مهندسی عمران: یک جابجایی هدف که سازه نباید از آن تجاوز نماید.

❑کنترل فعال سازه‌ها

سیستم کنترل مدار بسته (Closed loop)

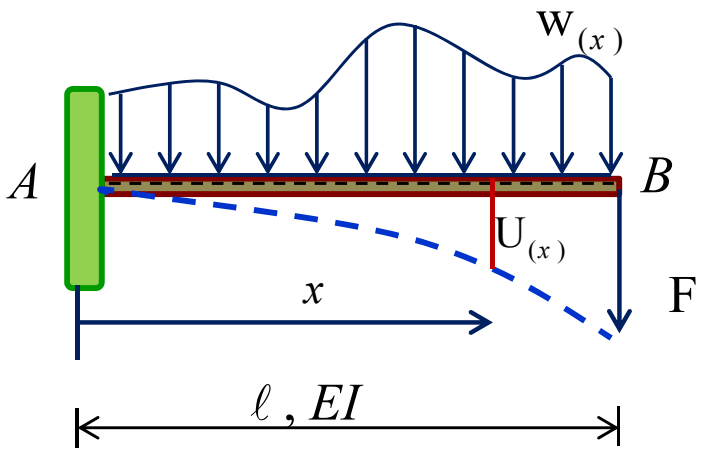
در این نوع ساختار کنترلی، نیروهای کنترل براساس خروجی‌ها (پاسخ‌های سازه) محاسبه شده و به سازه اعمال می‌شود. این نوع سیستم کنترلی مورد توجه بیشتری در مهندسی عمران قرار گرفته است. در این نوع سیستم کنترلی چون نیروهای کنترل براساس بازخوردی از سیستم (پاسخ‌های سازه) محاسبه می‌گردد به آن کنترل بازخورد (Feedback control) نیز گفته می‌شود.



سیستم کنترل مدار بسته (Closed loop)

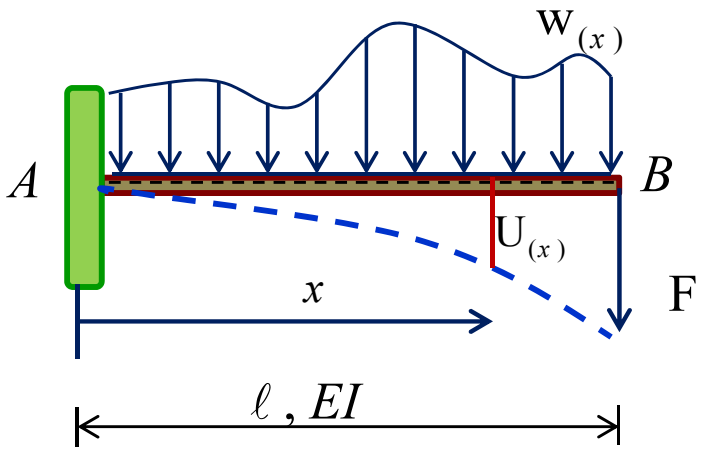
❑کنترل فعال سازه‌ها

مثال 1- در تیر نشان داده شده در شکل زیر نیروی کنترلی F را آنچنان محاسبه نمایید که جابجایی تیر تا حد امکان از رابطه $U^{*}_{(x)} = \frac{1}{2}\alpha x^{2}$ پیروی نماید. جابجایی تیر تحت اثر بارگسترده برابر با $U_{0(x)} = \frac{g_{(x)}}{EI}$ است.



❑کنترل فعال سازه‌ها

پاسخ مثال 1-



U_F تغییر شکل تیر تحت اثر تنها نیروی کنترل F برابر است با:

با فرض

$$h_{(x)} = \frac{x^2}{6}(3\ell - x) \qquad (2)$$

U_F تغییر شکل تیر به صورت زیر در می‌آید:

❑کنترل فعال سازه‌ها

پاسخ مثال 1-

$U_{(x)}$ تغییر شکل کلی تیر از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$U_{(x)} = \frac{1}{EI}(Fh_{(x)} + g_{(x)}) \quad (4)$$

اختلاف جابجایی کل با جابجایی هدف به صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$e_{(x)} = \frac{1}{EI}(Fh_{(x)} + g_{(x)}) - U^{*}_{(x)} \quad (5)$$

اگر هدف صفر شدن خطا تنها در یک موقعیت مشخص (مثلا انتهای تیر کنسول نقطه B) باشد در این صورت خواهیم داشت:

$$F = \frac{EIU^{*}_{(x=\ell)} - g_{(x=\ell)}}{h_{(x=\ell)}} \quad (6)$$

❑کنترل فعال سازه‌ها

پاسخ مثال 1-

حال اگر هدف مینیمم شدن خطا در طول کل تیر باشد می‌توان به کمک روش حداقل مربعات (LSM: Least square method) مقدار خطا را در کل طول تیر به حدقل رساند. برای این منظور تابع شاخص عملکرد (Performance Index) به صورت زیر تعریف می‌شود:

با مینیمم سازی شاخص عملکرد:

$$(5)\rightarrow(8) \quad \Rightarrow \quad \boxed{F=\frac{\int_0^{\ell} h_{(x)}\left(EIU^{*}_{(x)}-g_{(x)}\right)dx}{\int_0^{\ell} h^{2}_{(x)}dx}} \qquad (9)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر دو حالت نیروی کنترل تابعی از جابجایی اندازه‌گیری شده ($g_{(x)}$) است. یعنی کنترل از نوع بازخورد (Feedback control) است.

❑کنترل فعال سازه‌ها

پاسخ مثال 1-

حال اگر هدف مینیمم شدن خطا در تعداد محدودی نقطه در تیر باشد می‌توان به کمک روش حداقل مربعات مقدار خطا را در تعداد محدودی نقطه به حدقل رساند:

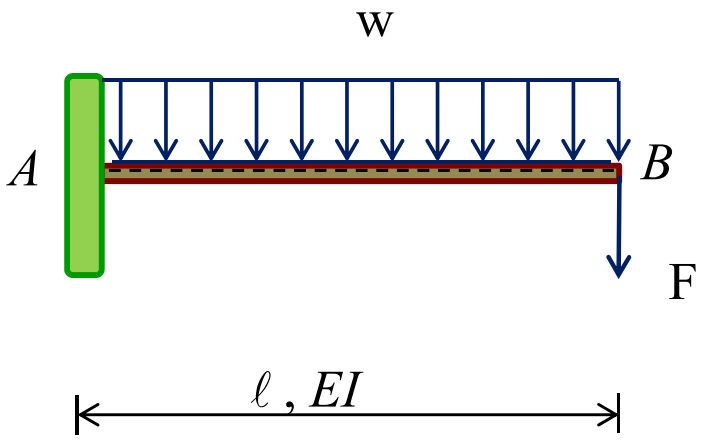
❑کنترل فعال سازه‌ها

مثال 2- در تیر نشان داده شده جابجایی هدف برابر با $U^*_{(x)} = \frac{1}{2}\alpha x^2$ است. نیروی کنترلی F را در حالت‌های زیر محاسبه نمایید:

الف- مقدار خطا در نقطه B صفر شود.

ب- مقدار خطا در نقاط وسط و انتهای تیر حداقل شود.

ج- مقدار خطا در طول تیر حداقل شود.



Matlab Code (L07Example02.m)

❑کنترل فعال سازه‌ها

پاسخ مثال 2-

تغییر شکل تیر تحت اثر بارگسترده برابر است با:

$$g_{(x)} = \frac{wx^2}{24}(6\ell^2 - 4\ell x + x^2) \qquad (11)$$

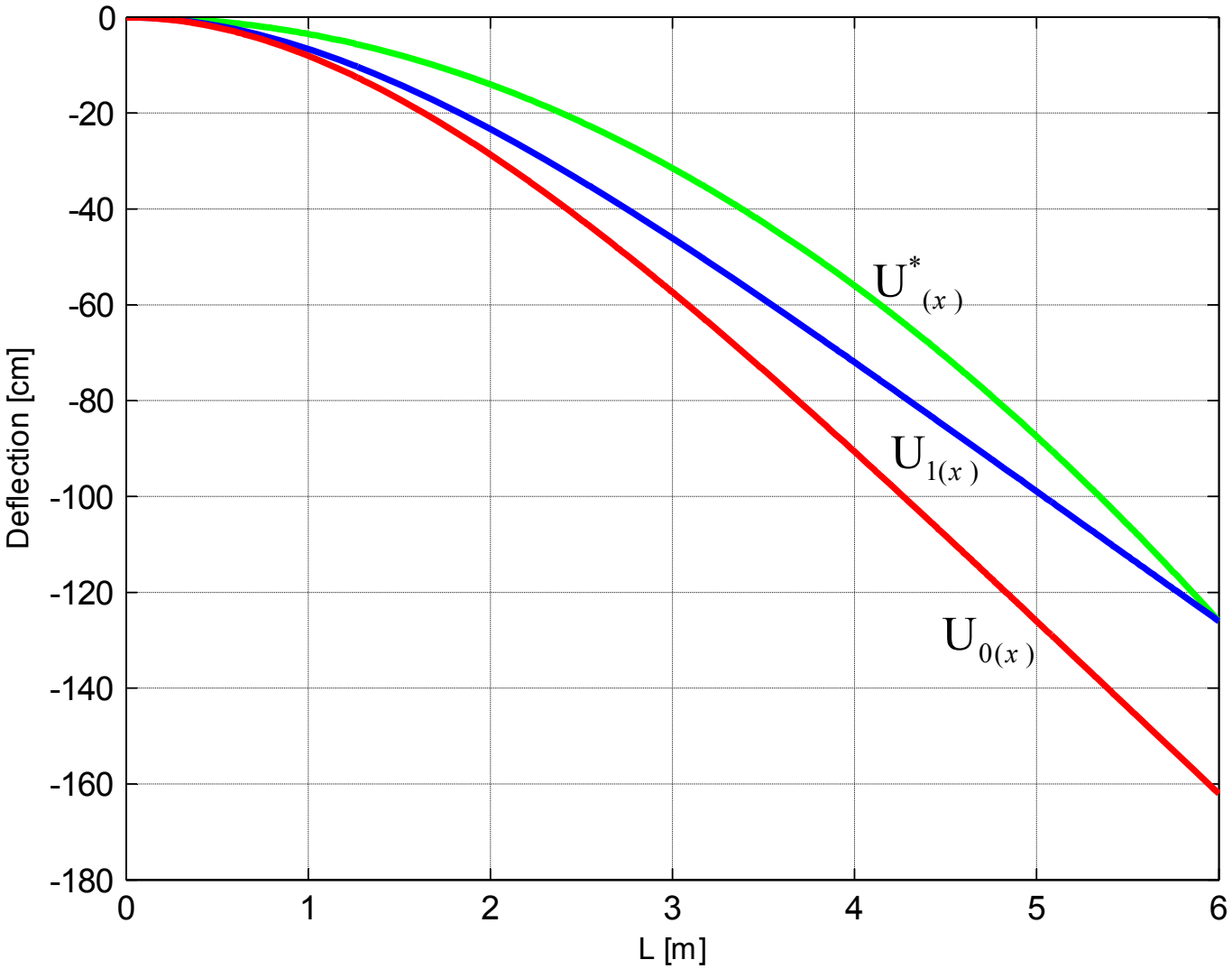
الف- خطا در نقطه B صفر شود:

$$F_1 = \frac{3EI\alpha}{2\ell} - \frac{3w\ell}{8}$$

$$U_{1(x)} = \frac{1}{EI}\left(\left(\frac{3EI\alpha}{2\ell} - \frac{3w\ell}{8}\right)\left(\frac{x^2}{6}(3\ell - x)\right) + \left(\frac{wx^2}{24}(6\ell^2 - 4\ell x + x^2)\right)\right)$$

❑کنترل فعال سازه‌ها

پاسخ مثال 2-



نمودار تغییر شکل تیر در حالت $\alpha = -0.07\,,\ L = 6\,(m)\,,w = -2\,(ton/m)\,,\ EI = 200\,ton.m^{2}\,,\ F_1 = 1\,ton$

❑کنترل فعال سازه‌ها

پاسخ مثال 2-

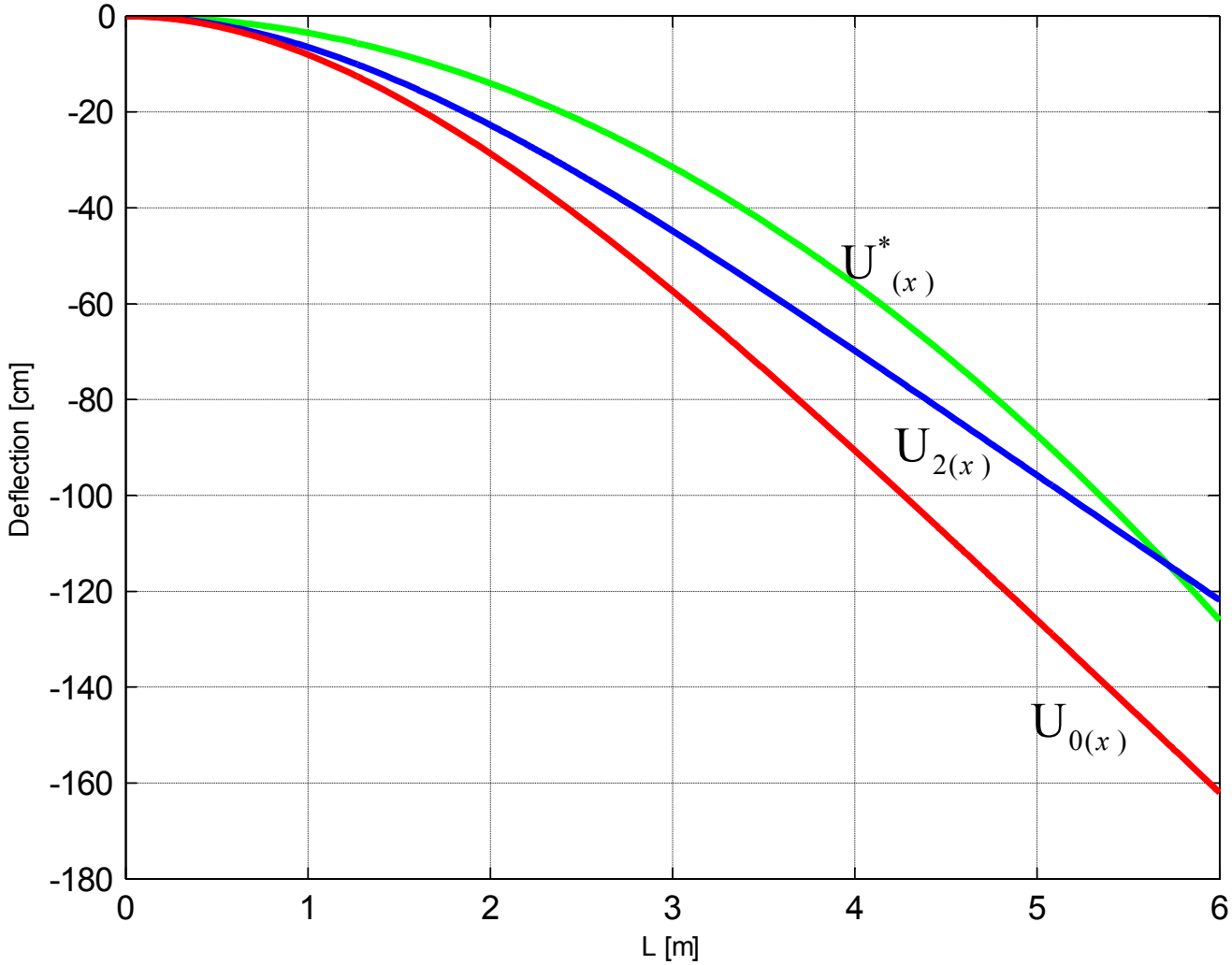
ب- مقدار خطا در نقاط وسط و انتهای تیر حداقل شود:

$$F_2 = \left(\frac{414}{281}\right)\frac{EI\alpha}{\ell} - \left(\frac{853}{2248}\right)w\ell$$

$$U_{2(x)} = \frac{1}{EI}\left(\left(\frac{414}{281}\frac{EI\alpha}{\ell} - \frac{853}{2248}w\ell\right)\left(\frac{x^2}{6}(3\ell - x)\right) + \left(\frac{wx^2}{24}(6\ell^2 - 4\ell x + x^2)\right)\right)$$

❑کنترل فعال سازه‌ها

پاسخ مثال 2-



نمودار تغییر شکل تیر در حالت $\alpha = -0.07 , L = 6\,(m) , w = -2\,(ton/m) , EI = 200\,ton.m^2 , F_2 = 1.116\,ton$

