



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

گروه کنترل و سیستم

آزمایشگاه ابزار دقیق

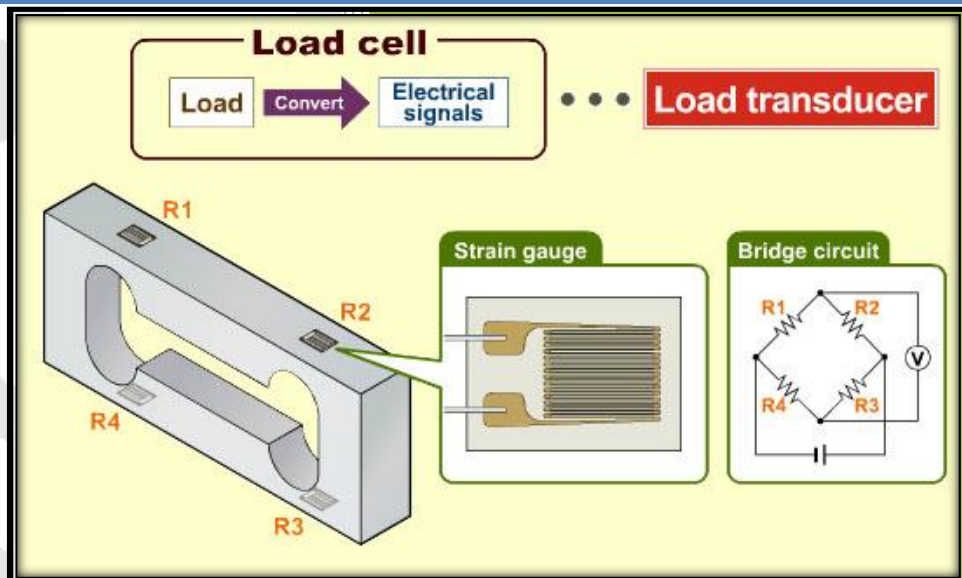
لطفاً برای صرفه‌جویی در مصرف کاغذ، این دستور کار را به صورت دورو چاپ کنید

حسگرهای اندازه‌گیری نیرو

تعداد جلسات: ۱

پیش‌نیاز:

- ✓ مبدل آنالوگ به دیجیتال
- ✓ تقویت‌کننده ابزار دقیق
- ✓ پورت سریال



خیلی از مواقع در کارگاه‌ها و یا مراکز صنعتی لازم است میزان نیروها و گشتاورهای وارد بر یک جسم اندازه‌گیری شوند. برای مثال برای بررسی میزان پایداری و مقاومت یک پل که روزانه چندین هزار خودرو از روی آن حرکت می‌کنند بایستی میزان نیروهای وارد بر آن محاسبه شود. برای اندازه‌گیری نیروی‌های وارد بر یک جسم از مبدل‌هایی به نام نیروسنج استفاده می‌شود. در این آزمایش ابتدا به معرفی کرنش‌سنج می‌پردازیم. در ادامه، نحوه ساخت یک نیروسنج با استفاده از چند کرنش‌سنج و با کمک یک مدار پل بیان می‌شود. نهایتاً به معرفی یک نیروسنج آماده خواهیم پرداخت و با استفاده از آن و پورت سریال کامپیوتر، وزن اجسام در نرم‌افزار سیمولینک متلب محاسبه و نمایش داده خواهد شد.

K. N. Toosi University of Technology
Instrumentation Lab

Last update: 3/Sep/2023

E. Amini

H.R. Chavoshi

A. Khoshlahjeh

Website:

instlab.kntu.ac.ir

Email:

