



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

گروه کنترل و سیستم

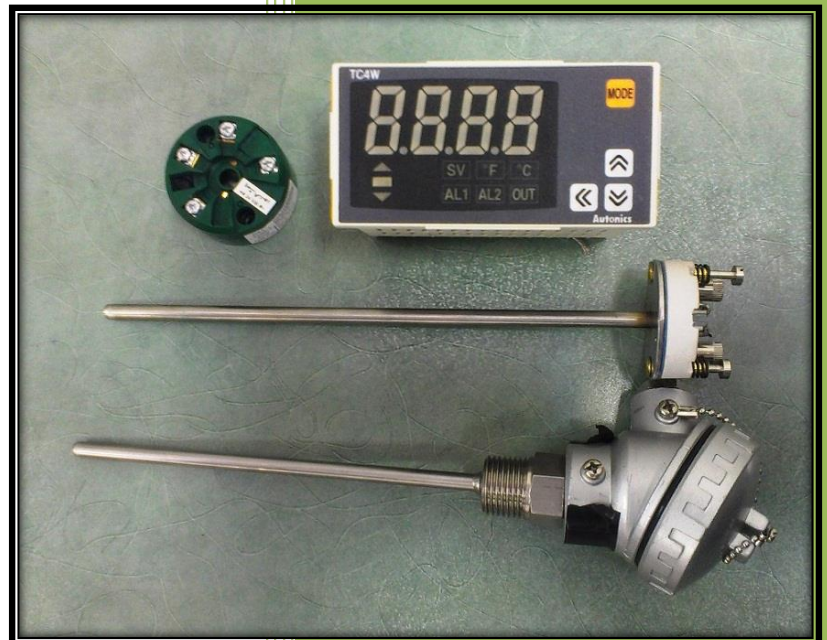
آزمایشگاه ابزار دقیق

حسگرهای اندازه گیری دما

تعداد جلسات: ۲

پیش نیاز:

✓ برازش منحنی



شاید اغراق نباشد اگر بگوییم که نیمی از تحقیقات انجام شده در زمینه حسگرها به حسگرهای اندازه گیری دما بر می گردد. این آمار خود نشان دهنده اهمیت این نوع از حسگرها می باشد. امروزه در اکثر فرآیندهای صنعتی برای کنترل دما و یا صرفاً جهت نمایش دمای فرآیند از حسگرهای دما استفاده می کنند. حسگرهای صنعتی اندازه گیری دما به سه دسته کلی ترموکوپل، ترمیستور و RTD تقسیم می شوند که البته هر کدام از اینها خود دارای تقسیم بندی های دیگری نیز هستند. در این آزمایش علاوه بر آشنایی با انواع حسگرهای دما با کاربرد هر کدام از انواع حسگرها نیز آشنا خواهیم 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- آشکارساز مقاومتی دما (RTD).....
۳.....	۱-۲- ترموکوپل.....
۴.....	۱-۳- ترمیستور.....
۵.....	بخش ۲- پیدا کردن مشخصه حسگرها.....
۷.....	بخش ۳- کالیبره کردن حسگرها با ترنسدیوسر.....
۷.....	۳-۱- تنظیم دیپ سوئیچ‌های ترنسدیوسر.....
۸.....	۳-۲- پیاده‌سازی مدار ترنسدیوسر.....
۹.....	۳-۳- کالیبره کردن ترنسدیوسر.....

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

بخش ۱- مختصری از تئوری

۱-۱- آشکارساز مقاومتی دما^۱ (RTD)

آشکارسازهای مقاومتی دما در واقع مقاومت‌های متغیر با دما می‌باشند. پرکاربردترین حسگر RTD نوع پلاتینی آنها است که با اسامی همچون Pt100, Pt500, Pt1000 و ... در صنعت شناخته می‌شوند. این نوع در حالت کلی با Pt_x معرفی شده که x نشان دهنده مقاومت اولیه یک حسگر RTD در دمای صفر درجه سانتی‌گراد است و Pt هم بیانگر جنس فلز است که در اینجا پلاتین می‌باشد. موادی همچون نیکل و مس نیز در ساخت RTD ها می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

مقاومت RTD ها را می‌توان با رابطه زیر بر حسب دما بدست آورد:

$$R = R_0(1 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2)$$

که در آن R_0 مقاومت RTD در دمای صفر درجه سانتی‌گراد می‌باشد. مقادیر α_1 و α_2 برای RTD از جنس پلاتین به صورت زیر است:

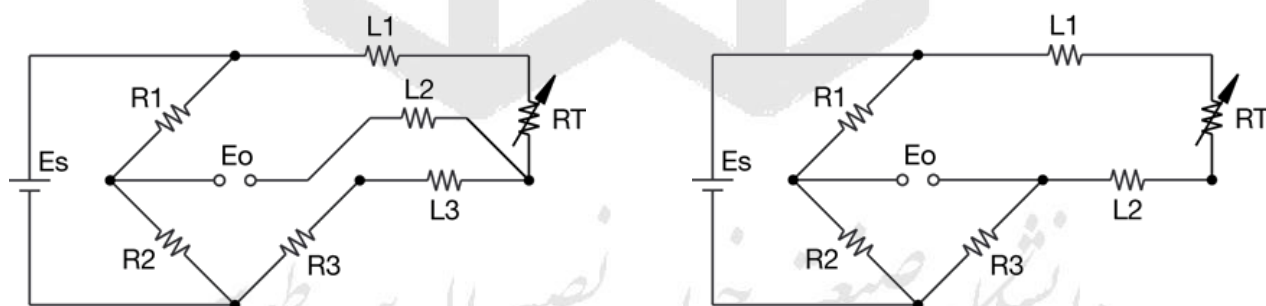
$$\alpha_1 = 3,9083 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\alpha_2 = -5,775 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$$

RTD ها دارای انواع اتصال دو سیمه، سه سیمه و چهار سیمه می‌باشند که بنا به اینکه فاصله RTD تا ترانسدیوسر^۲ چه مقدار باشد و اینکه از چه نوع سیمی برای انتقال سیگنال خروجی حسگر استفاده شود، به صورت زیر استفاده می‌شوند:

اتصال دو سیمه: در مواردی به کار می‌رود که فاصله بین حسگر و ترانسدیوسر زیاد نیست و از سیم‌های انتقال با مقاومت بسیار پایین (نزدیک به صفر) استفاده شده است (زیر ۱۰۰ متر).

اتصال سه سیمه: در مواردی استفاده می‌شود که فاصله RTD و ترانسدیوسر زیاد است و مقاومت سیم‌های انتقال تاثیر گذارند اما مقاومت این سیم‌ها با هم برابر است (زیر ۶۰۰ متر).



شکل ۱- اتصال RTD در مدار پل، سمت راست: دوسیمه و سمت چپ: سه سیمه

پرسش ۱- با توجه به شکل ۱، چگونه اثر مقاومت سیم‌های انتقال در اتصال سه سیمه از بین می‌رود؟

¹ Resistance Temperature Detectors or Resistive Thermal Devices

² Transducer

۲-۱- ترموکوپل^۱

ترموکوپل از دو فلز مختلف که از یک سمت (اتصال داغ) به هم جوش خورده‌اند تشکیل شده است. اساس کار آنها قانون سیبک^۲ می‌باشد که طبق آن ولتاژ خروجی در دو سر آزاد ترموکوپل (اتصال مرجع) از رابطه مرتبه اول و تقریبی $E = \alpha(T - T_0)$ محاسبه می‌گردد. ضریب α تقریباً ثابت است و لذا این رابطه در گستره وسیع دمایی خطی می‌باشد.

عیب بزرگ ترموکوپل در مقایسه با RTD همانطور که در رابطه ولتاژ خروجی آن با دما مشاهده می‌گردد، وابستگی ولتاژ خروجی آن به دمای اتصال مرجع ترموکوپل می‌باشد. به همین دلیل دمای اتصال مرجع همیشه باید در یک دمای مشخص ثابت نگه داشته شود. این تثبیت دما را می‌توان با قراردادن اتصال مرجع در حمام یخ (مخلوط آب یخ) و تثبیت در صفر درجه سانتی‌گراد انجام داد. استفاده از حمام یخ کار زیاد آسانی نبوده و به جای آن معمولاً از تکنیک جبران‌سازی اتصال سرد^۳ با استفاده از RTD یا ترمیستور برای ایجاد یک اتصال سرد مصنوعی استفاده می‌کنند. ذکر جزئیات این تکنیک در حوصله این دستور کار نیست.