❑ کنترل فعال سازه‌ها

پاسخ مثال 2-

ج- مقدار خطا در طول تیر حداقل شود:

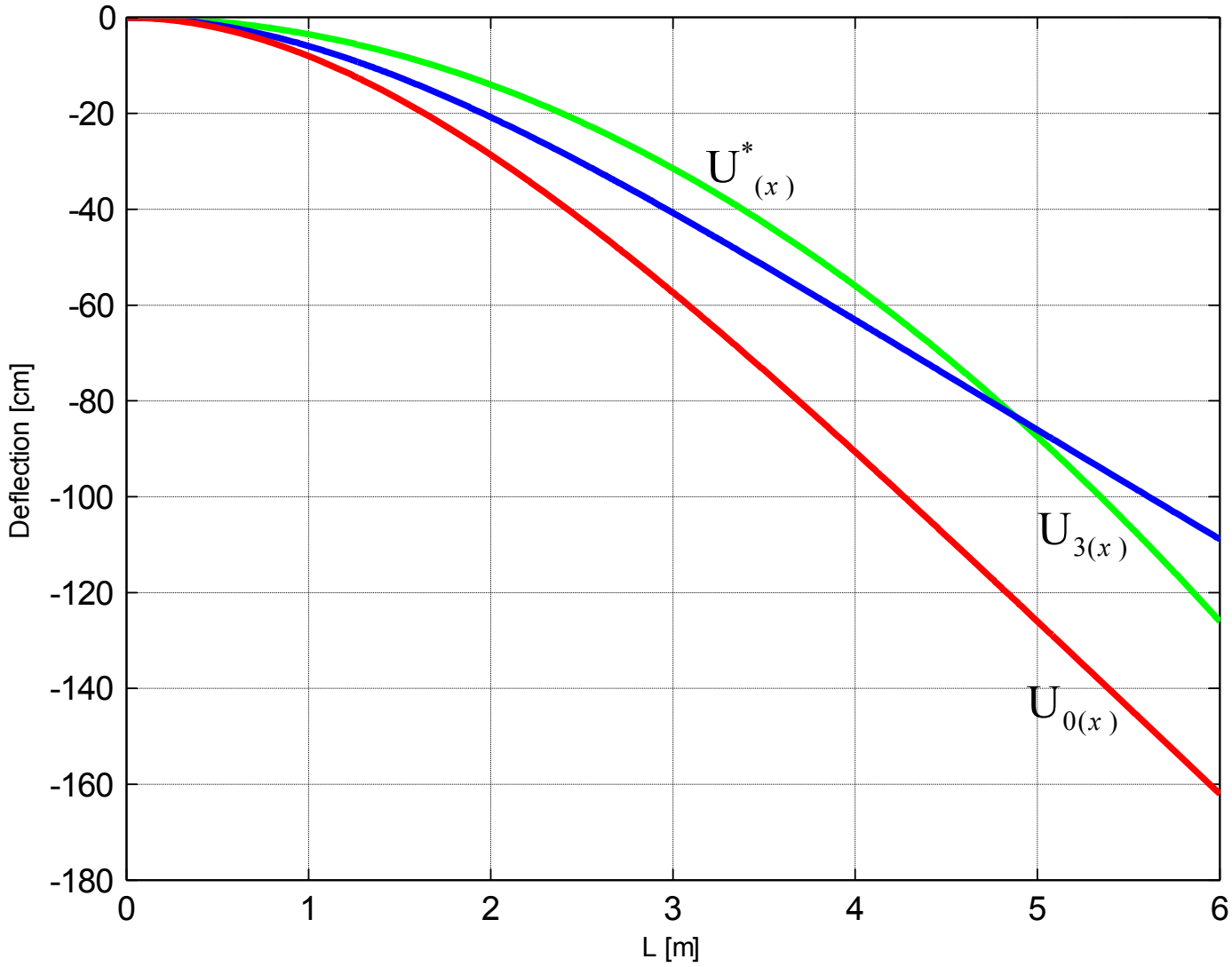
$$= \frac{\int_0^{\ell}\left(\frac{x^2}{6}(3\ell - x)\right)\left(\frac{EI}{2}\alpha x^2 - \left(\frac{wx^2}{24}(6\ell^2 - 4\ell x + x^2)\right)\right)dx}{\int_0^{\ell}\left(\frac{x^2}{6}(3\ell - x)\right)^2 dx}$$

$$\Rightarrow \quad F_3 = \frac{91}{66}\frac{EI\alpha}{\ell} - \frac{413}{1056}w\ell$$

$$U_{3(x)} = \frac{1}{EI}\left(\left(\frac{91}{66}\frac{EI\alpha}{\ell} - \frac{413}{1056}w\ell\right)\left(\frac{x^2}{6}(3\ell - x)\right) + \left(\frac{wx^2}{24}(6\ell^2 - 4\ell x + x^2)\right)\right)$$

❑کنترل فعال سازه‌ها

پاسخ مثال 2-



نمودار تغییر شکل تیر در حالت $\alpha = -0.07 , L = 6\,(m) , w = -2\,(ton/m) , EI = 200\,ton.m^2 , F_3 = 1.476\,ton$

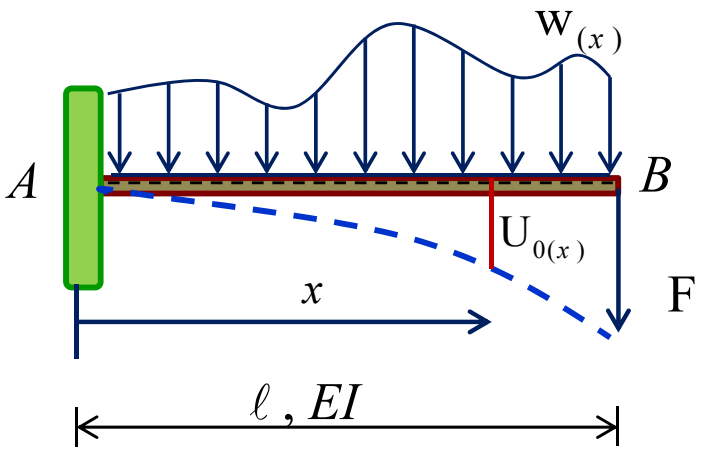
❑کنترل فعال سازه‌ها

مثال 3- در تیر نشان داده شده جابجایی هدف برابر با $U^*_{(x)} = \frac{1}{2}\alpha x^2$ است. نیروی کنترلی F را در حالت‌های زیر محاسبه نمایید:

الف- مقدار خطا در نقطه B صفر شود.

ب- مقدار خطا در نقاط وسط و انتهای تیر حداقل شود.

ج- مقدار خطا در طول تیر حداقل شود.



جابجایی تیر تحت اثر بار گسترده در نقاط وسط و انتهای تیر به ترتیب u_1 و u_2 است که توسط حسگرهایی اندازه‌گیری می‌گردد. جابجایی سایر نقاط از رابطه زیر قابل درونیابی می‌باشد:

$$U_{0(x)} = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 x^2$$

Matlab Code (L07Example03.m)

❑ کنترل فعال سازه‌ها

پاسخ مثال 3-

تغییر شکل تیر تحت اثر بارگسترده برابر است با:

$$U_{0(x)} = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 x^2 \qquad (I)$$

$$\left.\begin{aligned} &\Rightarrow \quad \alpha_0 + \alpha_1(0) + \alpha_2(0)^2 = 0 \\ &\Rightarrow \quad \alpha_0 + \alpha_1(\ell/2) + \alpha_2(\ell/2)^2 = u_1 \\ &\Rightarrow \quad \alpha_0 + \alpha_1(\ell) + \alpha_2(\ell)^2 = u_2 \end{aligned}\right\} \Rightarrow \begin{aligned} \alpha_0 &= 0 \\ \alpha_1 &= \frac{4u_1 - u_2}{\ell} \\ \alpha_2 &= \frac{2u_2 - 4u_1}{\ell^2} \end{aligned} \qquad (II)$$

$$(\text{II}) \rightarrow (\text{I}) \quad \Rightarrow \quad U_{0(x)} = u_1\left[4\left(\frac{x}{\ell}\right) - 4\left(\frac{x}{\ell}\right)^2\right] + u_2\left[-\left(\frac{x}{\ell}\right) + 2\left(\frac{x}{\ell}\right)^2\right] \qquad (12)$$

$$(12) \quad \Rightarrow \quad g_{(x)} = EIu_1\left[4\left(\frac{x}{\ell}\right) - 4\left(\frac{x}{\ell}\right)^2\right] + EIu_2\left[-\left(\frac{x}{\ell}\right) + 2\left(\frac{x}{\ell}\right)^2\right] \qquad (13)$$

❑کنترل فعال سازه‌ها

پاسخ مثال 3-

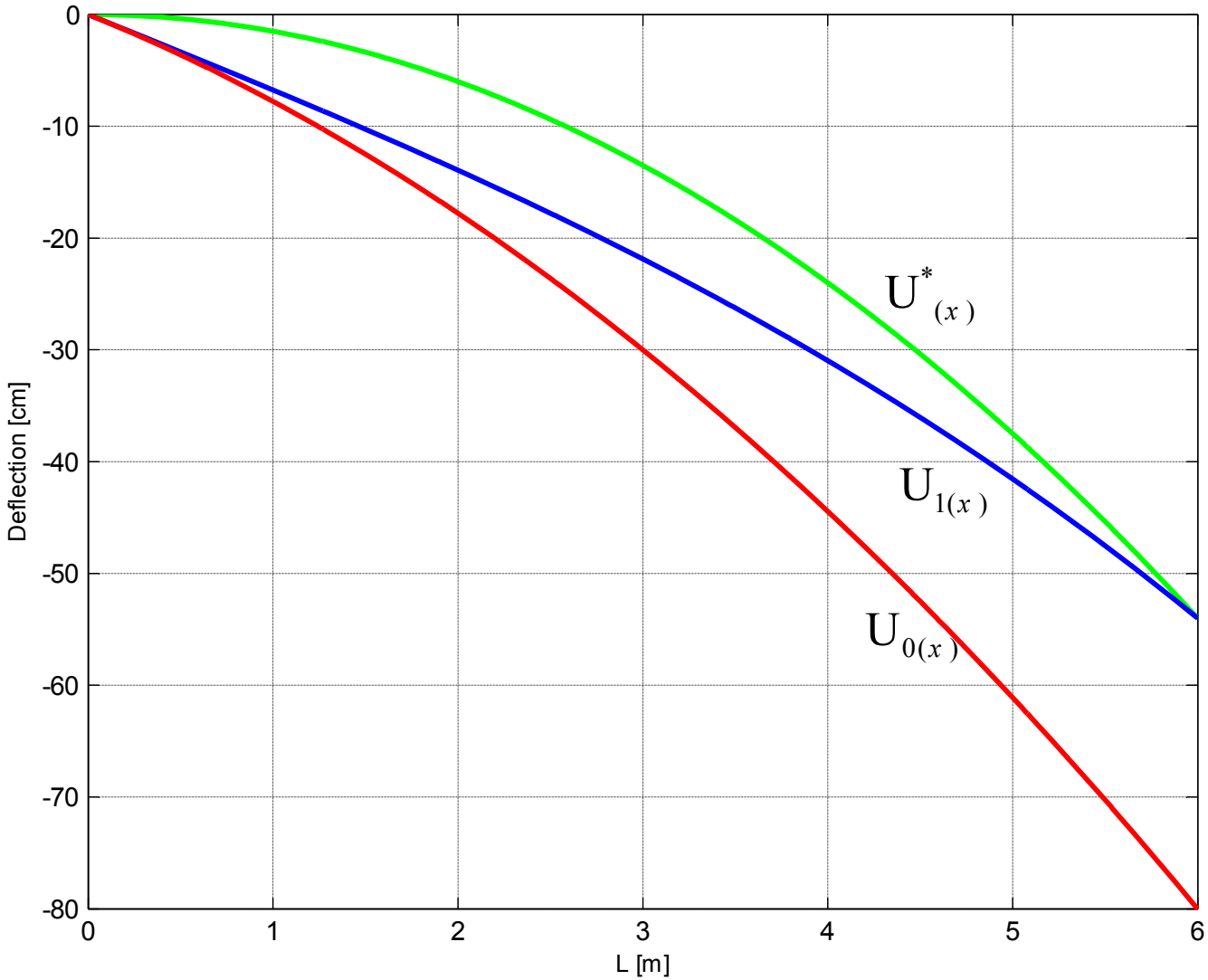
الف- خطا در نقطه B صفر شود:

$$F_1 = \frac{3EI\alpha}{2\ell} - \frac{3EIu_2}{\ell^3}$$

$$U_{1(x)} = \left(\frac{4u_1 - u_2}{\ell}\right)x + \left(\frac{3\alpha}{4} + \frac{u_2 - 8u_1}{2\ell^2}\right)x^2 - \left(\frac{\alpha}{4\ell} - \frac{u_2}{2\ell^3}\right)x^3$$

❑کنترل فعال سازه‌ها

پاسخ مثال 3-



نمودار تغییر شکل تیر در حالت

$$\alpha = -0.03\,,\ L = 6\,(m)\,,\ w = -2\,(ton/m)\,,\ EI = 200\,ton.m^2\,,\ F_1 = 0.722\,ton\,,\ u_1 = -0.3\,m\,,\ u_2 = -0.8\,m$$

❑کنترل فعال سازه‌ها

پاسخ مثال 3-

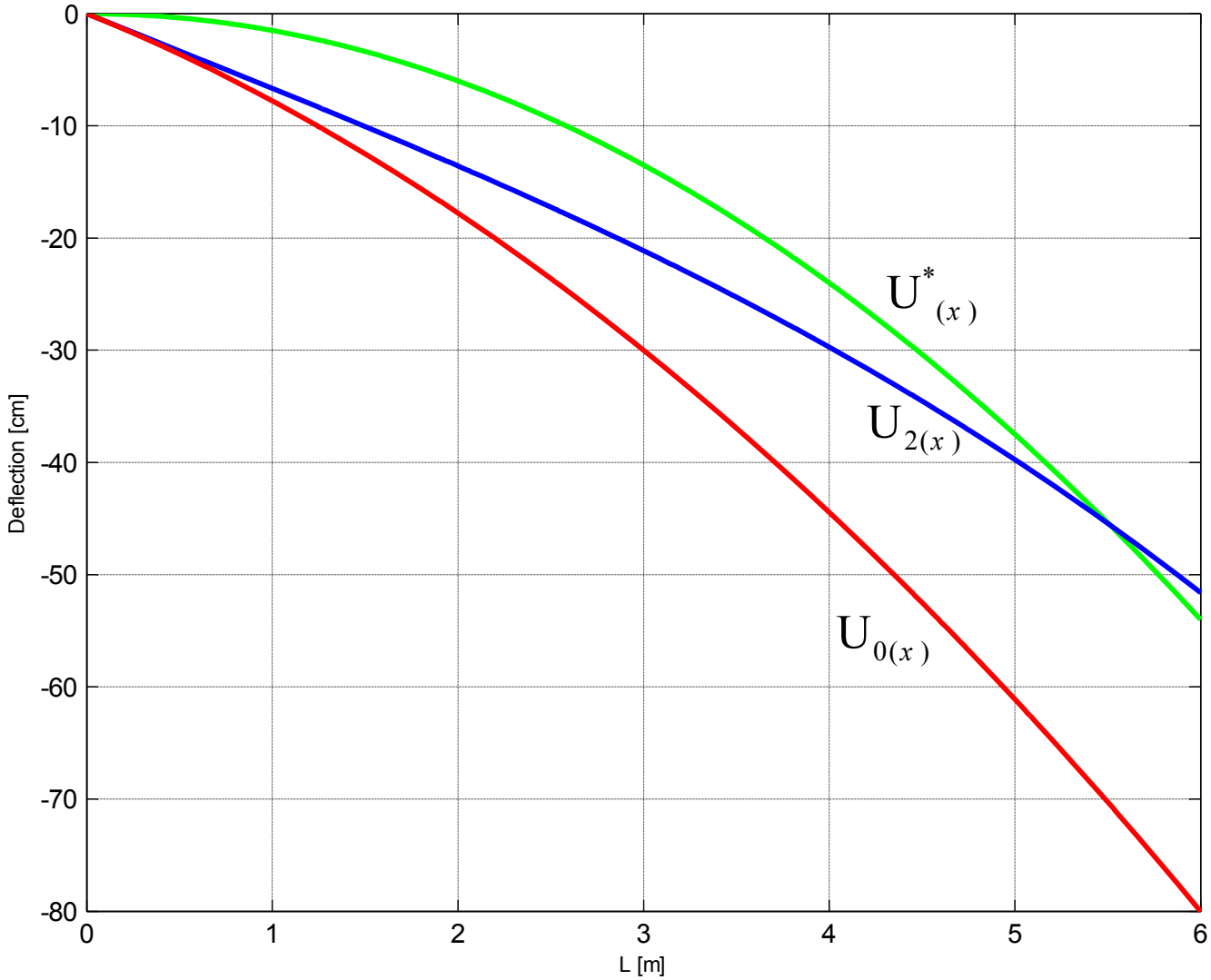
ب- مقدار خطا در نقاط وسط و انتهای تیر حداقل شود:

$$F_2 = \frac{EI}{\ell}(1.473\alpha) - \frac{EI}{\ell^3}(0.854u_1 + 2.733u_2)$$

$$U_{2(x)} = \left(\frac{4u_1 - u_2}{\ell}\right)x + \left(\frac{1.473\alpha\ell^2 + 1.267u_2 - 8.854u_1}{2\ell^2}\right)x^2 - \left(\frac{1.473\alpha\ell^2 - 0.854u_1 - 2.733u_2}{6\ell^3}\right)x^3$$