instlab@saba.kntu.ac.ir

فهرست مطالب

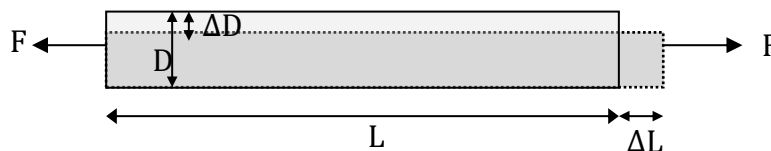
۱	فهرست مطالب.....
۲	بخش ۱- مختصری از تئوری.....
۲	۱-۱- معرفی کرنش‌سنج.....
۴	۱-۱-۱- مدار یک چهارم پل.....
۴	۱-۱-۲- مدار نیم پل.....
۵	۱-۱-۳- مدار تمام پل.....
۶	۲-۱- نیروسنج.....
۷	بخش ۲- فعالیت آزمایشگاهی.....
۷	۱-۲- شناسایی پایه‌های نیروسنج.....
۷	۲-۲- مشاهده رفتار کرنش‌سنج.....
۷	۳-۲- اندازه‌گیری نیرو توسط نیروسنج.....
۱۱	۴-۲- ساخت ترازوی دیجیتال.....

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

بخش ۱ - مختصری از تئوری

۱-۱ - معرفی کرنش سنج

به نسبت تغییر طول یک جسم نسبت به طول اولیه آن در اثر اعمال نیرو، کرنش^۱ گفته می‌شود که یک کمیت بدون بعد است.



شکل ۱- تغییر طول و سطح یک میله در اثر اعمال نیرو

بر اساس شکل ۱، مقدار کرنش میله در اثر نیروی وارد شده به آن از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

با اندازه‌گیری کرنش ایجاد شده در میله و در اختیار داشتن مدول یانگ^۲ (ضریب الاستیسیته) آن، می‌توان تنش^۳ یا نیروی وارد شده به قطعه را محاسبه کرد که در اینجا از ذکر جزئیات و دیگر روابط صرف نظر شده است.

برای اندازه‌گیری کرنش ایجاد شده در یک جسم، از حسگری به نام کرنش‌سنج^۴ که از خانواده حسگرهای مقاومتی می‌باشد استفاده می‌شود. در شکل ۲ می‌توان تصویری از ساختار یک کرنش‌سنج را مشاهده کرد. کرنش‌سنج‌ها از قدیمی‌ترین حسگرهای کاربردی می‌باشند که برای اندازه‌گیری نیرو، فشار، وزن و گشتاور استفاده می‌شود.

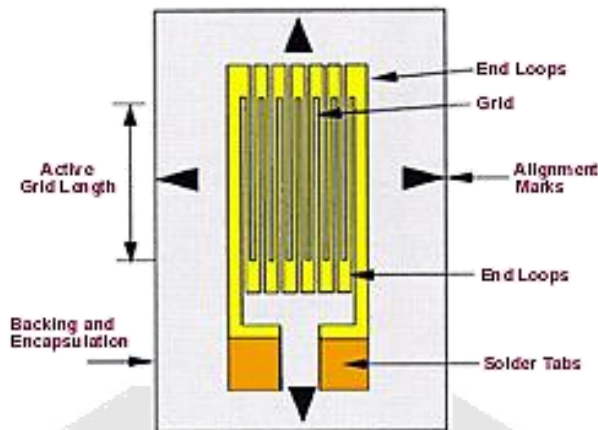
کرنش‌سنج‌های مقاومتی، لایه‌های نازک سیم‌های مقاومتی می‌باشند که بر روی سطوح اجزای یک ماشین یا سازه توسط چسب‌های مخصوصی نصب می‌شوند. در اثر نیروی اعمال شده به سطح و به تبع آن به کرنش‌سنج، طول سیم‌های مقاومتی افزایش (در صورت کشش) و یا کاهش (در صورت فشردگی) می‌یابد و همچنین ضخامت سیم‌ها نیز در اثر کشش یا فشار، به ترتیب کاهش یا افزایش می‌یابد. کرنش‌سنج‌ها یک رابطه خطی بین نیروی اعمالی و تغییر مقاومت خود در محدوده عملکردشان نشان می‌دهند.

