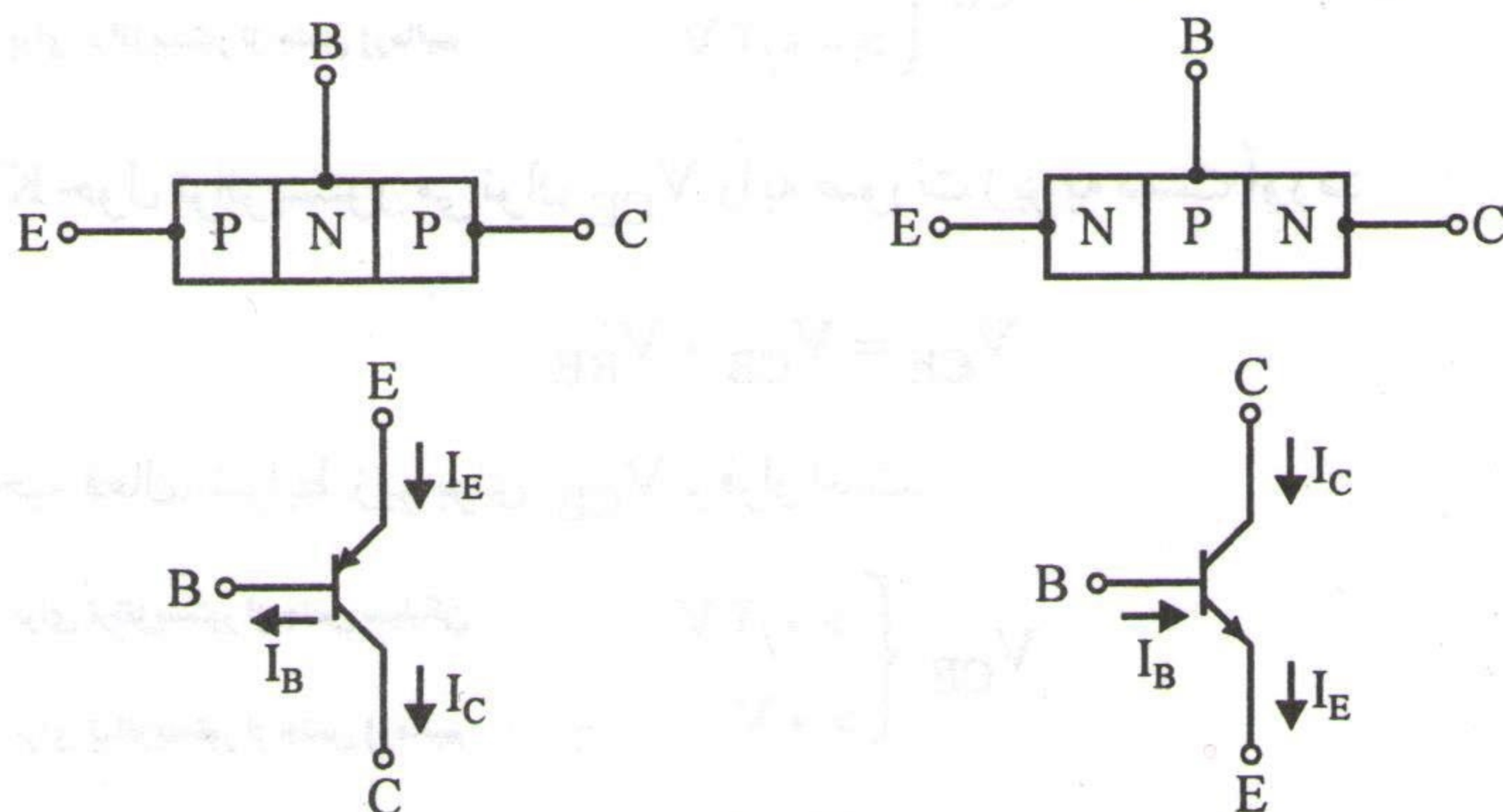


## ۳

### ترانزیستور پیوندی دو قطبی

#### ۱-۳ چکیده

- نماد مداری و شمای ساده ساختمان دو نوع ترانزیستور NPN و PNP و همچنین جهت جریان سرهای ترانزیستور در شکل ۱-۳ نمایش داده شده است.



شکل ۱-۳

- امیتر یا منتشر کننده، حاملهای اکثریت خود را از طریق بیس به طرف کلکتور انتشار می دهد و کلکتور یا جمع کننده، حاملهای تزریقی امیتر به بیس را جذب می کند. بنابراین جریان کلکتور توسط جریان بیس یا امیتر کنترل می شود و در نتیجه ترانزیستور پیوندی را می توان یک منبع جریان کنترل شونده توسط جریان در نظر گرفت.
- در ایجاد جریان سرهای ترانزیستور، هر دو نوع حامل اقلیت و اکثریت دخالت دارند.
- نسبت آن بخش از جریان امیتر که ناشی از حاملهای اکثریت است به کل جریان امیتر را بازده تزریق امیتر گفته و با  $\gamma$  نمایش می دهند. برای افزایش بازده تزریق امیتر، چگالی ناخالصی امیتر را نسبت به چگالی ناخالصی کلکتور و بیس بیشتر می گیرند.



- نسبت مؤلفه‌ای از جریان کلکتور که ناشی از حاملهای جذب شده می‌باشد به مؤلفه‌ای از جریان امیتر که ناشی از حاملهای تزریقی از طرف امیتر است را ضریب انتقال بیس گویند و با  $\alpha^*$  نمایش می‌دهند.  $\alpha^*$  در حقیقت نشان می‌دهد که چند درصد از حاملهای تزریق شده توسط امیتر از بیس عبور کرده و به کلکتور می‌رسند.
- برای افزایش ضریب انتقال بیس، لایه بیس را نازک و چگالی ناخالصی آن را کمتر می‌گیرند. همچنین کلکتور حجیم‌تر و سطح مقطع مشترک آن با بیس بزرگ انتخاب می‌شود. از این رو ترانزیستور پیوندی دارای ساختمان غیرمتقارن است و نمی‌توان سرهای امیتر و کلکتور آن را به جای یکدیگر استفاده کرد.
- **نواحی کار ترانزیستور:** ملاحظه می‌شود که ترانزیستور دارای دو پیوند بیس - امیتر (BE) و بیس - کلکتور (BC) است. بنابراین صرف نظر از نوع ترانزیستور (NPN یا PNP) و بسته به نحوه بایاس این دو پیوند، سه ناحیه کار فعال، اشباع و قطع برای ترانزیستور پیوندی تعریف می‌شود.
- الف) ناحیه فعال:** پیوند BE به صورت مستقیم و پیوند BC به صورت معکوس بایاس می‌گردد. بنابراین چنانچه ترانزیستور از نوع NPN باشد داریم

$$V_{BE(on)} \approx \begin{cases} 0.7V & \text{برای ترانزیستور از جنس سیلیکن} \\ 0.2V & \text{برای ترانزیستور از جنس ژرمانیم} \end{cases}$$

$$V_{CB} \begin{cases} > -0.5V & \text{برای ترانزیستور از جنس سیلیکن} \\ > -0.2V & \text{برای ترانزیستور از جنس ژرمانیم} \end{cases}$$

با نوشتن KVL حول ترانزیستور می‌توان  $V_{CE}$  را به صورت زیر به دست آورد:

$$V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}$$

بنابراین در ناحیه فعال، شرایط زیر برای  $V_{CE}$  برقرار است:

$$V_{CE} \begin{cases} > 0.2V & \text{برای ترانزیستور از جنس سیلیکن} \\ > 0V & \text{برای ترانزیستور از جنس ژرمانیم} \end{cases}$$

برای ترانزیستور PNP دقیقاً همین شرایط، منتها برای ولتاژهای  $V_{EB}$ ،  $V_{BC}$  و  $V_{EC}$  برقرار می‌باشد.

**ب) ناحیه اشباع:** هر دو پیوند BE و BC به صورت مستقیم بایاس می‌شوند. در این حالت  $|V_{CE}|$  مقدار ثابتی خواهد بود و با  $|V_{CE(sat)}|$  نشان داده می‌شود. به عنوان مثال برای ترانزیستور NPN داریم

$$V_{CE(sat)} \approx \begin{cases} 0.2V & \text{برای ترانزیستور از جنس سیلیکن} \\ 0V & \text{برای ترانزیستور از جنس ژرمانیم} \end{cases}$$

در مورد ترانزیستور نوع PNP ولتاژ  $V_{EC}$  دارای مقادیر فوق است.  $V_{BE}$  در حالت اشباع را با  $V_{BE(sat)}$  نشان می‌دهند که معمولاً کمی بزرگ‌تر از  $V_{BE(on)}$  است.



ج) ناحیه قطع: هر دو پیوند BE و BC در حالت قطع هستند. اگر در طراحی، هدف قرار دادن ترانزیستور در ناحیه قطع باشد،  $V_{BE}$  را کمی کمتر از ولتاژ آستانه هدایت پیوند BE در نظر می گیرند. برای ترانزیستور NPN جهت اطمینان از قطع کامل، ولتاژ  $V_{BE}$  را به صورت زیر در نظر می گیرند:

$$V_{BE(cut)} \approx \begin{cases} 0.7V & \text{برای ترانزیستور از جنس سیلیکن} \\ -0.1V & \text{برای ترانزیستور از جنس ژرمانیم} \end{cases}$$

● روابط جریان و ولتاژ سرهای ترانزیستور: با استفاده از قوانین KVL و KCL همواره روابط زیر بین جریان و ولتاژ سرهای یک ترانزیستور برقرار است:

$$I_E = I_C + I_B$$

$$V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}$$

الف) روابط جریان و ولتاژ در ناحیه فعال: در این ناحیه جریان کلکتور دارای دو مؤلفه است. یک مؤلفه ناشی از بایاس معکوس پیوند BC است که در واقع همان جریان اشباع معکوس بوده و با  $I_{CBO}$  یا  $I_{CO}$  نمایش داده می شود. مؤلفه دیگر ناشی از حاملهای تزریق شده از سوی امیتر است که توسط کلکتور جمع می گردند. می توان نشان داد که این مؤلفه با جریان امیتر  $I_E$  متناسب است. ضریب این تناسب را بهره جریان سیگنال بزرگ مدار بیس مشترک گویند و با  $\alpha$  نمایش می دهند. همچنین می توان به راحتی دید که  $\alpha$  برابر حاصل ضرب  $\alpha^*$  و  $\gamma$  است. بنابراین برای جریان کلکتور در ناحیه فعال داریم

$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO}$$

معمولاً در ناحیه فعال می توان از جریان اشباع معکوس صرف نظر کرد؛ که در این صورت معادله فوق به صورت ساده  $I_C = \alpha I_E$  در می آید.  $\alpha$  برای ترانزیستورهای مختلف، بسته به ضریب انتقال بیس و بازده امیتر، بین ۰/۹ تا ۰/۹۹۵ متغیر است. با توجه به معادله اخیر برای جریان کلکتور در ناحیه فعال، جریان کلکتور مستقیماً به ولتاژ  $|V_{CB}|$  وابسته نیست؛ چراکه جریان  $I_E$  به مدار بایاس BE بستگی داشته و جریان اشباع معکوس  $I_{CBO}$  نیز تا قبل از ناحیه شکست تقریباً مستقل از  $|V_{CB}|$  است. بنابراین به ازای یک جریان  $I_E$  ثابت، جریان کلکتور به ازای مقادیر مختلف  $|V_{CB}|$  ثابت می شود، اما به دلیل وقوع پدیده مدولاسیون عرض بیس (اثر اِرلی) جریان  $I_C$  تغییرات کمی داشته و ثابت نخواهد بود.

اثر اِرلی: با افزایش ولتاژ معکوس پیوند CB، پیشرفتگی ناحیه تهی در لایه بیس بیشتر شده و عرض مؤثر بیس (عرض ناحیه خنثی) کاهش می یابد که باعث می گردد درصد کمتری از حاملهای تزریقی امیتر ترکیب مجدد شوند. به عبارت دیگر ضریب انتقال بیس  $\alpha^*$  و در نتیجه  $\alpha$  افزایش می یابد. به این ترتیب در ناحیه فعال و با ثابت بودن جریان امیتر، چنانچه ولتاژ معکوس پیوند CB افزایش یابد جریان  $I_C$  نیز اندکی افزایش خواهد یافت.



در ناحیه فعال می توان جریانهای کلکتور و امیتر را بر حسب جریان بیس به صورت زیر نوشت:

$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO} = \beta I_B + (\beta + 1) I_{CBO}$$

$$I_E = I_C + I_B = (\beta + 1) I_B + (\beta + 1) I_{CBO}$$

$\beta$  در روابط فوق برابر  $\alpha / (1 - \alpha)$  است و بهره جریان مدار امیتر مشترک نامیده می شود. تغییر کوچکی در  $\alpha$  باعث تغییر بزرگی در مقدار  $\beta$  خواهد شد.  $\beta$  از مشخصات ترانزیستور بوده و معمولاً حدود مقادیر آن توسط سازنده داده می شود. معمولاً به دلیل ناچیز بودن  $I_{CBO}$  در دمای معمولی، خصوصاً در ترانزیستورهای از جنس سیلیکن، روابط فوق برای ناحیه فعال به صورت ساده زیر در می آیند:

$$I_C = \beta I_B, \quad I_E = (\beta + 1) I_B$$

ب) روابط جریان و ولتاژ در ناحیه اشباع: در این ناحیه  $|V_{CE}|$  حداقل مقدار خود یعنی  $|V_{CE}(sat)|$  و در نتیجه جریان کلکتور حداکثر مقدار خود، یعنی  $I_C(sat)$  را دارد. بنابراین در این ناحیه رابطه  $I_C = \beta I_B$  به نامساوی  $I_C(sat) < \beta_{min} I_B$  تبدیل می شود. لازم به یادآوری است که  $I_B$  در ناحیه فعال با  $I_B$  در ناحیه اشباع متفاوت است (در صورتی که سایر پارامترها ثابت باشند).

ج) روابط جریان و ولتاژ در ناحیه قطع: شرایط قطع برای ترانزیستور پیوندی،  $I_E = 0$  است. بنابراین در این ناحیه داریم

$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO} = I_{CBO}$$

$$I_B = I_E - I_C = -I_{CBO}$$

توجه نمایید که مدار باز کردن بیس به مفهوم قطع بودن ترانزیستور نیست. در این حالت  $I_B = 0$  است و در نتیجه داریم

$$I_C = I_E = (\beta + 1) I_{CBO} \gg I_{CBO}$$

● جریان اشباع معکوس پیوند CB یعنی  $I_{CBO}$  به ازای هر  $10^\circ C$  افزایش دما، دو برابر می شود. بنابراین بین  $I_{CBO}$  در دمای  $T_2$  و  $I_{CBO}$  در دمای  $T_1$  رابطه زیر برقرار است:

$$I_{CBO}(T_2) = I_{CBO}(T_1) \times 2^{(T_2 - T_1) / 10}$$

● جریان اشباع معکوس  $I_{CBO}$  برای ترانزیستورهای ژرمانیم نسبت به سیلیکن قابل ملاحظه تر می باشد. چرا که ژرمانیم به دلیل داشتن  $n_i$  بزرگ تر دارای چگالی حامل اقلیت بیشتری است.

● منظور از تجزیه و تحلیل یک مدار ترانزیستوری، تعیین ناحیه کار، جریان و ولتاژ سرهای ترانزیستور می باشد.

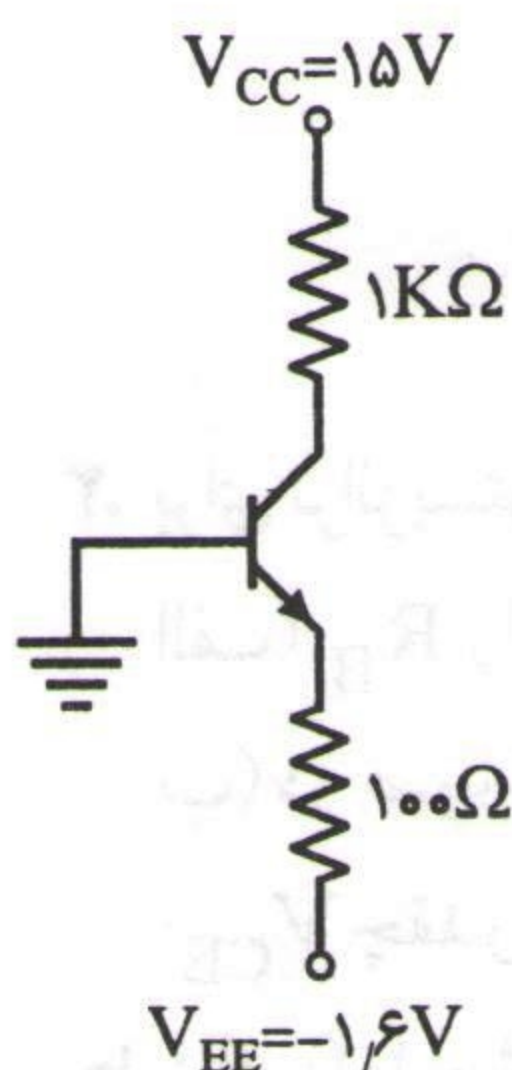


- در تجزیه و تحلیل مدارهای ترانزیستوری نیز همانند مدارهای دیودی چون با یک مدار غیر خطی سرو کار داریم، روش «فرض - حل مدار - بررسی درستی فرض» به کار می رود. به عنوان مثال فرض ناحیه فعال را در نظر می گیریم و مدار را تحلیل کرده، سپس شرط ناحیه فعال را بررسی می کنیم؛ چنانچه به تناقض نرسیدیم، فرض ناحیه فعال صحیح است. در غیر این صورت ترانزیستور در ناحیه اشباع یا قطع خواهد بود.
- با توجه به ساختمان غیر متقارن ترانزیستور پیوندی، مجاز به جابه جایی سرهای کلکتور و امیتر نیستیم. چنانچه از سر کلکتور به عنوان امیتر و بلعکس استفاده شود،  $\beta$  ترانزیستور کاهش زیادی خواهد داشت (چرا؟).
- نقطه کار ترانزیستور: نقطه ای از مشخصه ترانزیستور است که مختصات آن، جریان و ولتاژ DC سرهای ترانزیستور را مشخص می کند. معمولاً از جریان کلکتور ( $I_C$ ) و ولتاژ کلکتور-امیتر ( $V_{CE}$ ) برای مشخص کردن نقطه کار به صورت  $Q(I_{CQ}, V_{CEQ})$  استفاده می شود.
- در فیزیک الکترونیک می توان نشان داد که جریان کلکتور ترانزیستور پیوندی دارای رابطه ای به صورت زیر است:

$$I_C = I_S \left[ \exp \left( \frac{V_{BE}}{V_T} \right) \left( 1 + \frac{V_{CE}}{V_A} \right) \right]$$

که در آن  $V_A$  ولتاژ اِرلی نام دارد و برای اکثر ترانزیستورها بزرگ تر از ۱۰۰ ولت است. مقدار این ولتاژ برای ترانزیستورهای مدار مجتمع حدود ۵۰ تا ۱۰۰ ولت است.

### ۲-۳ مسائل نمونه



۱. در مدار شکل ۲-۳، ترانزیستور دارای  $\beta = 9$  و  $|V_{BE(on)}| = 0.7V$  می باشد.  
 الف) مقادیر جریانهای  $I_E$ ،  $I_C$  و  $I_B$  و ولتاژ  $V_{CE}$  را محاسبه نمایید.  
 ب) به ازای  $V_{CC} = 5V$ ، مقادیر فوق را به دست آورید.  
 ج) برای  $V_{CC} = 5V$  به ازای چه مقداری از  $V_{EE}$ ، ترانزیستور در مرز اشباع قرار می گیرد؟ ( $V_{BE(sat)} = 0.8V$  و  $|V_{CE(sat)}| = 0.2V$ )  
 حل: الف) با فرض فعال بودن ترانزیستور، از KVL در حلقه BE داریم

شکل ۲-۳

$$V_{BE(on)} + 0.1 I_E + V_{EE} = 0 \Rightarrow I_E = 9 \text{ mA}$$

$$I_C = \frac{\beta}{\beta + 1} I_E = 8.1 \text{ mA}, \quad I_B = \frac{I_C}{\beta} = 0.9 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - 1 \times I_C - 0.1 I_E - V_{EE} = 7.6 \text{ V} > 0.2 \text{ V}$$



که فرض ناحیه فعال را تأیید می‌کند. ولتاژ بیس - کلکتور نیز برابر است با

$$V_{BC} = V_{BE} - V_{CE} = -6.9V < 0.5V$$

ب) در این حالت می‌توان دید که فرض ناحیه فعال نادرست خواهد بود، پس ترانزیستور در ناحیه اشباع است و از KVL در حلقه BE داریم

$$V_{BE}(\text{sat}) + 0.1I_E + V_{EE} = 0 \Rightarrow I_E = 8\text{mA}, V_{CE} = V_{CE}(\text{sat}) = 0.2V$$

از KVL در حلقه CE داریم

$$V_{CC} = 1 \times I_C(\text{sat}) + V_{CE}(\text{sat}) + 0.1I_E + V_{EE} \Rightarrow I_C(\text{sat}) = 5.6\text{mA}$$

$$I_B = I_E - I_C = 2.4\text{mA} \Rightarrow \beta I_B = 21.6\text{mA} > I_C(\text{sat})$$

مشاهده می‌شود شرط اشباع بودن ترانزیستور برقرار است.

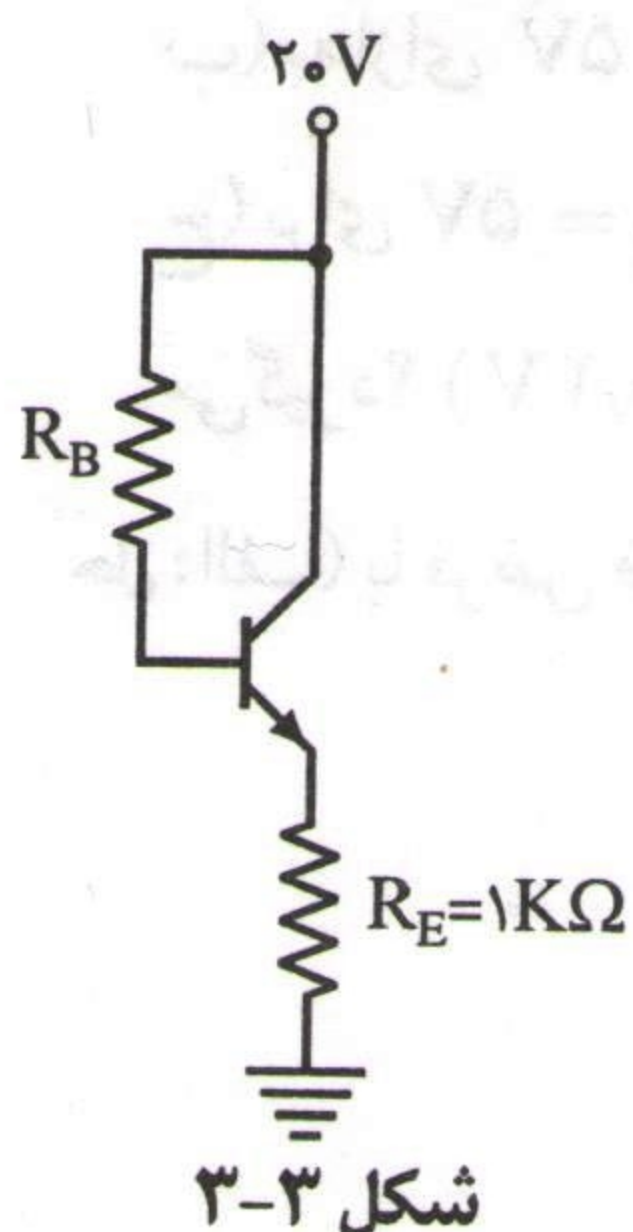
ج) ملاحظه شد که به ازای  $V_{CC} = 5V$  ترانزیستور در ناحیه اشباع قرار گرفته است. حال  $V_{EE}$  را چنان تغییر می‌دهیم که نقطه کار به مرز ناحیه اشباع و فعال منتقل گردد. در مرز این دو ناحیه می‌توان مقادیر ولتاژ و جریان را به صورت زیر در نظر گرفت:

$$V_{CE}(\text{sat}) = 0.2V, I_C(\text{sat}) = \beta I_B, V_{BC} = 0.5V, V_{BE} = 0.7V$$

با نوشتن KVL در حلقه CB داریم

$$V_{BC} - 1 \times I_C(\text{sat}) + V_{CC} = 0 \Rightarrow I_C(\text{sat}) = 5.5\text{mA}, I_E = \left( \frac{\beta + 1}{\beta} \right) I_C(\text{sat}) \approx 6.11\text{mA}$$

$$I_E = \frac{0 - V_{BE} - V_{EE}}{0.1} = 6.11 \Rightarrow V_{EE} = -1.31V$$



شکل ۳-۳

۲. برای ترانزیستور مدار شکل ۳-۳، فرض کنید  $\beta = 100$  و  $V_{BE}(\text{on}) = 0.7V$  است.

