



دانشگاه گیلان
دانشکده کشاورزی
گروه مهندسی بیوسیستم

ابزار اندازه گیری و کنترل Instrumentation and Control

فصل ششم:

اندازه گیری نیرو، گشتاور و فشار

مدرس:
دکتر کاوه ملازاده

مقدمه

○ مبدل هایی که نیرو، گشتاور یا فشار را اندازه می گیرند، معمولاً ماوی عضوی الاستیک هستند که کمیت مکانیکی مورد نظر را به یک انحراف یا کرنش تبدیل می کند. با استفاده از یک مسگر انحرافی (تغییر شکل) و یا مجموعه ای از کرنش سنج ها می توان سیگنال الکتریکی متناسب با کمیت های فوق (نیرو، گشتاور و فشار) را تولید کرد.

○ مبدل های تجاری متعدد و فراوانی برای اندازه گیری نیرو (سلول نیرو)، گشتاور (سلول گشتاور) و فشار وجود دارند. اعضای ارتجاعی مختلفی نظیر میله ها، ستون ها، ملقه ها، تیرها و استوانه ها، و اشترها، دیافراگم ها، بال های برشی و بسیاری شکل های دیگر برای کاربردهای خاص، در طراحی این مبدل ها استفاده شده اند.



اندازه گیری نیرو (سلول های نیرو (Load Cells)



○ سلول نیروی تیری
Beam type load cell



○ سلول نیروی میله ای
Rod type load cell



○ سلول نیروی بال برشی
Shear web type load cell



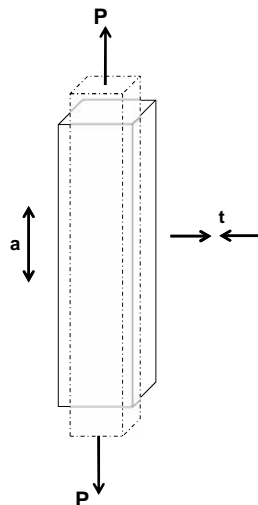
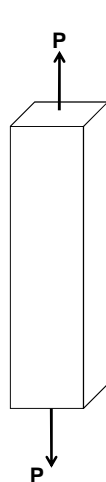
○ سلول نیروی حلقه ای
Ring type load cell

۲

ابزار اندازه گیری و کنترل - گروه مهندسی بیوسیستم - دانشگاه کردستان
<http://agri.uok.ac.ir/kmollazade>



سلول نیروی میله ای (Rod type load cell)



نیرو (کششی یا فشاری)

$$a = P/AE$$

مدول الاستیسیته ماده میله
مسامت سطح مقطع میله
گرنش مموری

$$t = - P/AE$$

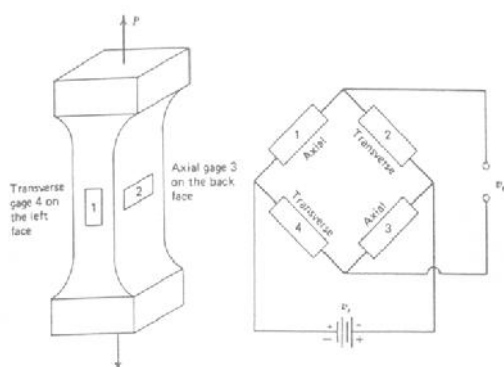
نسبت پواسون ماده میله
گرنش عرضی

۳

ابزار اندازه گیری و کنترل - گروه مهندسی بیوسیستم - دانشگاه کردستان
<http://agri.uok.ac.ir/kmollazade>



سلول نیروی میله ای (Rod type load cell)



$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = S_g \varepsilon_a = \frac{S_g P}{AE} \quad (1)$$

$$\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_4}{R_4} = S_g \varepsilon_t = -\nu \frac{S_g P}{AE}$$

$$v_o = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) v_s \quad (1) \rightarrow v_o = \frac{S_g P (1 + \nu) v_s}{2AE} \rightarrow P = \frac{2AE}{S_g (1 + \nu) v_s} v_o$$

$$S = \frac{v_o}{P} = \frac{S_g (1 + \nu) v_s}{2AE}$$

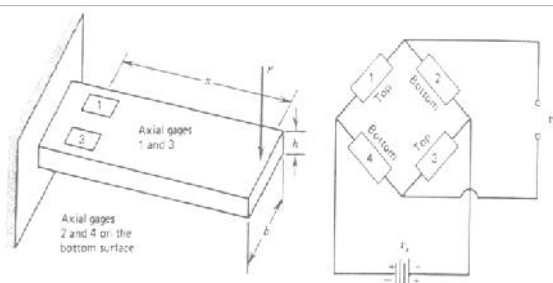
مساسیت سلول نیرو

۴

ابزار اندازه گیری و کنترل - گروه مهندسی بیوسیستم - دانشگاه کردستان
http://agri.uok.ac.ir/kmollazade