از دیگر معایب ترموکوپل می‌توان به کوچک بودن دامنه ولتاژ خروجی آن اشاره کرد که بسته به دمای آن اصولاً در حد چند میکرو ولت یا میلی ولت می‌باشد.

ترموکوپل دارای انواع مختلف است که در جدول زیر مقایسه شده‌اند:

نوع	حساسیت تقریبی ($\mu V/^{\circ}C$)	آلیاژ: اولی (+)، دومی (-) ()	محدوده دما $^{\circ}C$ (پیوسته)	محدوده دما $^{\circ}C$ (کوتاه مدت)
K	۴۱	کرومل ^۴ و آلومل ^۵	۰ تا +۱۱۰۰	-۱۸۰ تا +۱۳۰۰
J	۵۵	آهن و کنستانتان ^۶	۰ تا +۷۵۰	-۱۸۰ تا +۸۰۰
T	۴۳	مس و کنستانتان	-۱۸۵ تا +۳۰۰	-۲۵۰ تا +۴۰۰
E	۶۸	کرومل و کنستانتان	۰ تا +۸۰۰	-۴۰ تا +۹۰۰

انتخاب نوع ترموکوپل بر اساس قیمت، محدوده دمایی، حساسیت، دمای ذوب و مشخصات شیمیایی انجام می‌گیرد. ترموکوپل نوع K از بقیه انواع ترموکوپل استفاده بیشتری دارد.

ترموکوپل‌ها و RTDها دو حسگر خیلی معمول در صنعت برای اندازه‌گیری دما هستند. برای انتخاب درست یکی از آنها به عوامل زیر باید توجه کرد:

۱- محدوده دمایی: برای دماهای زیر $500^{\circ}C$ از RTD و برای دماهای بالای $500^{\circ}C$ تا حدوداً $2300^{\circ}C$ از ترموکوپل استفاده می‌شود.

۲- سرعت پاسخ: ترموکوپل زیر یک ثانیه و RTD در حد ۲ تا ۱۰ ثانیه،

¹ Thermocouples

² See beck

³ Cold Junction Compensation

⁴ Chromel (90% nickel and 10% chromium)

⁵ Alumel (95% nickel, 2% manganese, 2% aluminum and 1% silicon)

⁶ Constantan (55% copper and 45% nickel)

۳- قیمت: ترموکوپل‌ها ارزانتر از RTD می‌باشند،

۴- دقت، تکرارپذیری و ماندگاری: RTD دارای دقت و ماندگاری بیشتری نسبت به ترموکوپل است.

پرسش ۲- دقت، صحت، تکرارپذیری و تکثیرپذیری هر یک بیانگر چه چیزی هستند و چه تفاوتی با هم دارند؟ کدامیک با انحراف معیار و کدامیک با بایاس ارتباط مفهومی دارند؟

۳-۱- ترمیستور^۱

ترمیستورها همانند RTD ها حساسه‌های مقاومتی می‌باشند با این تفاوت که برخلاف RTD ها که از جنس فلز هستند، این حسگرها از جنس سرامیک، پلیمر و یا نیمه‌هادی می‌باشند. ترمیستورها به دو دسته NTC^۲ و PTC^۳ تقسیم می‌شوند که PTC همانند RTD با افزایش دما مقاومتش افزایش می‌یابد، ولی NTC با افزایش دما مقاومتش کاهش می‌یابد.



شکل ۲- نماد ترمیستور

رابطه تقریبی تغییر مقاومت بر حسب دما برای یک NTC به صورت زیر می‌باشد:

$$R = R_0 e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

که در آن دما بر حسب کلوین^۴ بوده و R_0 مقاومت اولیه NTC در دمای T_0 می‌باشد. لازم به ذکر است که رابطه سانتی‌گراد و کلوین به صورت زیر می‌باشد:

$$[K] = [^{\circ}C] + 273.15$$

بر خلاف RTD و ترموکوپل، ترمیستور کمتر برای اندازه‌گیری مستقیم دما به کار می‌رود بلکه از تغییر مقاومت آن در اثر تغییر دما، به صورت کیفی برای موارد کنترلی دیگری مانند کلیدزنی، استفاده به جای فیوز، محدودکننده جریان هجومی (جریان راه‌اندازی موتورها) و ... استفاده می‌شود.