الف)  $R_B$  را طوری تعیین کنید که  $V_{CE} = 10V$  گردد.

ب) در صورتی که  $\beta$  ترانزیستور برابر ۱۵۰ باشد، با  $R_B$  محاسبه شده در بند قبل،  $V_{CE}$  چقدر خواهد بود؟

حل: الف) با نوشتن KVL در حلقه CE داریم

$$V_{CE} = 20 - R_E I_E \Rightarrow I_E = 10\text{mA}$$

$$I_B = \frac{I_E}{\beta + 1} = 0.099\text{mA}$$

با نوشتن KVL در حلقه BE داریم

$$20 = R_B I_B + V_{BE}(\text{on}) + R_E I_E \Rightarrow R_B = 93.94\text{K}\Omega$$



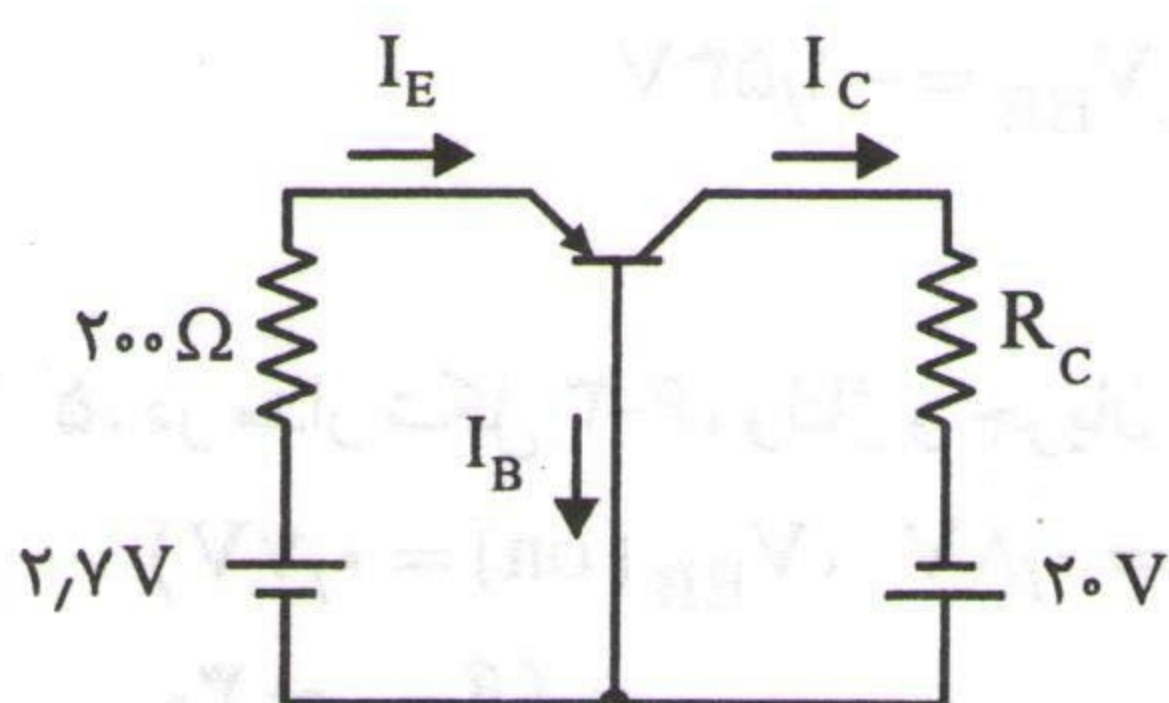
ب) با فرض فعال بودن ترانزیستور، با نوشتن KVL در حلقه BE داریم

$$20 = 93.94 I_B + V_{BE(on)} + 1 \times (\beta + 1) I_B$$

$$\Rightarrow I_B = 0.788 \text{ mA} , I_E = 151 I_B = 11.9 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = 20 - R_E I_E = 11.1 \text{ V} > 0.2 \text{ V}$$

بنابراین فرض ناحیه فعال صحیح است.



شکل ۳-۴

۳. در مدار شکل ۳-۴، با فرض اینکه ترانزیستور دارای

$$\alpha = 0.9 \text{ و } |V_{BE(on)}| = 0.7 \text{ V} \text{ است،}$$

الف) جریانهای  $I_E$ ،  $I_C$  و  $I_B$  را محاسبه کنید.

ب) اگر بخواهیم قدر مطلق ولتاژ  $V_{CE}$  از ۲۰ ولت تجاوز نکند

$$(|V_{CE,max}| = 20 \text{ V}) \text{، حداقل مقدار } R_C \text{ چقدر باید باشد؟}$$

حل: الف) از معادله KVL در حلقه EB داریم

$$2.7 = 0.2 I_E + V_{EB(on)} , I_E = (1 + \beta) I_B , \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = 9$$

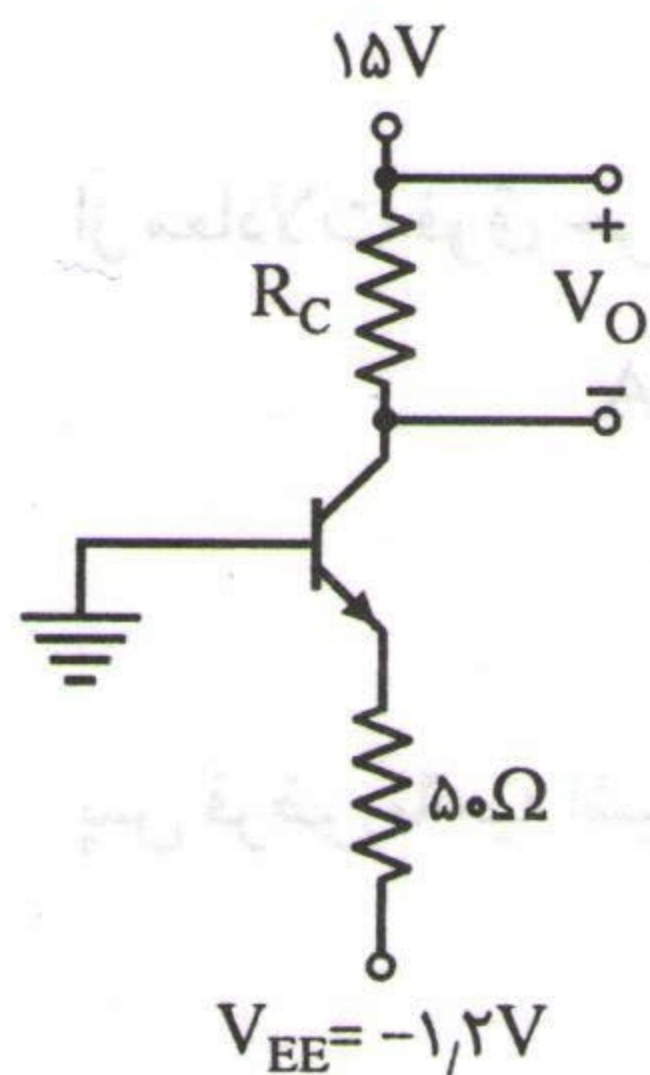
از حل معادله فوق  $I_B = 1 \text{ mA}$  به دست می آید و داریم

$$I_E = (1 + \beta) I_B = 10 \text{ mA} , I_C = \beta I_B = 9 \text{ mA}$$

ب) از معادله KVL در حلقه EC داریم

$$2.7 = 0.2 I_E + V_{EC} + R_C I_C - 20 \Rightarrow V_{EC} = 20.7 - 9 R_C$$

$$V_{EC} < 20 \Rightarrow R_C \geq 78 \Omega$$



شکل ۳-۵

۴. در مدار شکل ۳-۵ ترانزیستور دارای  $\alpha = 0.9$  و  $V_{BE(on)} = 0.7 \text{ V}$  است.

الف) به ازای چه مقدار  $R_C$ ، قدر مطلق ولتاژ خروجی برابر ۴/۵ ولت می شود؟

در این صورت  $V_{CE}$  چقدر خواهد بود؟

ب) اگر بخواهیم با مقاومت  $R_C$  بند (الف)، ولتاژ  $V_{CB}$  برابر ۷/۵ ولت گردد،

ولتاژ منبع  $V_{EE}$  را چقدر باید تغییر داد؟

حل: الف) با فرض اینکه ترانزیستور در ناحیه فعال باشد از KVL حلقه BE داریم

$$I_E = \frac{-V_{BE(on)} - V_{EE}}{R_E} = 10 \text{ mA} , \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = 9$$

$$I_C = \alpha I_E = 9 \text{ mA} , V_O = R_C I_C = 4.5 \text{ V} \Rightarrow R_C = 0.5 \text{ K}\Omega$$



جهت بررسی فرض ناحیه فعال،  $V_{CE}$  را به دست می آوریم

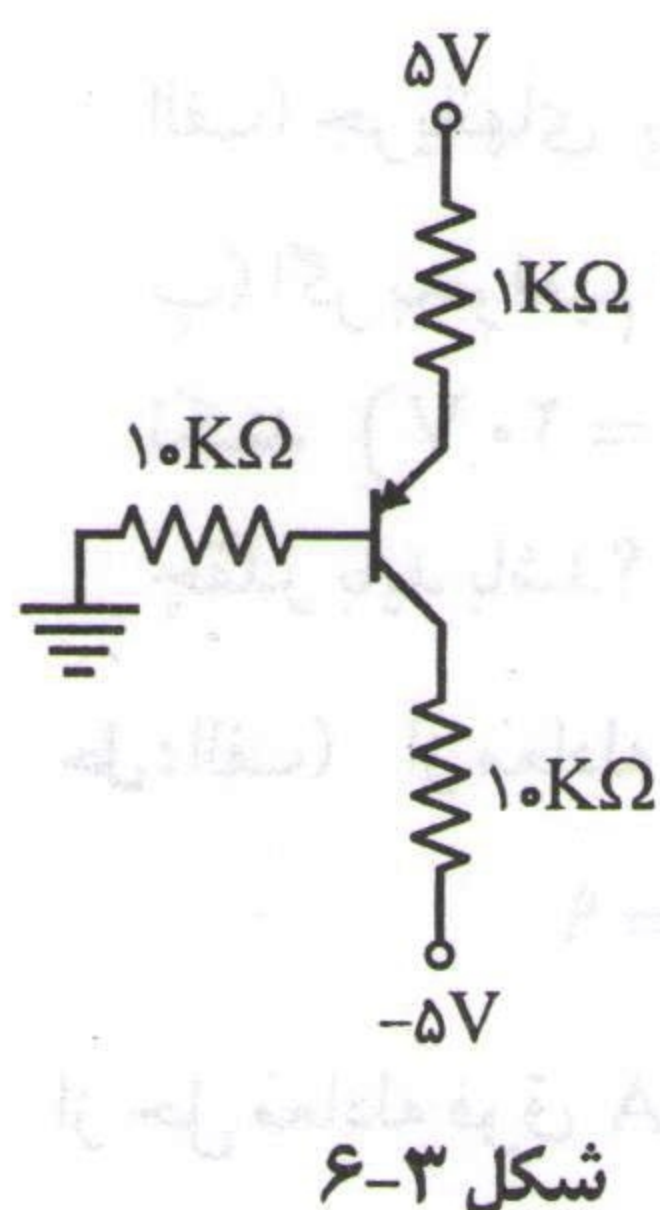
$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C - R_E I_E - V_{EE} = 11.2 > 0.2V$$

ب) با فرض  $V_{CB} = 7.5V$  ترانزیستور در ناحیه فعال قرار دارد و با نوشتن KVL در حلقه CB داریم

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CB}}{R_C} = 15mA, \quad I_E = I_C / \alpha = 16.67mA$$

$$I_E = \frac{-V_{BE}(on) - V_{EE}}{R_E} = 16.67mA \Rightarrow V_{EE} = -1.53V$$

■



شکل ۳-۶

۵. در مدار شکل ۳-۶، ولتاژ و جریان سرهای ترانزیستور را محاسبه نمایید.

$$V_{EB}(on) = 0.7V, \quad V_{EB}(sat) = 0.8V, \quad V_{EC}(sat) = 0.2V \quad \text{و} \quad (\beta_{min} = 30)$$

حل: فرض نمایید ترانزیستور در ناحیه فعال قرار دارد. با نوشتن KVL در حلقه EB داریم

$$5 = 1 \times (\beta + 1) I_B + V_{EB}(on) + 10 I_B \Rightarrow I_B = 0.1mA$$

$$I_E = 31 I_B = 3.1mA, \quad I_C = 30 I_B = 3mA$$

$$V_{EC} = 5 - 1 \times I_E - 10 I_C - (-5) = -23.1V!$$

بنابراین فرض ناحیه فعال نادرست بوده و ترانزیستور در ناحیه اشباع قرار دارد. با نوشتن KVL در حلقه EC و EB داریم

$$5 = 1 \times I_E + V_{EC}(sat) + 10 I_C(sat) + (-5), \quad 5 = 1 \times I_E + V_{EB}(sat) + 10 I_B$$

$$I_E = I_B + I_C(sat)$$

از معادلات فوق جریان سرهای ترانزیستور برابر است با

$$I_B = 0.3mA, \quad I_C(sat) = 0.863mA, \quad I_E = 1.17mA$$

$$\Rightarrow \beta_{min} I_B = 30 \times 0.3 = 9 > I_C(sat) = 0.863mA$$

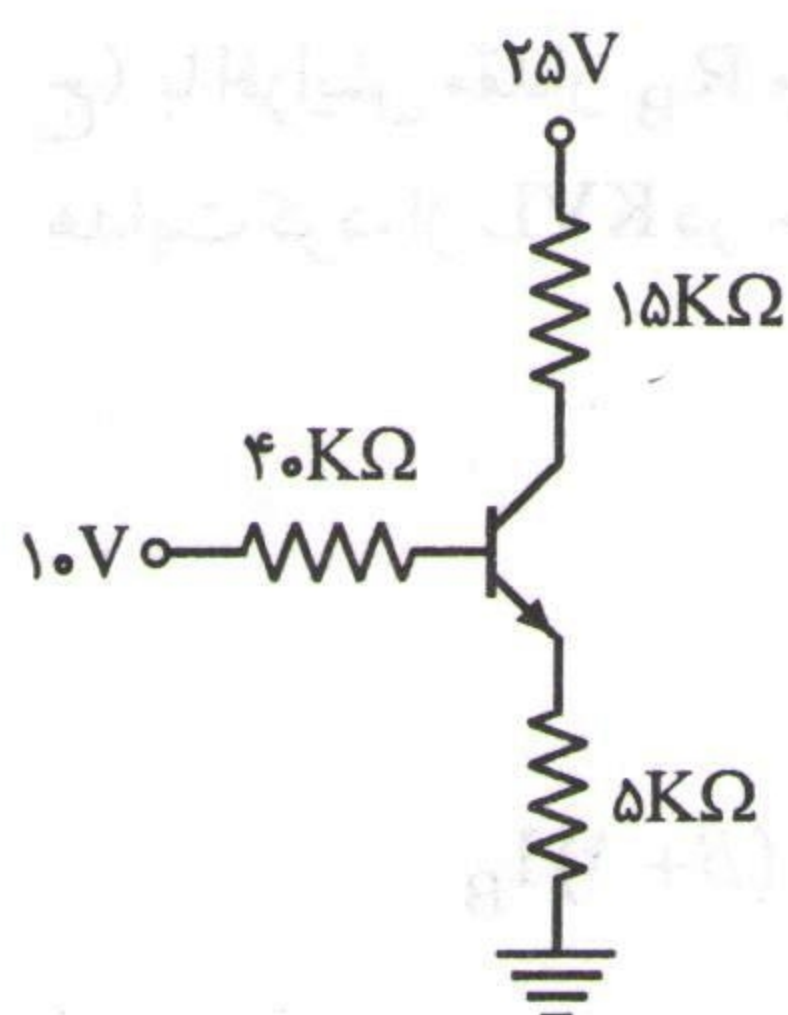
پس فرض ناحیه اشباع صحیح خواهد بود. ولتاژ سرهای ترانزیستور برابرند با

$$V_B = 10 I_B = 3V, \quad V_E = V_B + V_{EB}(sat) = 3.8V$$

$$V_C = V_E - V_{EC}(sat) = 3.6V$$

■





شکل ۷-۳

۶. در مدار شکل ۷-۳، ترانزیستور از جنس سیلیکن بوده و دارای  $\beta = 50$  می باشد ( $V_{BE}(on) = 0.7V$  و  $V_{BE}(sat) = 0.8V$ ).

(الف) نقطه کار و ناحیه کار ترانزیستور را تعیین کنید.

(ب) مقدار  $R_E$  را که به ازای آن ترانزیستور از ناحیه کار قبلی خارج می گردد، به دست آورید.

(ج) بند (ب) را با تغییر مقدار  $R_B$  انجام دهید.

حل: (الف) فرض کنید که ترانزیستور در ناحیه فعال قرار دارد. با نوشتن KVL در حلقه BE داریم

$$10 = 40 I_B + V_{BE}(on) + 5 I_E, \quad I_E = (\beta + 1) I_B = 51 I_B$$

$$\Rightarrow I_B = 31.5 \mu A \Rightarrow I_E = 1.61 mA, \quad I_C = \beta I_B = 1.58 mA$$

$$KVL CE: 25 = 15 I_C + V_{CE} + 5 I_E \Rightarrow V_{CE} = -6.75 V!$$

بنابراین فرض ناحیه فعال صحیح نیست و ترانزیستور در ناحیه اشباع قرار دارد. از KVL در حلقه های BE و CE داریم

$$10 = 40 I_B + 0.8 + 5 I_E$$

$$25 = 15(I_E - I_B) + 0.2 + 5 I_E$$

از حل دو معادله فوق  $I_B$  و  $I_E$  برابر است با

$$I_B = 0.686 mA, \quad I_E = 1.29 mA \Rightarrow I_C = I_E - I_B = 1.223 mA$$

$$\beta I_B = 3.43 > I_C(sat) = 1.223 mA$$

(ب) برای خارج شدن از ناحیه اشباع باید روابط زیر برقرار باشد:

$$V_{CE} \geq V_{CE}(sat) = 0.2 V, \quad I_C = \beta I_B$$

با افزایش  $R_E$  می توان ترانزیستور را از ناحیه اشباع خارج کرد. مقدار مرزی  $R_E$  را با در نظر گرفتن  $V_{CE} = 0.2 V$  و  $I_C = \beta I_B$  به دست می آوریم. از KVL در حلقه های BE و CE داریم

$$10 = 40 I_B + V_{BE}(on) + R_E (\beta + 1) I_B$$

$$25 = 15 \beta I_B + V_{CE}(sat) + R_E (\beta + 1) I_B$$

از معادلات فوق  $R_E$  برابر  $7.48$  کیلو اهم به دست می آید. اگر  $R_E$  کمتر از این مقدار باشد باعث افزایش جریان بیس و در نتیجه اشباع ترانزیستور می گردد.



ج) با افزایش مقدار  $R_B$  و در نتیجه کاهش جریان بیس می توان ترانزیستور را از ناحیه اشباع به ناحیه فعال هدایت کرد، از KVL در حلقه های BE و CE در مرز ناحیه فعال و اشباع داریم

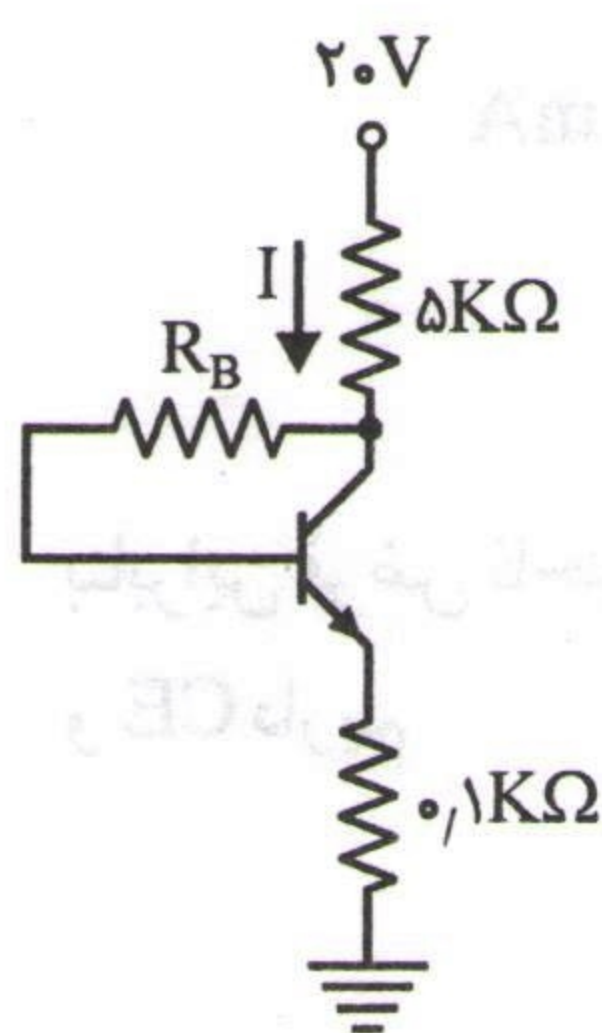
$$10 = R_B I_B + V_{BE(on)} + \Delta I_E$$

$$25 = 15 I_C + V_{CE} + \Delta I_E$$

$$V_{CE} = V_{CE(sat)} = 0.2V, \quad I_C = \beta I_B = 50 I_B, \quad I_E = (\beta + 1) I_B$$

$$\Rightarrow R_B = 121.875 K\Omega$$

با افزایش  $R_B$  از مقدار فوق، ترانزیستور وارد ناحیه فعال می گردد.



۷. در مدار شکل ۸-۳، ترانزیستور دارای  $\beta = 100$  و  $V_{BE(on)} = 0.7V$  است.

مقدار مقاومت  $R_B$  را که به ازای آن  $V_{CE} = 4V$  می گردد، به دست آورید.

حل: با نوشتن KCL در گره کلکتور و KVL در حلقه CE داریم

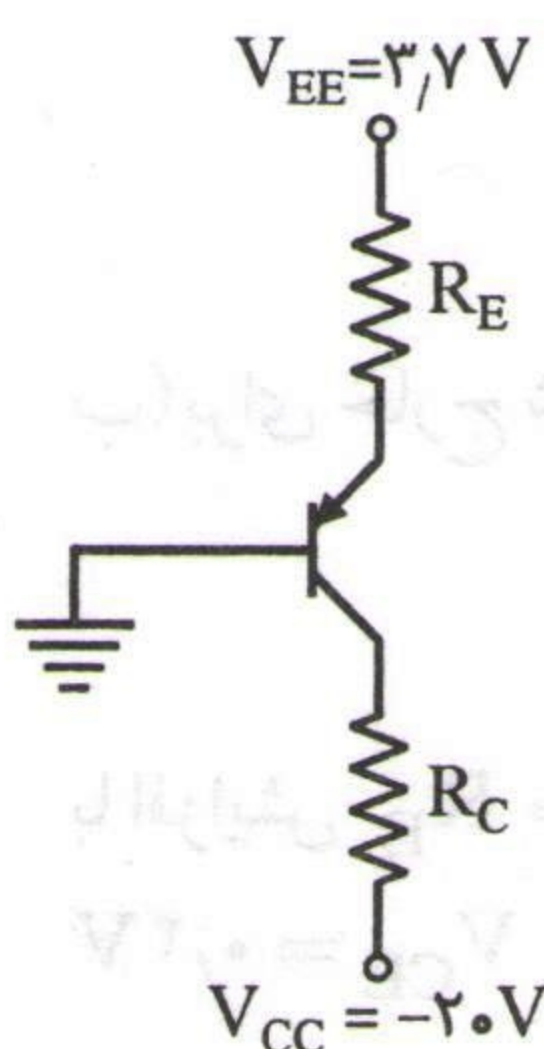
$$I = I_C + I_B = I_E, \quad 20 = 5I + V_{CE} + 0.1I_E$$

$$\Rightarrow I_E = 3.14mA, \quad I_B = \frac{I_E}{101} = 0.031mA$$

$$KVL\ CBE: 20 = 5I + R_B I_B + V_{BE(on)} + 0.1I_E$$

شکل ۸-۳

$$\Rightarrow R_B = 106 K\Omega$$



شکل ۹-۳

۸. در مدار شکل ۹-۳، ترانزیستور دارای  $\alpha = 0.9$  و  $|V_{BE(on)}| = 0.7V$  و  $|V_{CE(sat)}| = 0.2V$  می باشد.

