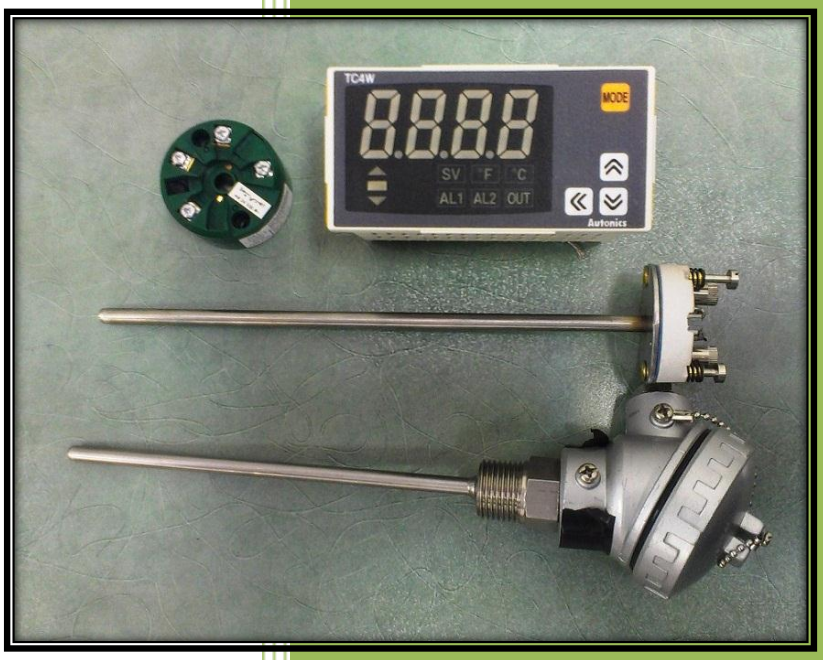
لطفا برای صرفه‌جویی در مصرف کاغذ، این دستور کار را به صورت دو رو چاپ کنید.

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

گروه کنترل و سیستم

آزمایشگاه ابزار دقیق

حسگرهای اندازه‌گیری دما



تعداد جلسات: ۲

پیش‌نیاز:

✓ برازش منحنی

شاید اغراق نباشد اگر بگوییم که نیمی از تحقیقات انجام شده در زمینه حسگرها به حسگرهای اندازه‌گیری دما بر می‌گردد. این آمار خود نشان دهنده اهمیت این نوع از حسگرها می‌باشد. امروزه در اکثر فرآیندهای صنعتی برای کنترل دما و یا صرفاً جهت نمایش دمای فرآیند از حسگرهای دما استفاده می‌کنند. حسگرهای صنعتی اندازه‌گیری دما به سه دسته کلی ترموکوپل، ترمیستور و RTD تقسیم می‌شوند که البته هر کدام از این‌ها خود دارای تقسیم‌بندی‌های دیگری نیز هستند. در این آزمایش علاوه بر آشنایی با انواع حسگرهای دما با کاربرد هر کدام از انواع حسگرها نیز آشنا خواهیم شد.

آخرین به روز رسانی: ٦ اسفند ۱۳۹۱

K. N. Toosi University of Technology
Instrumentation Lab

http://saba.kntu.ac.ir/eecd/instlab

فهرست مطالب

فهرست مطالب ۱
بخش ۱- مختصری از تئوری ۲

۱-۱- آشکارساز مقاومتی دما (RTD) ۲
۱-۲- ترموکوپل ۳
۱-۳- ترمیستور ۴

بخش ۲- پیدا کردن مشخصه حسگرها ۵
بخش ۳- کالیبره کردن حسگرها با ترنسدیوسر ۷

۳-۱- تنظیم دیپ سوئیچ‌های ترنسدیوسر ۷
۳-۲- پیاده‌سازی مدار ترنسدیوسر ۸
۳-۳- کالیبره کردن ترنسدیوسر ۹

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

بخش ۱– مختصری از تئوری

۱-۱- آشکارساز مقاومتی دما[1] (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 Ptx 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 RTDها می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