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

¹ Thermistor

² Negative Temperature Coefficient

³ Positive Temperature Coefficient

⁴ Kelvin

بخش ۲- پیدا کردن مشخصه حسگرها

در این بخش به دنبال یافتن رفتار حسگرهای معرفی شده، هنگام تغییرات دمایی می‌باشیم. مراحل زیر را دنبال کنید:

۱. سه حسگر دمایی مختلف را از مسئول آزمایشگاه تحویل بگیرید.

پرسش ۳- از بین حسگرهای موجود تنها با استفاده از یک اهم‌متر، ترموکوپل، ترمیستور و RTD را شناسایی کنید. آیا بدون استفاده از اهم‌متر نیز می‌توان به شناسایی این حسگرها پرداخت؟

۲. دمای کوره را روی ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم نموده (با قدرت حدوداً ۴۰ درصد) و حسگرها را از روزنه موجود در روی درب کوره، درون آن قرار دهید.

۳. جدولی مانند جدول زیر تشکیل دهید و مقاومت RTD، ترمیستور و ولتاژ ترموکوپل را به ازای هر ۵ درجه تغییر دما یادداشت نمایید.

پرسش ۴- مابین یادداشت برداری، یک تنگ دمایی در اختیار شما قرار داده می‌شود. به نظر شما اساس کار این وسیله چگونه است؟

توجه: چون خروجی ترموکوپل ولتاژ می‌باشد، لازم است تا پلاریته هر کدام از سرهای خروجی مشخص باشد. بنابراین در حین انجام آزمایش به نحوی پلاریته روی ترموکوپل را علامت‌گذاری کنید تا در مراحل بعد با مشکل روبرو نشوید.

توجه: با توجه به اینکه حداکثر دمای قابل اندازه‌گیری توسط ترمیستور چیزی کمتر از ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد، پس از رسیدن به دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، ترمیستور را به آرامی از کوره خارج نمایید.

دما °C	ترمیستور	ترموکوپل	RTD	دما °C	ترمیستور	ترموکوپل	RTD	دما °C	ترمیستور	ترموکوپل	RTD
۲۵				۱۰۵				۱۸۵			
۳۰				۱۱۰				۱۹۰			
۳۵				۱۱۵				۱۹۵			
۴۰				۱۲۰				۲۰۰			
۴۵				۱۲۵				۲۰۵			
۵۰				۱۳۰				۲۱۰			
۵۵				۱۳۵				۲۱۵			
۶۰				۱۴۰				۲۲۰			
۶۵				۱۴۵				۲۲۵			
۷۰				۱۵۰				۲۳۰			
۷۵				۱۵۵				۲۳۵			
۸۰				۱۶۰				۲۴۰			
۸۵				۱۶۵				۲۴۵			
۹۰				۱۷۰				۲۵۰			
۹۵				۱۷۵							
۱۰۰				۱۸۰							

۴. اطلاعات به دست آمده در جدول بالا را در نرم افزار متلب وارد کنید.

پرسش ۵- در بخش ۱-۱ دیدیم که رابطه بین دما و مقاومت RTD به صورت $R = R_0(1 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2)$ می باشد. با استفاده از جعبه ابزار برازش منحنی، مقادیر α_1 و α_2 رو به دست آورید. آیا این مقادیر به مقادیر واقعی نزدیک هستند؟

پرسش ۶- با توجه به قانون سیبک در ترموکوپل ها، مقدار α را در رابطه $E = \alpha(T - T_0)$ به دست آورید. آیا این مقدار به مقدار حساسیت ترموکوپل نوع K نزدیک است؟

پرسش ۷- در بخش ۳-۱ رابطه بین دما و مقاومت NTC به صورت $R = R_0 e^{\beta(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})}$ بیان شد. مقدار β با استفاده از جعبه ابزار برازش منحنی چند می شود (توجه کنید که در این رابطه دما بر حسب کلوین می باشد)؟

پرسش ۸- تغییرات مقاومت RTD و NTC را به ازای دمای ۵۰ تا ۱۵۰ درجه در یک نمودار رسم کنید. از مقایسه نمودار آنها به چه نکته ای می توان رسید؟