الف) مقدار مقاومت  $R_E$  چقدر باید باشد تا جریان کلکتور در ناحیه فعال برابر  $1.8mA$  گردد؟

ب) مقدار  $R_C$  که ترانزیستور را به مرز اشباع می برد چقدر است؟

ج) برای ثابت ماندن جریان  $I_C$  (ترانزیستور به صورت منبع جریان ثابت عمل کند) چه مقادیری برای  $R_C$  قابل قبول است؟ برای این مقادیر، اگر جهت قطبهای  $V_{CC}$  عوض گردد چه می شود؟

$$I_E = I_C / \alpha = 2mA \quad (\text{حل: الف})$$

$$I_E = \frac{V_{EE} - V_{EB(on)}}{R_E} = \frac{3.7 - 0.7}{R_E} = 2mA \Rightarrow R_E = 1.5K\Omega$$



ب) با نوشتن KVL در حلقه EC داریم

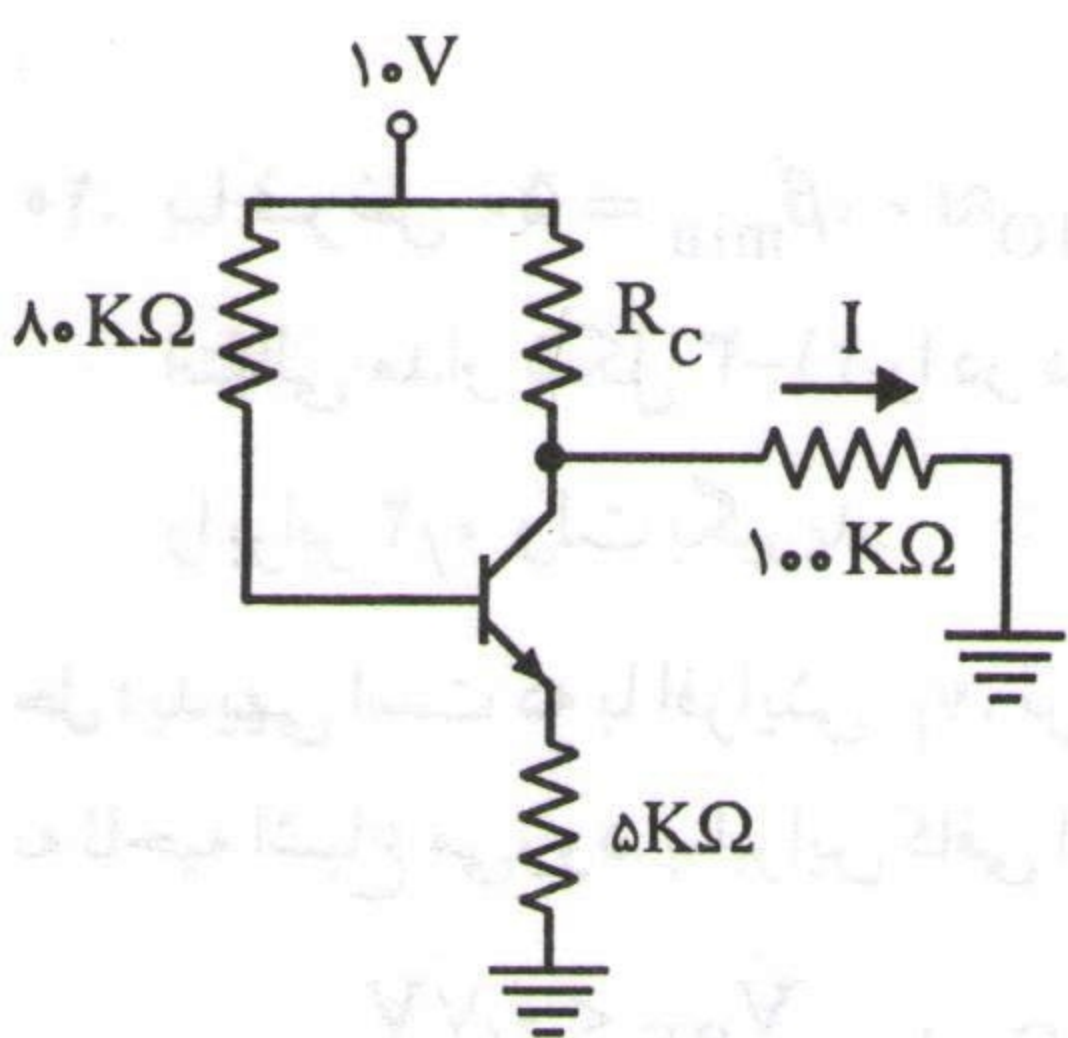
$$V_{EE} = R_E I_E + V_{EC}(\text{sat}) + R_C I_C + V_{CC}$$

$$20.7 - 1.8 R_C = 0.2 \Rightarrow R_C = 11.39 \text{ K}\Omega$$

ج) ترانزیستور در ناحیه فعال همانند یک منبع جریان عمل می‌نماید و جریان کلکتور مستقل از  $R_C$  خواهد بود. بنابراین

$$V_{EC} > 0.2 \text{ V} \Rightarrow 20.7 - 1.8 R_C > 0.2 \Rightarrow R_C < 11.39 \text{ K}\Omega$$

اگر جهت قطبهای  $V_{CC}$  عوض شود، با اینکه پیوند BE بایاس مستقیم شده است ولی  $I_C = 0$  می‌باشد و در واقع مثل این است که ترانزیستور به صورت یک دیود (دیود BE) بایاس شده است.



شکل ۱۰-۳

۹. در مدار شکل ۱۰-۳، با فرض  $\beta = 100$ ،  $V_{BE}(\text{on}) = 0.7 \text{ V}$  و

$$V_{CE}(\text{sat}) = 0.2 \text{ V}$$

الف) به ازای  $R_C = 5 \text{ K}\Omega$  ولتاژ و جریان سرهای ترانزیستور را محاسبه کنید.

ب) مقدار مقاومت  $R_C$  را طوری تعیین کنید که  $V_{CE} = 1 \text{ V}$  شود.

حل: الف) از KVL در حلقه BE داریم

$$10 = 80 I_B + V_{BE}(\text{on}) + 5 I_E, \quad I_E = (1 + \beta) I_B$$

$$\Rightarrow I_B = 0.16 \text{ mA}, \quad I_C = \beta I_B = 1.59 \text{ mA}, \quad I_E = 1.606 \text{ mA}$$

برای به دست آوردن نقطه کار ترانزیستور به منظور اطمینان از فعال بودن ترانزیستور، ابتدا جریان در مقاومت  $100 \text{ K}\Omega$  را با استفاده از KVL زیر به دست می‌آوریم:

$$10 = R_C (I_C + I) + 100 I \Rightarrow I = 0.02 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = 10 - R_C (I_C + I) - 5 I_E = -6.08 \text{ V}$$

بنابراین ترانزیستور در ناحیه اشباع است و داریم

$$10 = R_C (I_C + I) + V_{CE}(\text{sat}) + 5 I_E$$

$$V_{CE}(\text{sat}) + 5 I_E = 100 I \Rightarrow I = \frac{5 I_E + 0.2}{100}$$

با قرار دادن  $I$  در معادله قبل و با توجه به اینکه  $I_E = I_B + I_C$  داریم

$$5.25 I_B + 10.25 I_C = 9.79$$



از KVL در حلقه BE داریم

$$10 = 10 I_B + V_{BE(on)} + 5 I_E \Rightarrow 15 I_B + 5 I_C = 9.3$$

از حل دو معادله فوق داریم

$$I_B \approx 0.7055 \text{ mA}, I_C \approx 0.925 \text{ mA} \Rightarrow I_E = 0.98 \text{ mA}$$

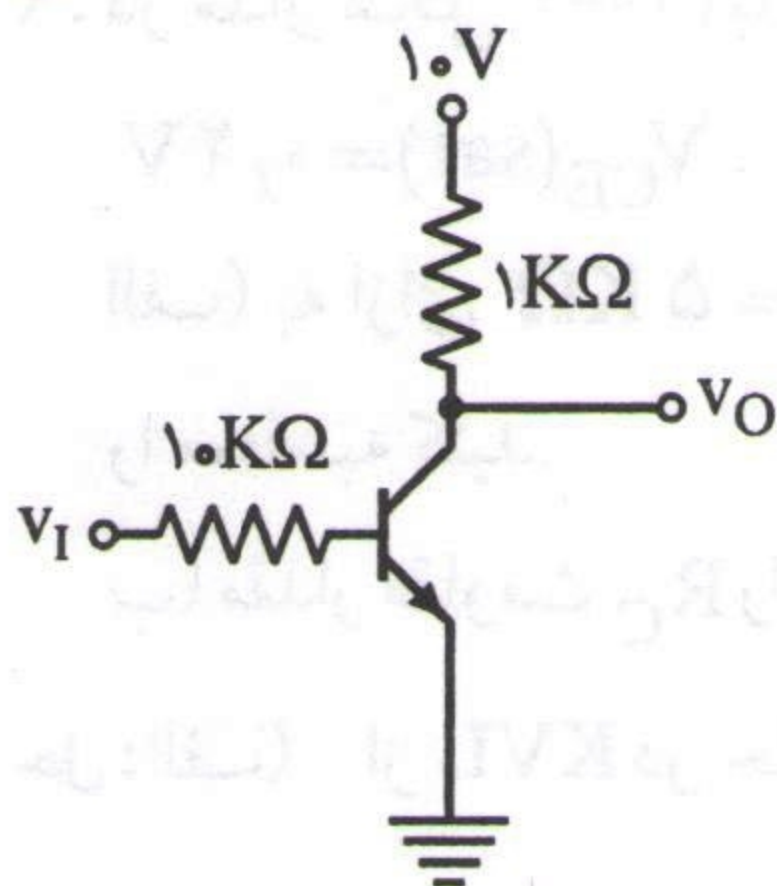
ب) در این حالت ترانزیستور در ناحیه فعال قرار داشته و از KVL در حلقه BE، جریان  $I_B$  و در نتیجه  $I_C$  و  $I_E$  به ترتیب  $0.7055 \text{ mA}$ ،  $0.925 \text{ mA}$  و  $0.98 \text{ mA}$  به دست می آید. ولتاژ کلکتور ترانزیستور برابر است با

$$V_C = V_{CE} + 5 I_E = 9.03 \text{ V}$$

$$V_C = 10 - R_C(I_C + I) \Rightarrow I = \frac{V_C - 0}{100} = 0.903 \text{ mA}$$

$$\Rightarrow R_C = 577 \Omega$$

■



۱۰. با فرض  $\beta_{min} = 50$ ،  $I_{CBO} \approx 0$  و  $V_{BE(on)} = 0.7 \text{ V}$ ، مشخصه

انتقالی مدار شکل ۱۱-۳ را در دمای  $25^\circ \text{C}$  به دست آورید.  $V_{CE(sat)}$

را برابر  $0.2 \text{ V}$  و ولت بگیرید.

حل: بدیهی است که با افزایش  $v_I$ ، ترانزیستور از ناحیه قطع به فعال و سپس به ناحیه اشباع می رود. بنابراین کافی است مرزهای سه ناحیه مشخص شوند.

$$\Rightarrow I_B = -I_{CBO} \text{ ناحیه قطع}, V_{BE} < 0.7 \text{ V}$$

شکل ۱۱-۳

$$v_I = 10 I_B + V_{BE} = V_{BE} \Rightarrow v_I < 0.7 \text{ V}$$

به این ترتیب می توان برای مقادیر  $v_I < 0.7 \text{ V}$  ترانزیستور را قطع در نظر گرفت که در نتیجه خروجی تقریباً  $10 \text{ V}$  ولت خواهد بود. برای  $v_I \geq 0.7 \text{ V}$  ترانزیستور فعال بوده و  $v_O$  از رابطه زیر به دست می آید:

$$v_O = 10 - 1 \times I_C = 10 - \beta I_B = 10 - \beta \left( \frac{v_I - 0.7}{10} \right) = 13.5 - 5v_I$$

مرز اشباع چنین به دست می آید:

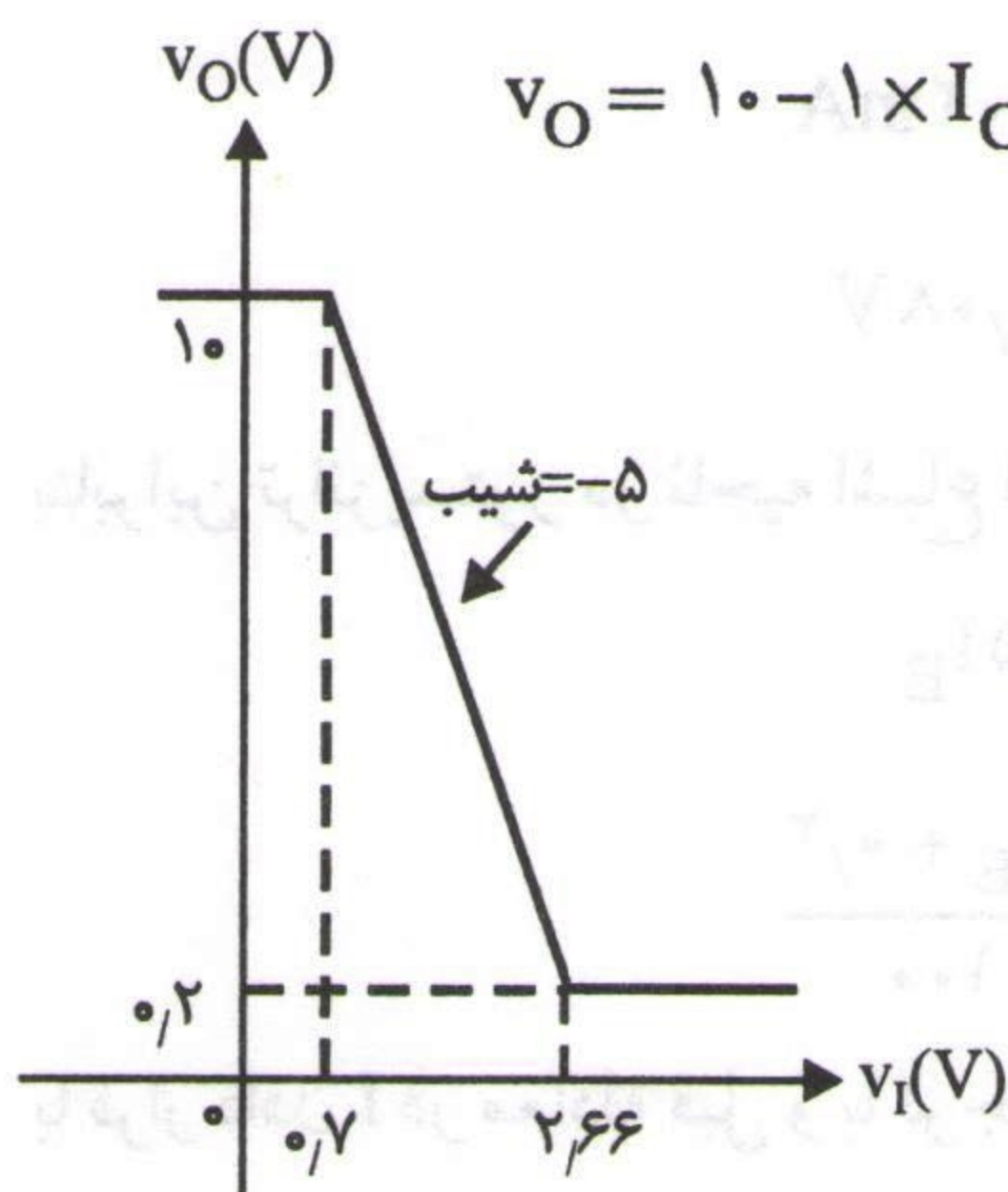
$$\beta_{min} I_B = I_C(sat)$$

$$\Rightarrow 50 \left( \frac{v_I - 0.7}{10} \right) = \frac{10 - 0.2}{1} \Rightarrow v_I = 2.66 \text{ V}$$

یعنی به ازای مقادیر  $v_I \geq 2.66 \text{ V}$  ترانزیستور در ناحیه اشباع و

خروجی برابر  $0.2 \text{ V}$  ولت خواهد بود. بنابراین مشخصه انتقالی مدار

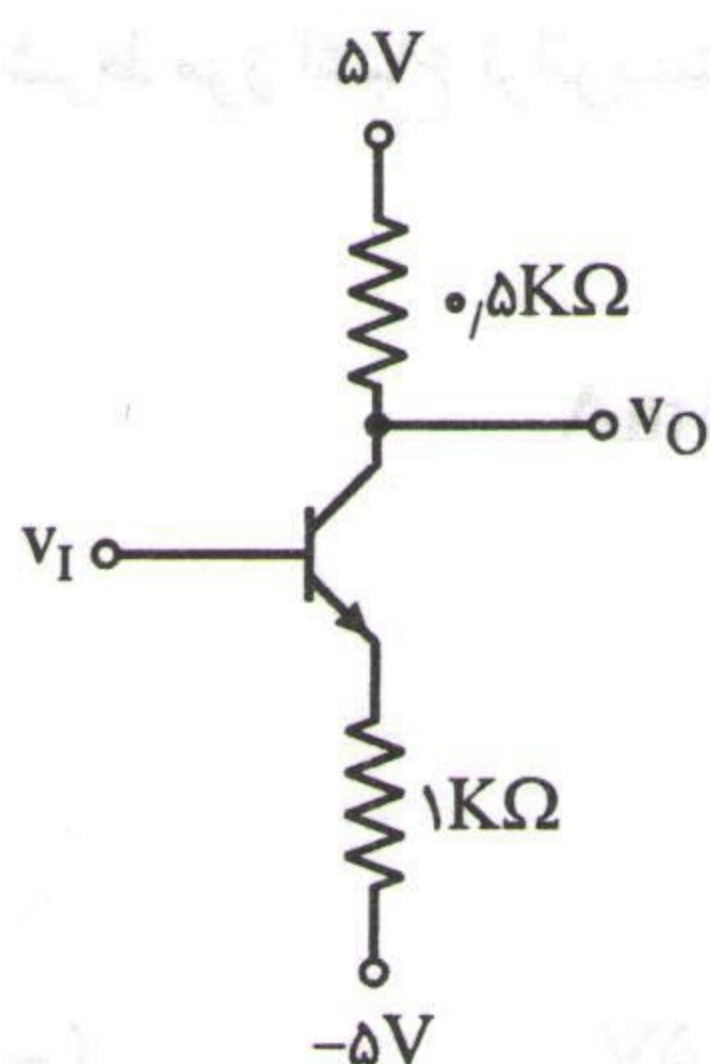
به صورت شکل ۱۲-۳ خواهد بود.



شکل ۱۲-۳

■





شکل ۳-۱۳

۱۱. مدار شکل ۳-۱۳ را در نظر بگیرید.

الف) خروجی  $v_O$  را به ازای ورودیهای  $v_I = 0, -3, 2.5$  ولت به دست آورید.

ب) مقادیر  $v_I$  و  $v_O$  را برای حالتی که قطع و اشباع ترانزیستور بیابید.

ج) مشخصه انتقالی مدار ( $v_O$  بر حسب  $v_I$ ) را به ازای  $-6 \leq v_I \leq 6$  ولت رسم کنید.

حل: الف) با فرض اینکه ترانزیستور در ناحیه فعال است برای  $v_I = -3V$  داریم

$$I_E = \frac{v_I - V_{BE} - (-5)}{1} = 1.3 \text{ mA}, \quad I_C \approx I_E$$

$$V_{CE} = 5 - R_C I_C - R_E I_E - (-5) = 1.05 \text{ V} > 0.2 \text{ V}$$

بنابراین فرض ناحیه فعال صحیح است و داریم

$$v_O = 5 - R_C I_C = 4.35 \text{ V}$$

به ازای  $v_I = 0V$  نیز ابتدا فرض می‌کنیم ترانزیستور فعال است. بنابراین

$$I_E = \frac{0 - 0.7 - (-5)}{1} = 4.3 \text{ mA}, \quad I_C \approx I_E$$

$$V_{CE} = 10 - (R_C + R_E) \times 4.3 = 3.55 \text{ V} > 0.2 \text{ V}$$

پس فرض ناحیه فعال صحیح است و داریم

$$v_O = 5 - R_C I_C = 2.85 \text{ V}$$

در حالت  $v_I = 2.5V$  مجدداً فرض می‌کنیم ترانزیستور در ناحیه فعال است.

$$I_E = \frac{2.5 - 0.7 - (-5)}{1} = 6.8 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = 10 - (R_C + R_E) \times 6.8 = -0.2 \text{ V} < 0.2 \text{ V}$$

پس فرض ناحیه فعال صحیح نبوده و ترانزیستور اشباع خواهد بود. از KVL در حلقه CB داریم

$$v_O = -V_{BC}(\text{sat}) + v_I = -0.6 + 2.5 = 1.9 \text{ V}$$

ب) شرط قطع بودن ترانزیستور به صورت زیر است:

$$I_C \approx I_E = 0 \Rightarrow v_O = 5 \text{ V}$$

$$V_{BE} = v_I - (-5) \leq 0.7 \Rightarrow v_I \leq -4.3 \text{ V}$$



شرط مرز اشباع ترانزیستور نیز به صورت زیر است:

$$V_{CE}(\text{sat}) = 0.2V, \quad I_C(\text{sat}) = \beta I_B \approx I_E$$

$$\text{KVL CE: } 10 = 1.5 I_C(\text{sat}) + 0.2 \Rightarrow I_C(\text{sat}) = 6.5 \text{ mA}$$

$$\Rightarrow v_O = 5 - 0.5 \times 6.5 = 1.7V$$

$$v_I = V_{BC}(\text{sat}) + v_O = 0.6 + 1.7 = 2.3V$$

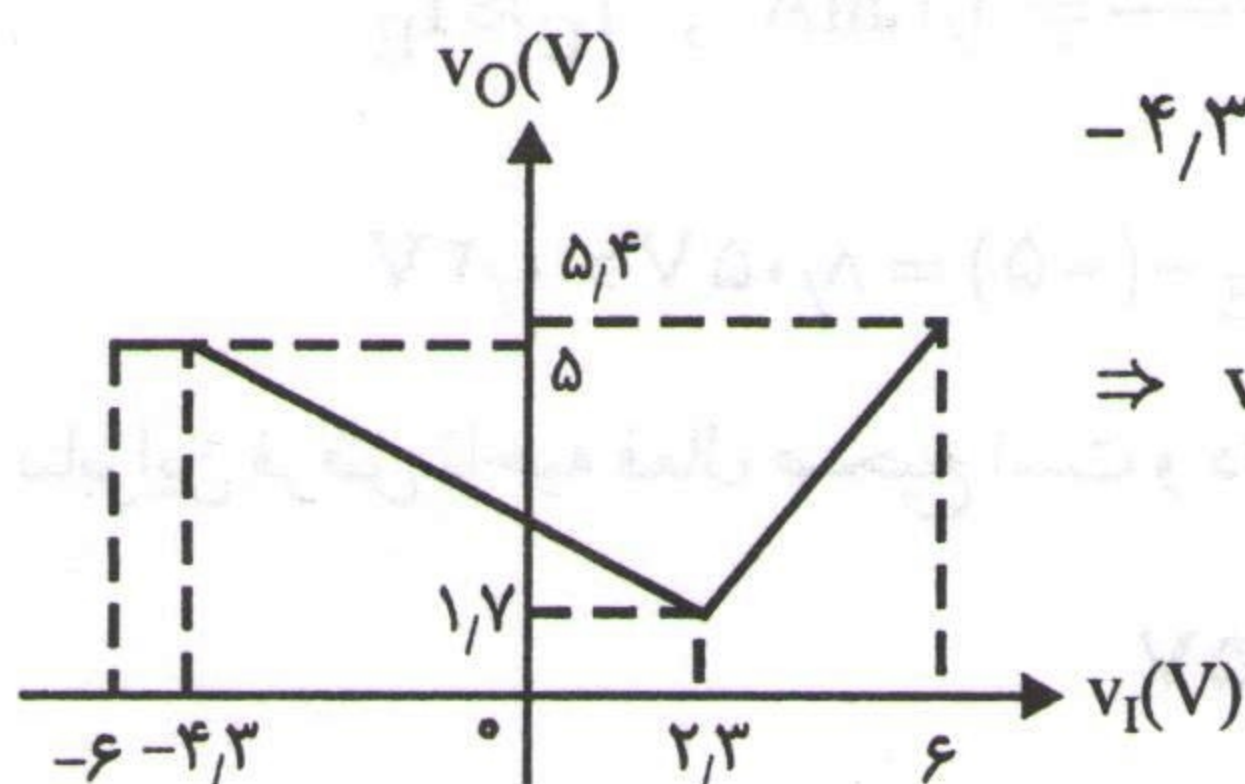
$$v_I \leq -4.3V \Rightarrow Q: \text{ قطع} \Rightarrow v_O = 5V \quad (\text{ج})$$

$$-4.3V < v_I \leq 2.3V \Rightarrow Q: \text{ فعال} \Rightarrow v_O = 5 - 0.5 I_C$$

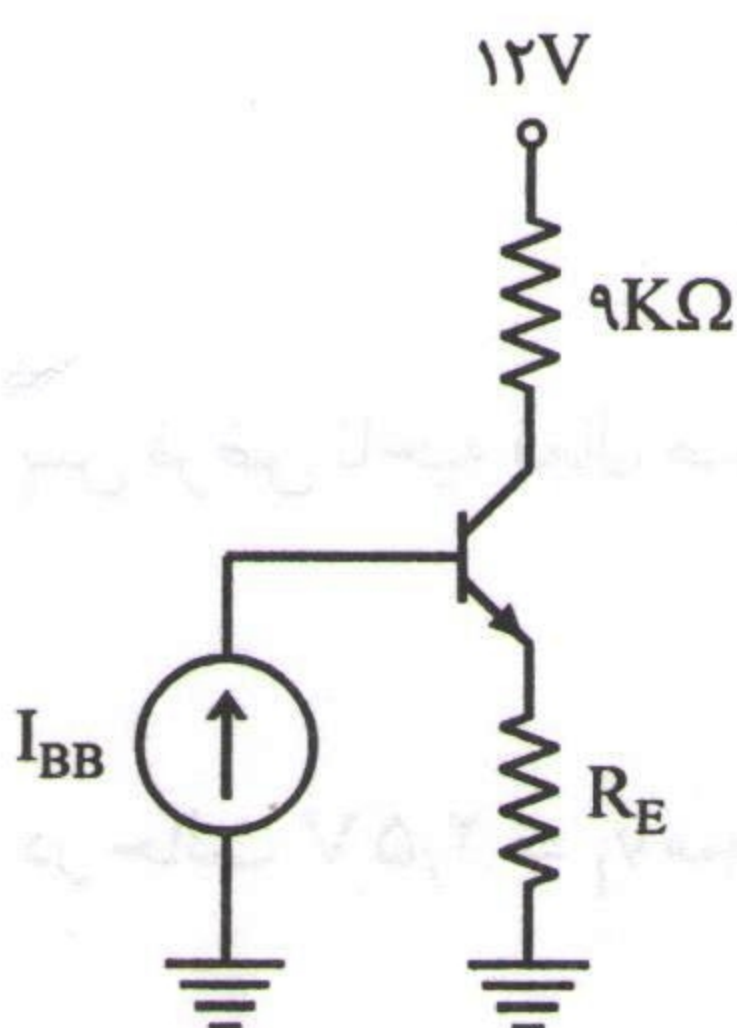
$$\Rightarrow v_O \approx 5 - 0.5 I_E = 5 - 0.5 \frac{v_I - 0.7 - (-5)}{1} = 2.85 - \frac{1}{2} v_I$$

$$v_I \geq 2.3V \Rightarrow Q: \text{ اشباع} \Rightarrow v_O = v_I - 0.6$$

مشخصه انتقالی در شکل ۱۴-۳ رسم گردیده است.