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

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

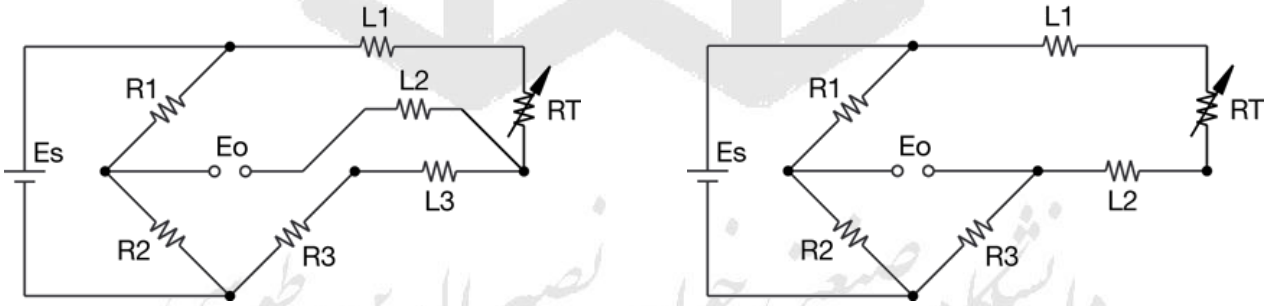
که در آن R_0 مقاومت RTD در دمای صفر درجه سانتی‌گراد می‌باشد. مقادیر α_1 و α_2 برای RTD از جنس پلاتین به صورت زیر است:

$$\alpha_1 = 3.9083 \times 10^{-3}\ ^\circ C^{-1}$$
$$\alpha_2 = -5.775 \times 10^{-7}\ ^\circ C^{-2}$$

RTDها دارای انواع اتصال دو سیمه، سه سیمه و چهار سیمه می‌باشند که بنا به اینکه فاصله RTD تا ترانسدیوسر[2] 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

[1] Resistance Temperature Detectors or Resistive Thermal Devices
[2] Transducer

۱-۲- ترموکوپل[1]

ترموکوپل از دو فلز مختلف که از یک سمت (اتصال داغ) به هم جوش خورده‌اند تشکیل شده است. اساس کار آنها قانون سیبک[2] 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 تقریبا 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 معمولا از تکنیک جبران‌سازی اتصال سرد[3] 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:

جدول 1: مشخصات چند ترموکوپل پرکاربرد

نوع	حساسیت تقریبی (µV/°C)	آلیاژ: اولی (+)، دومی (−)	محدوده دما °C (پیوسته)	محدوده دما °C (کوتاه مدت)
K	۴۱	کرومل[4] و آلومل[5]	0 تا +1100	-180 تا +1300
J	۵۵	آهن و کنستانتان[6]	0 تا +750	-180 تا +800
T	۴۳	مس و کنستانتان	-185 تا +300	-250 تا +400
E	۶۸	کرومل و کنستانتان	0 تا +800	-40 تا +900

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 $500\,°C$ از RTD و برای دماهای بالای $500\,°C$ تا حدوداً $2300\,°C$ 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)

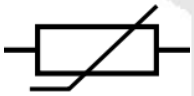
۳- **قیمت:** ترموکوپل‌ها ارزانتر از RTD می‌باشند،

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

پرسش ۱- 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؟

۱-۳- ترمیستور[1]

ترمیستورها همانند RTDها حساسه‌های مقاومتی می‌باشند با این تفاوت که برخلاف RTDها که از جنس فلز هستند، این حسگرها از جنس سرامیک، پلیمر و یا نیمه‌هادی می‌باشند. ترمیستورها به دو دسته NTC[2] و PTC[3] 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:

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

که در آن دما بر حسب کلوین[4] 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:

$$[K] = [°C] + 273.15$$

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 ۲- 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 ۳- مابین یادداشت برداری، یک تنفگ 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
۲۵			
۳۰			
۳۵			
۴۰			
۴۵			
۵۰			
۵۵			
۶۰			
۶۵			
۷۰			
۷۵			
۸۰			
۸۵			
۹۰			
۹۵			
۱۰۰			

دما c°	ترمیستور	ترموکوپل	RTD
۱۰۵			
۱۱۰			
۱۱۵			
۱۲۰			
۱۲۵			
۱۳۰			
۱۳۵			
۱۴۰			
۱۴۵			
۱۵۰			
۱۵۵			
۱۶۰			
۱۶۵			
۱۷۰			
۱۷۵			
۱۸۰			