سلول نیروی تیری (Beam type load cell)



○ سلول های نیروی نوع تیری عموماً در جاهایی استفاده می شوند که مقدار نیرو کم است به طوری که نوع میله ای برای اثرپذیری فیلی سفت است.

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\varepsilon_4 = \frac{6M}{Ebh^2} = \frac{6Px}{Ebh^2} \rightarrow \frac{\Delta R}{R} = S_g \varepsilon \rightarrow \frac{\Delta R_1}{R_1} = -\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = -\frac{\Delta R_4}{R_4} = \frac{6S_g Px}{Ebh^2} \quad (1)$$

$$v_o = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) v_s \quad (1) \rightarrow v_o = \frac{6S_g Px v_s}{Ebh^2} \rightarrow P = \frac{Ebh^2}{6S_g x v_s} v_o$$

$$S = \frac{v_o}{P} = \frac{6S_g x v_s}{Ebh^2}$$

مساسیت سلول نیرو

۵

ابزار اندازه گیری و کنترل - گروه مهندسی بیوسیستم - دانشگاه کردستان
http://agri.uok.ac.ir/kmollazade



سلول نیروی ملقه ای (Ring type load cell)

در این نوع سلول نیرو از یک ملقه ارتجاعی استفاده می شود. المان ملقوی می تواند طوری طراحی شود که با تغییر شعاع (R)، ضخامت (t) یا عمق (w)، ممدوده وسیعی از بارگذاری ها را جهت اندازه گیری پوشش دهد. به عنوان مسگر می توان از کرنش سنج و یا از یک LVDT استفاده کرد.

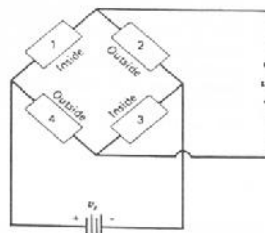
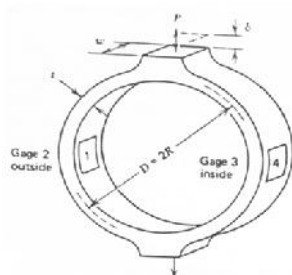


۶

ابزار اندازه گیری و کنترل - گروه مهندسی بیوسیستم - دانشگاه کردستان
http://agri.uok.ac.ir/kmollazade



سلول نیروی ملقه ای با کرنش سنج



$$\begin{aligned} \frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = S_g \epsilon_a = \frac{S_g P}{AE} \\ \frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_4}{R_4} = S_g \epsilon_t = -\nu \frac{S_g P}{AE} \end{aligned} \quad (1)$$

$$v_o = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) v_s \quad (1) \rightarrow v_o = \frac{S_g P (1 + \nu) v_s}{2AE} \rightarrow P = \frac{2AE}{S_g (1 + \nu) v_s} v_o$$

$$S = \frac{v_o}{P} = \frac{S_g (1 + \nu) v_s}{2AE}$$

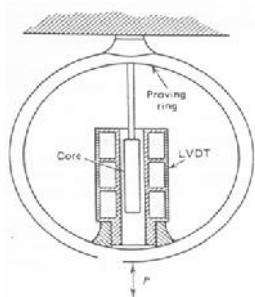
مساسیت سلول نیرو

۷

ابزار اندازه گیری و کنترل - گروه مهندسی بیوسیستم - دانشگاه کردستان
http://agri.uok.ac.ir/kmollazade



سلول نیروی ملقه ای با LVDT



نیرو (کشش یا فشار) $\delta = 1.79 \frac{PR^3}{Ewt^3}$

شعاع ملقه R

ضخامت ملقه t

عمق (پهنای) ملقه w

مدول الاستیسیته ماده ملقه E

جابجایی (کشیدگی یا فشردگی) δ

مساسیت LVDT $v_o = S v_s \rightarrow v_o = 1.79 \frac{SPR^3 v_s}{Ewt^3} \rightarrow P = 0.56 \frac{Ewt^3}{SR^3 v_s} v_o$