شکل ۱۴-۳



شکل ۱۵-۳

۱۲. در مدار شکل ۱۵-۳،  $\beta$  ترانزیستور بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ تغییر می‌کند و

جریان  $I_{BB}$  مقدار ثابت  $0.1 \text{ mA}$  می‌باشد.

الف) به ازای  $R_E = 1 \text{ k}\Omega$  ترانزیستور چه وضعیتی دارد؟

ب) به ازای چه مقادیری از  $R_E$  ترانزیستور همواره اشباع خواهد بود؟

$$\text{حل: الف)} \quad V_{CE} \approx 12 - (9 + R_E) \beta I_{BB} = 12 - 0.1 \beta$$

$$\beta = 100 \Rightarrow V_{CE} = 2V, \quad \beta = 118 \Rightarrow V_{CE} = 0.2V$$

بنابراین ترانزیستور به ازای  $\beta$  های بین ۱۰۰ و ۱۱۸ در ناحیه فعال و به ازای

$\beta$  های بزرگ‌تر از ۱۱۸ از جمله  $\beta$  متوسط، در ناحیه اشباع قرار دارد.

ب) با فرض اشباع ترانزیستور، از KVL در حلقه CE داریم

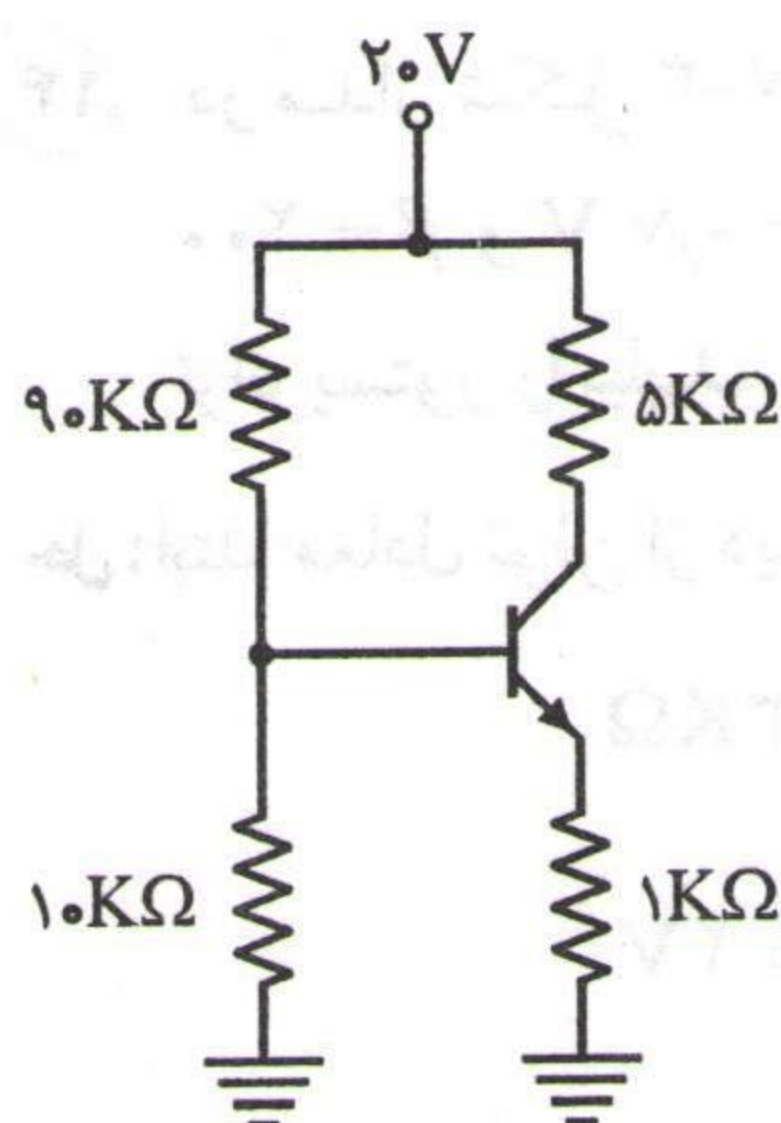
$$12 = 9 I_C(\text{sat}) + V_{CE}(\text{sat}) + R_E [I_C(\text{sat}) + I_{BB}]$$

$$\Rightarrow I_C(\text{sat}) = \frac{11.8 - 0.1 R_E}{9 + R_E}$$

حال شرط اشباع ترانزیستور را به صورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$\beta_{\min} I_B \geq I_C(\text{sat}) \Rightarrow R_E \geq 2.77 \text{ k}\Omega$$





شکل ۱۶-۳

۱۳. در مدار شکل ۱۶-۳، ترانزیستور دارای  $50 \leq \beta \leq 100$  می باشد. نقطه کار در چه محدوده ای تغییر می کند. به ازای  $\beta = \infty$  نیز نقطه کار را به دست آورید.

حل: ابتدا با قرار دادن مدار معادل تونن از دید بیس، مدار را ساده می کنیم.

$$R_{Th} = 90 \parallel 10 = 9K\Omega, \quad V_{Th} = \frac{20}{90 + 10} \times 10 = 2V$$

حال از KVL در حلقه BE داریم

$$I_B = \frac{V_{Th} - V_{BE}}{R_{Th} + (\beta + 1)R_E}$$

$$\beta = 50 \Rightarrow I_B = 21.67\mu A$$

$$I_C = \beta I_B = 1.083mA, \quad I_E = (\beta + 1)I_B = 1.105mA$$

$$V_{CE} = 20 - 5I_C - 1 \times I_E = 13.48V$$

بنابراین در این حالت نقطه کار عبارت است از

$$Q_1(1.083mA, 13.48V)$$

$$\beta = 100 \Rightarrow I_B = 11.82\mu A$$

$$I_C = \beta I_B = 1.182mA, \quad I_E = (\beta + 1)I_B = 1.194mA$$

$$V_{CE} = 20 - 5I_C - 1 \times I_E = 12.9V$$

و در این حالت نقطه کار عبارت است از

$$Q_2(1.182mA, 12.9V)$$

در اینجا به دلیل برقرار نبودن شرط پایداری نقطه کار نسبت به  $\beta$ ، نقطه کار دارای تغییرات نسبتاً زیادی است. شرط پایداری چنین است

$$R_{Th} = \frac{1}{\beta_{min}} R_E = 5K\Omega$$

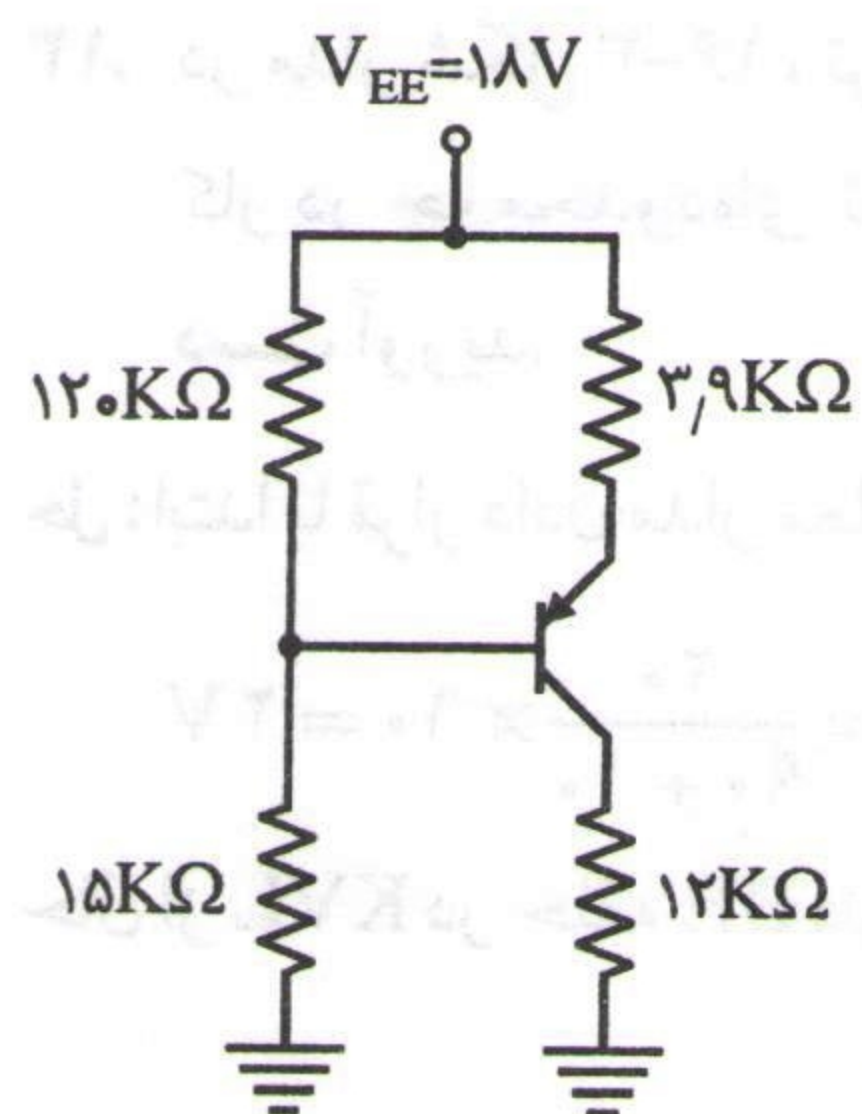
در حالی که در این مدار  $R_{Th} = 9K\Omega$  است.

به ازای  $\beta = \infty$ ، جریان  $I_B$  صفر و  $I_C = I_E$  خواهد بود. بنابراین از KVL در حلقه های BE و CE داریم

$$V_{Th} = V_{BE} + R_E I_E \Rightarrow I_E = 1.3mA$$

$$V_{CE} = 20 - (R_C + R_E)I_E \Rightarrow V_{CE} = 12.2V$$





شکل ۳-۱۷

۱۴. در مدار شکل ۳-۱۷، ترانزیستور دارای  $V_{CE(sat)} = 0.2V$ ،  $V_{EB(on)} = 0.7V$  و  $\beta = 200$  می باشد. نقطه کار و ناحیه کار ترانزیستور را بیابید.

حل: ابتدا معادل تونن از دید بیس را به دست می آوریم.

$$R_{Th} = 120 \parallel 15 = 13.3K\Omega$$

$$V_{Th} = \frac{18}{120 + 15} \times 15 = 2V$$

با فرض ناحیه فعال برای ترانزیستور، از KVL در حلقه EB داریم

$$18 = 3.9I_E + V_{EB(on)} + 13.3I_B + 2, \quad I_E = (\beta + 1)I_B = 210I_B$$

$$\Rightarrow I_B = 0.192mA \Rightarrow I_C = 200I_B = 3.84mA, \quad I_E = 201I_B = 3.86mA$$

حال از KVL در حلقه EC داریم

$$18 = 3.9I_E + V_{EC} + 12I_C \Rightarrow V_{EC} = -43.13V!!$$

بنابراین ترانزیستور نمی تواند در ناحیه فعال قرار داشته باشد پس در ناحیه اشباع خواهد بود و از KVL در حلقه های EC و EB داریم

$$18 = 3.9I_E + V_{EC(sat)} + 12(I_E - I_B)$$

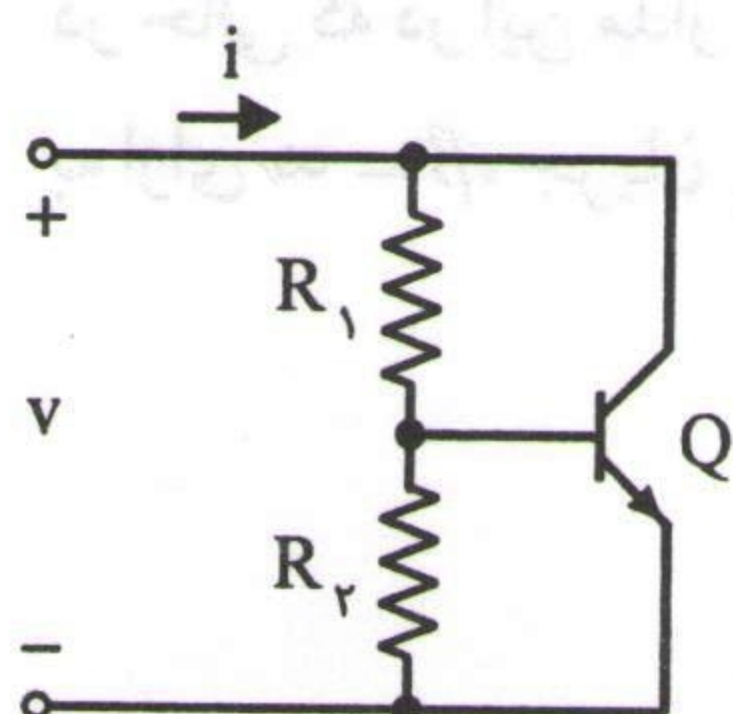
$$18 = 3.9I_E + V_{EB(on)} + 13.3I_B + 2$$

از حل دو معادله فوق  $I_E$  و  $I_B$  به دست می آیند.

$$I_B = 0.674mA, \quad I_E = 1.63mA, \quad I_C(sat) = I_E - I_B = 0.956mA$$

از آنجا که شرط اشباع  $\beta I_B > I_C(sat)$  برقرار است، فرض اشباع بودن ترانزیستور صحیح است و نقطه کار آن برابر است با

$$Q: \begin{cases} I_C(sat) = 0.956mA \\ V_{EC(sat)} = 0.2V \end{cases}$$



شکل ۳-۱۸

۱۵. در مدار شکل ۳-۱۸ با فرض فعال بودن ترانزیستور، رابطه  $v$  بر حسب  $i$  را به دست آورده و نشان دهید رفتار مدار مشابه رفتار دیود در ناحیه مستقیم است. مقادیر  $V_T$  و  $R_f$  را بر حسب  $V_{BE}$ ،  $\beta$ ،  $R_1$  و  $R_2$  به دست آورید.

حل: ابتدا مدار معادل تونن از دید بیس را به دست می آوریم.

$$v_{Th} = \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) v, \quad R_{Th} = R_1 \parallel R_2$$



با فرض فعال بودن ترانزیستور، جریان بیس برابر است با

$$i_B = \frac{v_{Th} - V_{BE}}{R_{Th}} \Rightarrow i_C = \beta i_B = \beta \left( \frac{v_{Th} - V_{BE}}{R_{Th}} \right)$$

از KCL در مدار شکل ۱۸-۳ داریم

$$i = i_{R_1} + i_C = (i_{R_1} + i_B) + i_C = i_{R_1} + (1 + \beta) i_B$$

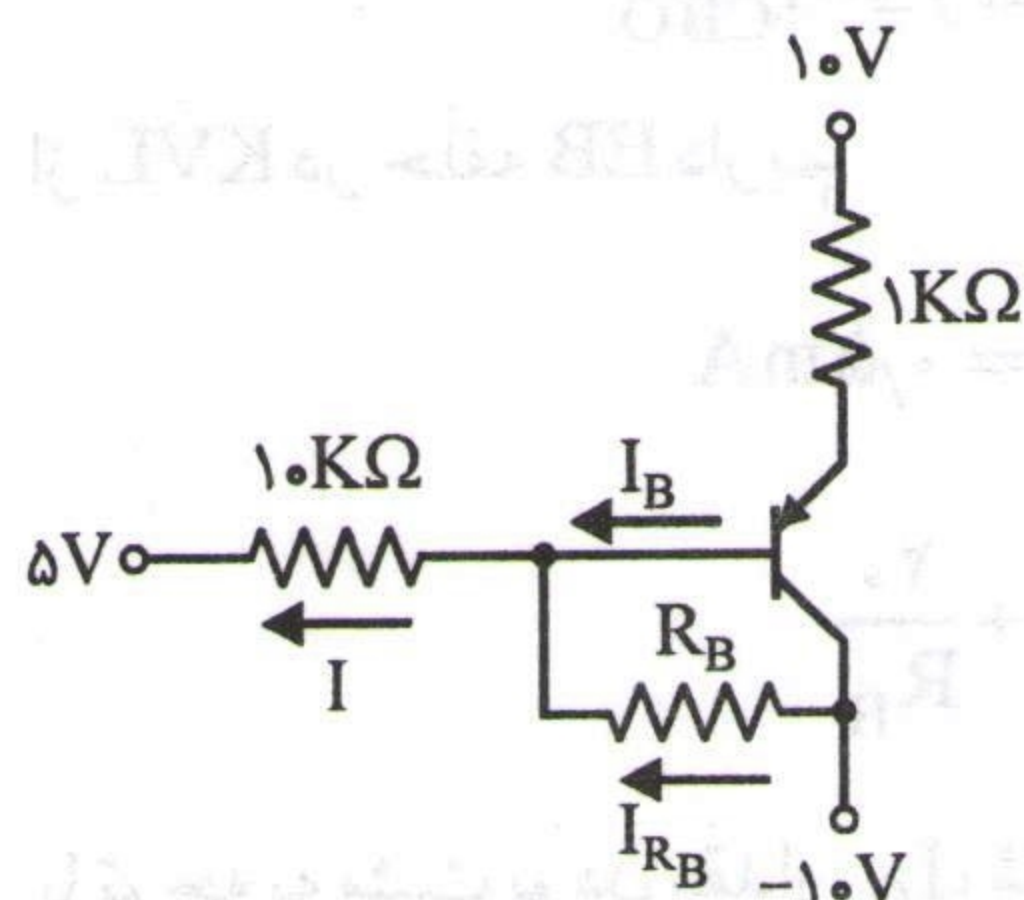
$$\Rightarrow i = \frac{V_{BE}}{R_1} + (1 + \beta) \left( \frac{v_{Th} - V_{BE}}{R_{Th}} \right)$$

با قرار دادن  $v_{Th}$  و  $R_{Th}$  در معادله فوق و متحد قرار دادن آن با معادله ولتاژ جریان دیود در ناحیه مستقیم داریم

$$i = \frac{1 + \beta}{R_1} \left[ v - \left( 1 + \left( \frac{\beta}{1 + \beta} \right) \frac{R_1}{R_2} \right) V_{BE} \right] = \frac{1}{R_f} (v - V_\gamma)$$

$$\Rightarrow R_f = \frac{R_1}{1 + \beta}, \quad V_\gamma = \left( 1 + \left( \frac{\beta}{1 + \beta} \right) \frac{R_1}{R_2} \right) V_{BE} \approx \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) V_{BE}$$

■



شکل ۱۹-۳

۱۶. در مدار شکل ۱۹-۳ برای ترانزیستور  $V_{EC}(\text{sat}) = 0.2V$

$V_{EB}(\text{on}) = 0.7V$ ،  $V_{EB}(\text{sat}) = 0.8V$  و  $\beta = 100$  است.

(الف) به ازای  $R_B = 5K\Omega$  ولتاژ و جریان آمیتر را به دست آورید.

(ب) آیا می توان  $R_B$  را طوری تعیین نمود که ترانزیستور اشباع شود؟

(ج) آیا می توان  $R_B$  را طوری تعیین نمود که ترانزیستور قطع شود؟

حل: (الف) با فرض ناحیه فعال، از KVL در حلقه EB داریم

$$10 = 1 \times I_E + V_{EB}(\text{on}) + 10I + 5 \Rightarrow 4.3 = I_E + 10I$$

از KVL در حلقه شامل منبع ۵V، مقاومت های  $10K\Omega$  و  $R_B$  و منبع ۱۰V - داریم

$$5 = -10I - R_B I_{R_B} - 10, \quad I_{R_B} = I - I_B = I - \frac{1}{101} I_E \Rightarrow 15 = \frac{5}{101} I_E - 15I$$

از حل دو معادله فوق برای  $I$  و  $I_E$  داریم

$$I_E = 13.84 \text{ mA} \Rightarrow V_E = 10 - 1 \times I_E = -3.84V$$

$$V_{EC} = V_E - (-10) = 6.16 > V_{EC}(\text{sat})$$

پس فرض ناحیه فعال درست بوده است.



ب) با فرض اشباع بودن ترانزیستور، از KVL در حلقه CE داریم

$$10 = 1 \times I_E + V_{EC}(\text{sat}) - 10 \Rightarrow I_E = 19.8 \text{ mA}$$

$$\Rightarrow I_B = I_E / (1 + \beta_{\min}) = 0.196 \text{ mA}$$

از KVL در حلقه EB داریم

$$10 = 1 \times I_E + V_{EB}(\text{sat}) + 10I + 5 \Rightarrow I = -1.56 \text{ mA}$$

$$I_B = I - I_{R_B} = -1.56 - \frac{V_{EB}(\text{sat}) - V_{EC}(\text{sat})}{R_B} = -\left(1.56 + \frac{0.6}{R_B}\right)$$

شرط اشباع بودن ترانزیستور عبارت است از

$$I_B \geq I_B(\text{sat}) = 0.196 \text{ mA}$$

که با توجه به منفی بودن مقدار  $I_B$ ، نامعادله فوق نمی تواند برقرار باشد و در نتیجه به ازای هیچ مقدار  $R_B$ ، ترانزیستور وارد ناحیه اشباع نخواهد شد.

ج) شرط قطع بودن ترانزیستور عبارت است از

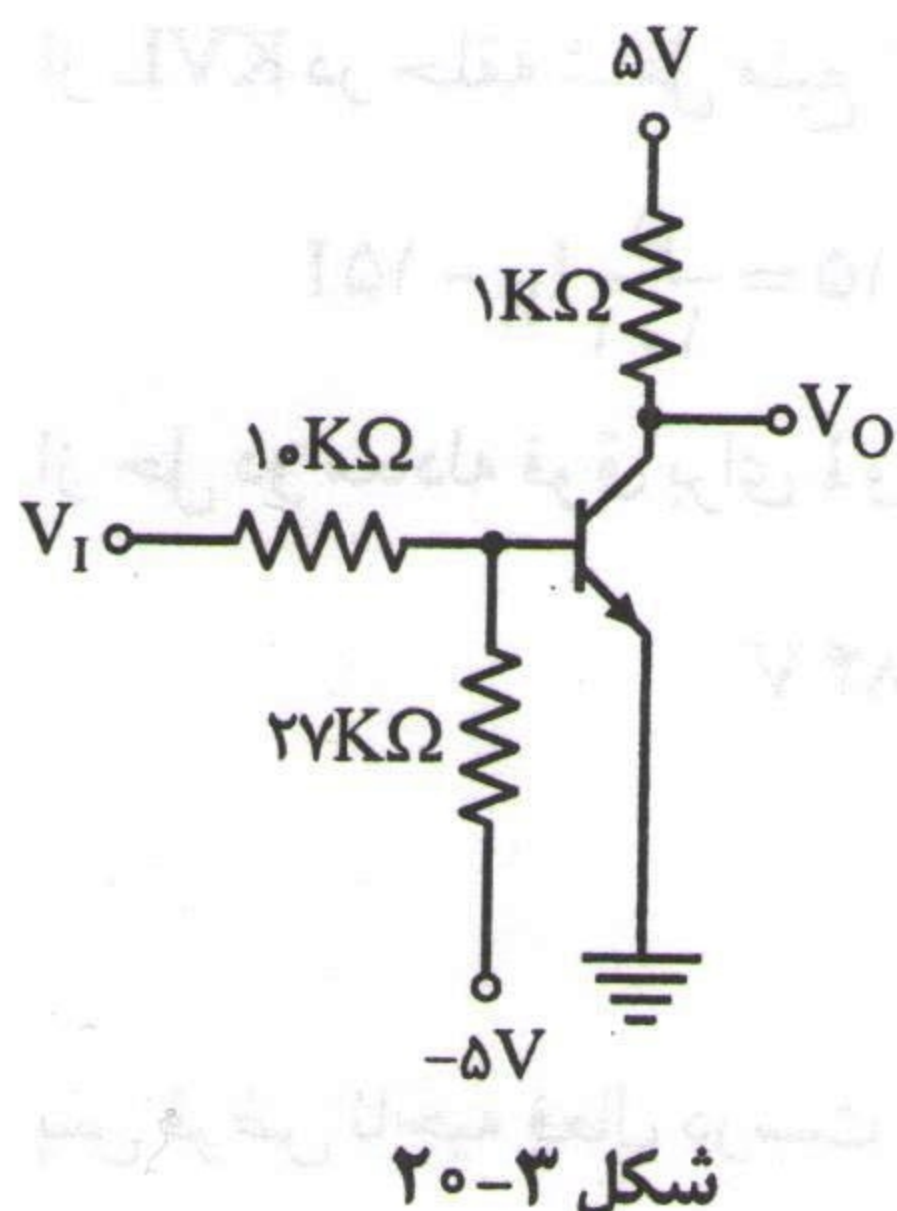
$$I_E = 0, V_{EB} = V_{EB}(\text{cut}) = 0, I_B(\text{cut}) \leq -I_{CBO}$$

از KVL در حلقه EB داریم

$$10 = 1 \times I_E + V_{EB}(\text{cut}) + 10I + 5 \Rightarrow I = 0.5 \text{ mA}$$

$$I_B = I - I_{R_B} = 0.5 - \frac{(-10) - 10}{R_B} = 0.5 + \frac{20}{R_B}$$

با توجه به مثبت بودن مقدار  $I_B$ ، شرط  $I_B \leq -I_{CBO}$  نمی تواند برقرار باشد، بنابراین به ازای هیچ مقدار  $R_B$  ترانزیستور به حالت قطع نخواهد رفت.