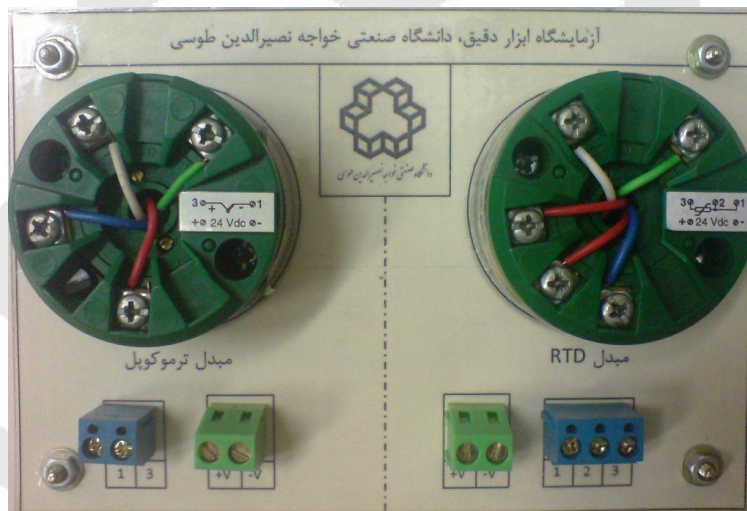
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

بخش ۳- کالیبره کردن حسگرها با ترنسدیوسر

ترنسدیوسرها (Transducer) ابزاری هستند که به کمک آنها می‌توان ولتاژ خروجی ترموکوپل و یا مقاومت RTD را به محدوده استاندارد (۴ تا ۲۰ میلی آمپر یا ۰ تا ۵ ولت) تبدیل کرد. در این بخش از آزمایش قصد داریم هر دو ترنسدیوسر مربوط به ترموکوپل و RTD را کالیبره کنیم. ترنسدیوسری که در این آزمایش از آن استفاده شده است مدل DAT1120 برای ترموکوپل و DAT1110 برای Pt100 ساخت شرکت Datexel می‌باشد.

پرسش ۹- چرا خروجی ترنسدیوسرها بیشتر از جنس جریان است تا ولتاژ؟

پرسش ۱۰- چرا حد پایین خروجی جریان ترنسدیوسرها ۴ میلی آمپر است و نه ۰ میلی آمپر؟



شکل ۳- ترنسدیوسرهای مورد استفاده در آزمایشگاه

۳-۱- تنظیم دیپ سوئیچ‌های ترنسدیوسر

اگر به سطح بالایی ترنسدیوسر نگاه کنید درپوشی را می‌بینید که روی آن برخی از مشخصات ترنسدیوسر نوشته شده است. با برداشتن درپوش می‌توانید به دیپ سوئیچ‌های تنظیمی ترنسدیوسر دسترسی پیدا کنید. اکنون با توجه به بازه اندازه‌گیری دما و به کمک جداول ارائه شده در شکل ۴ و شکل ۵ دیپ سوئیچ‌ها را در وضعیت مناسب قرار دهید.

INPUT		SWITCH			
SPAN	ZERO	1	2	3	4
< 80°C (176°F)	- 50 ÷ -15°C (-58÷5°F)			●	
< 80°C (176°F)	- 15 ÷ 15°C (5÷59°F)	●		●	
< 80°C (176°F)	15 ÷ 50°C (59÷122 °F)	●	●	●	
80÷200°C (176÷392°F)	- 50 ÷ -15°C (-58÷5°F)			●	●
80÷200°C (176÷392°F)	- 15÷ 15°C (5÷59°F)	●		●	●
80÷200°C (176÷392°F)	15 ÷ 50°C (59÷122 °F)	●	●	●	●
200÷250°C (392÷482°F)	- 50÷50°C (-58÷122°F)				
250÷650°C (482÷1202°F)	- 50÷50°C (-58÷122°F)				●

شکل ۴- تنظیم دیپ سوئیچ در ترنسدیوسر Pt100

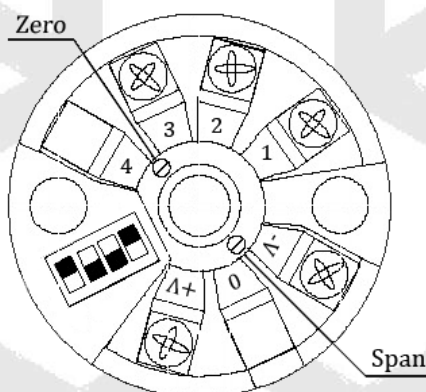
THERMOCOUPLE K PROG. SPAN	SWITCH			THERMOCOUPLE K PROG. ZERO	SW
	1	3	4		
100÷150°C (210÷300 °F)	●		●	- 50 ÷ - 10°C (-58 ÷ 14 °F)	
150÷390°C (300÷730 °F)	●	●	●	-10 ÷ 50 °C (14 ÷ 122 °F)	●
390÷510°C (730÷950 °F)			●		
510÷1370°C (950÷2500 °F)		●	●		