ولتاژ خروجی LVDT v_o

ولتاژ اعمالی به ملقه اولیه LVDT v_s

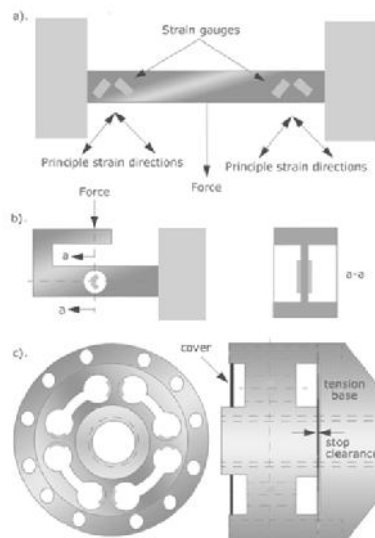
مساسیت سلول نیرو $S_t = \frac{v_o}{P} = 1.79 \frac{SR^3 v_s}{Ewt^3}$

۸

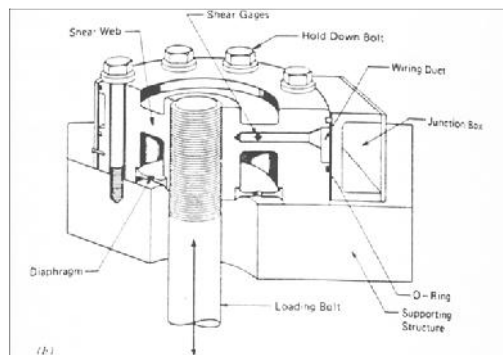
ابزار اندازه گیری و کنترل - گروه مهندسی بیوسیستم - دانشگاه کردستان
http://agri.uok.ac.ir/kmollazade



سلول نیروی بال برشی (Shear web type load cell)



این سلول نیرو، که به سلول نیروی تفت یا مقطع طولی هم نیز معروف است، در جاهایی که فضای کافی در امتداد نقطه اثر نیرو وجود ندارد، کاربرد دارد.



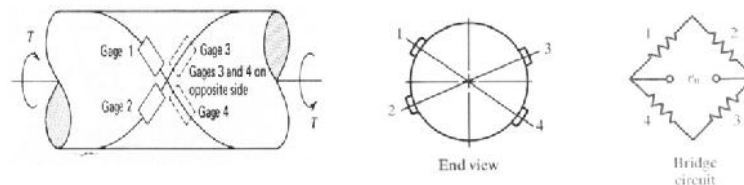
۹

ابزار اندازه گیری و کنترل - گروه مهندسی بیوسیستم - دانشگاه کردستان
http://agri.uok.ac.ir/kmollazade



اندازه گیری گشتاور پیچشی (سلول های گشتاور پیچشی (Torsional Torque Cells))

○ سلول های گشتاور پیچشی، مبدل هایی هستند که گشتاور پیچشی اعمالی را به سیگنال فرومبی الکتریکی تبدیل می کنند.



گشتاور پیچشی اعمالی

قطر میله

$$\tau_{xz} = \frac{TD}{2J} = \frac{16T}{\pi D^3}$$

تنگش برشی در میله

ممان اینرسی قطبی مقطع میله

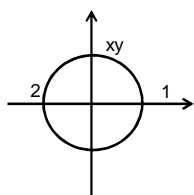
۱۰

ابزار اندازه گیری و کنترل - گروه مهندسی بیوسیستم - دانشگاه کردستان
http://agri.uok.ac.ir/kmollazade



سلول های گشتاور پیچشی (Torsional Torque Cells)

○ در حالت پیچش خالص داریم:



$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 0$$

$$\sigma_1 = -\sigma_2 = \tau_{xz} = \frac{16T}{\pi D^3}$$

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E}(\sigma_1 - \nu\sigma_2) = \frac{16T}{\pi D^3} \left(\frac{1+\nu}{E} \right) \quad (1)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E}(\sigma_2 - \nu\sigma_1) = -\frac{16T}{\pi D^3} \left(\frac{1+\nu}{E} \right)$$

$$\frac{\Delta R}{R} = S_g \varepsilon \xrightarrow{(1)} \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} = \frac{16T}{\pi D^3} \left(\frac{1+\nu}{E} \right) S_g \quad (2)$$

$$v_o = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) v_s \xrightarrow{(2)} v_o = \frac{16T}{\pi D^3} \left(\frac{1+\nu}{E} \right) S_g v_s \longrightarrow T = \frac{\pi D^3 E}{16(1+\nu) S_g v_s} v_o$$

$$S = \frac{v_o}{T} = \frac{16(1+\nu) S_g v_s}{\pi D^3 E}$$

مساسیت سلول گشتاور

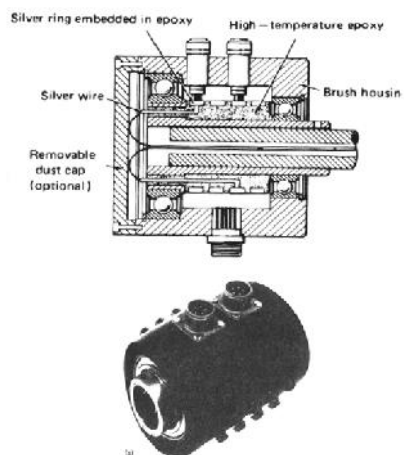
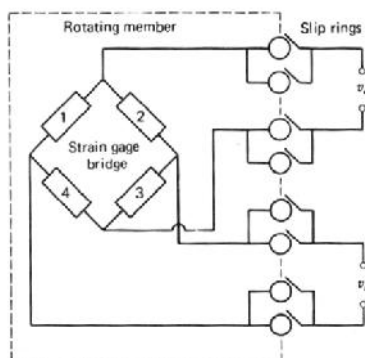
۱۱

ابزار اندازه گیری و کنترل - گروه مهندسی بیوسیستم - دانشگاه کردستان
http://agri.uok.ac.ir/kmollazade



اندازه گیری گشتاور پیچشی بر روی محورهای دوار

○ انتقال سیگنال با ملقه های لغزشی (سرشی)



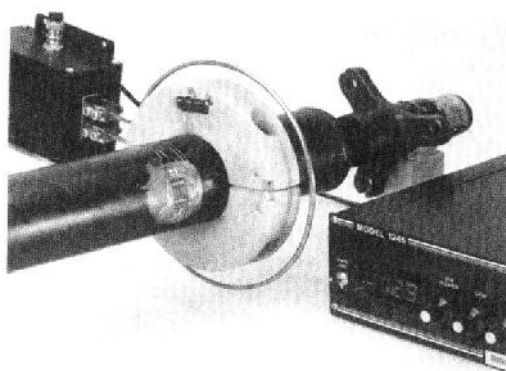
۱۲

ابزار اندازه گیری و کنترل - گروه مهندسی بیوسیستم - دانشگاه کردستان
<http://agri.uok.ac.ir/kmollazade>



اندازه گیری گشتاور پیچشی بر روی محورهای دوار

○ انتقال سیگنال از طریق تله متری

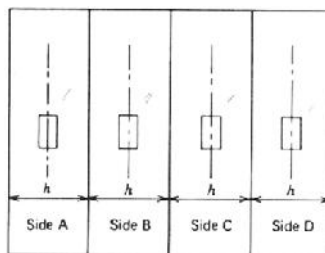
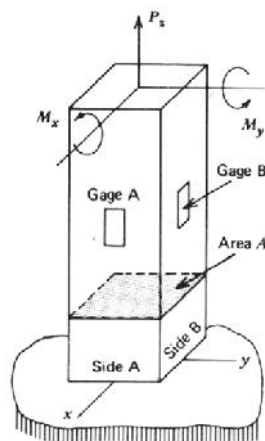


۱۳

ابزار اندازه گیری و کنترل - گروه مهندسی بیوسیستم - دانشگاه کردستان
<http://agri.uok.ac.ir/kmollazade>



اندازه گیری همزمان نیرو - گشتاور خمشی

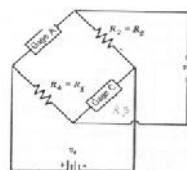


۱۴

ابزار اندازه گیری و کنترل - گروه مهندسی بیوسیستم - دانشگاه کردستان
http://agri.uok.ac.ir/kmollazade