شکل ۲۰-۳

۱۷. در مدار شکل ۲۰-۳، ترانزیستور دارای  $V_{BE}(\text{on}) = 0.7 \text{ V}$ ،

$\beta_{\min} = 30$ ،  $V_{BE}(\text{sat}) = 0.8 \text{ V}$  و  $V_{CE}(\text{sat}) = 0.2 \text{ V}$  است.

خروجی را به ازای ورودیهای  $0.2 \text{ V}$  و  $5 \text{ V}$  بیابید.

حل: ابتدا معادل تونن از دید بیس را به دست می آوریم

$$R_{Th} = 10 \parallel 27 = 7.3 \text{ K}\Omega$$

$$V_{Th} = \frac{V_I - (-5)}{10 + 27} \times 27 - 5 = 0.73 V_I - 1.35$$



به ازای  $V_I = 0.2V$  مقدار  $V_{Th}$  برابر  $1.2V$  می شود و در نتیجه پیوند BE به صورت معکوس بایاس گردیده و ترانزیستور قطع خواهد بود. بنابراین

$$I_B = 0, \quad I_C = 0 \Rightarrow V_O = V_{CC} = 5V$$

به ازای  $V_I = 5V$  مقدار  $V_{Th}$  برابر  $2.3V$  بوده و پیوند BE به صورت مستقیم بایاس می گردد. بنابراین فرض می کنیم ترانزیستور در ناحیه فعال قرار دارد. از KVL در حلقه BE داریم

$$I_B = \frac{V_{Th} - V_{BE(on)}}{R_{Th}} = 0.2192mA \Rightarrow I_C = \beta I_B = 6.58mA$$

$$V_{CE} = V_O = 5 - 1 \times I_C = -1.58V!!$$

بنابراین فرض ناحیه فعال نادرست بوده و ترانزیستور اشباع خواهد بود.

$$I_B = \frac{V_{Th} - V_{BE(sat)}}{R_{Th}} = 0.21mA, \quad I_C(sat) = \frac{V_{CC} - V_{CE(sat)}}{R_C} = 4.8mA$$

$$\beta_{min} I_B = 6.3 > I_C(sat) = 4.8mA$$

| $V_I$  | $V_O$  |
|--------|--------|
| $0.2V$ | $5V$   |
| $5V$   | $0.2V$ |

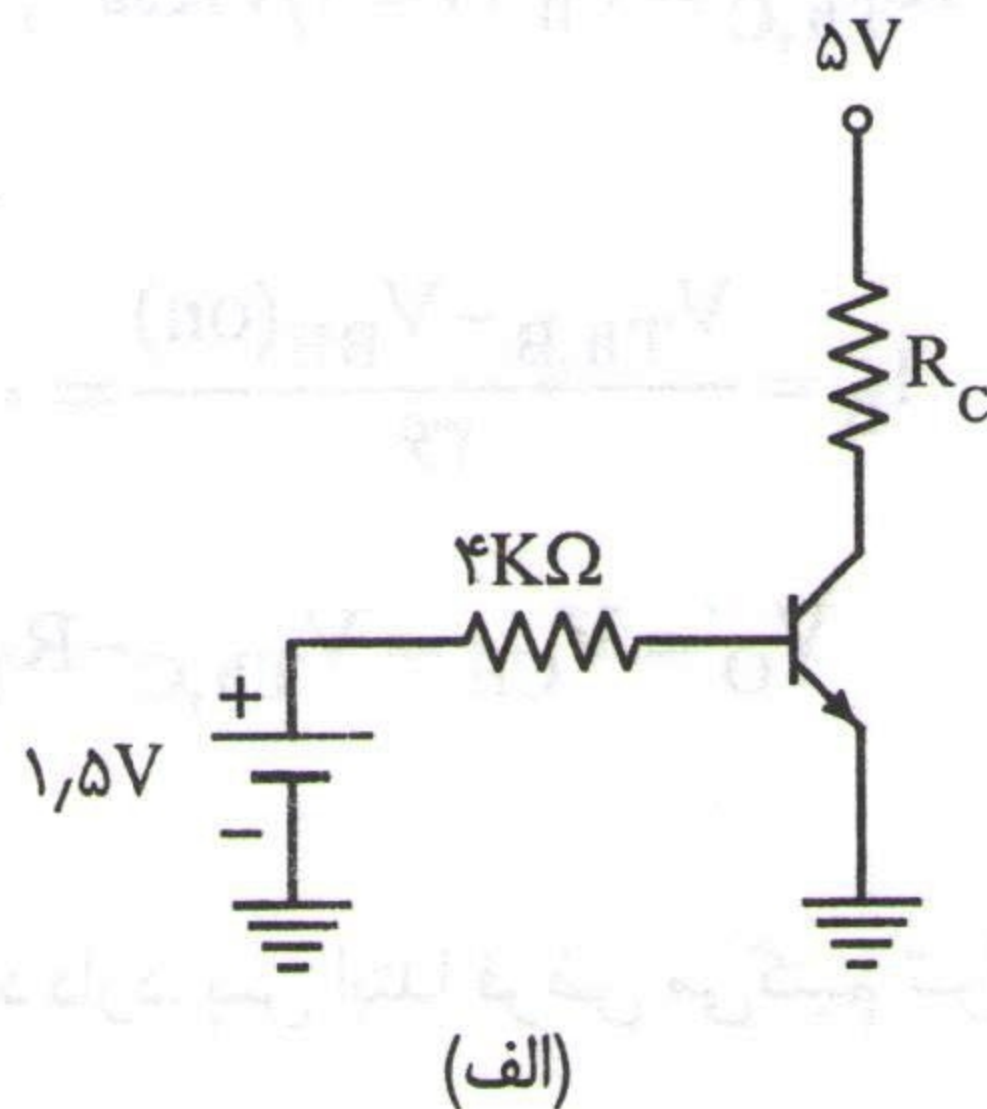
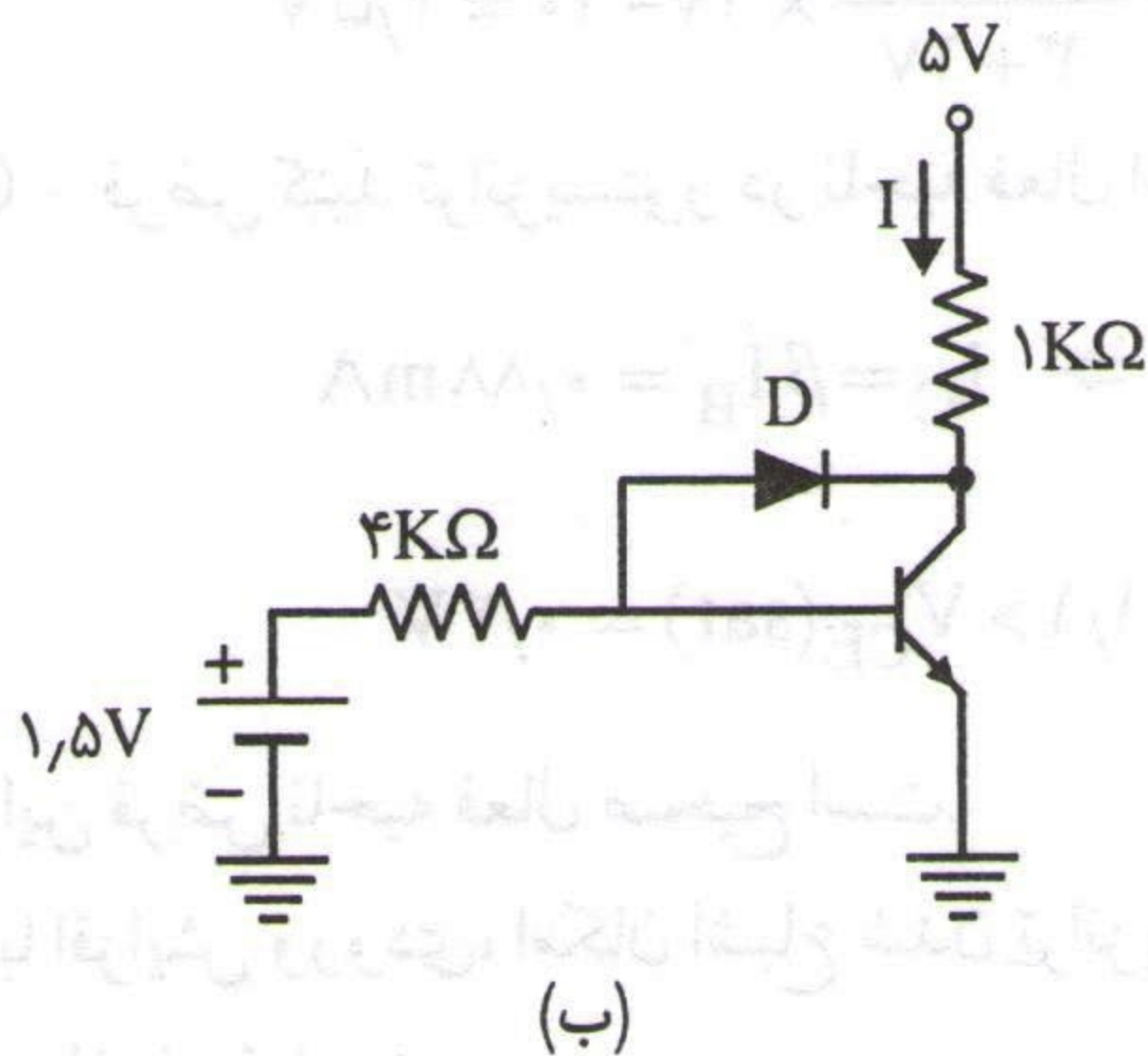
که اشباع بودن ترانزیستور را تأیید می کند. بنابراین

$$V_O = V_{CE(sat)} = 0.2V$$

با توجه به جدول مقابل، مدار همانند دروازه NOT عمل می کند.

■

۱۸. در مدار شکل ۲۱-۳، برای ترانزیستور،  $\beta = 48$ ،  $V_{BE} = 0.7V$  و  $V_{CE(sat)} = 0.2V$  است. الف) در مدار شکل ۲۱-۳ الف  $R_C$  را طوری تعیین کنید که ترانزیستور در مرز اشباع قرار گیرد. ب) در مدار شکل ۲۱-۳ ب، اگر دیود D را به مدار اضافه و  $R_C = 1K\Omega$  انتخاب شود، با فرض  $V_D(on) = 0.3V$ ، مقادیر  $V_{CE}$  و I چقدر خواهند بود؟ ترانزیستور چه وضعیتی دارد؟ نقش دیود D چیست؟



شکل ۲۱-۳



حل: الف) برای اینکه ترانزیستور در مرز ناحیه اشباع باشد، باید داشته باشیم

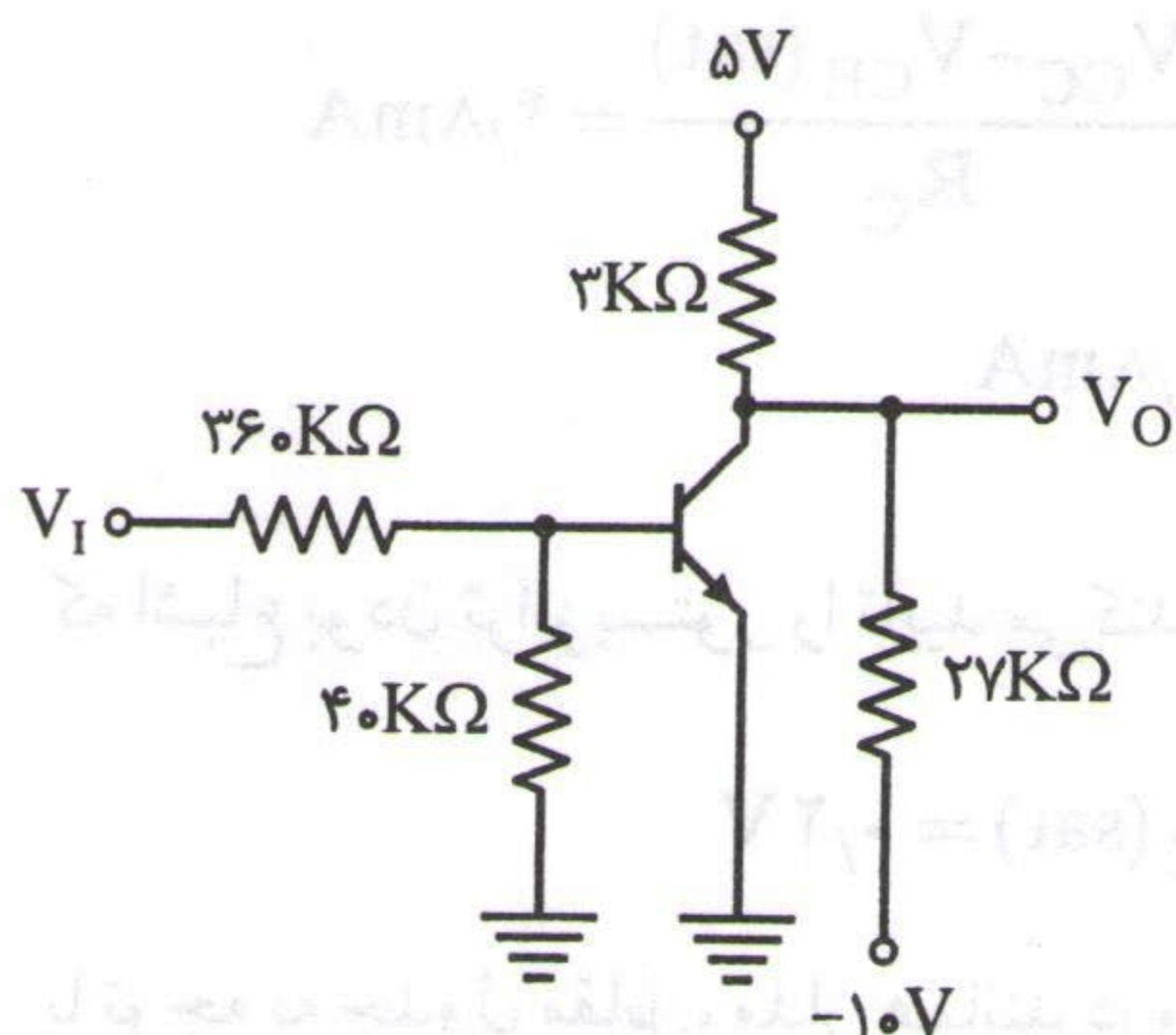
$$\beta_{\min} I_B \geq I_C(\text{sat}) \Rightarrow \beta_{\min} \left( \frac{1.5 - V_{BE}}{4} \right) \geq \frac{5 - V_{CE}(\text{sat})}{R_C} \Rightarrow R_C \geq 0.5 \text{ K}\Omega$$

ب) با فرض روشن بودن دیود، از KVL داریم

$$5 = 1 \times I - V_D(\text{on}) + V_{BE}(\text{on}) \Rightarrow I = 4.6 \text{ mA}$$

$$5 = 1 \times I + V_{CE} \Rightarrow V_{CE} = 0.4 \text{ V}$$

بنابراین به دلیل وجود دیود، ترانزیستور وارد ناحیه اشباع نشده و در ناحیه فعال قرار دارد.



شکل ۲۲-۳

۱۹. در مدار شکل ۲۲-۳، ترانزیستور دارای مشخصات

$V_{BE}(\text{on}) = 0.7 \text{ V}$ ،  $V_{CE}(\text{sat}) = 0.2 \text{ V}$ ،  $\beta = 40$  و

$V_{BE}(\text{sat}) = 0.8 \text{ V}$  می باشد.

الف) خروجی را به ازای  $V_I = 15 \text{ V}$  به دست آورید.

ب) خروجی را به ازای  $V_I = 30 \text{ V}$  به دست آورید.

ج) حداکثر  $V_I$  که به ازای آن ترانزیستور در ناحیه فعال

باقی می ماند چقدر است؟

حل: برای ساده تر شدن تحلیل مدار، ابتدا مدارهای معادل تونن از دید بیس و کلکتور را جایگزین می کنیم.

توجه کنید که  $V_O$  از کلکتور گرفته شده و در مدار ساده شده نیز خروجی همان  $V_{CE}$  است.

$$R_{Th,B} = 36 \parallel 40 = 20 \text{ K}\Omega, \quad V_{Th,B} = \frac{V_I}{36 + 40} \times 40 = 0.1 V_I$$

$$R_{Th,C} = 3 \parallel 27 = 2.7 \text{ K}\Omega, \quad V_{Th,C} = \frac{5 - (-10)}{3 + 27} \times 27 - 10 = 3.5 \text{ V}$$

الف) فرض کنید ترانزیستور در ناحیه فعال است.

$$I_B = \frac{V_{Th,B} - V_{BE}(\text{on})}{36} = 0.022 \text{ mA} \Rightarrow I_C = \beta I_B = 0.88 \text{ mA}$$

$$V_O = V_{CE} = V_{Th,C} - R_{Th,C} I_C = 1.1 > V_{CE}(\text{sat}) = 0.2 \text{ V}$$

بنابراین فرض ناحیه فعال صحیح است.

ب) با افزایش ورودی، امکان اشباع شدن ترانزیستور وجود دارد. پس ابتدا فرض می کنیم ترانزیستور در

حالت اشباع قرار دارد.



$$I_B = \frac{V_{Th,B} - V_{BE(sat)}}{R_{Th,B}} = 0.61 \text{ mA}$$

$$I_C(sat) = \frac{V_{Th,C} - V_{CE(sat)}}{R_{Th,C}} = 1.22 \text{ mA}$$

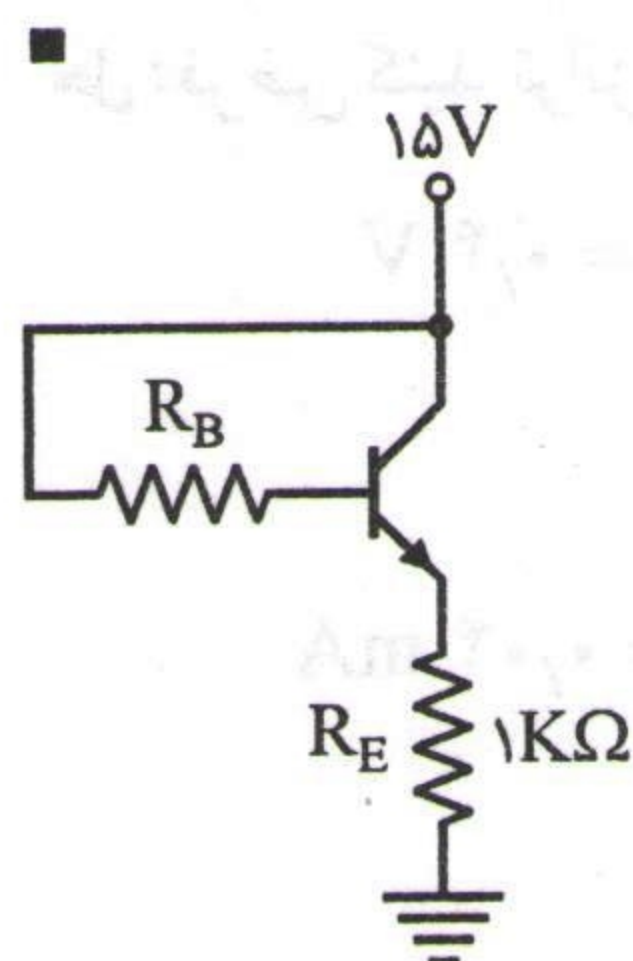
$$\beta I_B = 2.44 > I_C(sat) = 1.22 \text{ mA}$$

که درستی فرض اشباع را تأیید می‌کند. پس خروجی ۰.۲V می‌باشد.  
(ج) در مرز اشباع داریم

$$V_{CE} = V_{CE(sat)} = 0.2 \text{ V}, \quad V_{BE} = V_{BE(sat)} = 0.8 \text{ V}$$

$$I_C = \beta I_B \Rightarrow \frac{3.5 - 0.2}{2.7} = 40 \left( \frac{0.1 V_I - 0.8}{36} \right) \Rightarrow V_I = 19 \text{ V}$$

پس به ازای ورودیهای بزرگتر از ۱۹V ترانزیستور اشباع خواهد بود.



۲۰. در مدار شکل ۳-۲۳، ترانزیستور دارای  $\beta = 50$ ،  $V_{BE(on)} = 0.7 \text{ V}$ ،  $V_{BE(sat)} = 0.8 \text{ V}$  و  $V_{CE(sat)} = 0.2 \text{ V}$  است.

(الف) به ازای  $R_B = 49 \text{ K}\Omega$  مقادیر  $I_B$ ،  $I_C$  و  $V_{CE}$  را بیابید.  
(ب) آیا با تغییر مقدار مقاومت  $R_B$  می‌توان ترانزیستور را به ناحیه اشباع برد؟  
(ج) با تغییر  $R_E$  چطور؟

حل: (الف) با فرض اینکه ترانزیستور در ناحیه فعال باشد از KVL در حلقه BE داریم

$$V_{CC} = R_B I_B + V_{BE(on)} + R_E I_E, \quad I_E = (\beta + 1) I_B$$

$$\Rightarrow I_B = 0.143 \text{ mA}, \quad I_C = \beta I_B = 7.15 \text{ mA}$$

$$I_E = (\beta + 1) I_B = 7.29 \text{ mA}, \quad V_{CE} = 15 - R_E I_E = 7.7 \text{ V}$$

که فرض ناحیه فعال را تأیید می‌کند.