❑کنترل فعال سازه‌ها

پاسخ مثال 3-



نمودار تغییر شکل تیر در حالت

$$\alpha = -0.03\,,\ L = 6\,(m)\,,\ w = -2\,(ton/m)\,,\ EI = 200\,ton.m^2\,,\ F_2 = 0.788\,ton\,,\ u_1 = -0.3\,m\,,\ u_2 = -0.8\,m$$

پاسخ مثال 3-

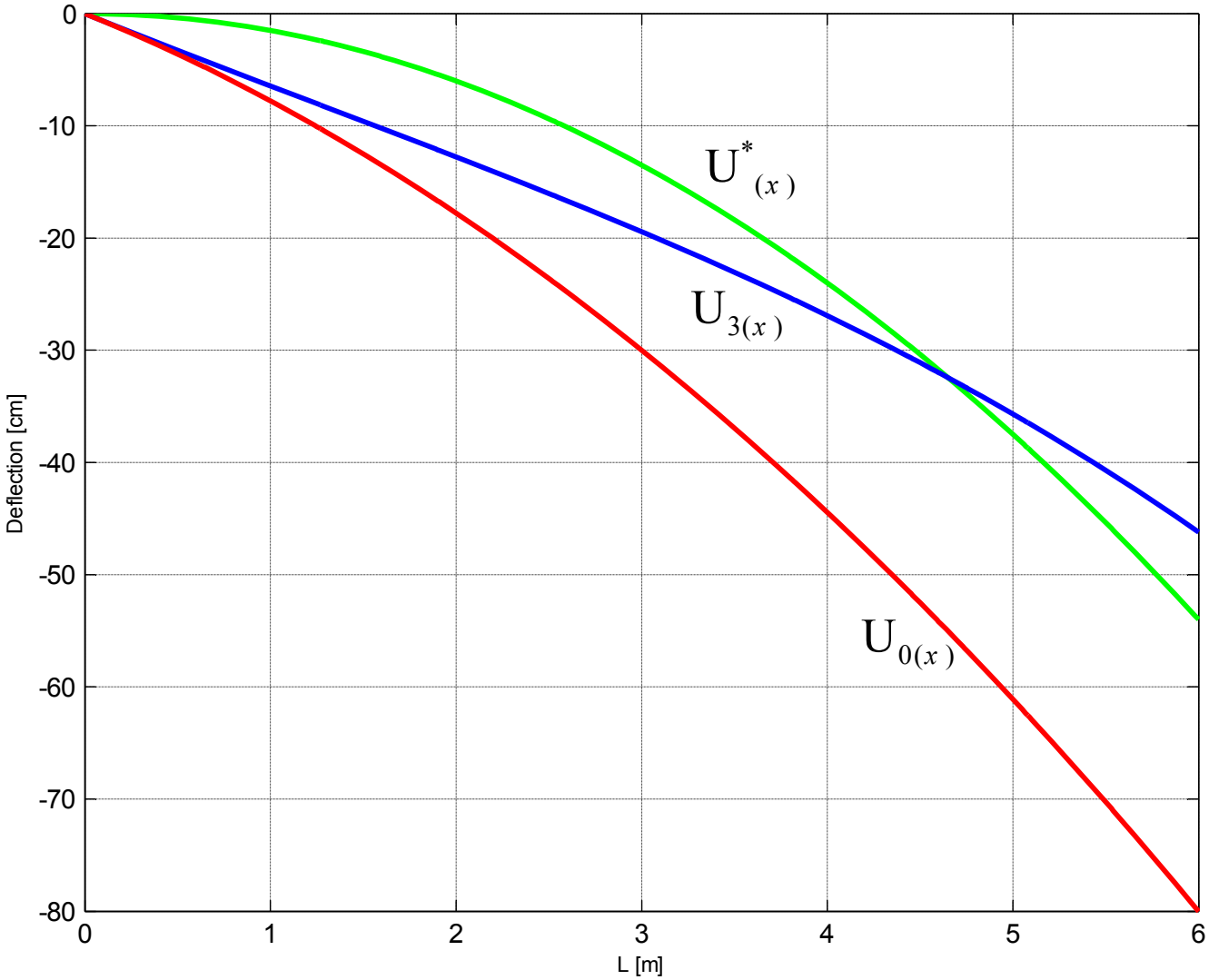
ج- مقدار خطا در طول تیر حداقل شود:

$$\Rightarrow \quad F_3 = EI\left[\frac{91}{66}\left(\frac{\alpha}{\ell}\right) - \frac{1}{\ell^3}\left(\frac{98}{33}u_1 + \frac{133}{66}u_2\right)\right]$$

$$U_{3(x)} = \left(\frac{4u_1 - u_2}{\ell}\right)x + \left(\frac{91\alpha}{132} - \frac{181u_1}{33\ell^2} + \frac{131u_2}{132\ell^2}\right)x^2 + \left(-\frac{91\alpha}{396\ell} + \frac{49u_1}{99\ell^3} + \frac{133u_2}{396\ell^3}\right)x^3$$

❑کنترل فعال سازه‌ها

پاسخ مثال 3-

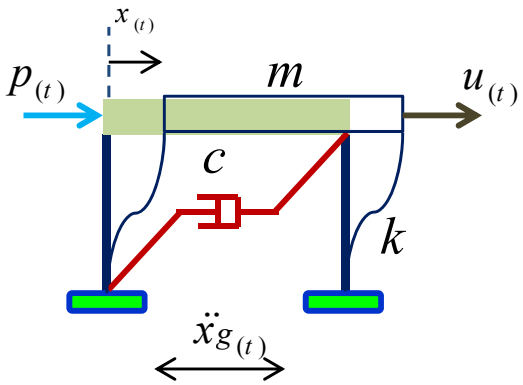


نمودار تغییر شکل تیر در حالت

$$\alpha = -0.03\,,\ L = 6\,(m)\,,\ w = -2\,(ton/m)\,,\ EI = 200\,ton.m^2\,,\ F_3 = 0.939\,ton\,,\ u_1 = -0.3\,m\,,\ u_2 = -0.8\,m$$

❑کنترل فعال سازه‌ها

کنترل با بازخورد سختی و میرایی در سیستم‌های SDOF



نیروی کنترل $u(t)$ در حالت بازخورد تابعی از جابجایی و سرعت به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$u_{(t)} = -c_d \dot{x}_{(t)} - k_d x_{(t)} \quad (12)$$

هدف در کنترل فعال آن است که این نیروی کنترل به گونه‌ای محاسبه شود تا رفتار سازه متعادل گردد. معادله دیفرانسیل حرکت با در نظر گرفتن نیروی کنترل به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$m\ddot{x}_{(t)} + c\dot{x}_{(t)} + kx_{(t)} = -m\ddot{x}g_{(t)} + p_{(t)} + u_{(t)} \quad (13)$$

مراحل کنترل به شرح زیر می‌باشد:

پاسخ در حالت کنترل نشده محاسبه یا اندازه‌گیری می‌شود.

نیروی کنترل $u(t)$ با انتخاب مقادیر دلخواه برای c_d و k_d محاسبه می‌گردد.

معادله حرکت با احتساب نیروی کنترل تشکیل می‌شود.

پاسخ سازه کنترل شده محاسبه می‌گردد. در صورتی که پاسخ سازه در حد مجاز قرار داشته باشد نیروی کنترل انتخابی مطلوب است. در غیر این صورت مقادیر جدیدی برای c_d و k_d انتخاب می‌گردد و مراحل فوق تا زمانی که پاسخ‌ها در محدوده مطلوب قرار گیرند تکرار می‌شود.

❑کنترل فعال سازه‌ها

کنترل با بازخورد سختی و میرایی در سیستم‌های SDOF

با جایگذاری معادله (12) در معادله (13) خواهیم داشت:

$$(12)\rightarrow(13) \quad \Rightarrow \quad \boxed{m\ddot{x}_{(t)}+(c+c_d)\dot{x}_{(t)}+(k+k_d)x_{(t)}=-m\ddot{x}_{g(t)}+p_{(t)}} \qquad (14)$$

توجه شود که در این جا سختی و میرایی سازه تغییر نمی‌کند. در واقع عملیات از نظر ریاضی در حال انجام است در غیر این صورت با کنترل غیر فعال و نیمه فعال مواجه خواهیم بود. طرفین رابطه (14) را بر m تقسیم می‌کنیم:

$$(14) \quad \overset{\div m}{\Rightarrow} \quad \boxed{\ddot{x}_{(t)}+\left(\frac{c}{m}+\frac{c_d}{m}\right)\dot{x}_{(t)}+\left(\frac{k}{m}+\frac{k_d}{m}\right)x_{(t)}=-\ddot{x}_{g(t)}+\frac{p_{(t)}}{m}} \qquad (15)$$

با تعریف پارامترهای زیر

$$\boxed{\begin{aligned} &\frac{k}{m}=\omega^2 \qquad 2\xi\omega+\frac{c_d}{m}=2\xi_{eq}\,\omega_{eq} \\ &\frac{c}{m}=2\xi\omega \qquad \omega^2+\frac{k_d}{m}=\omega_{eq}{}^2 \end{aligned}} \qquad (16)$$

❑کنترل فعال سازه‌ها

کنترل با بازخورد سختی و میرایی در سیستم‌های SDOF

رابطه (15) را می توان به صورت زیر نوشت:

$$(16)\rightarrow(15) \quad \Rightarrow \quad \boxed{\ddot{x}_{(t)} + 2\xi_{eq}\omega_{eq}\dot{x}_{(t)} + \omega_{eq}{}^{2}\, x_{(t)} = -\ddot{x}g_{(t)} + \frac{p_{(t)}}{m}} \qquad (17)$$

معادله (17) مشابه معادله یک سیستم SDOF بدون نیروی کنترل می‌باشد؛ با این تفاوت که نسبت میرایی معادل ξ_{eq} و فرکانس معادل ω_{eq} به جای ξ و ω قرار می‌گیرد.

$$(16) \quad \Rightarrow \quad \omega_{eq} = \sqrt{\omega^2 + \frac{k_d}{m}} \quad \overset{m=\frac{k}{\omega^2}}{\Rightarrow} \quad \boxed{\omega_{eq} = \omega\sqrt{1+\frac{k_d}{k}}} \qquad (18)$$

ξ_α مقدار افزایش ضریب میرایی ناشی از نیروی کنترل از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\xi_\alpha + \xi = \xi_{eq} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\xi_\alpha = \xi_{eq} - \xi} \qquad (19)$$

❑کنترل فعال سازه‌ها

کنترل با بازخورد سختی و میرایی در سیستم‌های SDOF

از رابطه (16) ضریب میرایی معادل را می توان به صورت زیر نوشت:

$$(16) \Rightarrow 2\xi\omega+\frac{c_d}{m}=2\xi_{eq}\omega_{eq} \Rightarrow \boxed{\xi_{eq}=\frac{\omega}{\omega_{eq}}\xi+\frac{c_d}{2m\omega_{eq}}} \quad (20)$$

با جایگذاری رابطه‌های (18) و (20) در رابطه (19) خواهیم داشت:

$$(20)\rightarrow(19) \Rightarrow \boxed{\xi_\alpha=\frac{1}{\sqrt{1+\frac{k_d}{k}}}\left(\frac{c_d}{2m\omega}-\xi\left(\sqrt{1+\frac{k_d}{k}}-1\right)\right)} \quad (21)$$

حالت حدی $\xi_{eq}=1$

$$(16),(18) \overset{\xi_{eq}=1}{\Rightarrow} \boxed{\frac{c_d}{2\omega m}=\sqrt{1+\frac{k_d}{k}}-\xi} \quad (22)$$

❑کنترل فعال سازه‌ها

کنترل با بازخورد سختی و میرایی در سیستم‌های SDOF

با بررسی روابط (18) و (21) می‌توان نتیجه گرفت:

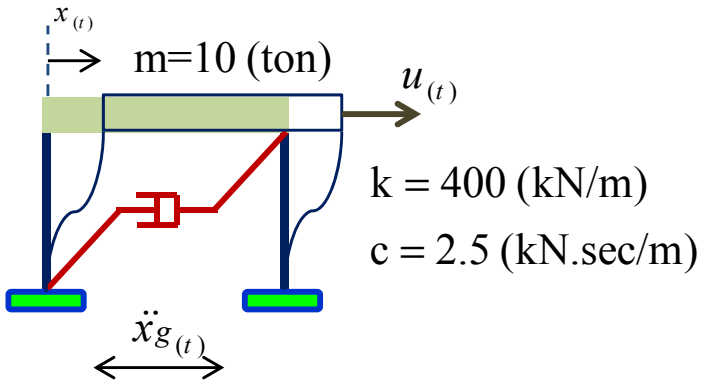
$$(18) \Rightarrow \text{if} \quad k_d \uparrow \Rightarrow \omega_{eq} \uparrow$$
$$(21) \Rightarrow \text{if} \quad k_d \uparrow \Rightarrow \xi_{\alpha} \downarrow$$

- اگر بازخورد جابجایی در حال افزایش باشد و بخواهیم با افزایش k_d جابجایی را کم کنیم در این صورت افزایش k_d باعث افزایش فرکانس شده و میرایی اضافه شده به سازه را هم کم می کند. این امر ممکن است باعث ناپایداری سازه گردد. بنابراین اگر بخواهیم جابجایی را کاهش دهیم کارکردن با میرایی مناسب‌تر است.
- اگر بازخورد سرعت در حال افزایش باشد و بخواهیم با افزایش c_d سرعت را کم کنیم در این صورت افزایش c_d باعث افزایش میرایی اضافه شده به سازه می‌گردد.

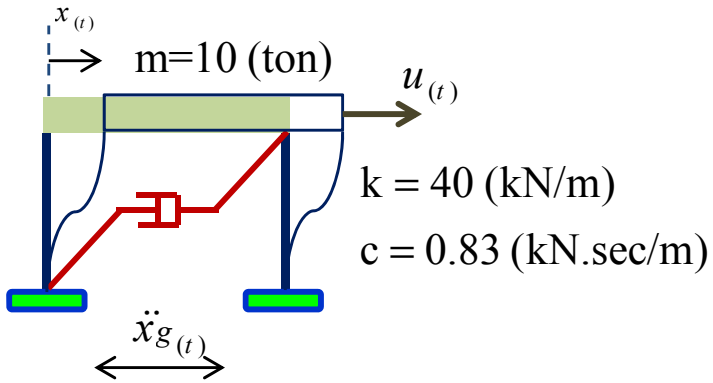
(درکل کارکردن با c_d به جای k_d پاسخ‌های بهتری نتیجه می‌دهد)

❑کنترل فعال سازه‌ها

مثال 4- رفتار دو مدل SDOF نشان داده شده تحت اثر دو زلزله Elcentro و Kobe را با در نظر گرفتن بازخورد سرعت کنترل نمایید.