اندازه گیری همزمان نیرو - گشتاور خمشی



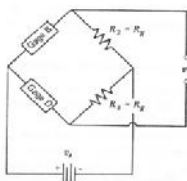
$$v_o = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_3}{R_3} \right) v_s$$

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = S_g \epsilon = \frac{S_g P_z}{AE}$$

$$v_o = \left(\frac{S_g v_s}{2AE} \right) P_z$$

○ بار مموری Pz

$$P_z = \left(\frac{2AE}{S_g v_s} \right) v_o$$



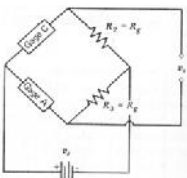
$$v_o = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_3}{R_3} \right) v_s$$

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = -\frac{\Delta R_3}{R_3} = S_g \epsilon = \frac{6S_g M_x}{Eh^3}$$

○ گشتاور خمشی Mx

$$v_o = \left(\frac{3S_g v_s}{Eh^3} \right) M_x$$

$$M_x = \left(\frac{Eh^3}{3S_g v_s} \right) v_o$$



$$v_o = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_1}{R_1} \right) v_s$$

$$\frac{\Delta R_3}{R_3} = -\frac{\Delta R_1}{R_1} = S_g \epsilon = \frac{6S_g M_y}{Eh^3}$$

○ گشتاور خمشی My

$$v_o = \left(\frac{3S_g v_s}{Eh^3} \right) M_y$$

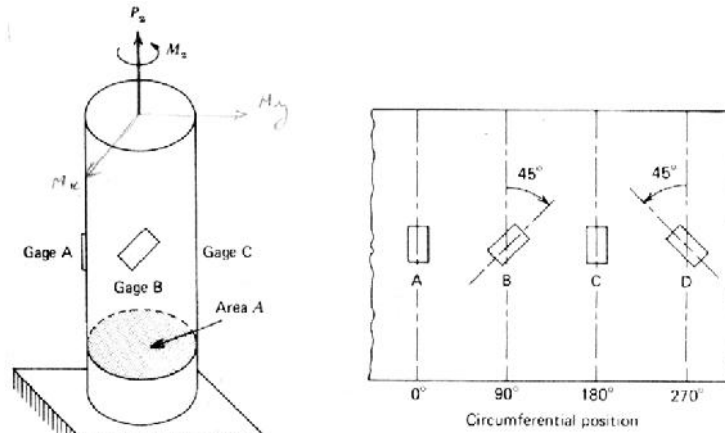
$$M_y = \left(\frac{Eh^3}{3S_g v_s} \right) v_o$$

۱۵

ابزار اندازه گیری و کنترل - گروه مهندسی بیوسیستم - دانشگاه کردستان
http://agri.uok.ac.ir/kmollazade



اندازه گیری همزمان نیرو - گشتاور پیچشی

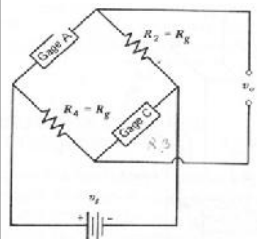


۱۶

ابزار اندازه گیری و کنترل - گروه مهندسی بیوسیستم - دانشگاه کردستان
http://agri.uok.ac.ir/kmollazade



اندازه گیری همزمان نیرو - گشتاور پیچشی



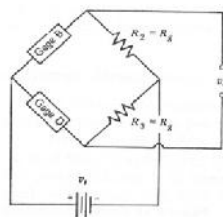
$$v_o = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_3}{R_3} \right) v_s$$

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = S_g \epsilon = \frac{S_g P_z}{AE}$$

$$v_o = \left(\frac{S_g v_s}{2AE} \right) P_z$$

○ بار مموری P_z

$$P_z = \left(\frac{2AE}{S_g v_s} \right) v_o$$



$$v_o = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_3}{R_3} \right) v_s$$

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = -\frac{\Delta R_3}{R_3} = S_g \epsilon = \frac{16(1+\nu) S_g M_z}{\pi D^3 E}$$

$$v_o = \left(\frac{8(1+\nu) S_g v_s}{\pi D^3 E} \right) M_z$$

○ گشتاور پیچشی M_z

$$M_z = \left(\frac{\pi D^3 E}{8(1+\nu) S_g v_s} \right) v_o$$

۱۷

ابزار اندازه گیری و کنترل - گروه مهندسی بیوسیستم - دانشگاه کردستان
http://agri.uok.ac.ir/kmollazade



اندازه گیری فشار (سلول فشار (Pressure Cell))

○ مبدل های فشار وسایلی هستند که فشار اعمالی از طریق اندازه گیری یک جابجایی، کرنش یا پاسخ یک عنصر پیزو به سیگنال الکتریکی تبدیل می کنند.