1 Strain

2 Young's modulus

3 Stress

4 Strain Gauge



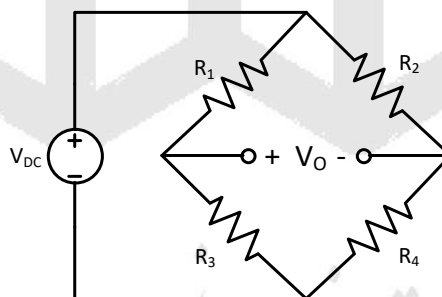
شکل ۲ - ساختار یک نمونه کرنش‌سنج

به رابطه مقاومت یک هادی فلزی توجه کنید:

$$R = \rho \frac{\ell}{A}$$

اگر یک لایه از ماده رسانا را بکشیم آن لایه درازتر و نازکتر می‌شود و لذا بر اساس رابطه بالا، مقاومت آن افزایش می‌یابد. برای حالت فشرده شدن نیز بر اساس رابطه فوق، مقاومت آن کاهش می‌یابد. البته باید توجه کرد که تغییرات مقاومت کرنش‌سنج‌ها بسیار ناچیز است.

معمولاً از حسگرها برای نمایش یک کمیت و یا گرفتن فیدبک و بستن حلقه کنترلی استفاده می‌شود. در هر دو حالت لازم است تا سیگنال‌ها از نوع الکتریکی باشند، لذا بایستی به شیوه‌ای تغییرات مقاومت یک کرنش‌سنج به یک سیگنال الکتریکی تبدیل شود. پل وتسون^۱ به همین منظور مورد استفاده قرار می‌گیرد. به مدار پل وتسون (شکل ۳) توجه کنید:



شکل ۳ - مدار پل وتسون

با توجه به شکل ۳ مقدار خروجی از رابطه زیر به دست می‌آید:

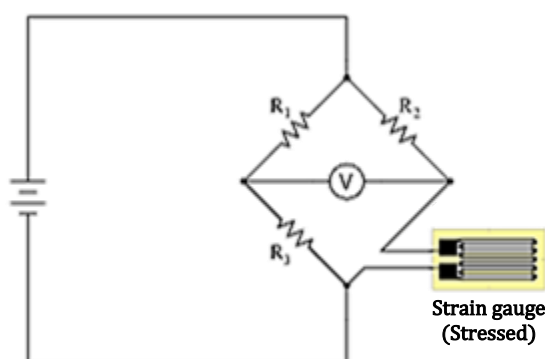
$$V_O = \left[\frac{R_3}{R_1 + R_3} - \frac{R_4}{R_2 + R_4} \right] V_{DC}$$

¹ Wheatstone Bridge

برای قرار دادن کرنش‌سنج در پل سه شیوه رایج وجود دارد:

۱-۱-۱ - مدار یک چهارم پل

در مدار یک چهارم پل^۱ یک عنصر از چهار عنصر پل با کرنش‌سنج جایگزین می‌شود (شکل ۴). بقیه مقاومت‌ها نیز ثابت و برابر با مقاومت اولیه کرنش‌سنج انتخاب می‌شوند. به این ترتیب در زمانی که هیچ نیرویی به کرنش‌سنج وارد نشود، پل در حالت تعادل قرار دارد و خروجی آن صفر می‌باشد. در این مدار با تغییر مقدار مقاومت کرنش‌سنج خروجی پل تغییر می‌کند و با اندازه‌گیری مقدار آن می‌توان مقدار نیرو را محاسبه کرد.

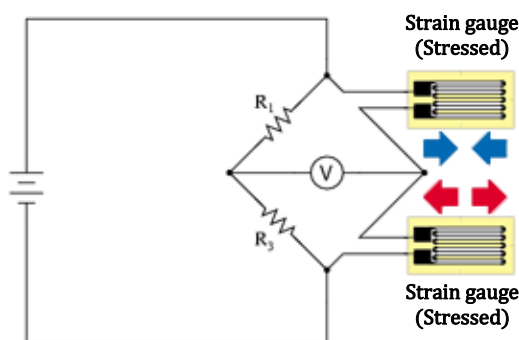


شکل ۴- اتصال کرنش‌سنج به مدار پل در حالت یک چهارم پل

پرسش ۱- با توجه به وابستگی مقاومت کرنش‌سنج‌ها به تغییرات دما، برای حذف اثر تغییر دما در اندازه‌گیری نیرو چه روشی پیشنهاد می‌کنید (فرض کنید که تنها مقاومت کرنش‌سنج‌ها به دما وابسته است و بقیه مقاومت‌ها مستقل از دما هستند)؟

۱-۱-۲ - مدار نیم پل

در مدار نیم پل^۲ از دو کرنش‌سنج استفاده می‌شود که به صورت شکل ۵ در مدار پل قرار می‌گیرند.