مدل (1)



مدل (2)

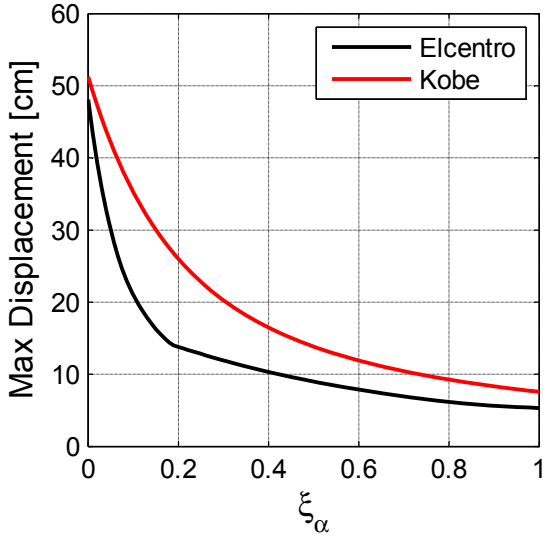
Matlab Code (L07Example04.m)

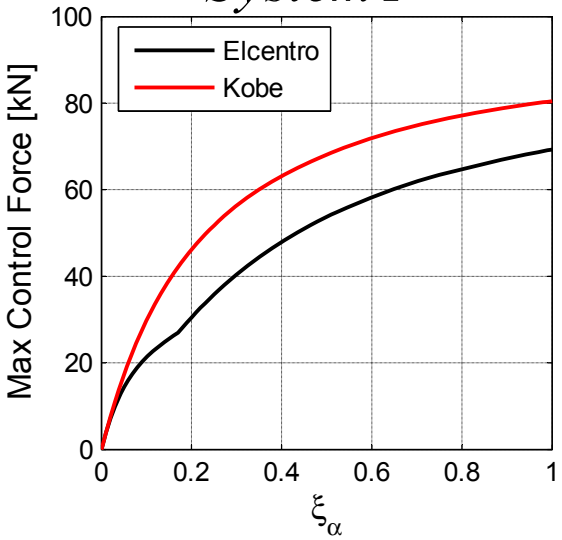
❑کنترل فعال سازه‌ها

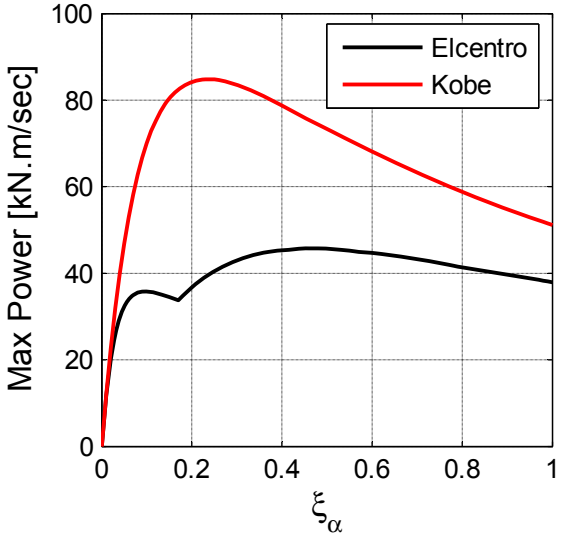
پاسخ مثال 4-

$$(21) \quad \Rightarrow \quad c_d = 2m\omega\left[\xi_\alpha\sqrt{1+\frac{k_d}{k}}+\xi\left(\sqrt{1+\frac{k_d}{k}}-1\right)\right]$$

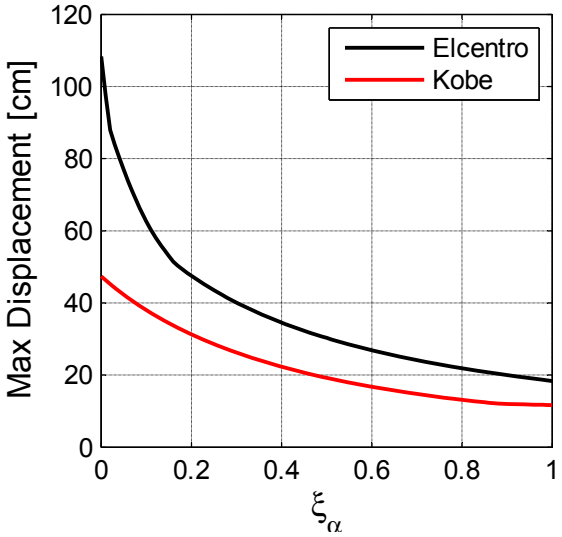
System 1

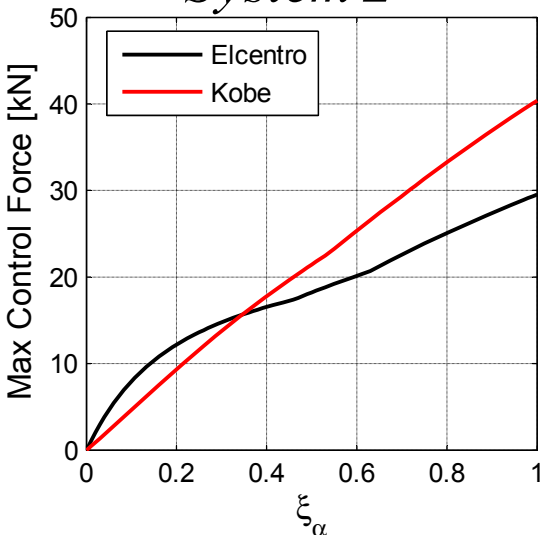


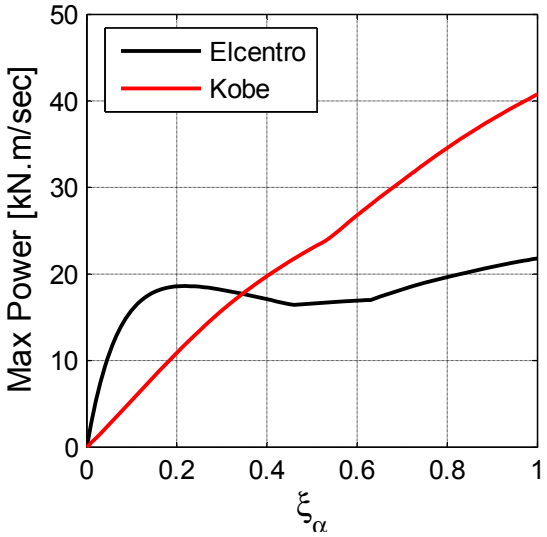




System 2



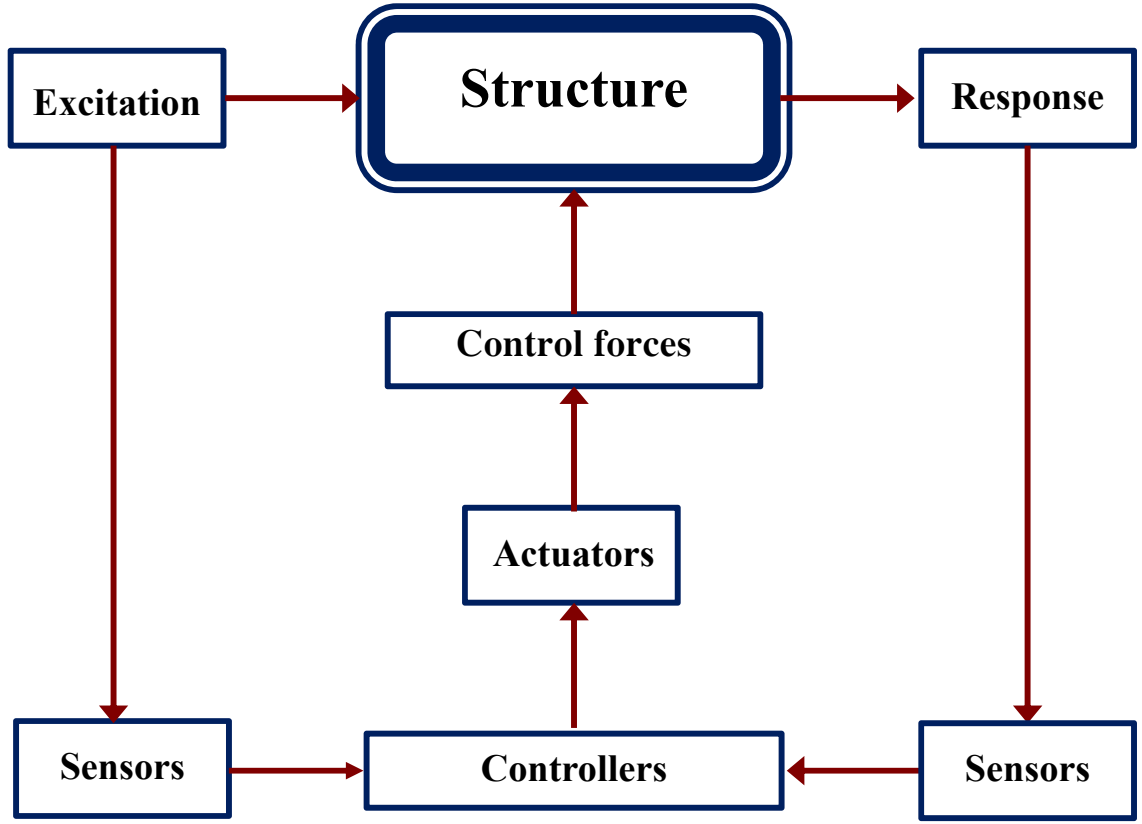




❑کنترل فعال سازه‌ها

سیستم کنترل مدار باز- بسته (Open-Closed loop)

در این نوع ساختار کنترلی، نیروهای کنترل براساس خروجی‌ها (پاسخ‌های سازه) و ورودی‌ها (نیروی خارجی) محاسبه شده و به سازه اعمال می‌شود. این نوع سیستم کنترلی نیز یک کنترل باز خور (Feedback control) است.



سیستم کنترل مدار باز بسته

(Open-Closed loop)

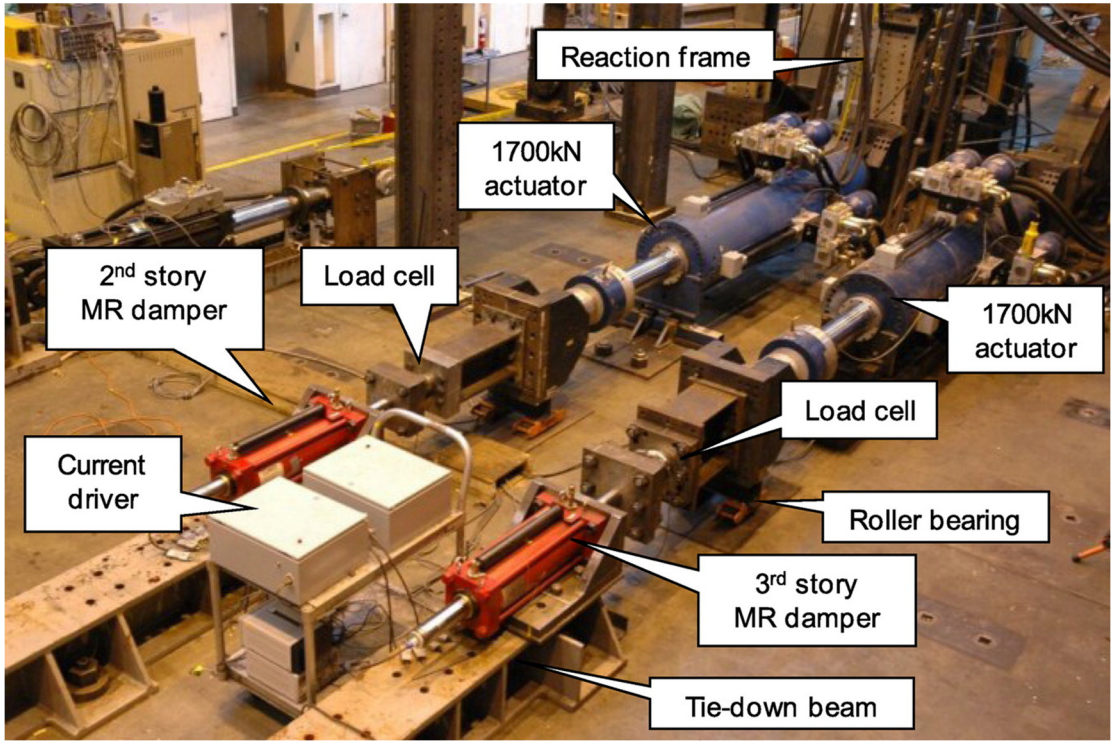
❑ محرک یا راه انداز (Actuator)

محرک (مولد نیرو):

دستگاه‌های مولد نیرو یا راه‌اندازها به منظور اعمال نیروی خارجی کنترلی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

یک محرک ایده‌آل باید سه شرط اصلی را دارا باشد:

- بتواند تولید نیروی زیادی نماید.
- در مدت زمان کوتاهی نیرو را اعمال نماید.
- انرژی مصرفی آن کم باشد.



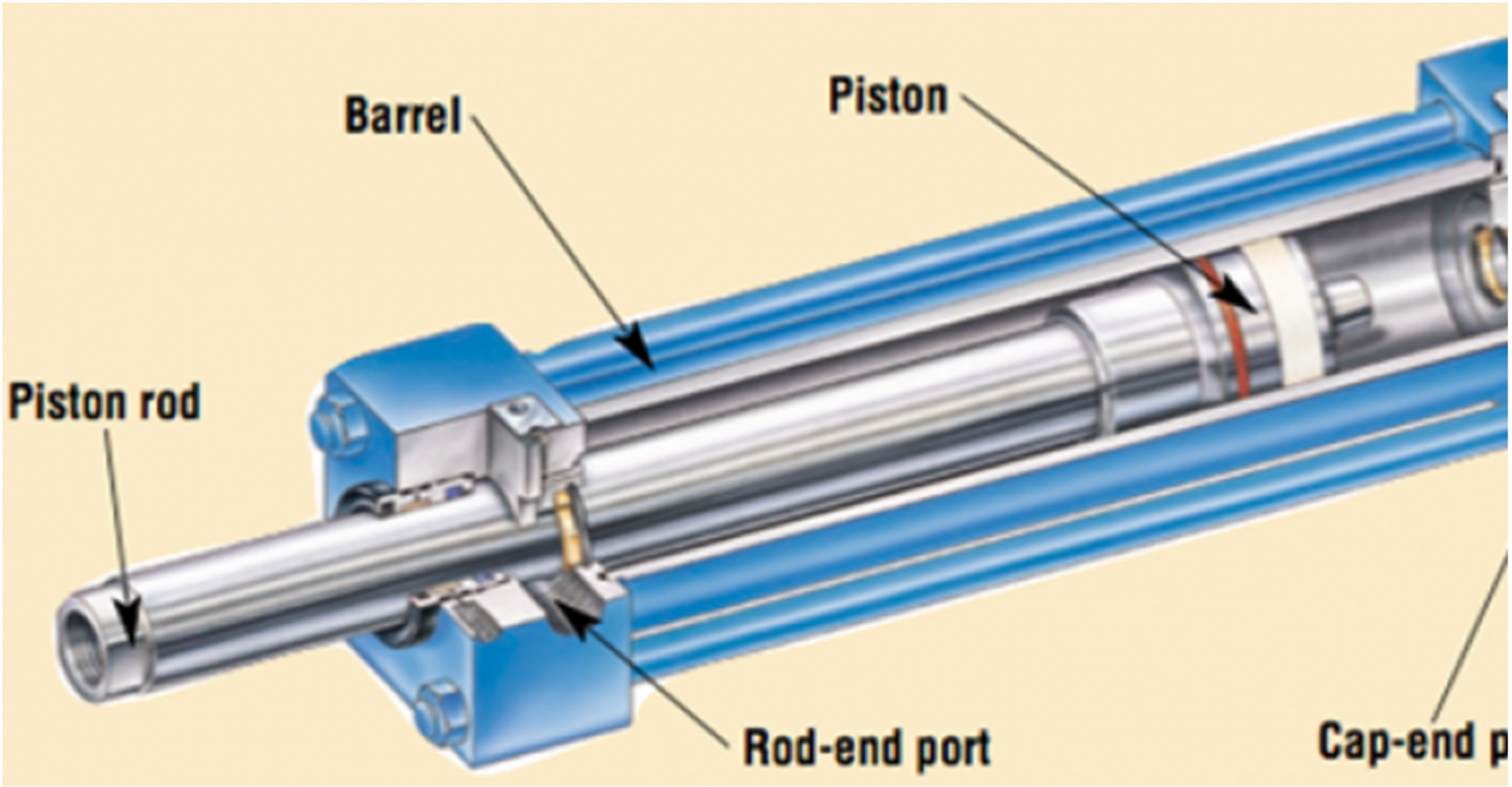
دو سوال در مورد محرک‌ها مطرح می‌شود:

- نیرو به چه صورتی ایجاد می‌شود؟
- چگونه نیرو به سازه انتقال داده می‌شود؟

https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000691

❑ انواع راه‌اندازها و نحوه کارکرد آن‌ها

ساختار بیشتر راه‌اندازه‌ها مشتمل بر یک پیستون و نیرویی است که به آن اعمال می‌شود تا باعث حرکت آن شود. حرکت پیستون و انتقال آن به سازه، نیروی کنترلی لازم را به وجود می‌آورد.