شرایط دینامیکی

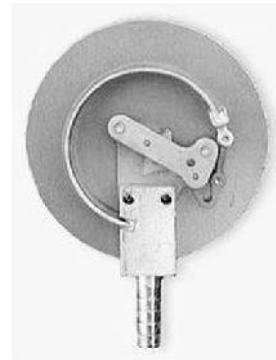
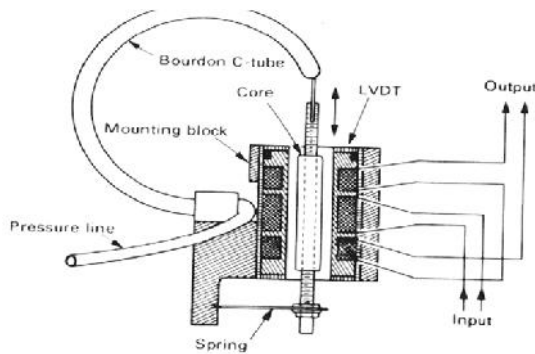
- مبدل فشار
- پیزوالکتریک

شرایط شبه استاتیکی

- مبدل فشار جابجایی
- مبدل فشار دیافراگمی



مبدل فشار جابجایی (Displacement type pressure transducer)

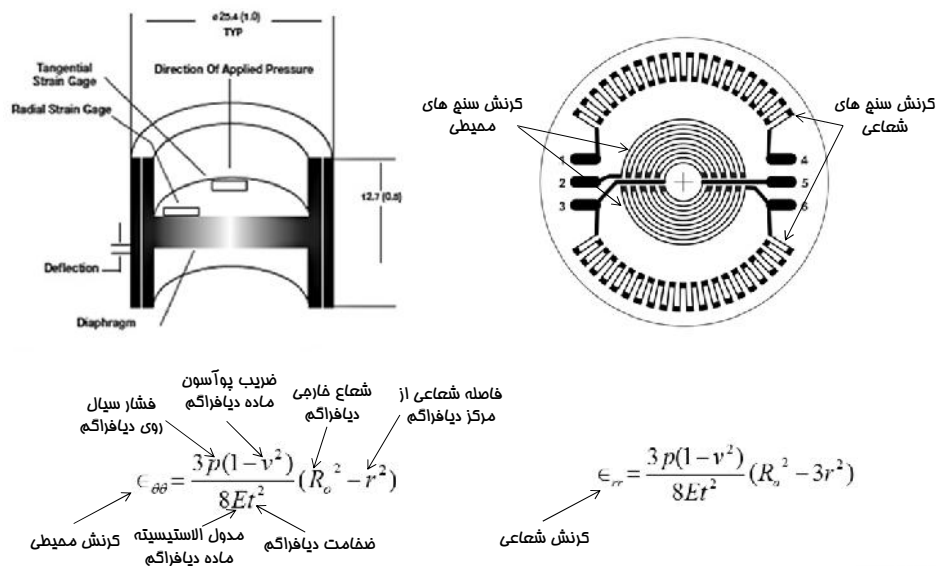


○ در صورتیکه جابجایی لوله ی بوردن کوچک باشد، ولتاژ خروجی تابعی خطی از فشار خواهد بود.

○ مبدل فشار جابجایی به علت جرم های لوله، سیال داخل لوله و نیز جرم هسته، پاسخ فرکانسی را تا ۱۰ هرتز محدود می کند، بنابراین برای اندازه گیری فشار در شرایط دینامیکی مناسب نیست.



مبدل فشار دیافراگمی (Diaphragm type pressure transducer)



مبدل فشار پیزوالکتریک (Piezoelectric type pressure transducer)

○ مبدل فشار پیزوالکتریک از یک کریستال پیزوالکتریک، هم به عنوان عضو ارتجاعی و هم به عنوان مسگر استفاده می کند.