شکل ۵- تنظیم دیپ سوئیچ در ترموکوپل نوع K

اگر به این جداول خوب دقت کنید دو کلمه Span و Zero را خواهید دید. این دو کلمه در واقع معادل همان بهره و بایاس می‌باشند. بدین معنی که با Zero حد پایین دما و با Span، بهره یا حد بالای محدوده اندازه‌گیری دما مشخص می‌شود.

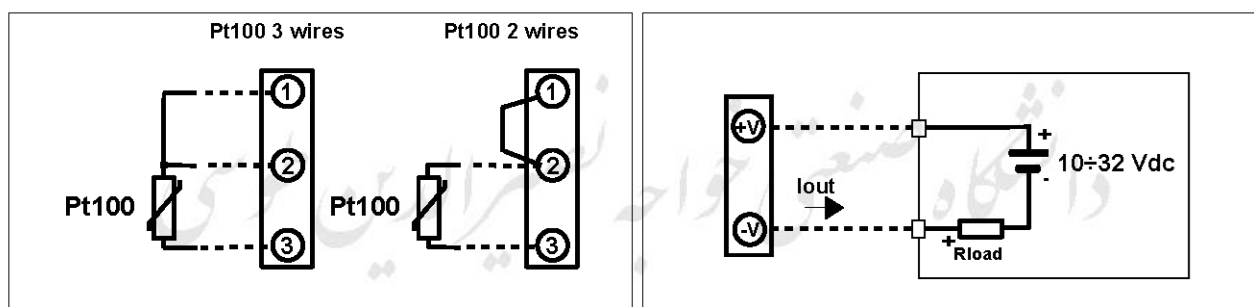
۲-۳- پیاده‌سازی مدار ترنسدیوسر

در شکل ۶ پایه‌های یک ترنسدیوسر مشخص شده‌اند. پایه‌هایی که نماد عددی دارند بایستی به ترموکوپل و RTD متصل شوند (در ترنسدیوسر ترموکوپل، پایه ۲ وجود ندارد).

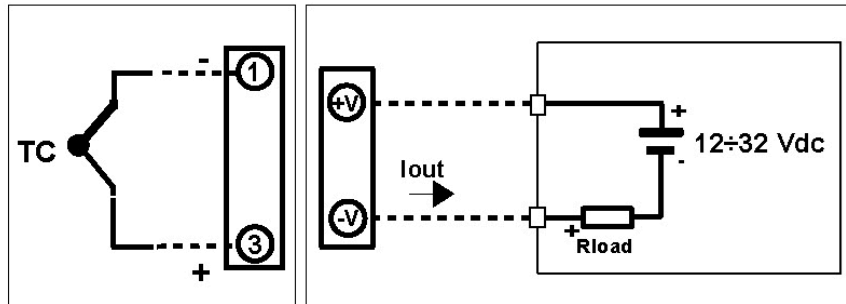


شکل ۶- پایه‌های ترنسدیوسر

حال مدار ترنسدیوسر RTD را مطابق شکل ۷ و ترنسدیوسر ترموکوپل را مطابق شکل ۸ پیاده‌سازی کنید.