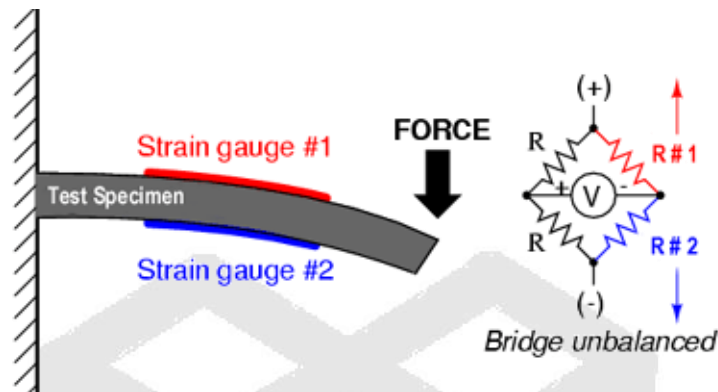


شکل ۵ - اتصال دو کرنش‌سنج در حالت نیم پل

¹ Quarter-Bridge

² Half-Bridge

این کرنش‌سنج‌ها معمولاً در زیر و روی جسم مورد نظر نصب می‌شوند، مطابق شکل ۶، به این ترتیب زمانی که به جسم نیرویی به سمت پایین وارد شود، یکی از کرنش‌سنج‌ها افزایش مقاومت و دیگری کاهش مقاومت خواهد داشت.

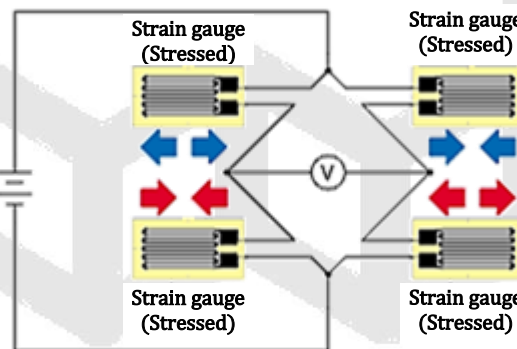


شکل ۶ - نحوه اتصال دو کرنش‌سنج به یک تیر سر آزاد و مدار پل متناظر

پرسش ۲- مزیت استفاده از مدار نیم پل در مقایسه با مدار یک چهارم پل برای اندازه‌گیری نیرو چیست؟

۱-۱-۳ - مدار تمام پل

مدار تمام پل^۱ از چهار کرنش‌سنج بهره می‌برد و دیگر نیازی به مقاومت‌های ثابت ندارد. امروزه در اغلب نیروسنج‌های موجود در بازار از این مدار پل استفاده شده است.



شکل ۷ - اتصال چهار کرنش‌سنج در حالت تمام پل

پرسش ۳- مزیت مدار تمام پل در مقایسه با مدار نیم پل چیست؟

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

¹ Full-Bridge

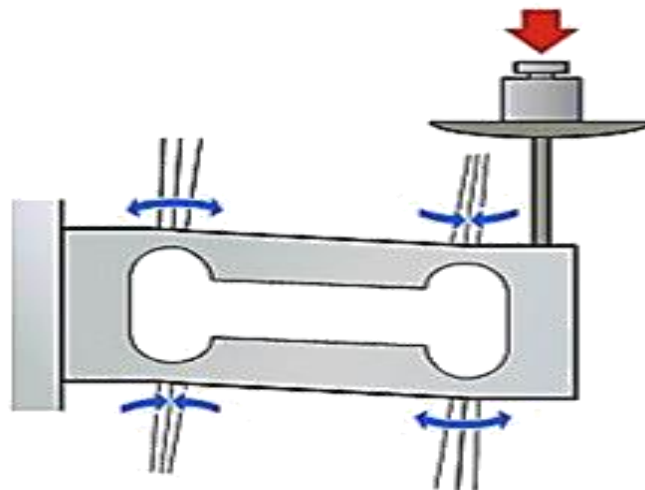
۱-۲- نیروسنج

نیروسنج^۱ یکی از ابزارهای صنعتی رایج برای اندازه‌گیری نیرو می‌باشد. معمولاً یک نیروسنج شامل چهار کرنش‌سنج می‌باشد که در یک مدار تمام پل قرار گرفته‌اند. نیروسنجهای بسته به کاربردها به شکل‌های مختلفی ساخته می‌شوند که در شکل ۸ چند نمونه از آنها آورده شده است.