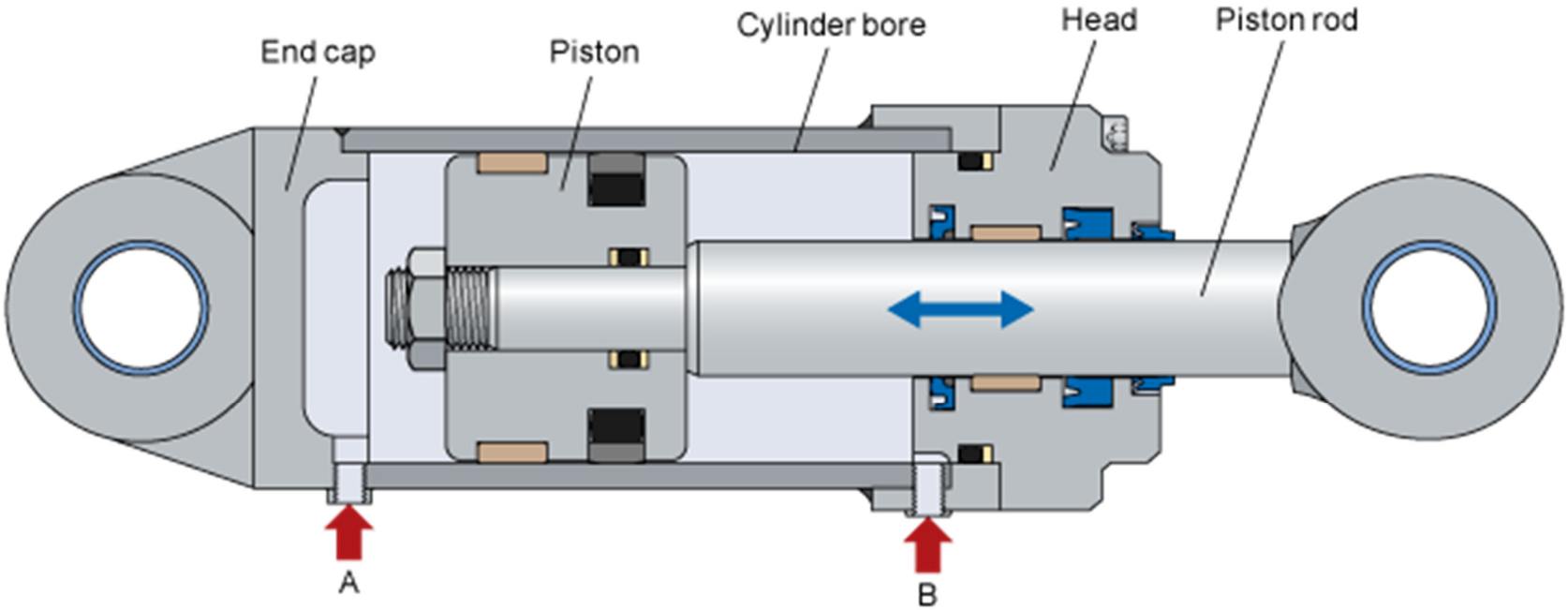


❑ انواع راه‌اندازها و نحوه کارکرد آن‌ها

سه نمونه متعارف محرک‌ها به شرح زیر است:

- **محرک هیدرولیکی (Hydraulic Actuator):**

در این نوع راه‌انداز، اعمال نیرو به پیستون که در داخل سیلندر حرکت می‌کند از طریق وارد یا خارج شدن مایع از روزنه می‌باشد



❑ انواع راه‌اندازها و نحوه کارکرد آن‌ها

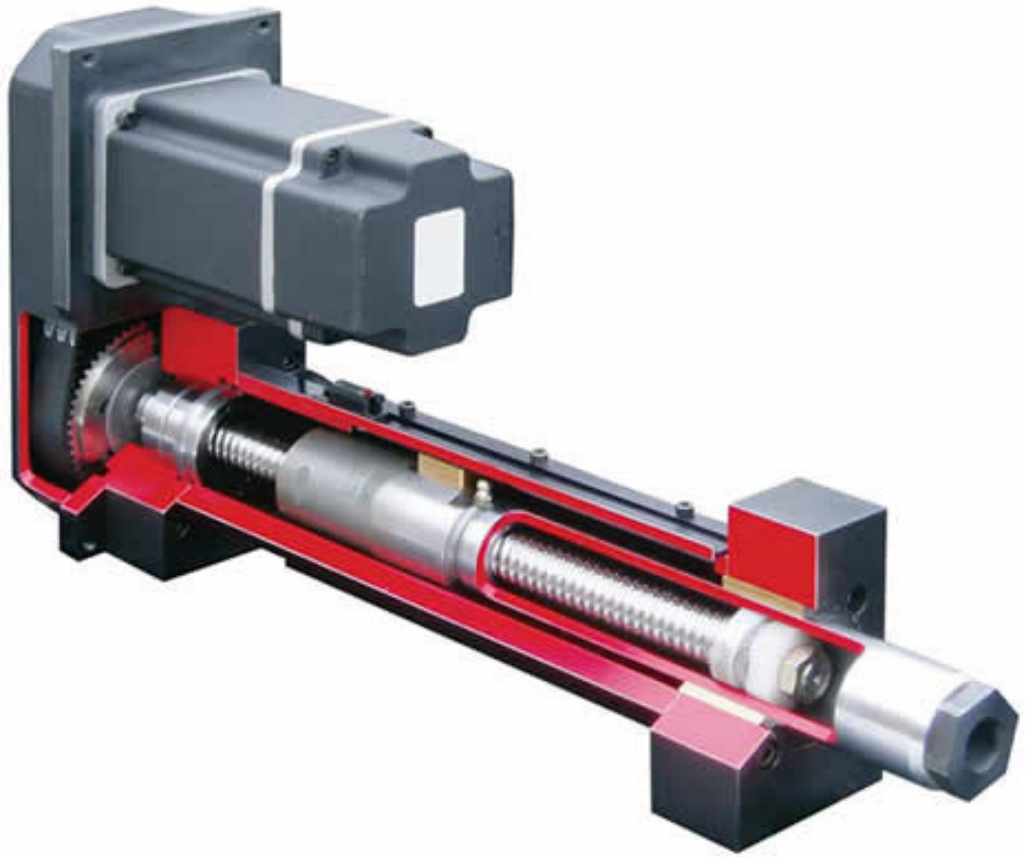
سه نمونه متعارف محرک‌ها به شرح زیر است:

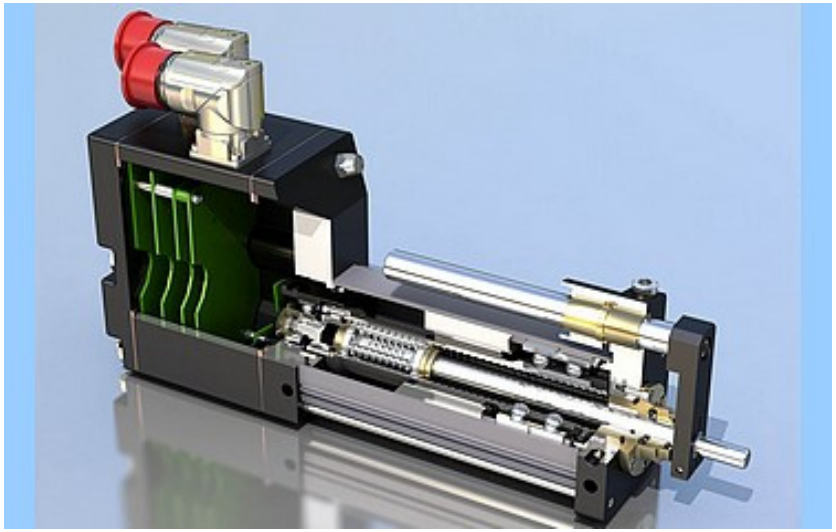
- **محرک هیدرولیکی (Hydraulic Actuator):**

❑ انواع راه‌اندازها و نحوه کارکرد آن‌ها

سه نمونه متعارف محرک‌ها به شرح زیر است:

- **محرک الکترومکانیکی (Electromechanical Actuator)**: در این نوع راه‌انداز، حرکت پیستون توسط دنده‌های برقی انجام می‌گیرد.



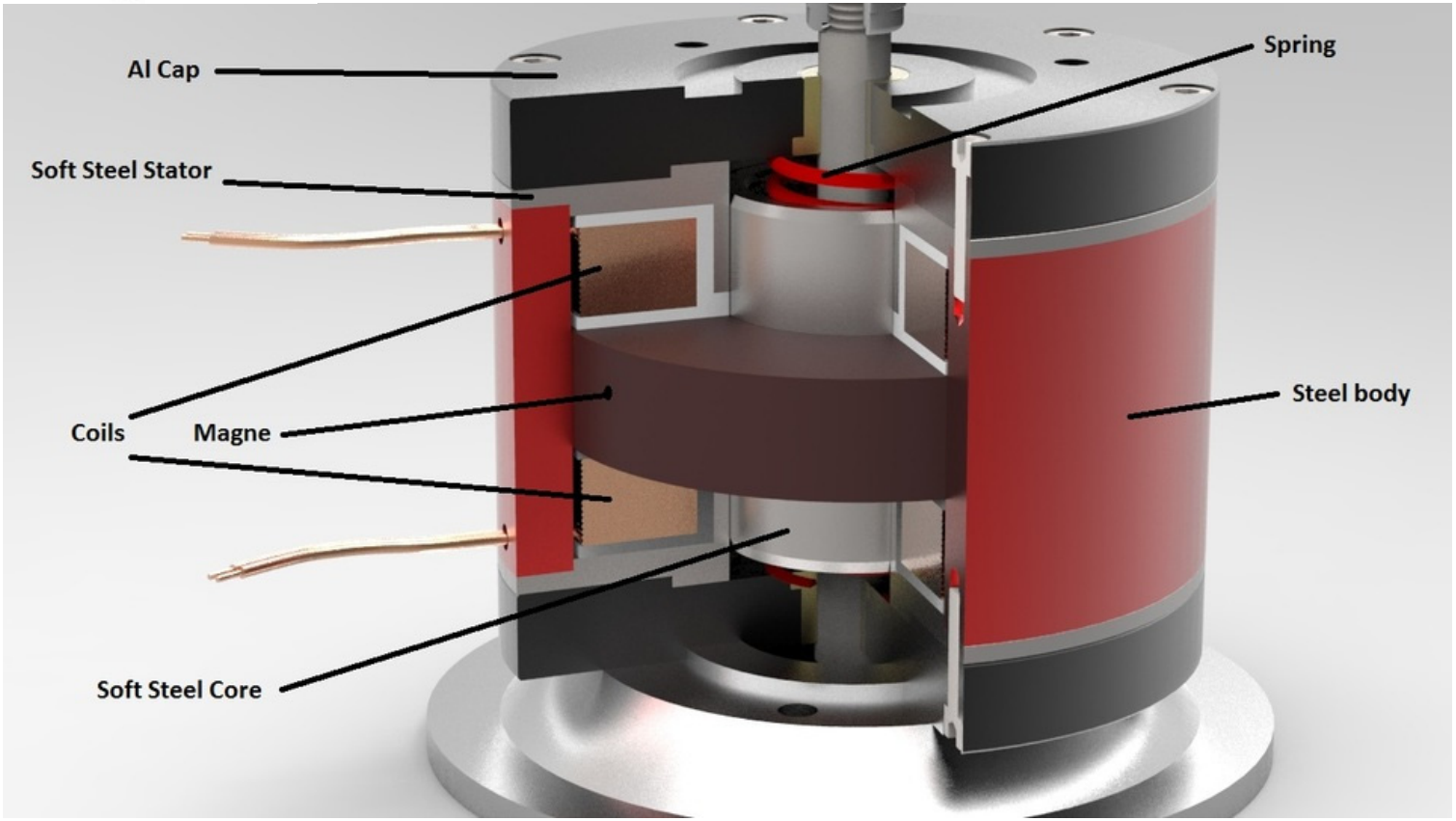


❑ انواع راه‌اندازها و نحوه کارکرد آن‌ها

سه نمونه متعارف محرک‌ها به شرح زیر است:

- **محرک الکترومغناطیسی (Electromagnetic Actuator):**

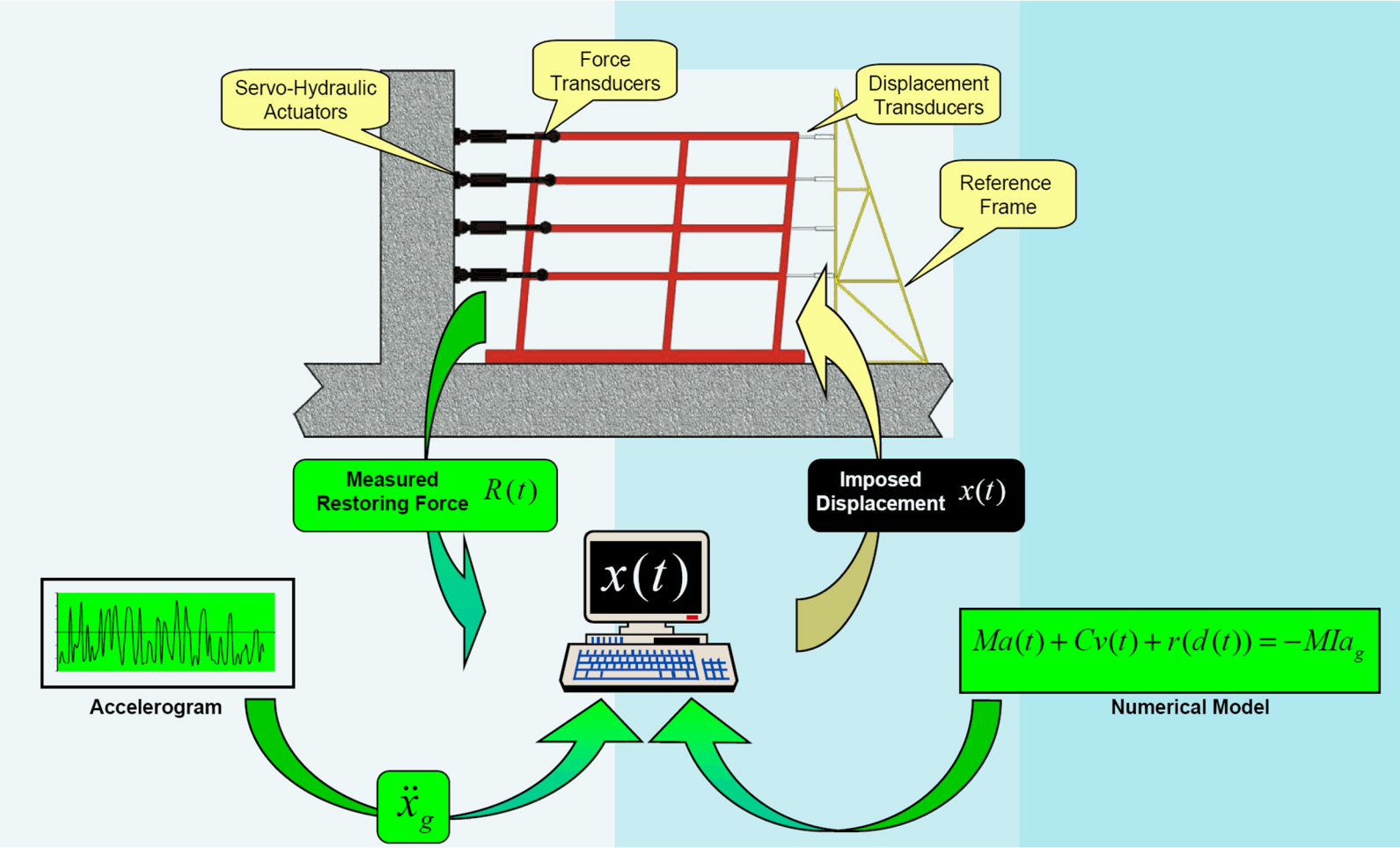
در این نوع راه‌انداز، حرکت پیستون توسط میدان مغناطیسی انجام می‌گیرد.