دما c°	ترمیستور	ترموکوپل	RTD
۱۸۵			
۱۹۰			
۱۹۵			
۲۰۰			
۲۰۵			
۲۱۰			
۲۱۵			
۲۲۰			
۲۲۵			
۲۳۰			
۲۳۵			
۲۴۰			
۲۴۵			
۲۵۰			

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

پرسش ۴- در بخش ۱-۱ دیدیم که رابطه بین دما و مقاومت RTD به صورت $R = R_0(1 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2)$ می‌باشد. با استفاده از جعبه‌ابزار برازش منحنی، مقادیر α_1 و α_2 رو به دست آورید. آیا این مقادیر به مقادیر واقعی نزدیک هستند؟

پرسش ۵- با توجه به قانون سیبک در ترموکوپل‌ها، 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 ۶- در بخش ۱-۳ رابطه بین دما و مقاومت NTC به صورت $R = R_0 e^{\beta\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}$ بیان شد. مقدار β با استفاده از جعبه‌ابزار برازش منحنی چند می‌شود (توجه کنید که در این رابطه دما بر حسب کلوین می‌باشد)؟

پرسش ۷- تغییرات مقاومت RTD و NTC را به ازای دمای **۵۰** تا **۱۵۰** درجه در یک نمودار رسم کنید. از مقایسه نمودار آنها به چه نکته‌ای می‌توان رسید؟

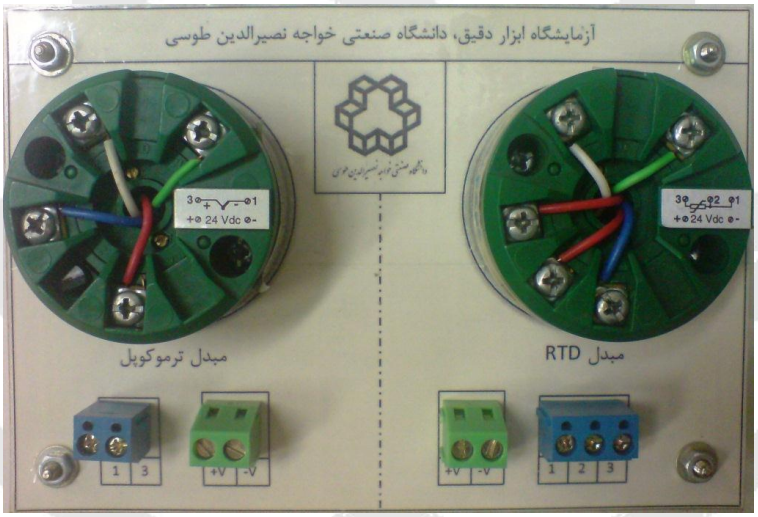
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

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

پرسش ۹- 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: جدول تنظیم دیپ سوئیچ در ترنسدیوسر Pt100

THERMOCOUPLE K PROG. SPAN	SWITCH 1	3	4
100÷150°C (210÷300 °F)	●		●
150÷390°C (300÷730 °F)	●	●	●
390÷510°C (730÷950 °F)			●
510÷1370°C (950÷2500 °F)		●	●

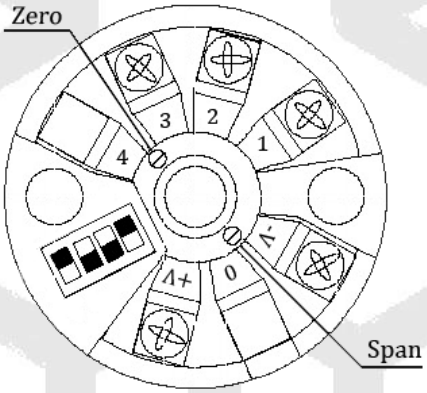
THERMOCOUPLE K PROG. ZERO	SW 2
- 50 ÷ - 10°C (-58 ÷ 14 °F)	
-10 ÷ 50 °C (14 ÷ 122 °F)	●

شکل ۵: جدول 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.