(ب) برای اشباع ترانزیستور باید  $R_B$  را کاهش داد تا با افزایش  $I_B$  و در نتیجه افزایش  $I_C$ ، مقدار  $V_{CE}$  تا ۰.۲V کاهش یابد. با در نظر گرفتن شرایط مرزی اشباع، مقدار  $R_B$  که ترانزیستور را به اشباع می‌برد محاسبه می‌کنیم.

$$V_{CE} = 0.2 \text{ V}, \quad V_{BE} = 0.8 \text{ V}, \quad I_C = \beta I_B, \quad I_E = (\beta + 1) I_B$$

$$\text{KVL BE: } I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE(sat)}}{R_B + (\beta + 1) R_E}$$

$$\text{KVL CE: } V_{CC} = V_{CE(sat)} + R_E (\beta + 1) I_B$$



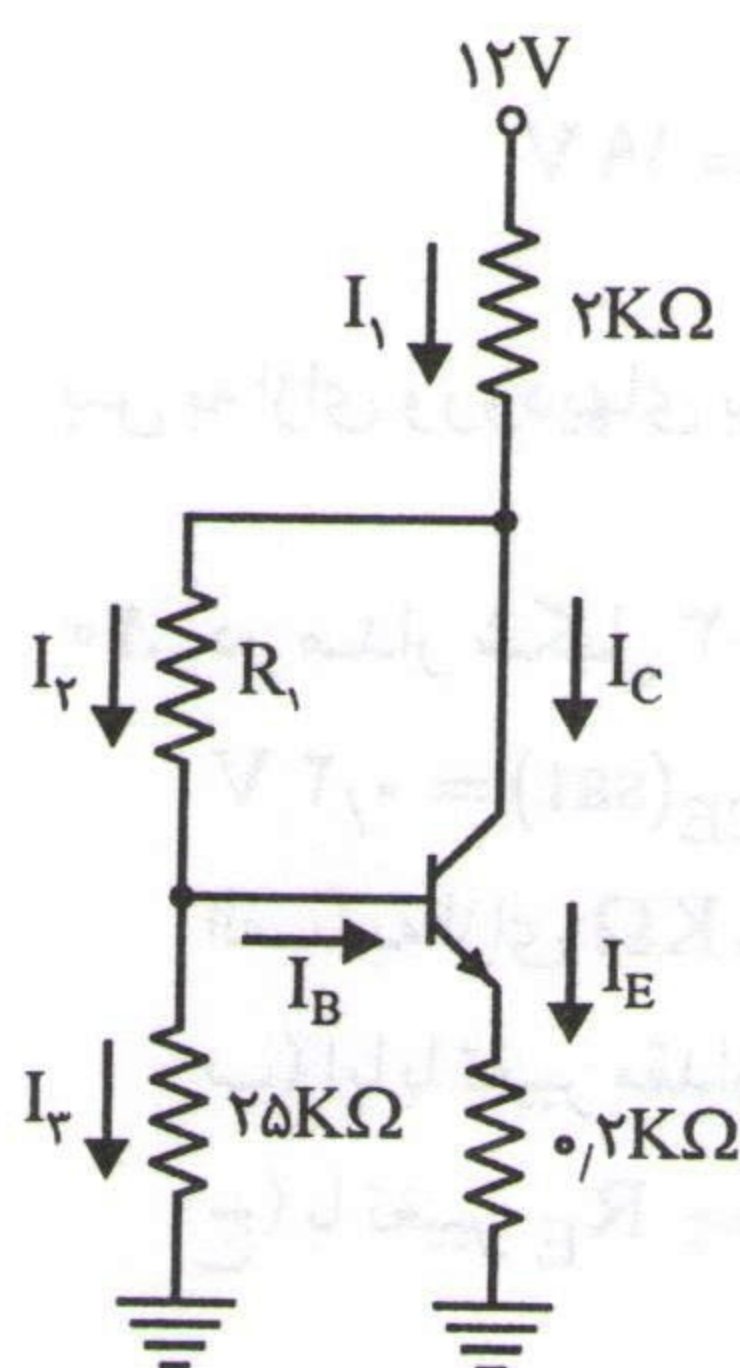
از این دو معادله  $R_B = -2.1 K\Omega$  به دست می آید. بنابراین حتی با  $R_B = 0$  ترانزیستور در ناحیه فعال قرار خواهد داشت.

(ج) با فرض بهترین حالت برای اشباع (یعنی  $R_B = 0$ )، مقدار  $R_E$  برای اشباع ترانزیستور را می یابیم.

$$KVL_{BE}: 15 = 0.8 + R_E \times (\beta + 1) I_B \Rightarrow 14.2 = 51 R_E I_B$$

$$KVL_{CE}: 15 = 0.2 + R_E \times (\beta + 1) I_B \Rightarrow 14.8 = 51 R_E I_B$$

با توجه به دو معادله فوق می بایست  $14.8 = 14.2$  گردد که غیرممکن است، یعنی به ازای هیچ مقدار  $R_E$ ، ترانزیستور اشباع نمی شود. مدار فوق را مدار غیر اشباع گویند.



شکل ۳-۲۴

۲۱. در مدار شکل ۳-۲۴، ترانزیستور دارای  $\alpha = 0.98$ ،  $I_{CBO} = 0$  و  $V_{BE} = 0.7 V$  است. چنانچه جریان  $I_E = 2 mA$  باشد مقدار مقاومت  $R_1$  را به دست آورید.

حل: فرض کنید ترانزیستور در ناحیه فعال قرار دارد. در این صورت داریم

$$I_C = \alpha I_E = 1.96 mA, \quad V_E = R_E I_E = 0.4 V$$

$$V_B = V_E + 0.7 = 1.1 V$$

$$I_B = \frac{I_E}{1 + \beta}, \quad \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = 49 \Rightarrow I_B = 0.04 mA$$

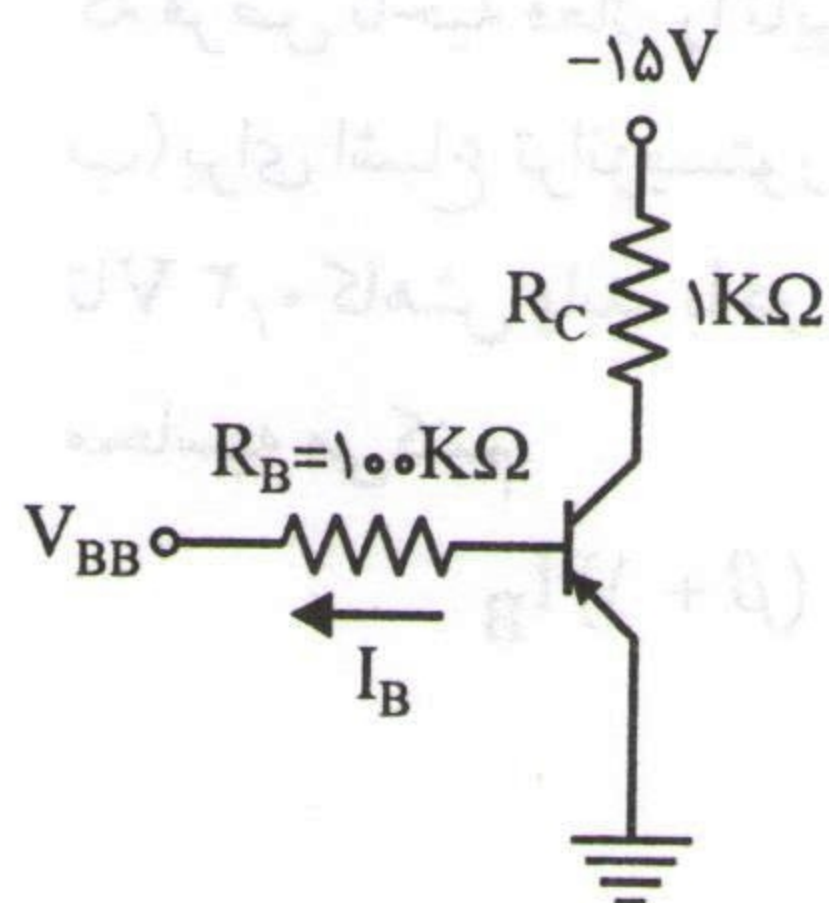
$$I_3 = \frac{V_B}{25} = 0.044 mA$$

$$I_2 = I_3 + I_B = 0.084 mA, \quad I_1 = I_C + I_2 = 2.044 mA$$

$$KVL: 12 = 2I_1 + R_1 I_2 + 25I_3 \Rightarrow R_1 = 81.1 K\Omega$$

$$KVL_{CE}: 12 = 2I_1 + V_{CE} + 0.2I_E \Rightarrow V_{CE} = 7.512 > V_{CE(sat)}$$

که فرض ناحیه فعال را تأیید می کند.



شکل ۳-۲۵

۲۲. در مدار شکل ۳-۲۵، ترانزیستور از نوع ژرمانیم و دارای جریان اشباع معکوس  $1 \mu A$  در  $25^\circ C$  می باشد.

(الف)  $V_{BB}$  را طوری تعیین کنید که ترانزیستور در  $25^\circ C$  قطع باشد.

(ب) آیا با  $V_{BB}$  فوق ترانزیستور در دمای  $85^\circ C$  نیز قطع خواهد ماند؟

(ج) در صورتی که  $V_{BB} = 3V$  و  $R_B = 30 K\Omega$  باشد تا چه دمایی

ترانزیستور در وضعیت قطع باقی خواهد ماند؟



حل: الف)  $I_{CBO}(25^{\circ}C) = 1\mu A$  ,  $V_{EB}(cut) = -0.1V$  ,  $I_B = -I_{CBO} = -1\mu A$

KVLEB:  $V_{EB}(cut) + R_B I_B + V_{BB} = 0 \Rightarrow V_{BB} = 0.2V$

ب)  $I_{CBO}(85^{\circ}C) = I_{CBO}(25^{\circ}C) 2^{(85-25)/10} = 64\mu A$

KVLEB:  $V_{EB} + R_B I_B + V_{BB} = 0 \Rightarrow V_{EB} = 6.2V$

بنابراین به ازای  $V_{BB} = 0.2V$  ترانزیستور قطع نخواهد بود. برای اینکه ترانزیستور در این شرایط در حالت قطع باشد، باید داشته باشیم

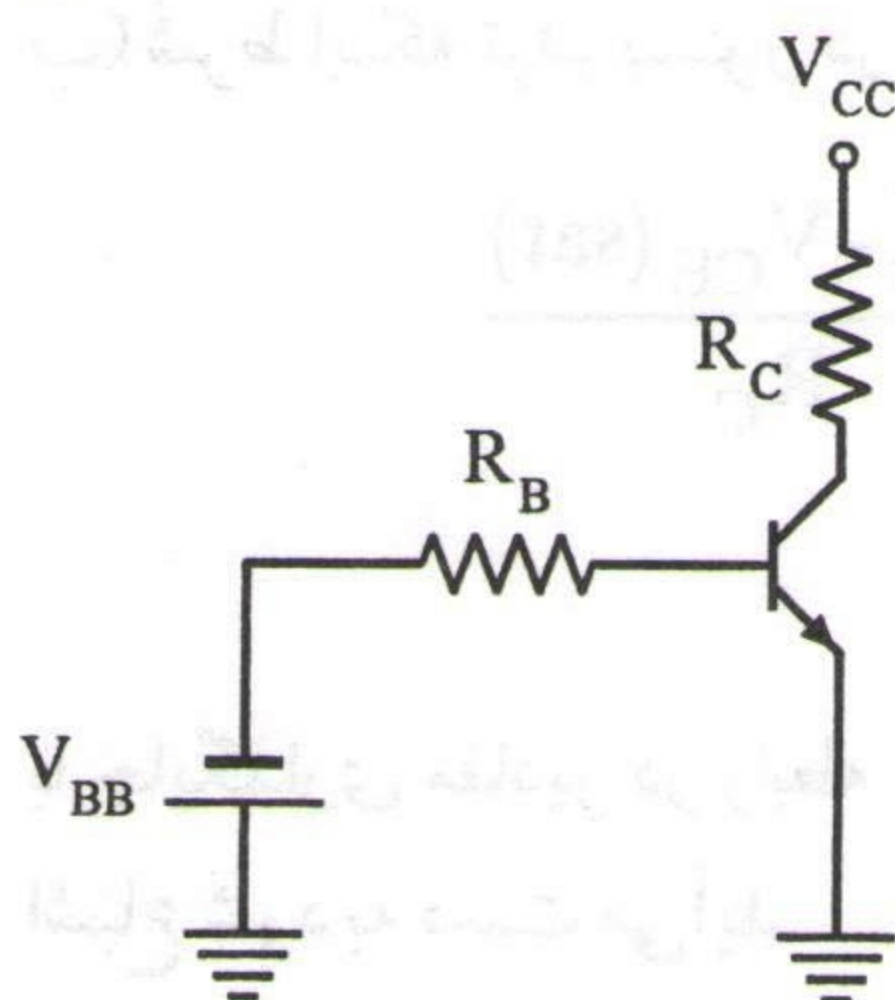
$V_{EB}(cut) = -V_{BB} - R_B I_B = -V_{BB} + R_B I_{CBO} < -0.1 \Rightarrow V_{BB} \geq 6.5V$

ج) KVLEB:  $V_{EB} + R_B I_B + V_{BB} = 0$  ,  $V_{EB}(cut) = -0.1V$

$\Rightarrow -0.1 + 30(-I_{CBO}) + 3 = 0 \Rightarrow I_{CBO} = 97\mu A$

$I_{CBO}(T_2) = 97\mu A = I_{CBO}(25) 2^{(T_2-25)/10} \Rightarrow T_2 = 91^{\circ}C$

پس با  $V_{BB} = 3V$  و  $R_B = 30K\Omega$  ترانزیستور تا دمای  $91^{\circ}C$  در ناحیه قطع خواهد بود.



۲۳. در مدار شکل ۳-۲۶، از یک ترانزیستور سیلیکونی با

$I_{CBO} = 10nA$  در دمای  $25^{\circ}C$  استفاده شده، که به ازای هر  $10^{\circ}C$  درجه افزایش دما این جریان دو برابر می شود.

الف) با فرض  $V_{BB} = 8V$ ، به ازای چه مقدار  $R_B$  ترانزیستور در دمای  $185^{\circ}C$  در حالت قطع باقی می ماند؟

ب) اگر  $V_{BB} = 2V$  و  $R_B = 20K\Omega$  باشد، تا چه دمایی ترانزیستور در حالت قطع باقی خواهد ماند؟

شکل ۳-۲۶

حل: الف)  $I_{CBO}(185^{\circ}C) = I_{CBO}(25^{\circ}C) \times 2^{(185-25)/10} = 0.655mA$

در ناحیه قطع  $I_B = -I_{CBO}$  و  $V_{BE} \leq 0$  است. بنابراین

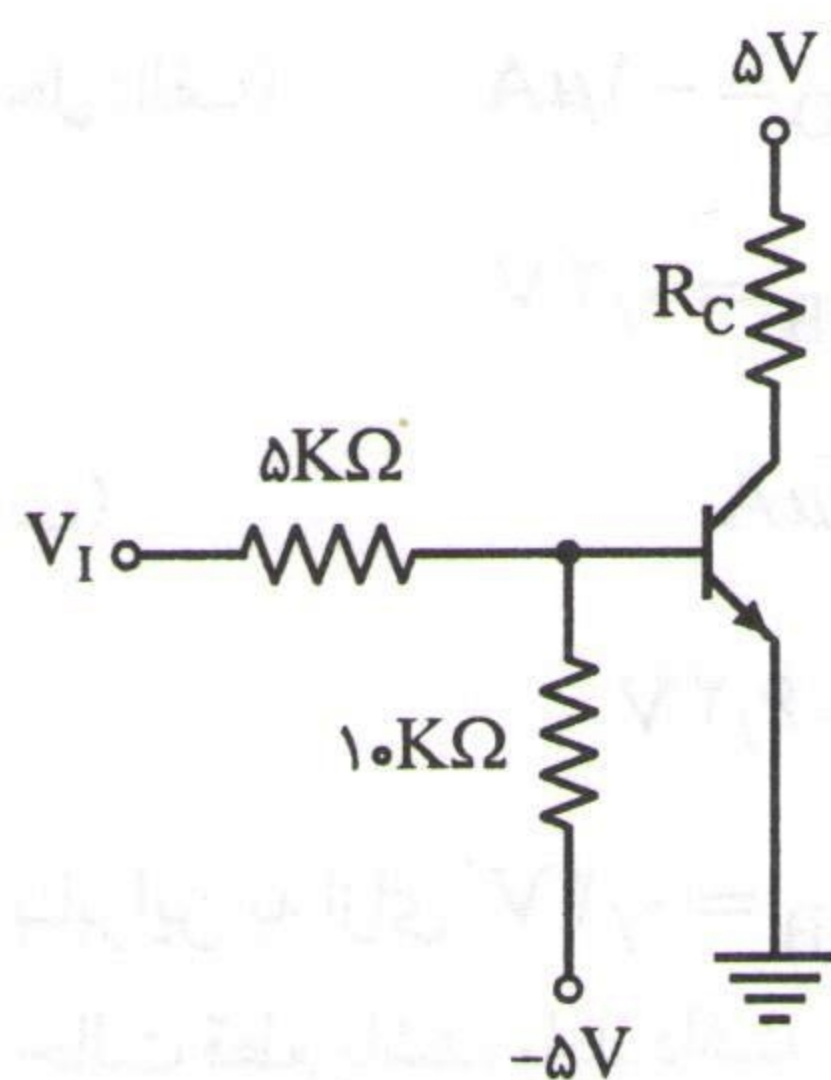
$V_{BE} = -R_B I_B - V_{BB} \leq 0 \Rightarrow R_B \leq 12.2K\Omega$

ب)  $V_{BE} = -R_B I_B - V_{BB} = 20 I_{CBO}(T_2) - 2$

$V_{BE} = V_{BE}(cut) = 0 \Rightarrow I_{CBO}(T_2) = 0.1mA$

$I_{CBO}(T_2) = I_{CBO}(25^{\circ}C) \times 2^{(T_2-25)/10} = 0.1mA \Rightarrow T_2 = 157.88^{\circ}C$





شکل ۳-۲۷

۲۴. در مدار کلید ترانزیستوری شکل ۳-۲۷، ترانزیستور دارای  $20 \leq \beta \leq 50$ ،  $I_{CBO} = 20 \text{ nA}$  در دمای  $25^\circ\text{C}$  و  $V_{CE}(\text{sat}) = 0.2 \text{ V}$  است.

(الف) حداکثر  $V_I$  برای اینکه ترانزیستور در دمای  $75^\circ\text{C}$  در حالت قطع باشد چقدر است؟

(ب)  $R_C$  را طوری تعیین کنید که به ازای  $V_I = 5 \text{ V}$ ، ترانزیستور اشباع گردد. این مقدار  $R_C$  حداقل است یا حداکثر؟

حل: (الف) ابتدا مدار معادل تونن از دید بیس را به دست می آوریم.

$$R_{Th} = 5 \parallel 10 = 3.33 \text{ K}\Omega, \quad V_{Th} = \frac{2}{3} V_I - \frac{5}{3}$$

از KVL در حلقه BE داریم

$$V_{Th} = R_{Th} I_B + V_{BE}, \quad I_B = -I_{CBO}(75^\circ\text{C})$$

برای اینکه ترانزیستور در ناحیه قطع بماند باید داشته باشیم

$$V_{BE} \leq 0 \Rightarrow V_{Th} - R_{Th} I_B \leq 0$$

$$\Rightarrow \left( \frac{2}{3} V_I - \frac{5}{3} \right) - 3.33 \left( -I_{CBO}(25^\circ\text{C}) \times 2^{(75-25)/10} \right) \leq 0 \Rightarrow V_I \leq 2.5 \text{ V}$$

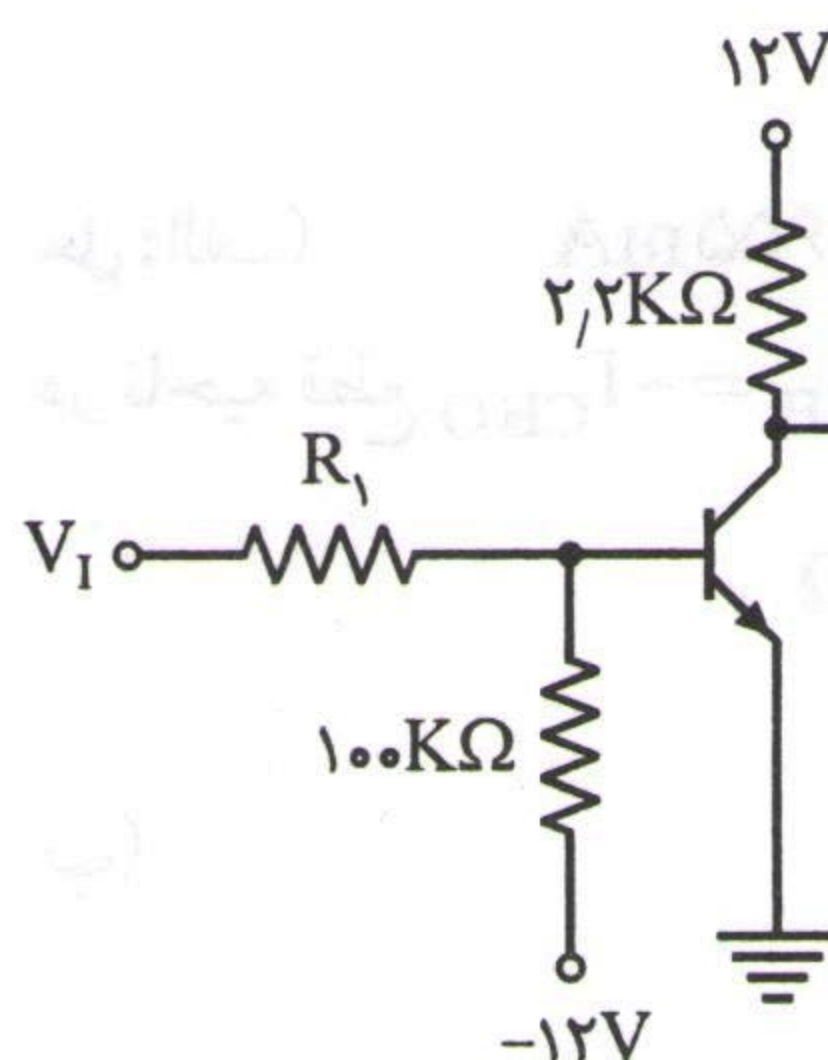
(ب) شرط اینکه ترانزیستور در ناحیه اشباع باشد، این است که

$$\beta_{\min} I_B \geq I_C(\text{sat}) \Rightarrow \beta_{\min} \left( \frac{V_{Th} - V_{BE}}{R_{Th}} \right) \geq \frac{V_{CC} - V_{CE}(\text{sat})}{R_C}$$

$$V_{Th} = \frac{2}{3} V_I - \frac{5}{3} = 1.67 \text{ V}$$

با جایگذاری مقادیر در رابطه فوق و حل نامساوی، حداقل مقداری که  $R_C$  اختیار می کند تا ترانزیستور اشباع شود به دست می آید.

$$R_C \geq 0.824 \text{ K}\Omega$$



شکل ۳-۲۸

۲۵. در مدار شکل ۳-۲۸، ترانزیستور از جنس سیلیکن با  $\beta_{\min} = 30$  و  $I_{CBO} = 10 \text{ nA}$  در دمای  $25^\circ\text{C}$  است.

(الف) با فرض  $V_I = 12 \text{ V}$  و  $R_1 = 15 \text{ K}\Omega$ ، خروجی  $V_O$  را محاسبه نمایید.

(ب) به ازای  $V_I = 12 \text{ V}$ ، محدوده تغییرات  $R_1$  که ترانزیستور در ناحیه فعال باقی می ماند را به دست آورید.

(ج) به ازای  $V_I = 1 \text{ V}$  و  $R_1 = 15 \text{ K}\Omega$ ، خروجی  $V_O$  را بیابید.

(د) در بند (ج) حداکثر تا چه دمایی ترانزیستور در ناحیه قطع باقی خواهد ماند؟



حل: الف) ابتدا مدار معادل تونن از دید بیس را به دست می آوریم.

$$R_{Th} = R_1 \parallel 100 = 13 K\Omega, \quad V_{Th} = \frac{V_I - (-12)}{R_1 + 100} \times 100 - 12 = 8.86 V$$

فرض کنید ترانزیستور در ناحیه فعال قرار دارد. در این صورت از KVL در حلقه BE داریم

$$V_{Th} = R_{Th} I_B + V_{BE} \Rightarrow I_B = 0.628 mA$$

$$\Rightarrow I_C = \beta I_B + (\beta + 1) I_{CBO} = 18.85 mA$$

$$KVL CE: V_{CC} = R_C I_C + V_{CE} \Rightarrow V_{CE} = -29.5 V!!$$

بنابراین فرض ناحیه فعال نادرست بوده و ترانزیستور در ناحیه اشباع خواهد بود.

$$I_C(sat) = \frac{V_{CC} - V_{CE(sat)}}{R_C} = 5.36 mA$$

$$\beta_{min} I_B = 18.4 > I_C(sat) = 5.36 mA$$

بنابراین فرض اشباع بودن ترانزیستور صحیح است؛ پس

$$V_O = V_{CE(sat)} = 0.2 V$$

ب) شرط فعال بودن ترانزیستور  $V_{CE} \geq 0.2 V$  می باشد و یا

$$\beta_{min} I_B \leq I_C(sat) = 5.36 \Rightarrow I_B \leq 0.179 mA$$

$$R_{Th} = R_1 \parallel 100, \quad V_{Th} = \frac{12 - (-12)}{R_1 + 100} \times 100 - 12 = \frac{2400}{R_1 + 100} - 12$$

$$I_B = \frac{V_{Th} - 0.7}{R_{Th}} \leq 0.179$$

با جایگذاری  $R_{Th}$  و  $V_{Th}$  بر حسب  $R_1$ ، حداقل مقدار مقاومت  $R_1$  برابر ۳۷ کیلو اهم به دست می آید.

$$R_{Th} = 15 \parallel 100 = 13 K\Omega, \quad V_{Th} = \frac{1 - (-12)}{15 + 100} \times 100 - 12 = -0.696 V \quad (ج)$$

بنابراین ترانزیستور در ناحیه قطع خواهد بود و داریم

$$I_B = -I_{CBO} = -10 nA$$

$$V_{BE} = -R_{Th} I_B + V_{Th} = -0.695 \leq 0$$



که صحت قطع بودن ترانزیستور را تأیید می‌کند. در این حالت  $V_O = V_{CC} = 12V$  خواهد بود.