شکل ۸- چند نیروسنج مختلف

در شکل ۹ نمایی از یک نیروسنج با مدار تمام پل در مواجهه با اعمال نیرو آورده شده است.



شکل ۹- تغییر شکل نیروسنج با اعمال نیرو

پرسش ۴- با مقایسه شکل ۶ و شکل ۹ به چه نکته مهمی پی می‌برید؟ (به حفره‌های موجود روی بدنه نیروسنج نگاه کنید و به چرایی حضور آن‌ها توجه کنید.)

¹ Load Cell

بخش ۲- فعالیت آزمایشگاهی

۱-۲- شناسایی پایه‌های نیروسنج

معمولاً یک نیروسنج شامل پنج سیم می‌باشد، چهار سیم که از پل وتسون می‌آید و یک سیم که در نقش شیلد^۱ می‌باشد. سیم شیلد از بقیه سیم‌ها متمایز بوده و به راحتی قابل تشخیص می‌باشد.

پرسش ۵- به نظر شما چه نیازی به استفاده از سیم شیلد در یک نیروسنج می‌باشد؟

چهار سیم دیگر یک نیروسنج دارای رنگ‌های مختلفی بوده و بسته به شرکت سازنده آن، دارای معانی مختلفی می‌باشند.

پرسش ۶- با توجه به اینکه چهار سیم یک نیروسنج همان زوج سیگنال‌های ورودی و خروجی مدار پل می‌باشند، در صورت مشخص نبودن ماهیت هر سیم، چه راهکاری برای تشخیص آنها پیشنهاد می‌کنید؟

با استفاده از یک مولتی متر و با توجه به پاسخی که به پرسش ۶- داده‌اید سعی کنید پایه‌های یکی از نیروسنج‌های آزمایشگاه را شناسایی کنید.

۲-۲- مشاهده رفتار کرنش سنسور

یک صفحه‌ی فلزی که یک کرنش‌سنج بر روی آن نصب شده است در اختیار شما قرار می‌گیرد. دو سر کرنش‌سنج را به یک اهم‌متر وصل کنید. به آرامی با دست‌های خود صفحه فلزی را فشار دهید و همینطور فشار وارد بر صفحه فلزی را افزایش دهید و هم زمان تغییرات مقاومت کرنش‌سنج را مشاهده کنید.

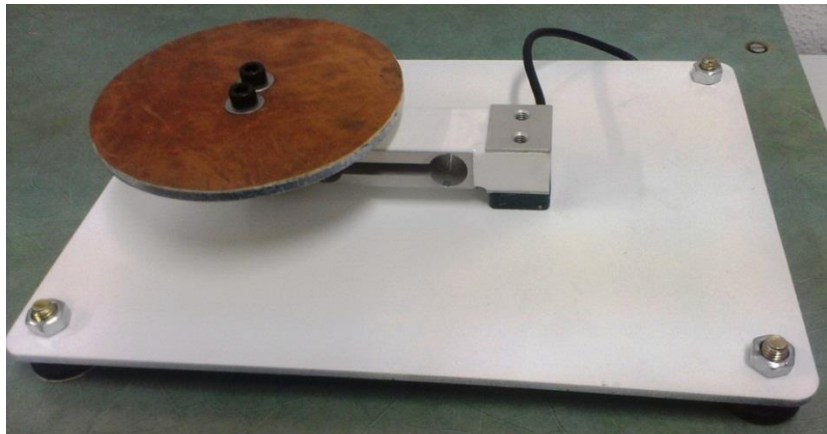
پرسش ۷- از مقادیر اندازه‌گیری شده در این قسمت چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟ آیا میزان مقاومت به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌کند؟ آیا این رویکرد به تنهایی برای اندازه‌گیری میزان کرنش مناسب است؟

۳-۲- اندازه‌گیری نیرو توسط نیروسنج

در این قسمت از آزمایش قصد داریم مشخصه رفتاری یک نیروسنج را به دست آوریم. ترازوی موجود در آزمایشگاه از یک نیروسنج مدل L6D-5Kg ساخت شرکت Zemic تشکیل شده است (شکل ۱۰) که از یک سمت به صفحه‌ی فلزی محکم شده است و از سمت دیگر به کفه ترازو متصل می‌باشد.