❑ روش انتقال نیرو از راه‌انداز به سازه

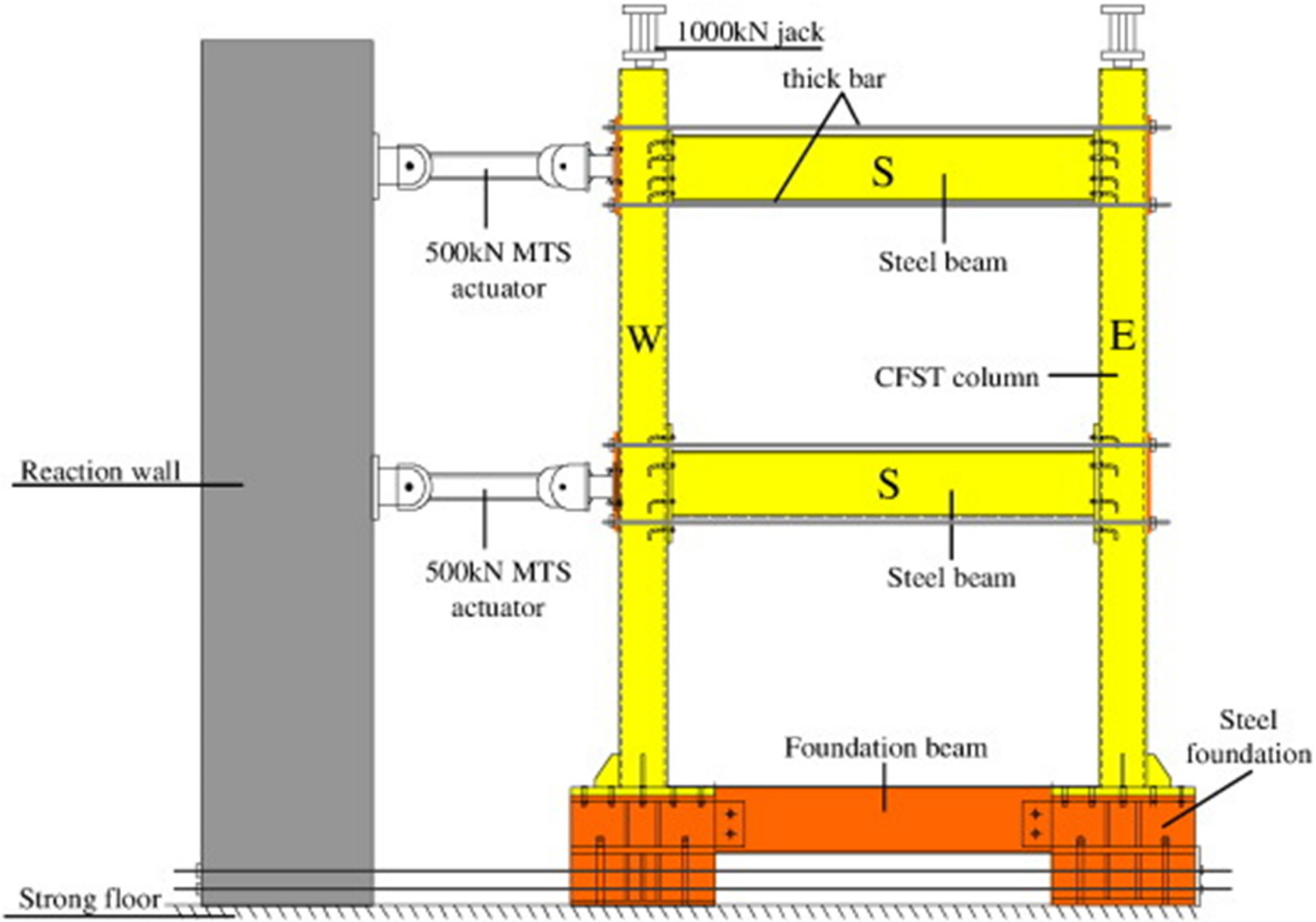
به شیوه‌های مختلفی می‌توان نیروی راه‌انداز را به سازه منتقل کرد:

محرک خارج از سازه: می‌توان راه‌انداز یا محرک را در منطقه‌ای مستقل (خارج) از سازه ثابت کرد و با حرکت پیستون نیروی لازم را به سازه انتقال داد.



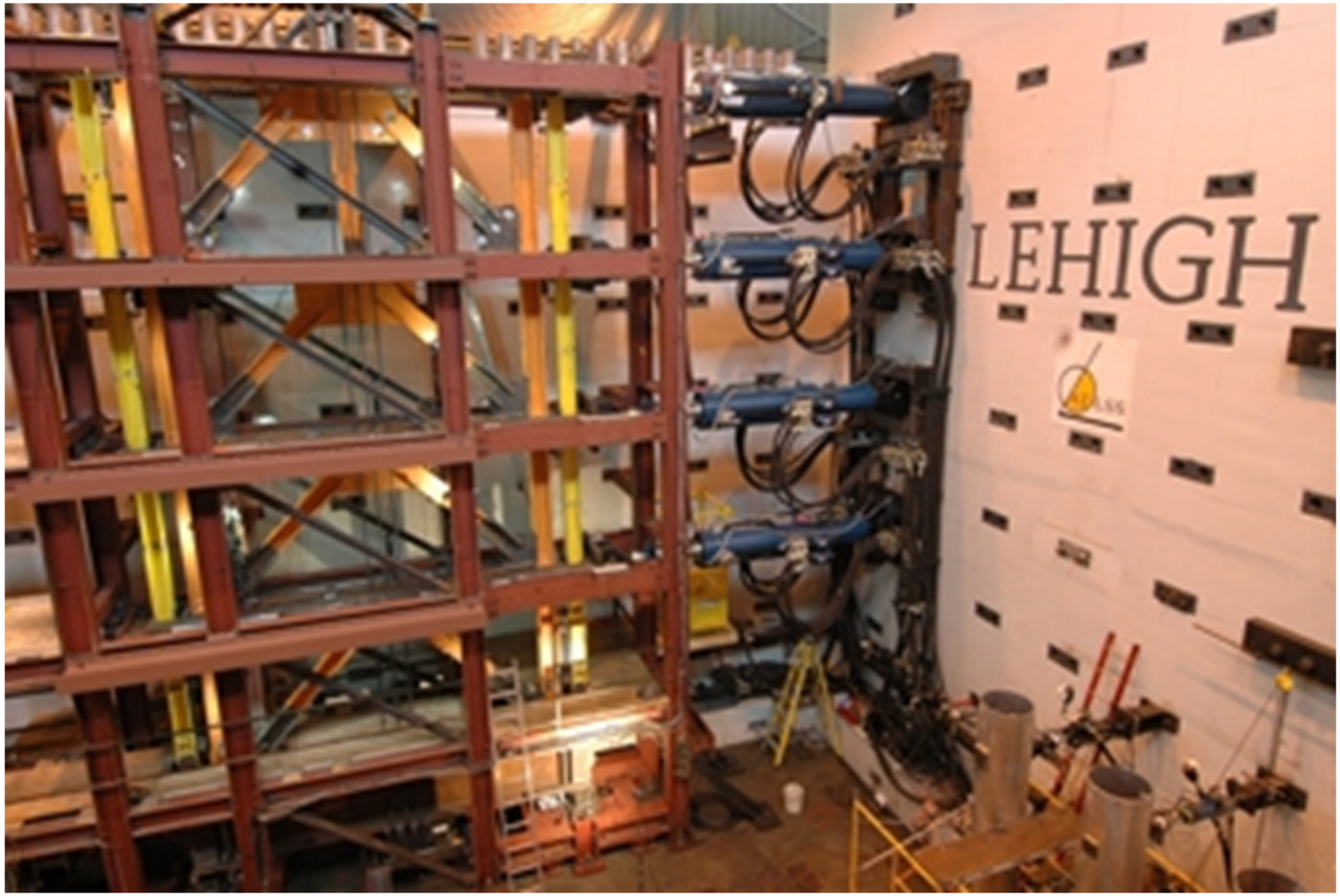
❑ روش انتقال نیرو از راه‌انداز به سازه

محرک خارج از سازه:



❑ روش انتقال نیرو از راه‌انداز به سازه

محرک خارج از سازه:

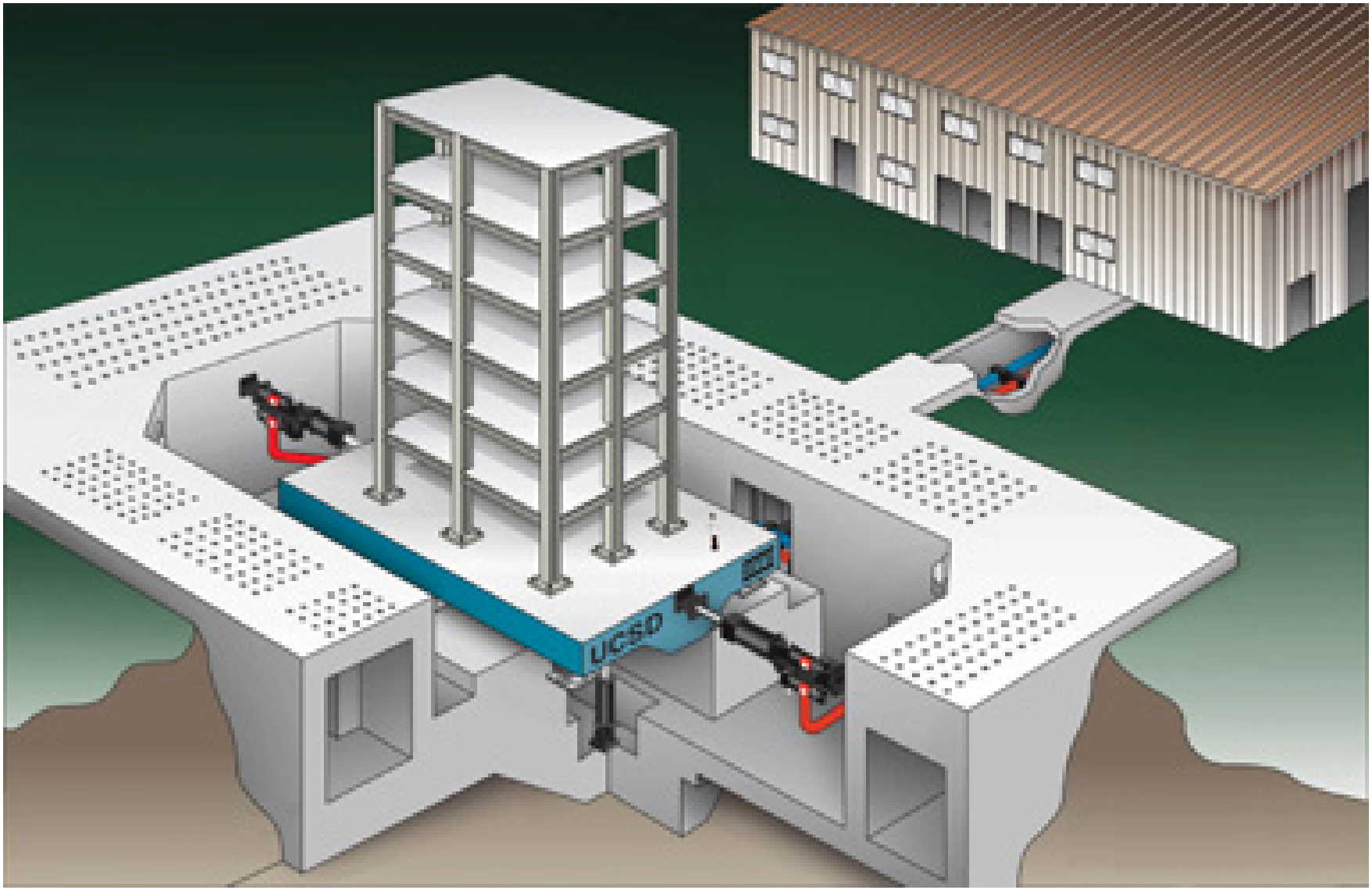


❑ روش انتقال نیرو از راه‌انداز به سازه

محرک خارج از سازه:

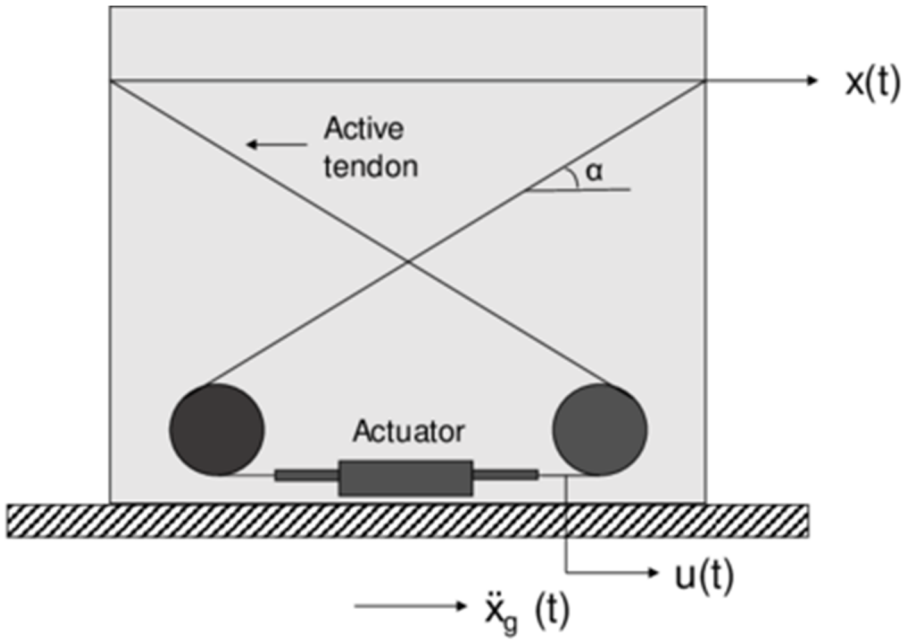
❑ روش انتقال نیرو از راه‌انداز به سازه

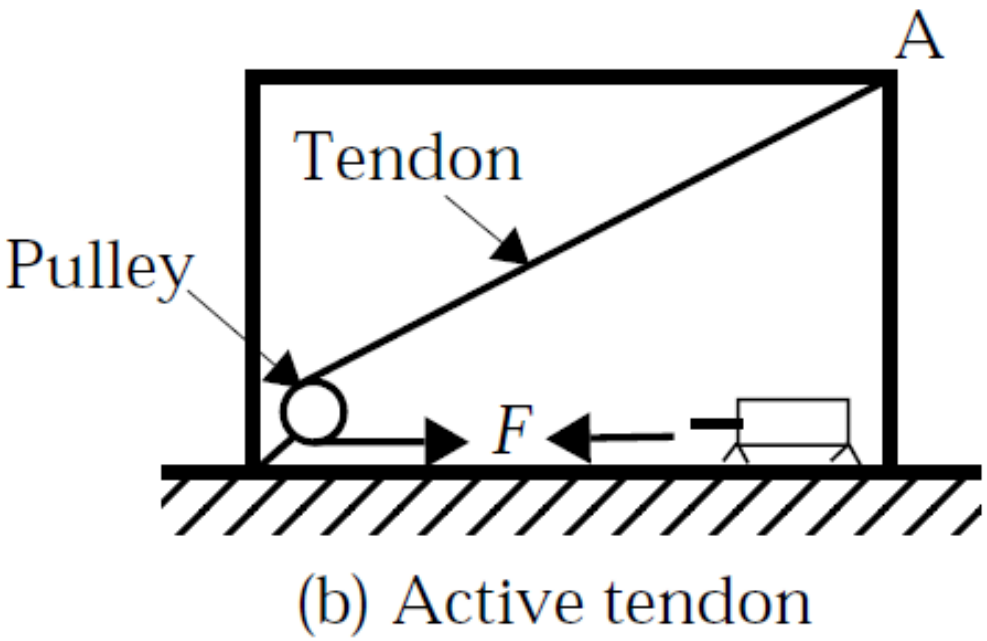
محرک خارج از سازه:



❑ روش انتقال نیرو از راه‌انداز به سازه

محرک داخل سازه: در این حالت راه‌انداز در سازه نصب می‌شود و باید اندرکنش آن با سازه را در محاسبات لحاظ نمود.