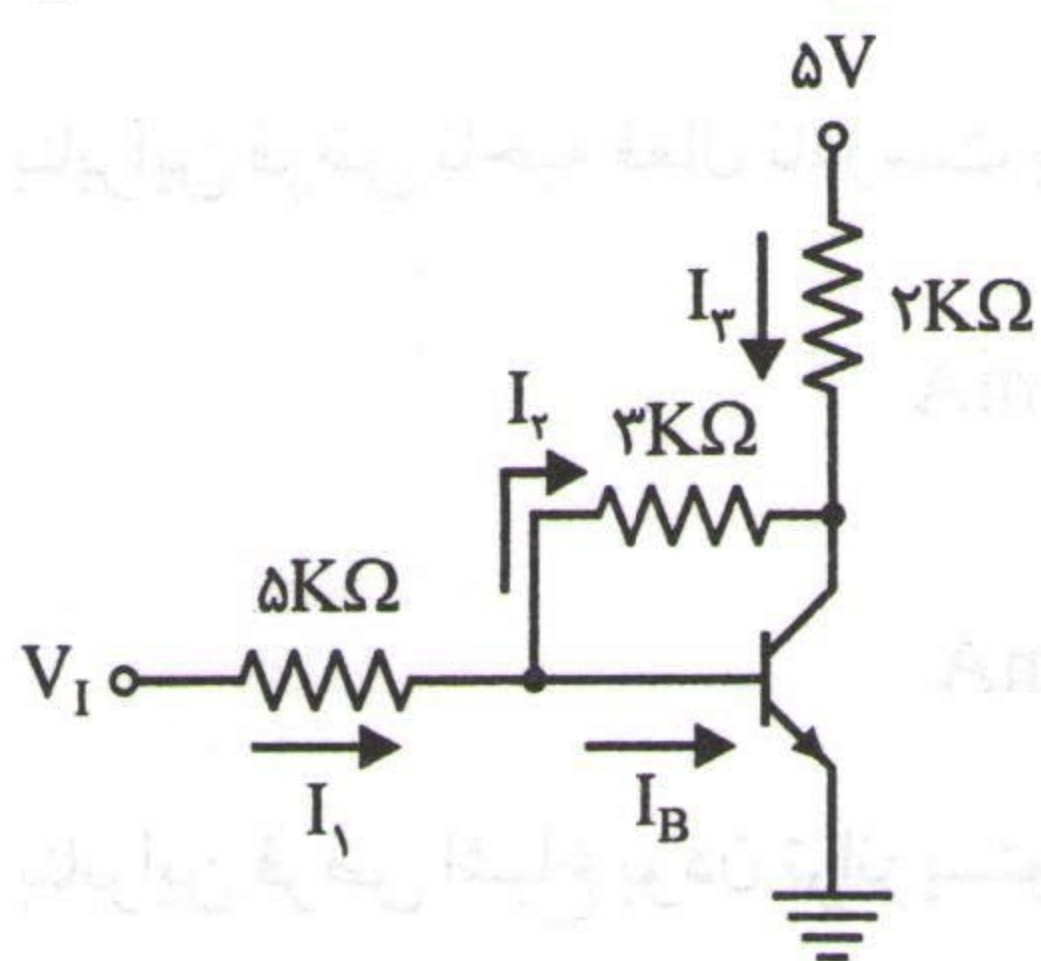
$$R_{Th} = 13K\Omega, \quad V_{Th} = -0.696V \quad (د)$$

از آنجا که شرط ناحیه قطع  $V_{BE} \leq 0$  و  $I_B = -I_{CBO}$  می‌باشد؛ داریم

$$V_{BE} = -R_{Th} I_B + V_{Th} = 13I_{CBO} - 0.696 \leq 0 \Rightarrow I_{CBO} \leq 0.0535mA$$

$$I_{CBO}(T_2) = I_{CBO}(25^\circ C) 2^{(T_2 - 25)/10} \Rightarrow T_2 = 149^\circ C$$

با شرایط فوق، ترانزیستور تا دمای  $149^\circ C$  در حالت قطع خواهد بود.



شکل ۲۹-۳

۲۶. برای ترانزیستور مدار شکل ۳-۲۹، جریان اشباع معکوس در  $25^\circ C$  برابر  $10\mu A$  و حداقل  $\beta$  برابر  $50$  می‌باشد. اگر دما تا  $75^\circ C$  افزایش یابد.

الف) محدوده‌ای از  $V_I$  را که به ازای آن ترانزیستور در ناحیه قطع می‌ماند به دست آورید.  $V_{BE}(on) = 0.7V$  و  $V_{BE}(cut) = 0$  ولت می‌باشد.

ب) به ازای چه مقادیری از  $V_I$ ، ترانزیستور اشباع می‌شود.  $V_{BE}(sat) = 0.8V$  و  $V_{CE}(sat) = 0.2V$  است.

حل: الف) از KVL در حلقه BE و CB داریم

$$V_{BE} = -5I_1 + V_I, \quad 5 = 2I_3 - 3I_2 - 5I_1 + V_I$$

اگر بخواهیم ترانزیستور قطع باشد در این صورت  $V_{BE} \leq 0$ ،  $I_C = I_{CBO}$ ،  $I_B = -I_{CBO}$  و  $I_E = 0$  می‌باشد. بنابراین با نوشتن KCL در دو گره کلکتور و بیس مدار داریم

$$I_2 = I_{CBO} - I_3, \quad I_1 = I_2 + I_B = -I_3$$

$$\Rightarrow 5 = 2I_3 - 3(I_{CBO} - I_3) + 5I_3 + V_I \Rightarrow I_3 = \frac{1}{10}(5 - V_I + 3I_{CBO}) = -I_1$$

از رابطه فوق استفاده کرده و در رابطه  $V_{BE}$  قرار می‌دهیم. در نتیجه داریم

$$2V_{BE} = 5 + 3I_{CBO} + V_I \Rightarrow V_{BE,max} = [5 + 3I_{CBO,max} + V_I]/2$$

$$I_{CBO,max} = I_{CBO}(75^\circ C) 2^{(75 - 25)/10} = 0.32mA$$

حال با جایگذاری مقادیر در شرط ناحیه قطع داریم

$$V_{BE,max} \leq 0 \Rightarrow V_I \leq -5.96V$$

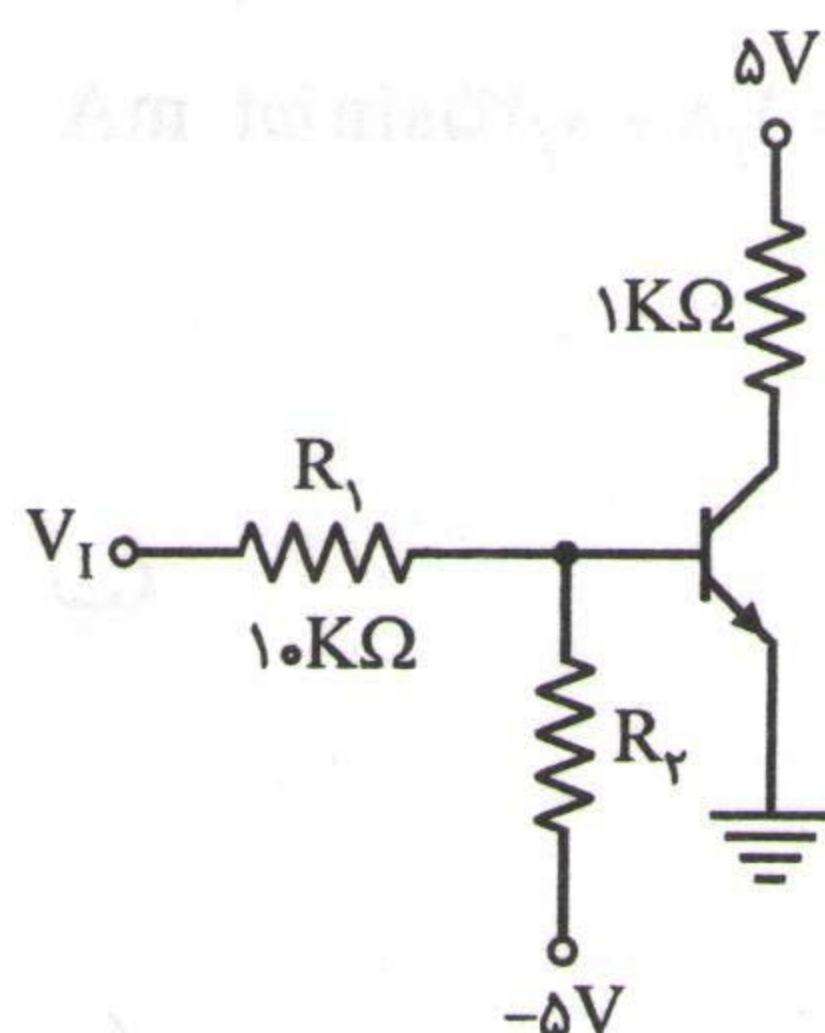


ب) با توجه به جهت جریانهای نشان داده شده در شکل ۲۹-۳ داریم

$$I_2 = \frac{V_{BE}(sat) - V_{CE}(sat)}{3} = 0.2 \text{ mA} , I_3 = \frac{V_{CC} - V_{CE}(sat)}{2} = 2.4 \text{ mA}$$

$$I_C(sat) = I_2 + I_3 = 2.6 \text{ mA} , \beta_{min} I_B > I_C(sat) = 2.6 \text{ mA}$$

$$\Rightarrow 50 \left[ \frac{V_I - 0.8}{5} - I_2 \right] > 2.6 \Rightarrow V_I > 2.1 \text{ V}$$



شکل ۳۰-۳

۲۷. در مدار کلید ترانزیستوری شکل ۳۰-۳، ترانزیستور از جنس

سیلیکن،  $\beta_{min} = 50$ ،  $V_{BE}(sat) = 0.8 \text{ V}$ ،  $I_{CBO} = 0.1 \mu\text{A}$ ،  $V_{CE}(sat) = 0.2 \text{ V}$  است.

الف) حداقل  $R_2$  را طوری تعیین کنید که به ازای  $V_I = 5 \text{ V}$  ترانزیستور به حالت اشباع برود.

ب) به ازای  $R_2 = 20 \text{ K}\Omega$  حداکثر  $V_I$  که به ازای آن ترانزیستور در حالت قطع باقی می ماند چقدر است؟

حل:  $R_{Th} = 10 \parallel R_2$  ,  $V_{Th} = \frac{V_I - (-5)}{10 + R_2} \times R_2 - 5 = R_{Th} - 5$

$$\beta_{min} I_B \geq I_C(sat) \Rightarrow 50 \times \left[ \frac{V_{Th} - 0.8}{R_{Th}} \right] \geq \frac{5 - 0.2}{1}$$

$$\Rightarrow R_{Th} \geq 6.31 \text{ K}\Omega$$

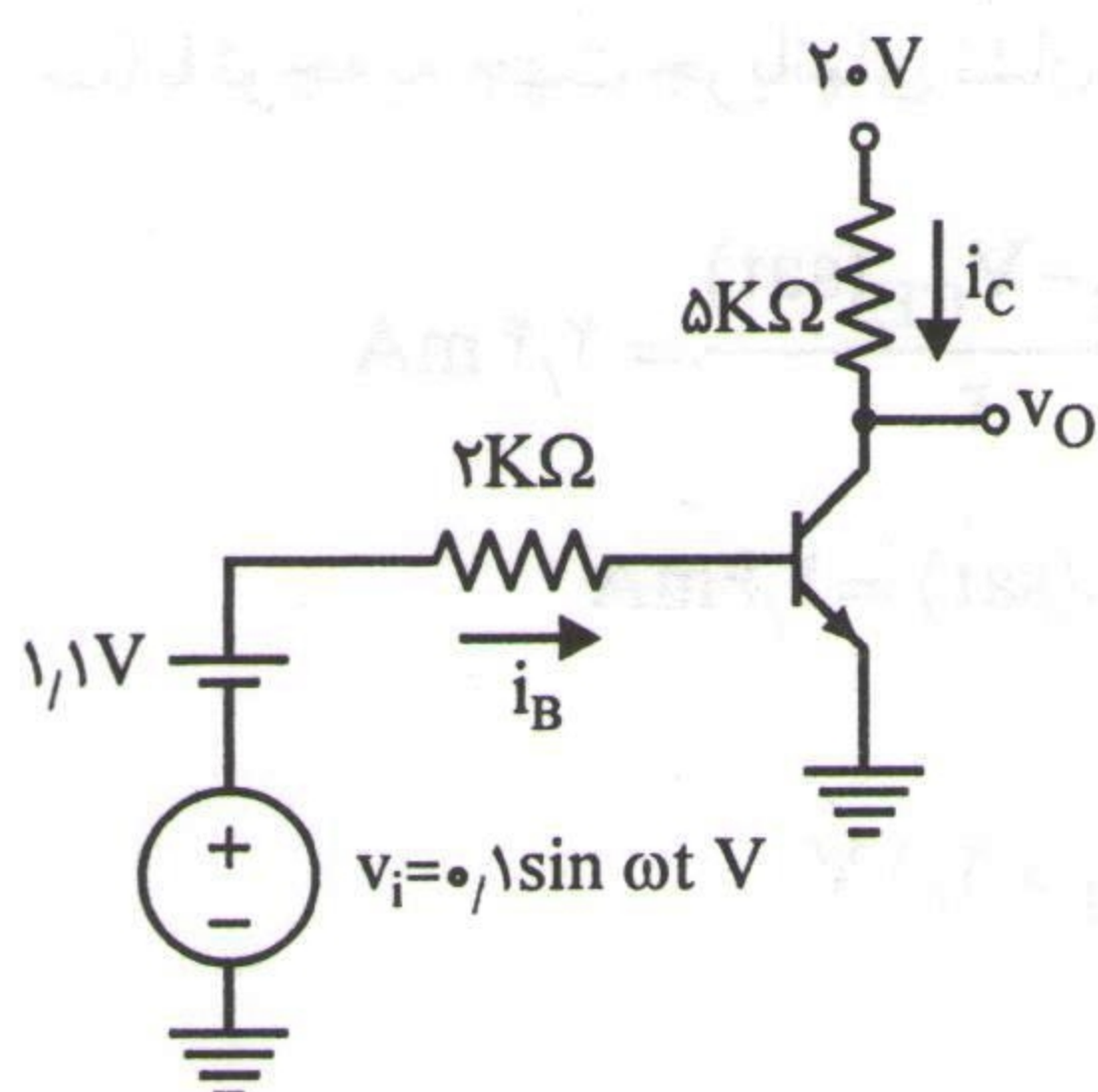
$$R_{Th} = \frac{10 R_2}{10 + R_2} \geq 6.31 \Rightarrow R_2 \geq 17.1 \text{ K}\Omega$$

ب)  $R_{Th} = 10 \parallel 20 = 6.67 \text{ K}\Omega$  ,  $V_{Th} = \frac{V_I - (-5)}{10 + 20} \times 20 - 5 = 0.67 V_I - 1.67$

$$V_{Th} = R_{Th} I_B + V_{BE} , I_B = -I_{CBO}$$

$$\Rightarrow V_{BE} = 0.67 V_I - 1.67 + 6.67 \times 10^{-5} \leq 0 \Rightarrow V_I \leq 2.5 \text{ V}$$





شکل ۳-۳۱

۲۸. در تقویت کننده امیتر مشترک شکل ۳-۳۱، بهره جریان سیگنال بزرگ ترانزیستور ( $\alpha$ ) برابر ۰٫۹ و  $V_{BE(on)} = ۰٫۷V$  است.

(الف) ولتاژ خروجی  $v_O$  را به دست آورید.

(ب) حداقل و حداکثر مقدار ولتاژ  $v_{CE}$  را بیابید.

(ج) حداکثر دامنه ورودی چقدر باشد تا  $v_{CE}$  از ۰٫۳V کمتر نگردد؟

حل: (الف) با فرض اینکه ترانزیستور در ناحیه فعال است، داریم

$$i_B = \frac{1.1 + v_i - V_{BE(on)}}{2} = 0.2 + 0.05 \sin \omega t \text{ mA}$$

$$i_C = \beta i_B = \left[ \frac{\alpha}{1-\alpha} \right] (0.2 + 0.05 \sin \omega t) = 1.8 + 0.45 \sin \omega t \text{ mA}$$

$$v_O = v_{CE} = 20 - 5i_C = 11 - 2.25 \sin \omega t \text{ V}$$

$$v_{CE(max)} = 11 - 2.25 \times (-1) = 13.25 \text{ V} \quad (\text{ب})$$

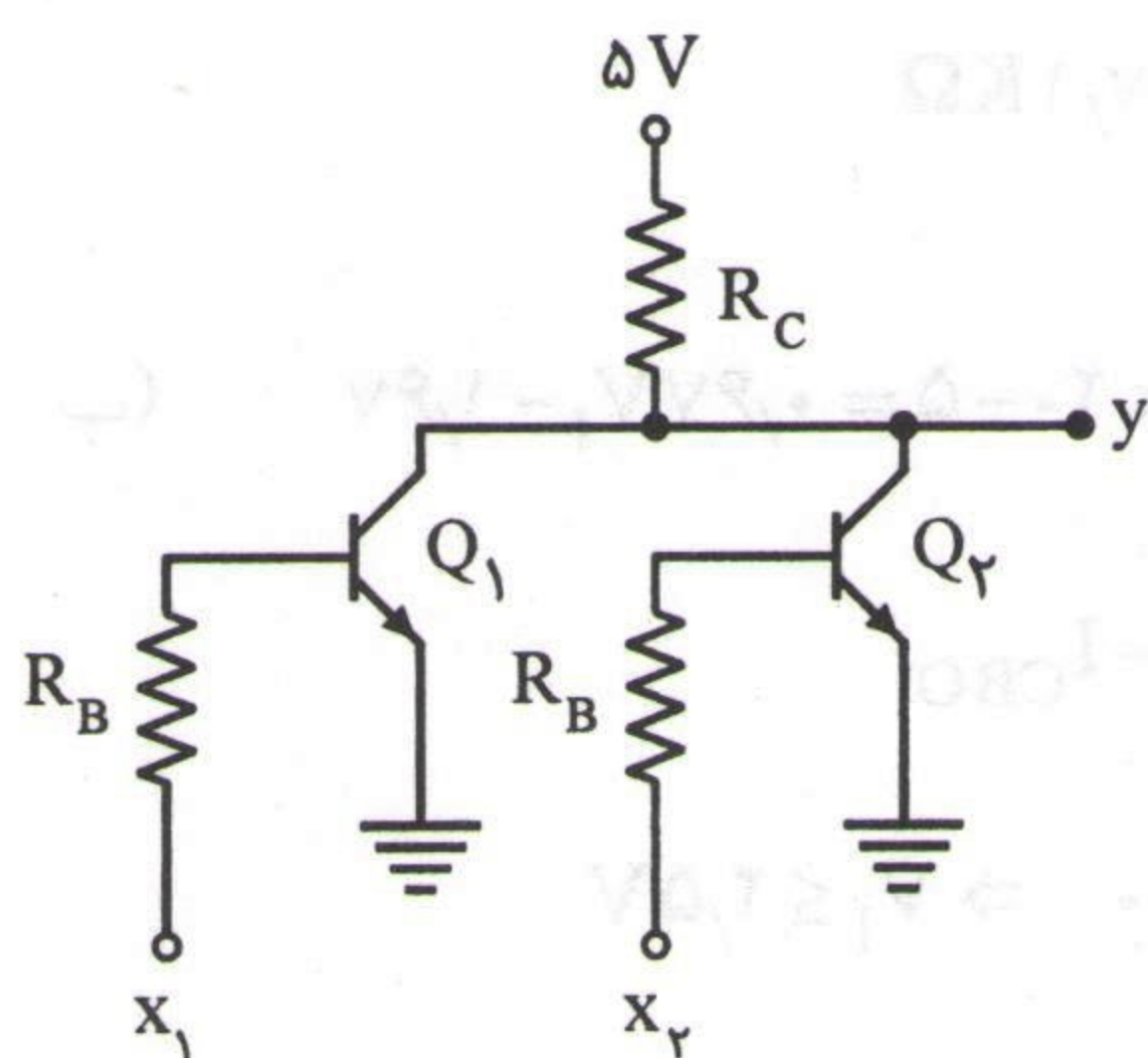
$$v_{CE(min)} = 11 - 2.25 \times (+1) = 8.75 \text{ V}$$

$$v_{CE} = 20 - 5i_C = 20 - 5(\beta i_B) = 20 - 45i_B \quad (\text{ج})$$

$$= 20 - 45 \left( \frac{1.1 - 0.7 + V_m \sin \omega t}{2} \right) = 11 - 22.5 V_m \sin \omega t$$

$$\Rightarrow v_{CE(min)} = 11 - 22.5 V_m \geq 0.3 \Rightarrow V_m \leq 0.476 \text{ V}$$

۲۹. در مدار شکل ۳-۳۲ با فرض اینکه  $V_{CE(sat)} = 0.2 \text{ V}$  و با صرف نظر از جریان  $I_{CBO}$  جدول داده شده را تکمیل نمایید (مدار نشان داده شده یک NOR از خانواده RTL است).



شکل ۳-۳۲

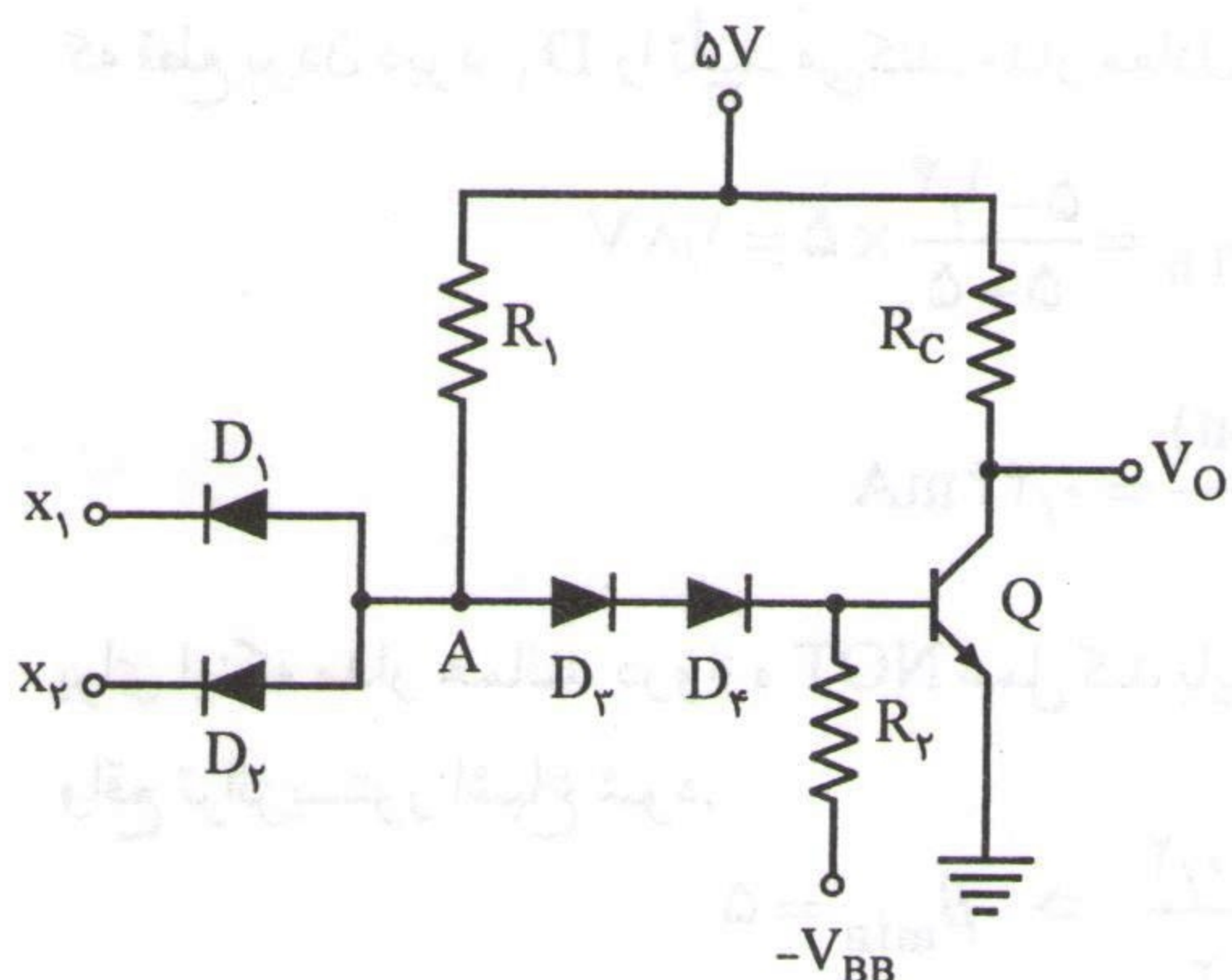
| $x_1$ | $x_2$ | $y$ |
|-------|-------|-----|
| ۰V    | ۰V    |     |
| ۰V    | ۵V    |     |
| ۵V    | ۵V    |     |