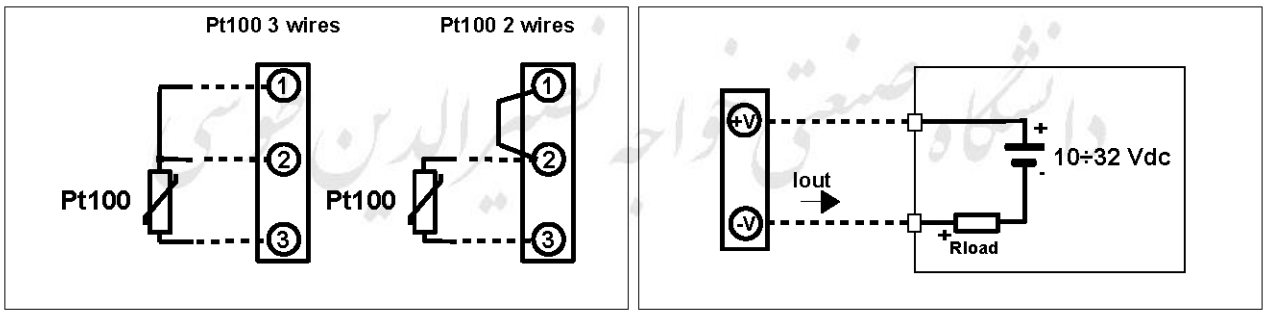
۳-۲- پیاده‌سازی مدار ترنسدیوسر

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).

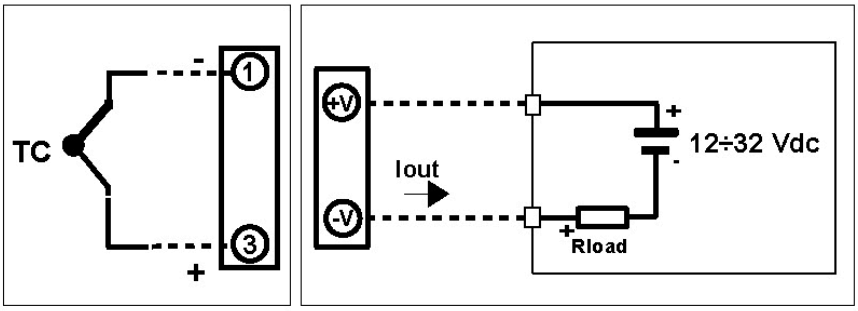


شکل ۶: پایه‌های ترنسدیوسر

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

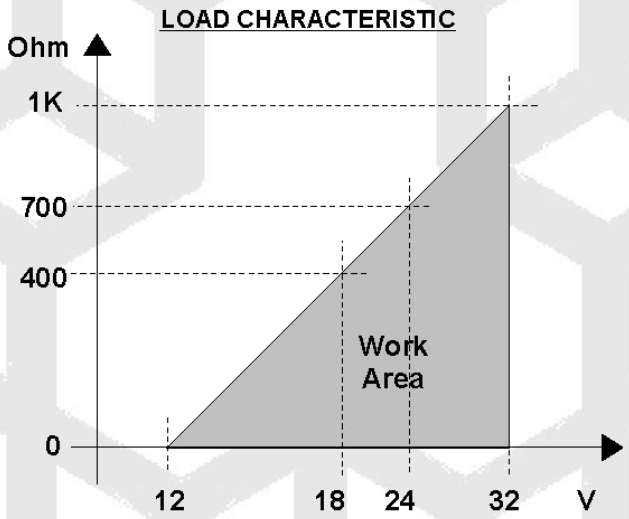


شکل ۷: مدار خارجی ترنسدیوسر RTD



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 نمائید.
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 نمائید.
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 شبیه‌سازمرحله 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[1]، 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[2]، 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 250°C – 25 به ازای تغییرات 5°C یادداشت کنید.

دما °c	ترموکوپل	RTD	دما °c	ترموکوپل	RTD	دما °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 ۱۰- با استفاده از نرم‌افزار متلب، جریان خروجی ترنسدیوسر ترموکوپل و RTD را رسم کنید. آیا خروجی ترنسدیوسرها خطی می‌باشد؟

[1] Zero Potentiometer
[2] Span Potentiometer