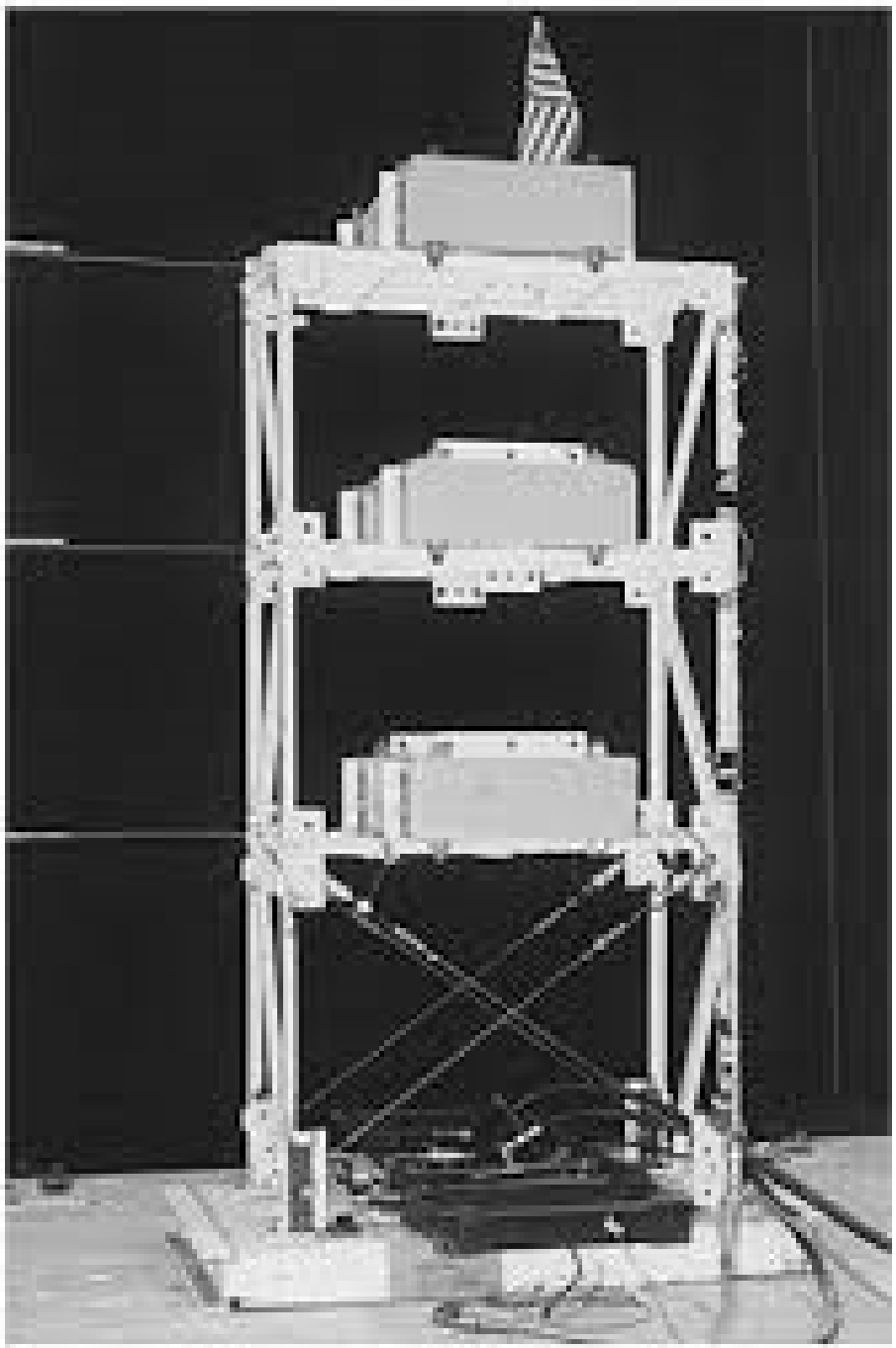




(b) Active tendon

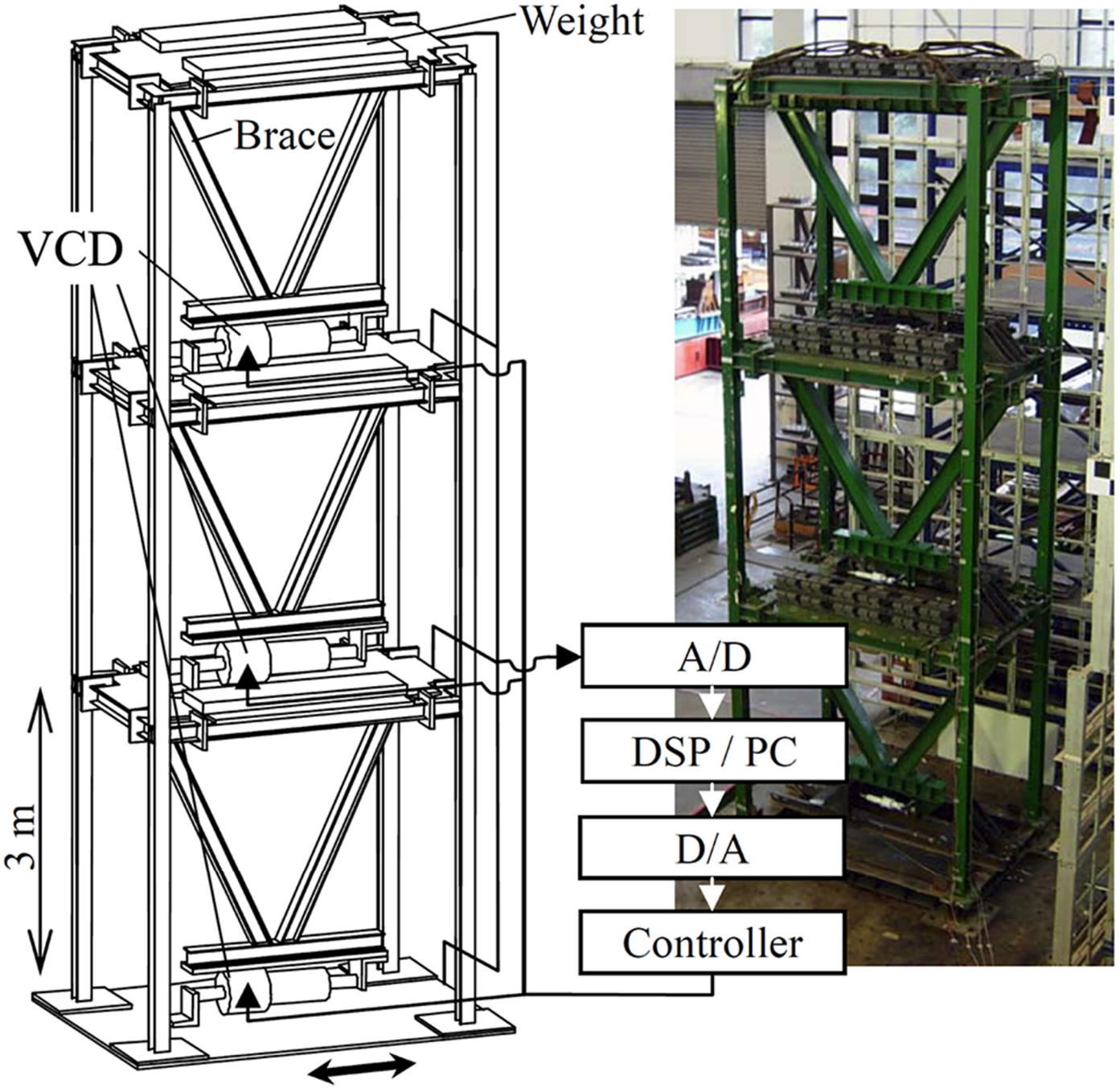
❑ روش انتقال نیرو از راه‌انداز به سازه

محرک داخل سازه:



❑ روش انتقال نیرو از راه‌انداز به سازه

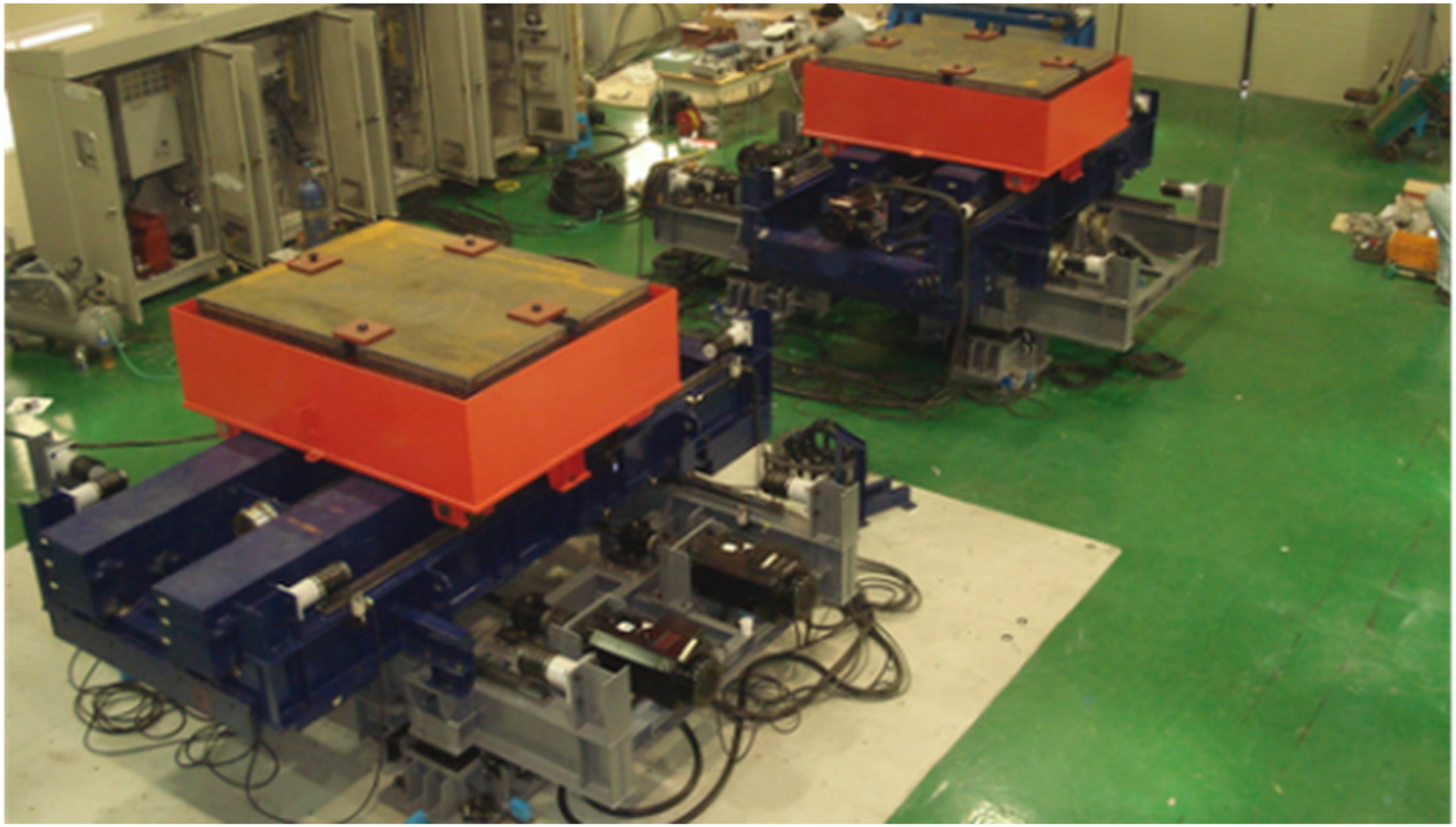
محرک داخل سازه:



❑ روش انتقال نیرو از راه‌انداز به سازه

محرک بر روی سازه: می‌توان راه‌انداز را بر روی سازه قرار داد. در این روش نیرو به یک جرم متحرک وارد می‌شود و از طریق حرکت این جرم، نیروی کنترلی لازم به سازه اعمال می‌گردد.

میراگر جرمی فعال
(AMD: Active Mass Damper)



❑ روش انتقال نیرو از راه‌انداز به سازه

محرک بر روی سازه:

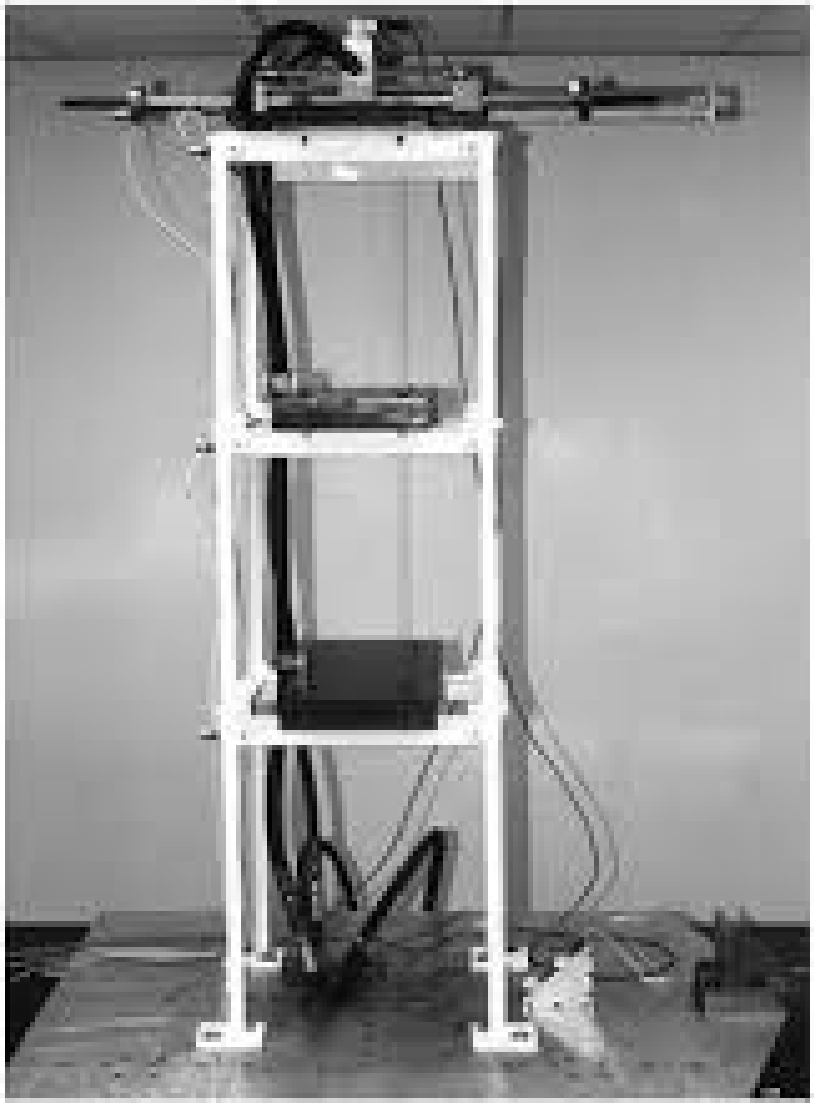


Figure 1. Three Degree-of-Freedom Test Structure with AMD System.

❑کنترل‌گرهای نیمه‌فعال (Semiactive controller)

با توجه به مشکلات راه‌اندازها نظیر انرژی مصرفی زیاد و نحوه انتقال نیرو (انتقال نیروی زیاد در یک نقطه متمرکز از سازه) تجهیزات کنترلی نیمه‌فعال مطرح شدند. تجهیزات کنترلی نیمه‌فعال نظیر بعضی از انواع میراگرها، دستگاه‌های با سختی متغیر و مصالح هوشمند این مزیت را دارند که با تغییر مشخصات خود نیروهای کنترلی لازم را هنگام وقوع زلزله، با مصرف کم انرژی، به سازه اعمال نمایند؛ بنابراین به این تجهیزات یا مصالح، ابزار یا مصالح تطبیقی (Adaptive Device or Material) نیز گفته می‌شود. در ساختمان‌های مدرن بخشی از مقاومت جانبی (در حدود 30%) بر عهده تجهیزات نیمه فعال و مابقی آن (70%) بر عهده خود سازه می‌باشد.