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

¹ Shield



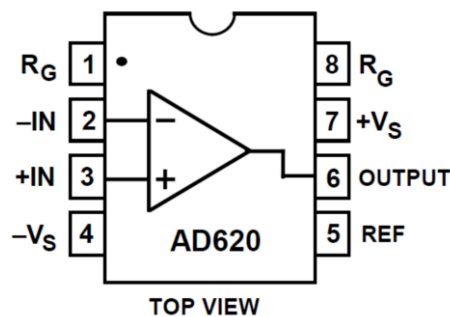
شکل ۱۰- سامانه ترازوی موجود در آزمایشگاه

کافی است تا ولتاژ تغذیه مناسب را به مدار پل اعمال کرده و ولتاژ خروجی مدار پل را که مقدار کوچکی می باشد، تقویت نمود. اطلاعات کامل این نیروسنج نیز به شرح زیر می باشد:

Output Sensitivity	$1.8 \pm 0.2 \text{ mV/V}$
Safe Overload	150%
Ultimate Overload	300%
Excitation Voltage	5 ~ 12 V
Excitation Maximum	18 V
Terminal Resistance, Input	$409 \pm 6 \Omega$
Terminal Resistance, Output	$350 \pm 3 \Omega$

پرسش ۸- با توجه به پارامتر حساسیت خروجی نیروسنج در جدول بالا و با در نظر گرفتن ولتاژ تحریک ۵ ولت در ترمینال ورودی، ولتاژ ترمینال خروجی نیروسنج را به ازای وزنه ۲ کیلوگرمی محاسبه کنید (توجه داشته باشید کفه ترازوی دیجیتال خود دارای تقریباً ۵۰۰ گرم وزن می باشد). این مقدار را به صورت عملی و با قرار دادن وزنه‌ی ۲ کیلوگرمی بر روی کفه ترازو نیز به دست آورید.

اکنون زمان آن رسیده است که خروجی نیروسنج را تقویت کنیم. برای تقویت خروجی مدار پل از یک تقویت کننده ابزار دقیق AD620 استفاده نمایید. در شکل ۱۱ نمایی از این تقویت کننده آورده شده است.



شکل ۱۱- آی سی AD620

این آی سی یک تقویت کننده تفاضلی نسبتاً مقاوم در برابر نویز با بهره قابل تنظیم می باشد، تفاضلی بودن آن به این معناست که این آی سی اختلاف ولتاژ دو پایه مثبت و منفی خود را تقویت می کند. تغذیه این قطعه از ± 2.3 الی ± 18 ولت

می‌باشد و می‌تواند بهره تفاضلی از ۱ تا ۱۰۰۰ ایجاد کند. تنظیم بهره با استفاده از یک مقاومت (R_G) صورت می‌پذیرد که رابطه آن را در زیر مشاهده می‌کنید:

$$G = \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{R_G} + 1 \qquad R_G = \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{G - 1}$$