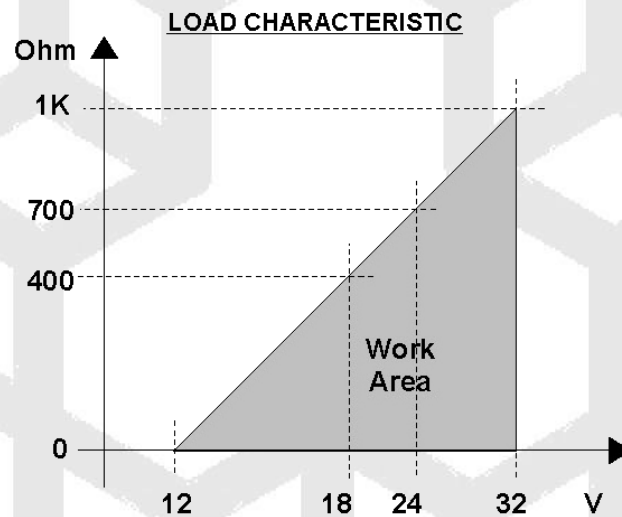


شکل ۷- مدار خارجی ترنسدیوسر RTD



شکل ۸- مدار خارجی ترنسدیوسر ترموکوپل

در شکل‌های بالا دو پارامتر مجهول V_{dc} و R_{load} مشخص نیستند که باید مقدار آن‌ها را به کمک شکل ۹ تعیین کرد. این انتخاب باید به گونه‌ای صورت پذیرد که همواره درون محدوده کاری خاکستری رنگ قرار داشته باشیم.



شکل ۹- محدوده انتخاب مقاومت بار و ولتاژ تغذیه

۳-۳- کالیبره کردن ترنسدیوسر

در راستای کالیبره کردن ترنسدیوسر ترموکوپل و RTD، مراحل زیر را دنبال کنید:

۱. با استفاده از یک منبع تغذیه، ولتاژی به اندازه مقدار ولتاژ ترموکوپل در دمای 250°C بسازید و یا از شبیه‌ساز ترموکوپل موجود در آزمایشگاه استفاده نمایید.
۲. با استفاده از یک پتانسیومتر، مقاومتی به اندازه مقاومت RTD در دمای 250°C بسازید و یا از شبیه‌ساز RTD موجود در آزمایشگاه استفاده نمایید.
۳. مدار شکل ۷ را ببندید و با تنظیم پتانسیومتر صفر، مقدار جریان بار را روی 4 mA تنظیم کنید.
۴. به جای RTD از مقاومت یا شبیه‌ساز مرحله ۲ استفاده کنید و با تغییر پتانسیومتر گستره، مقدار جریان را روی 20 mA تنظیم کنید.
۵. مراحل ۳ و ۴ را چند بار تکرار کنید تا به دقت مناسب برسید.

۶. مدار شکل ۸ را ببندید و با تنظیم پتانسیومتر صفر^۱، مقدار جریان بار را روی 4 mA تنظیم کنید.
۷. به جای ترموکوپل از منبع ولتاژی یا شبیه‌ساز مرحله ۱ استفاده کنید و با تغییر پتانسیومتر گستره^۲، مقدار جریان را روی 20 mA تنظیم کنید.
۸. مراحل ۶ و ۷ را چند بار تکرار کنید تا به دقت مناسب برسید.

بعد از انجام مراحل بالا ترانسدیوسرها کالیبره شده و برای انجام آزمایش مناسب هستند. ترموکوپل و RTD را درون کوره قرار دهید. دمای کوره را روی 250°C تنظیم کرده و روشن نمایید. جریان خروجی ترانسدیوسرها را در دمای 25 – 250°C به ازای تغییرات 5°C یادداشت کنید.

دمای °C	ترموکوپل	RTD	دمای °C	ترموکوپل	RTD	دمای °C	ترموکوپل	RTD
۲۵			۱۰۵			۱۸۵		
۳۰			۱۱۰			۱۹۰		
۳۵			۱۱۵			۱۹۵		
۴۰			۱۲۰			۲۰۰		
۴۵			۱۲۵			۲۰۵		
۵۰			۱۳۰			۲۱۰		
۵۵			۱۳۵			۲۱۵		
۶۰			۱۴۰			۲۲۰		
۶۵			۱۴۵			۲۲۵		
۷۰			۱۵۰			۲۳۰		
۷۵			۱۵۵			۲۳۵		
۸۰			۱۶۰			۲۴۰		
۸۵			۱۶۵			۲۴۵		
۹۰			۱۷۰			۲۵۰		
۹۵			۱۷۵					
۱۰۰			۱۸۰					

پرسش ۱۱- با استفاده از نرم‌افزار متلب، جریان خروجی ترانسدیوسر ترموکوپل و RTD را رسم کنید. آیا خروجی ترانسدیوسرها خطی می‌باشد؟

^۱ Zero Potentiometer

^۲ Span Potentiometer