نمونه‌هایی از تجهیزات نیمه‌فعال به شرح زیر است:

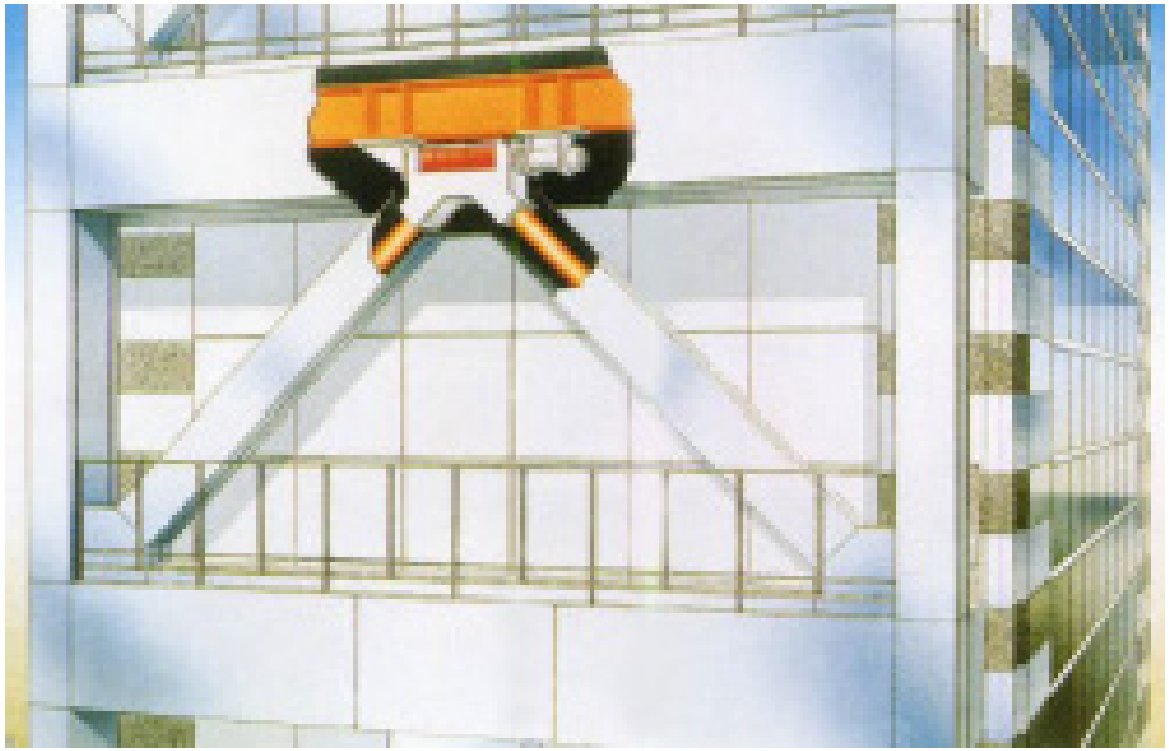
1. میراگرهای هیدرولیکی نیمه فعال با روزنه متغیر
2. محرک پیزوالکتریک
3. محرک با آلیاژهای حافظه‌دار
4. محرک حاوی سیال کنترل‌پذیر

❑ انواع تجهیزات نیمه‌فعال

Semi-active hydraulic Dampers (SHD) with a variable orifice

1- میراگرهای هیدرولیکی نیمه‌فعال با روزنه متغیر

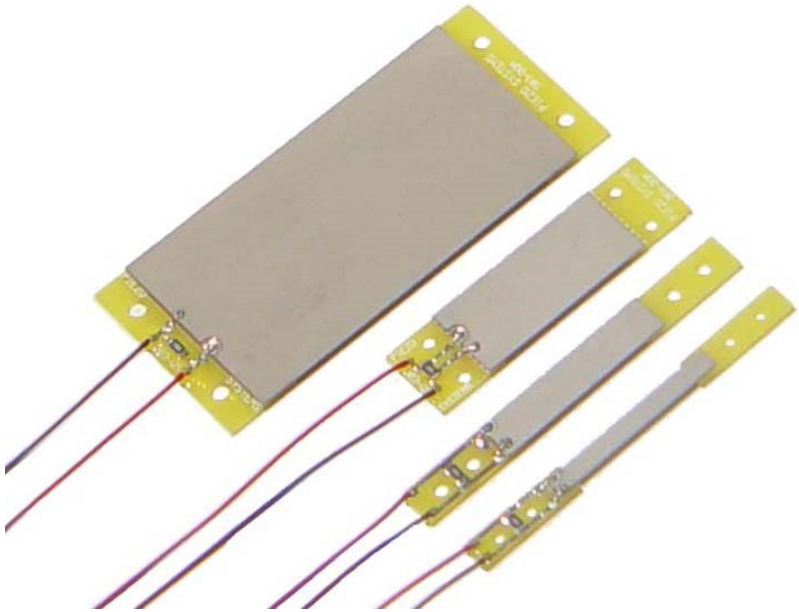
این نوع میراگر با تنظیم خودکار روزنه ورود و خروج سیال می‌تواند نیروی کنترلی تولید شده را تغییر دهد. به طور نمونه میراگر SHD را شرکت Kajima ژاپن تولید می‌کند. ضریب میرایی این دستگاه به صورت لحظه‌ای از طریق باز و بسته شدن یک روزنه کوچک که دو بخش محفظه هیدرولیکی را به هم مرتبط می‌کند تنظیم می‌شود. این دستگاه قادر است با مصرف 70 watt برق نیروی 100 kN تولید نماید.



❑ انواع تجهیزات نیمه‌فعال

2- محرک پیزوالکتریک (Piezoelectric Actuator)

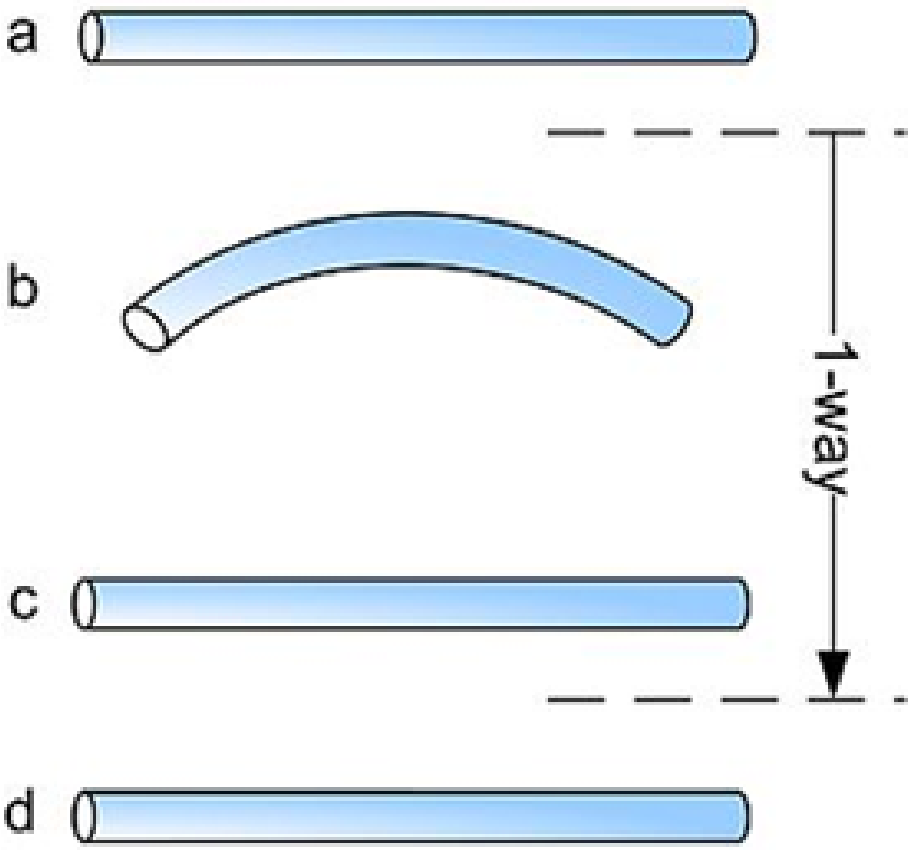
نوعی مصالح orthotropic می‌باشند که دارای یک صفحه تقارن و یک محور تقارن است. خصوصیات مصالح در صفحه تقارن در هر جهت یکسان می‌باشد؛ اما عمود بر صفحه در راستای محور تقارن متفاوت است. به طور همزمان می‌تواند به عنوان حسگر و محرک کار کند. محرک پیزوالکتریک مصالح آن تحت اثر ولتاژ الکتریکی ساختار مولوکولی آن‌ها تغییر یافته و در دسته‌های مختلف تغییر شکل می‌دهند.



❑ انواع تجهیزات نیمه‌فعال

3-محرک با آلیاژهای حافظه‌دار (Shape Memory Alloys Actuator)

آلیاژ حافظه‌دار گروهی از آلیاژهای فلزی هستند که این توانایی را دارند که اگر آن‌ها را تا بالای دمای ویژه‌ای گرم کنیم، قادر به بازیابی شکل اولیه خود خواهند بود.

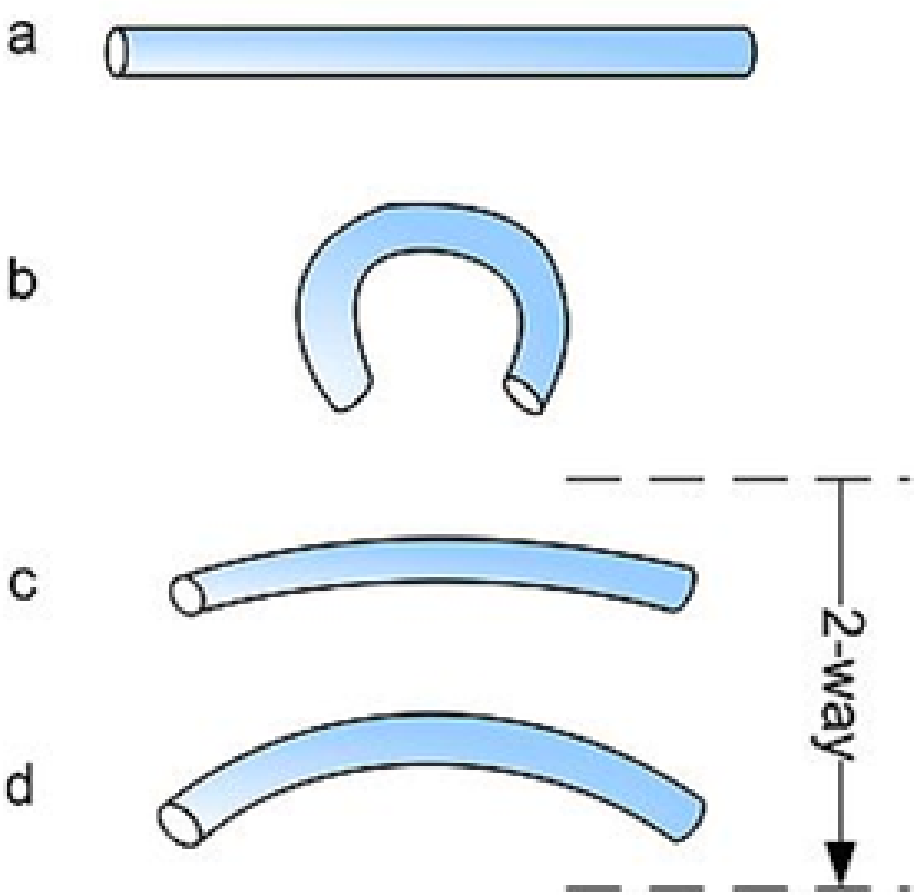


بر این اساس، خاصیت حافظه‌داری، به دو دسته‌ی عمده تقسیم می‌شود:

1.در دسته‌ی اول، تغییرشکل ایجادشده، فقط با گرم‌کردن به حالت اولیه‌ی قبل از تغییرشکل باز می‌گردد و اگر جسم را دوباره سرد کنیم، تغییر جدیدی در شکل آن مشاهده نمی‌شود که این پدیده را «حافظه‌داری یک‌طرفه» نامیده‌اند. در آلیاژهایی که دارای این ویژگی می‌باشند، هدف، بازیابی شکل اولیه‌ی نمونه‌ای است که تحت بارگذاری مکانیکی قرار گرفته و تغییرشکل داده‌است.

❑ انواع تجهیزات نیمه‌فعال

3-محرک با آلیاژهای حافظه‌دار (Shape Memory Alloys Actuator)



2.دسته‌ی دوم از این آلیاژها، پدیده‌ی «حافظه‌داری دوطرفه» را از خود بروز می‌دهند. این آلیاژها قادرند با سرد و گرم‌شدن در محدوده‌ی معینی از دما، دوباره به‌حالت قبلی خود بازگردند؛ یعنی، در دو طرف محدوده‌ی تغییر دما، شکل مشخصی از خود به نمایش می‌گذارند. آلیاژهایی که در این گروه هستند، کاربردی متفاوت دارند؛ بدین‌گونه در این نوع کاربرد، نیازی به اعمال نیرو نمی‌باشد و فقط با فراهم‌کردن شرایط دمایی معین، در دو سر بازه‌ی دمایی تعریف‌شده برای آلیاژ حافظه‌دار دوطرفه، می‌توان به شکل معین و ازپیش‌تعیین‌شده‌ای برای این دسته از آلیاژها رسید. با اصلاح میکروساختار آلیاژهای حافظه‌دار دوطرفه، می‌توان به خواص پایدارتری رسید. به‌طور مثال، تربیت آلیاژهای حافظه‌داری که دارای استحکام بالاتری می‌باشند (دانه‌های ریزتر) به‌منظور رسیدن به خاصیت حافظه‌داری دوطرفه، کار دشوارتری می‌باشد.

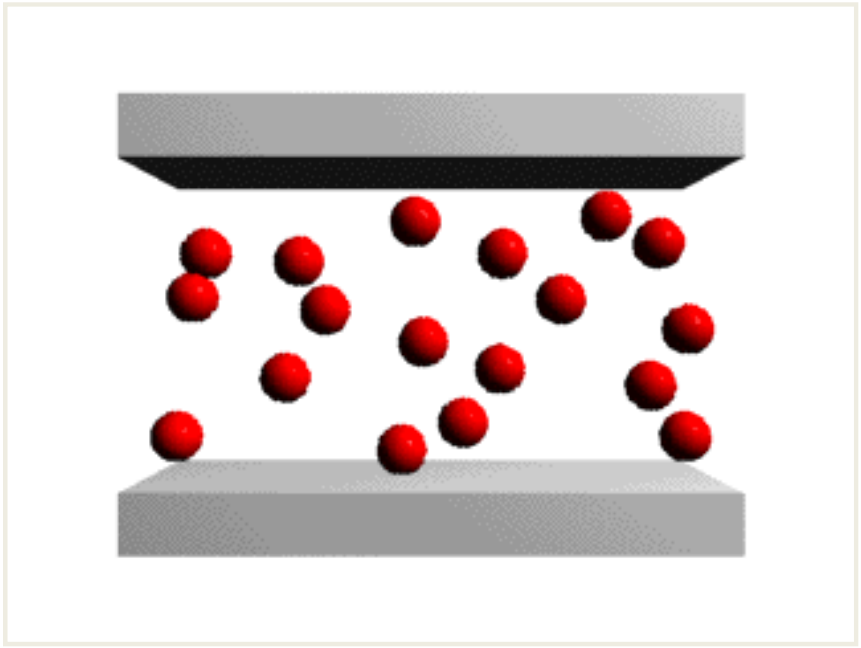
❑ انواع تجهیزات نیمه‌فعال

3-محرک با آلیاژهای حافظه‌دار (Shape Memory Alloys Actuator)

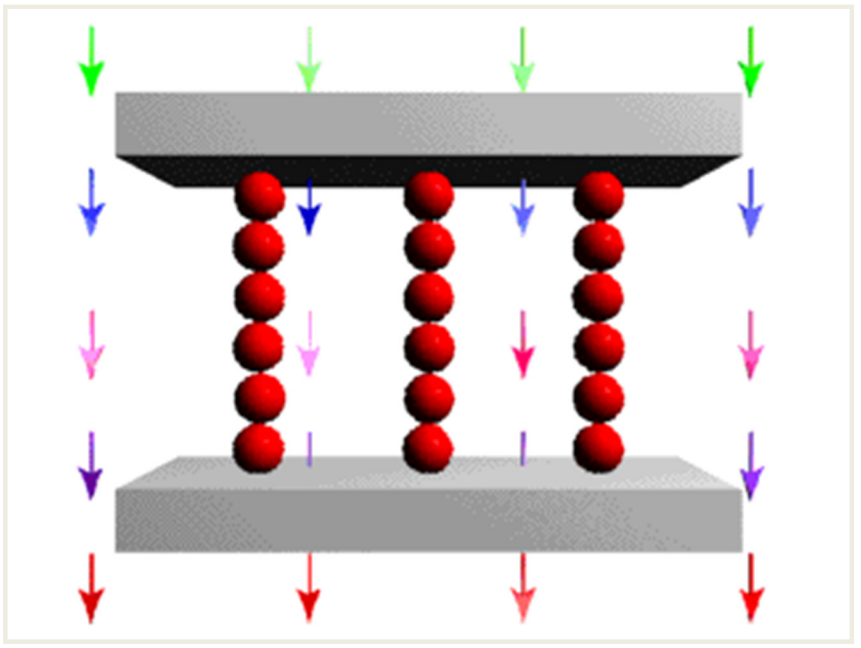
❑ انواع تجهیزات نیمه‌فعال

4- محرک حاوی سیال کنترل‌پذیر (Controllable Fluids)

سیالات کنترل‌پذیر سیالاتی هستند که تحت اثر میدان الکتریکی یا مغناطیسی از حالت مایع به حالت نیمه‌جامد تغییر حالت می‌دهند. در صورتی که سیال تحت اثر میدان الکتریکی تغییر حالت دهد به آن ER (Elect-Rheological) و در صورتی که تحت اثر میدان مغناطیسی تغییر حالت دهد به آن MR (Magneto-Rheological) می‌گویند. با استفاده از این نوع سیالات، میراگرهای مختلفی ساخته شده است.



Without Magnetic (Electric) Field



With Magnetic (Electric) Field

❑ انواع تجهیزات نیمه‌فعال

4- محرک حاوی سیال کنترل‌پذیر (Controllable Fluids)

به طور نمونه میراگر حاوی سیال رئومغناطیسی (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 نمایید.