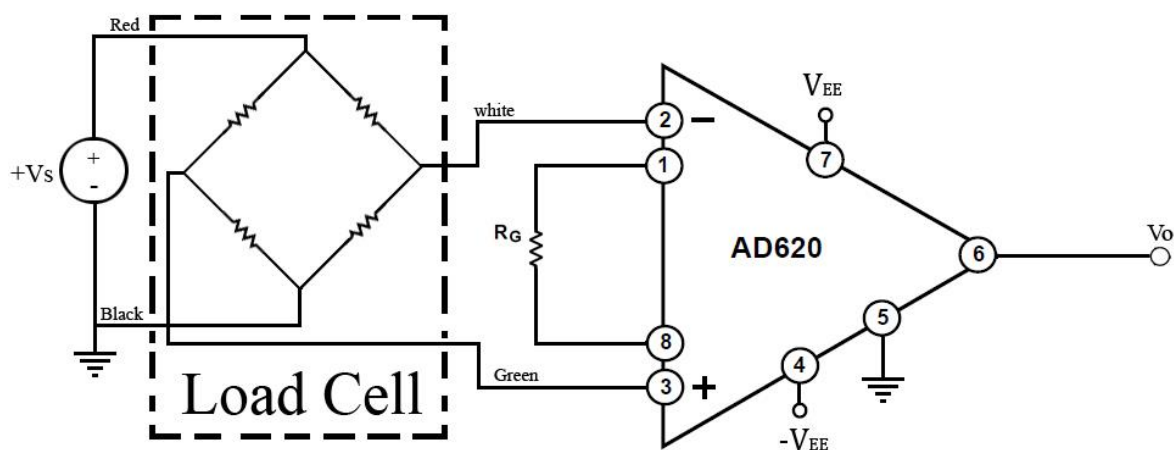
در جدول زیر میزان مقاومت لازم برای مجموعه‌ای از بهره‌های خاص آورده شده است:

مقاومت‌های استاندارد 1%	بهره	مقاومت‌های استاندارد 0.1%	بهره
49.9 K Ω	1.990	49.3 K Ω	2.002
12.4 K Ω	4.984	12.4 K Ω	4.984
5.49 K Ω	9.998	5.49 K Ω	9.998
2.61 K Ω	19.93	2.61 K Ω	19.93
1.00 K Ω	50.40	1.01 K Ω	49.91
499 Ω	100.0	499 Ω	100.0
249 Ω	199.4	+249 Ω	199.4
100 Ω	495.0	98.8 Ω	501.0
49.9 Ω	991.0	49.3 Ω	1003

با کمک این تقویت‌کننده می‌توانید خروجی پل را که حداکثر چند میلی ولت است، به چند ولت برسانید. برای این منظور ابتدا باید بهره تقویت‌کننده را تعیین کنید. در تعیین بهره مدار می‌بایست این نکته را مد نظر قرار دهید که چون قصد داریم در قسمت بعدی آزمایش خواندن ولتاژ خروجی مدار را به ADC میکروکنترلر ATmega16 بسپاریم و با توجه به اینکه ولتاژ مرجع مبدل آنالوگ به دیجیتال این میکرو ۲/۵۶ ولت است بنابراین ولتاژ خروجی مدار نباید از این مقدار تجاوز کند.

در بُرد آماده ترازو، مدار شکل ۱۲ بسته شده است. در این مدار ولتاژ V_{SS} و V_{EE} به ترتیب برابر ۵ و ۳- می‌باشد. قطعه AD620 پایه‌ای برای تنظیم آفست ولتاژ دارد بنابراین زمانی که هیچ باری روی نیروسنج قرار ندارد به کمک یک پتانسیومتر متصل به پایه آفست خروجی تقویت‌کننده را صفر کنید در کل با اعمال ولتاژ به این پایه می‌توان خروجی این قطعه را شیفت داد. در اینجا این پایه مستقیماً به زمین وصل شده است. مقاومت متناظر با بهره را در قسمت مشخص شده (R_{Gain}) قرار دهید. در خروجی این مدار نیز قسمتی برای ساخت یک فیلتر پایین‌گذر فراهم شده است که در صورت نویزی بودن خروجی می‌توان از آن استفاده کرد.

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی



شکل ۱۲- نیروسنج به همراه مدار تقویت کننده

اکنون با وزنه‌های دقیق موجود در آزمایشگاه وزن‌های مختلف را ایجاد کرده و روی ترازو قرار دهید و سپس جدول زیر را تکمیل کنید.

جرم وزنه (gr)	خروجی تقویت شده (mV)	جرم وزنه (gr)	خروجی تقویت شده (mV)
۹۰		۱	
۱۰۰		۵	
۲۰۰		۱۰	
۳۰۰		۱۵	
۴۰۰		۲۰	
۵۰۰		۲۵	
۶۰۰		۳۰	
۷۰۰		۳۵	
۸۰۰		۴۰	
۹۰۰		۵۰	
۱۰۰۰		۶۰	
۱۵۰۰		۷۰	
۱۸۰۰		۸۰	

پرسش ۹- با رسم نمودار جرم وزنه‌ها بر حسب ولتاژ تقویت شده، به چه نکته‌ای پی می‌برید؟

۲-۴ - ساخت ترازوی دیجیتال

در این قسمت می‌خواهیم با استفاده از میکروکنترلر AVR داده‌های اندازه‌گیری شده را به کامپیوتر انتقال و در محیط سیمولنک این داده‌ها را به وزن تبدیل کنیم. بدین منظور برنامه‌ای بنویسید که روند زیر را انجام دهد.

۱- تنظیمات مربوط به مبدل آنالوگ به دیجیتال، نمایشگر LCD و فرستنده USART را توسط نرم افزار مربوط به برنامه‌نویسی AVR انجام دهید. ولتاژ مرجع ADC را روی ولتاژ مرجع داخلی ۲/۵۶ قرار دهید.

Baud Rate	56000
Data Bit	8
Stop Bit	1
Parity	No Parity

۲- عدد خوانده شده از ADC یک عدد ۱۰ بیتی از نوع صحیح بدون علامت است. با انجام اعمال ریاضی این عدد را به دو عدد ۵ بیتی جدا تبدیل کنید (یک عدد حاوی ۵ بیت LSB و یک عدد حاوی ۵ بیت MSB).

۳- از طریق فرستنده پورت سریال و با کمک دستورات printf, putchar, puts به ترتیب زیر داده‌ها را انتقال دهید.

Byte 01	Start Byte	عدد ثابت 0xC8
Byte 02	High Byte	یک کاراکتر بدون علامت شامل ۵ بیت پر ارزش داده ADC
Byte 03	Low Byte	یک کاراکتر بدون علامت شامل ۵ بیت کم ارزش داده ADC

۴- یک فایل سیمولینک از پیش آماده شده در کامپیوتر آزمایشگاه وجود دارد. با اجرای آن، داده‌های ارسال شده مبدل ADC از طریق پورت سریال در این فایل در دسترس خواهند بود.

۵- با استفاده از یک فیلتر پایین‌گذر نرم‌افزاری، تغییرات شبه نویز در خروجی را کاهش دهید.

۶- برای تبدیل عدد دریافت شده از پورت سریال به وزن جسم بر حسب گرم ابتدا باید آن را با یک عدد ثابت جمع کنید (حذف بایاس) و سپس خروجی آن را در یک عدد مناسب ضرب کنید (تنظیم بهره).
حذف بایاس را در حالت نبود وزنه و تنظیم بهره را در حالت وجود یک وزنه مشخص مثلاً ۱۰۰۰ گرمی روی کفه ترازو انجام دهید.

۷- پس از این کار اجسام مختلف (زیر ۵۰۰ گرم) را روی نیروسنج قرار دهید و وزن آنها را مشاهده کنید، مقدار جرم این اجسام را به کمک ترازوی دیجیتالی دقیق موجود در آزمایشگاه نیز بخوانید و آنها را با هم مقایسه کنید.

پرسش ۱۰- با تلفن همراه خود یک تماس برقرار کنید و آن را نزدیک مدار نیروسنج قرار دهید، با این کار چه تغییراتی بر روی مقدار جرم نمایش داده شده بر روی اسکوپ مشاهده می‌کنید؟ علت چیست؟ آیا راهکاری برای جلوگیری از این اثر می‌توانید معرفی کنید؟

پرسش ۱۱- در حین تماس یک ورق آلومینیومی بین تلفن همراه و مدار نیروسنج قرار دهید و اثر آن را مشاهده کنید. آیا این ورق اثری بر روی خروجی دارد؟

پرسش ۱۲- به نظر شما با ساختار معرفی شده در این گزارش، با چه دقتی بر حسب گرم می‌توان به محاسبه جرم اجسام پرداخت؟

پرسش ۱۳- دو روش برای افزایش دقت (بر حسب گرم) ساختار بالا و تبعات حاصل از آن را بیان کنید.