حل: به ازای  $x_1 = x_2 = 0V$ ، مدارهای بیس دارای بایاس نبوده و هر دو ترانزیستور قطع می‌باشند. بنابراین خروجی  $y = 5V$  می‌شود. به ازای  $x_1 = 5V$  و  $x_2 = 0V$ ، ترانزیستور  $Q_1$  می‌تواند به حالت اشباع رفته و در نتیجه  $y = 0.2V$  می‌گردد. در این حالت ترانزیستور  $Q_2$  قطع است. به همین ترتیب به ازای  $x_1 = 0V$  و  $x_2 = 5V$ ، ترانزیستور  $Q_1$  قطع و ترانزیستور  $Q_2$  اشباع می‌شود و  $y = 0.2V$  می‌شود. به ازای  $x_1 = x_2 = 5V$ ، هر دو ترانزیستور اشباع شده و  $y = 0.2V$  می‌گردد. به عبارت دیگر مدار به صورت یک NOR عمل می‌کند. برای اینکه وقتی یکی از ورودیها برابر  $5V$  است، ترانزیستور مورد نظر به حالت اشباع برود باید داشته باشیم

$$\beta_{\min} I_B \geq I_C(\text{sat})$$

$$\Rightarrow \beta_{\min} \left( \frac{4.3}{R_B} \right) \geq \frac{5 - V_{CE}(\text{sat})}{R_C} \Rightarrow \frac{R_B}{R_C} \leq 0.896 \beta_{\min}$$



شکل ۳-۳۳

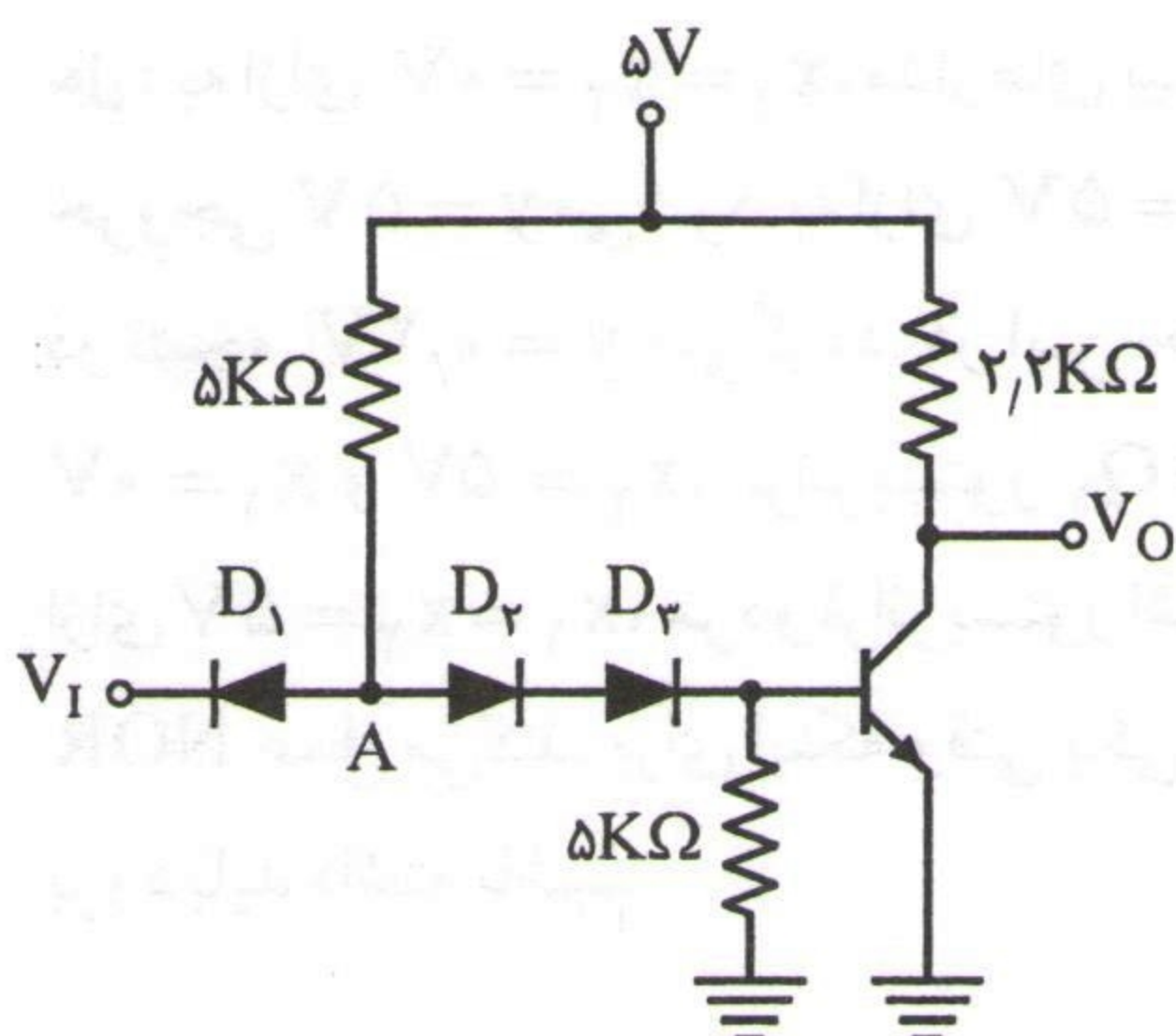
۳۰. در مدار منطقی شکل ۳-۳۳، دروازه NAND از خانواده DTL نشان داده شده است. ورودیهای  $x_1$  و  $x_2$  می‌توانند در یکی از سطوح صفر یا ۵ ولت قرار گیرند، با فرض  $V_{BE}(\text{on}) = 0.7V$ ،  $V_{CE}(\text{sat}) = 0.2V$  و  $V_{BE}(\text{sat}) = 0.8V$  در مورد نحوه عملکرد و مقدار خروجی به ازای مقادیر مختلف ورودی بحث کنید.

حل: واضح است که اگر هر یک از ورودیهای  $x_1$  و  $x_2$  صفر گردند، دیود متناظر از طریق منبع ۵ ولتی و مقاومت  $R_1$  بایاس شده و روشن می‌گردد. در این صورت  $V_A = 0.7V$  شده و دیودهای  $D_3$  و  $D_4$  قطع خواهند بود که در نتیجه ترانزیستور قطع و  $V_O = 5V$  می‌باشد. فقط در صورتی که هر دو ورودی  $5V$  است، دیود  $D_1$  و  $D_2$  قطع و در نتیجه دیودهای  $D_3$  و  $D_4$  هدایت می‌کنند. در این حالت می‌توان با طراحی مناسب ترانزیستور را در ناحیه اشباع قرار داده تا  $V_O = 0.2$  ولت گردد. بنابراین با توجه به جدول روبه رو مدار همانند یک دروازه NAND عمل می‌کند.

| $x_1$ | $x_2$ | Q     | $V_O$ |
|-------|-------|-------|-------|
| ۰     | ۰     | قطع   | ۵     |
| ۵     | ۰     | قطع   | ۵     |
| ۵     | ۰     | قطع   | ۵     |
| ۵     | ۵     | اشباع | ۰.۲   |

۳۱. در مدار منطقی شکل ۳-۳۴، ترانزیستور دارای  $V_{BE}(\text{on}) = 0.7V$ ،  $V_{BE}(\text{sat}) = 0.8V$  و  $V_{CE}(\text{sat}) = 0.2V$  است. همچنین برای دیودها  $V_D(\text{on}) = 0.7V$  می‌باشد. ورودی در یکی از دو سطح صفر و ۵ ولت قرار می‌گیرد.





شکل ۳-۳۴

الف) حداقل  $\beta$  ترانزیستور چقدر باشد تا مدار به صورت دروازه NOT عمل کند.

ب) ولتاژ خروجی به ازای  $V_I = 2.5$  ولت چقدر است؟

ج) ولتاژ خروجی به ازای  $V_I = 0.5$  ولت چقدر است؟

حل: الف) به ازای  $V_I = 0$ ، دیود  $D_1$  هدایت کرده و  $V_A = 0.7$  ولت می‌گردد که در این صورت دیودهای  $D_2$  و  $D_3$  نمی‌توانند هدایت کنند، بنابراین ترانزیستور قطع و  $V_O = 5$  ولت می‌باشد. به ازای  $V_I = 5$  ولت، دیودهای  $D_2$  و  $D_3$  روشن و دیود  $D_1$  قطع خواهد بود. در این صورت داریم

$$V_A = V_{D_2} + V_{D_3} + V_{BE} = 2.1 \text{ V}$$

که قطع بودن دیود  $D_1$  را تأیید می‌کند. مدار معادل تونن از دید بیس برابر است با

$$R_{Th} = 5 \parallel 5 = 2.5 \text{ K}\Omega, \quad V_{Th} = \frac{5 - 1/4}{5 + 5} \times 5 = 1.8 \text{ V}$$

$$I_B = \frac{V_{Th} - V_{BE(on)}}{R_{Th}} = 0.44 \text{ mA}$$

برای اینکه مدار همانند دروازه NOT عمل کند باید خروجی به ازای  $V_I = 5$  ولت برابر صفر گردد یا در واقع ترانزیستور اشباع شود.

$$\beta_{min} I_B \geq I_C(sat) = \frac{5 - 0.2}{2.2} \Rightarrow \beta_{min} = 5$$

ب) به ازای  $V_I = 2.5 \text{ V}$ ، دیود  $D_1$  قطع خواهد بود چرا که با وصل بودن دیودهای  $D_2$  و  $D_3$  و روشن بودن ترانزیستور،  $V_A = 2.1$  ولت شده و در نتیجه دیود  $D_1$  قطع می‌گردد. بنابراین چنانچه  $\beta > \beta_{min}$  باشد، ترانزیستور اشباع و  $V_O = 0.2 \text{ V}$  می‌باشد.

ج) به ازای  $V_I = 0.5$  ولت، دیود  $D_1$  وصل و در نتیجه  $V_A = 1.2$  ولت شده که باعث قطع بودن دیودهای  $D_2$  و  $D_3$  و در نتیجه ترانزیستور می‌شود. بنابراین  $V_O = 5$  ولت است.

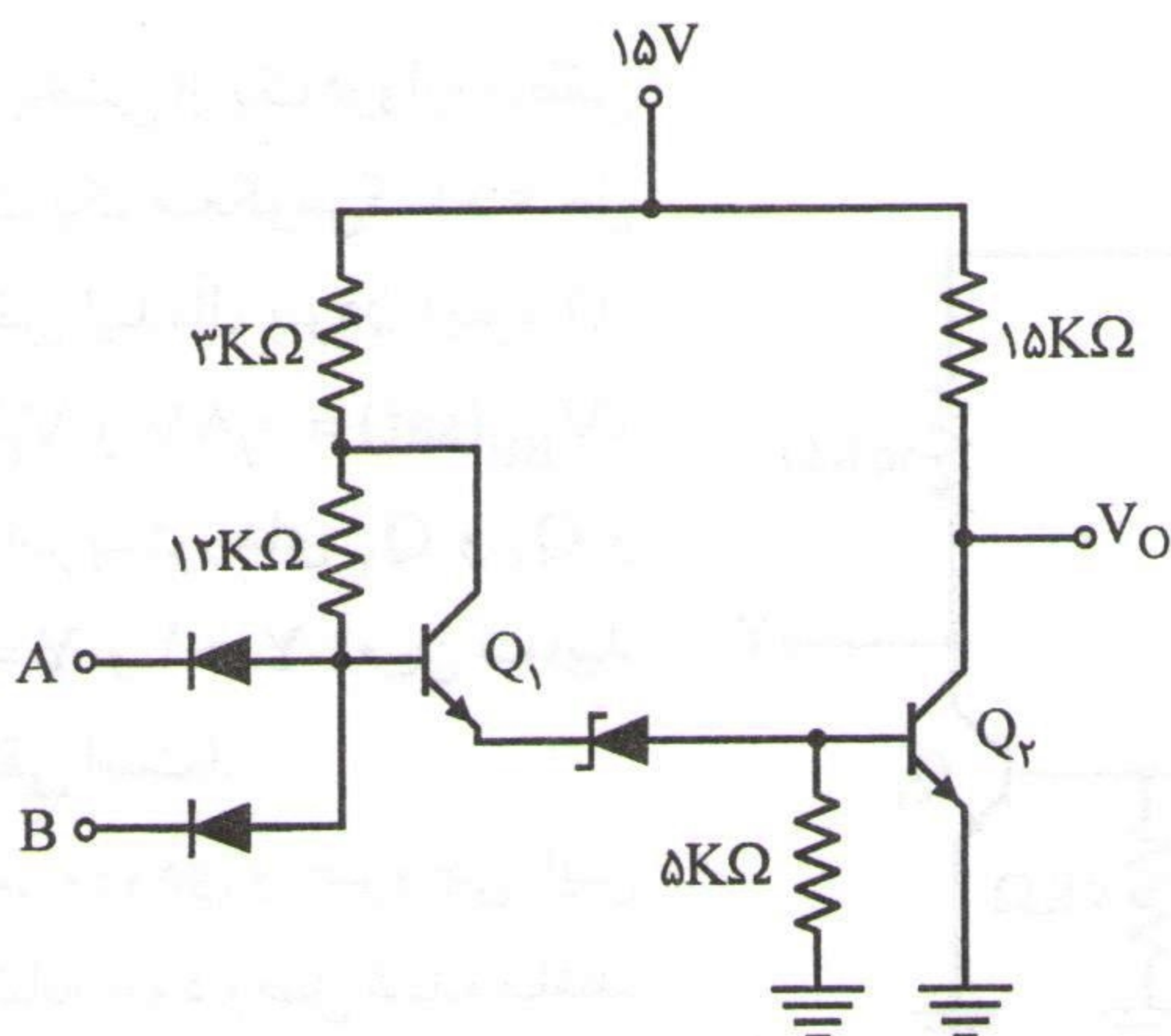
۳۲. در مدار شکل ۳-۳۵، ترانزیستورها مشابه هستند و از جریان اشباع معکوس صرف نظر می‌شود. ولتاژ شکست دیود زنر  $6.9$  ولت است. ورودیهای A و B در یکی از دو سطح ولتاژ  $0.2 \text{ V}$  یا  $15 \text{ V}$  قرار می‌گیرند.

الف) با فرض اینکه  $V_A = V_B = 15 \text{ V}$  باشد،  $\beta_{min}$  را طوری تعیین کنید که  $Q_2$  در حالت اشباع باشد. در این شرایط  $Q_1$  در ناحیه فعال کار می‌کند.

ب) با فرض اینکه  $\beta > \beta_{min}$  باشد، خروجی  $V_O$  را برای همه حالات ممکن ورودیها به دست آورید.

ج) اگر  $\beta = 9$  و بزرگ‌تر از  $\beta_{min}$  باشد، حداقل  $I_{Z,max}$  و  $P_{Z,max}$  را برای دیود زنر مشخص کنید.





شکل ۳-۳۵

حل: الف) با فرض اینکه هر دو ورودی ۱۵ ولت باشند، دیودها قطع بوده و امکان فعال بودن ترانزیستور  $Q_1$  و اشباع شدن ترانزیستور  $Q_2$  وجود دارد و در این صورت دیود زنر در ناحیه شکست قرار گرفته و داریم

$$V_{B_1} = V_{BE_1} + V_Z + V_{BE_2} = 0.7V$$

$$\text{KVL: } 15 = 3(I_{C_1} + I_{B_1}) + 12I_{B_1} + V_{B_1} = 3I_{E_1} + 12\frac{I_{E_1}}{1+\beta} + 0.7$$

$$\Rightarrow I_{E_1} = \frac{6.7}{3 + 12/(1+\beta)}$$

$$I_{B_2} = I_{E_1} - \frac{V_{BE_2}}{5} = I_{E_1} - 0.14$$

شرط اشباع ترانزیستور  $Q_2$  عبارت است از

$$\beta_{\min} I_{B_2} \geq I_{C_2} (\text{sat})$$

$$\Rightarrow \beta_{\min} \left[ \frac{6.7}{3 + 12/(1+\beta_{\min})} - 0.14 \right] \geq \frac{15 - 0.2}{15} \Rightarrow \beta_{\min} \geq 1.42$$

ب) با توجه به بند الف) برای حالت  $V_A = V_B = 15V$  هر دو دیود قطع و در نتیجه ترانزیستور  $Q_1$  فعال و ترانزیستور  $Q_2$  اشباع گردیده و خروجی برابر ۰.۲ ولت خواهد شد. چنانچه حداقل یکی از ورودیها در سطح ۰.۲ ولت قرار گیرد، دیود متناظر با آن ورودی روشن شده و در این صورت ترانزیستور  $Q_1$  و در نتیجه ترانزیستور  $Q_2$  قطع و خروجی برابر ۱۵ ولت می گردد. بنابراین مدار همانند یک دروازه NAND عمل می کند.

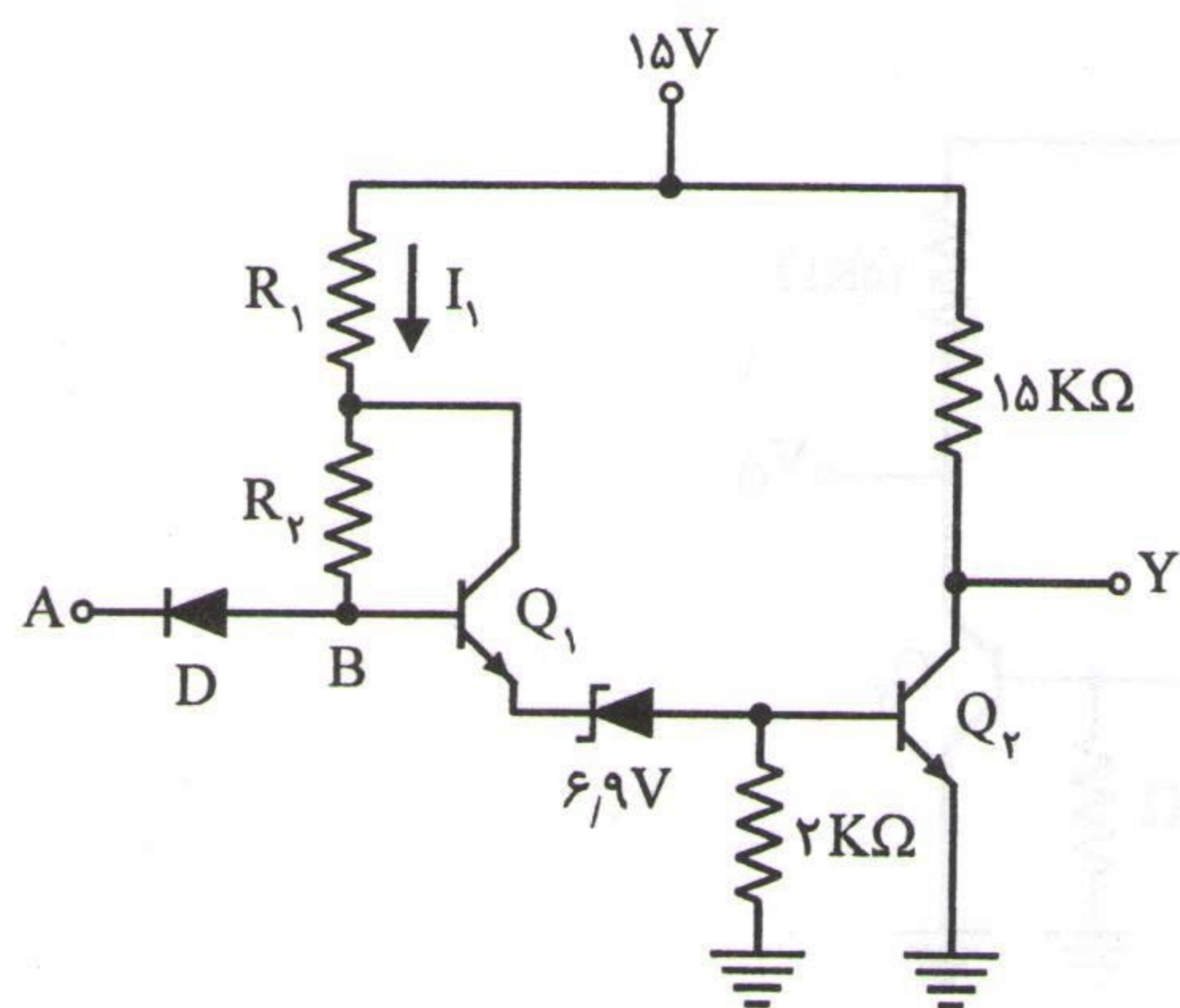
ج) حداقل  $I_{Z, \max}$  برابر  $I_{E_1}$  در حالت فعال بودن ترانزیستور  $Q_1$  می باشد.

$$I_{Z, \max} = I_{E_1} = \frac{6.7}{3 + 12/(1+\beta)} = 1.6 \text{ mA}$$

و برای حداقل  $P_{Z, \max}$  داریم

$$P_{Z, \max} = V_Z I_{Z, \max} = 6.9 \times 1.6 = 11 \text{ mW}$$





شکل ۳-۳۶

۳۳. مدار شکل ۳-۳۶، بخشی از یک دروازه منطقی است که به صورت یک معکوس کننده عمل می کند. با فرض ایده آل بودن دیود D،  $V_{BE}(sat) = 0.7V$  و  $V_{CE}(sat) = 0.2V$  (الف) وضعیت ترانزیستورهای  $Q_1$  و  $Q_2$  و دیود D را در  $Y = 1$  و  $Y = 0$  تعیین نمایید (منظور ۰ و ۱ منطقی است).

(ب) فرض کنید در ورودی و خروجی، این مدار به دروازه مشابه خود وصل شده باشد. ولتاژ نقاط A و B را برای  $Y = 1$  و  $Y = 0$  تعیین نمایید.

(ج) در صورتی که  $\beta_1 = \beta_2 = 20$  باشد،  $R_1$  و  $R_2$  را طوری تعیین کنید که در حالت  $Y = 0$  جریان  $I_1$  برابر  $I_{C1}(sat)/2$  شود.

حل: (الف) با فرض اینکه ولتاژ ورودی A برابر ۱۵V باشد (یک منطقی)، دیود D قطع بوده و امکان فعال بودن ترانزیستور  $Q_1$  و اشباع شدن ترانزیستور  $Q_2$  فراهم می شود که در این صورت دیود Zener در ناحیه شکست قرار خواهد داشت. بنابراین خروجی Y برابر ۰.۲V (صفر منطقی) می گردد. اگر ولتاژ ورودی A برابر ۰.۲V (صفر منطقی) باشد، دیود D وصل می شود و در این صورت ترانزیستور  $Q_1$  و در نتیجه ترانزیستور  $Q_2$  قطع خواهند شد و خروجی Y برابر ۱۵V (یک منطقی) می گردد. در واقع این مدار به منزله یک دروازه NOT عمل می کند.

(ب) اگر خروجی  $Y = 0$  باشد، با توجه به بند (الف)، دیود D قطع خواهد بود و ولتاژ نقطه A توسط مدار طبقه قبل تعیین می شود که باید بالا (یک منطقی) باشد. در واقع ترانزیستور  $Q_2$  مدار طبقه قبل قطع بوده و در نتیجه  $V_A = 15V$  خواهد بود. ولتاژ نقطه B با توجه به فعال بودن ترانزیستور  $Q_1$ ، اشباع بودن ترانزیستور  $Q_2$  و قرار گرفتن دیود Zener در ناحیه شکست برابر است با

$$V_B = V_{BE1}(on) + V_Z + V_{BE}(sat) = 0.9V$$

اگر خروجی  $Y = 1$  باشد (یک منطقی)، با توجه به بند (الف)، دیود D وصل بوده و ولتاژ نقطه A توسط مدار طبقه قبل تعیین می شود که باید پایین (صفر منطقی) باشد. یعنی ترانزیستور  $Q_2$  مدار طبقه قبل اشباع بوده و در نتیجه داریم

$$V_A = V_{CE}(sat) = 0.2V$$

و ولتاژ نقطه B نیز برابر است با

$$V_B = V_D(on) + V_A = 0.9V$$



ج) با توجه به فرض مسأله،  $I_1$  برابر است با

$$I_1 = \frac{I_{C_2}(\text{sat})}{2} = \frac{1}{2} \left( \frac{15 - V_{CE}(\text{sat})}{15} \right) = 0.49 \text{ mA}$$

برای اینکه ترانزیستور  $Q_2$  در ناحیه اشباع باشد باید داشته باشیم

$$\beta_{\min} I_{B_2} \geq I_{C_2}(\text{sat}) \Rightarrow I_{B_2} \geq 0.05 \text{ mA}$$

$$I_{E_1} = \frac{V_{BE_2}(\text{sat})}{2} + I_{B_2} \Rightarrow I_{E_1} \geq 0.45 \text{ mA}$$

از KCL در گره کلکتور ترانزیستور  $Q_1$  داریم

$$I_1 = I_{C_1} + I_{B_1} \Rightarrow I_1 = I_{E_1}$$

بنابراین  $I_{E_1}$  باید برابر  $0.49 \text{ mA}$  انتخاب گردد که در شرط فوق برای اشباع بودن ترانزیستور  $Q_2$  صدق نماید.

$$I_{E_1} = 0.49 \text{ mA} \Rightarrow I_{C_1} = 0.47 \text{ mA}, I_{B_1} = 0.023 \text{ mA}$$

$$V_B = V_{BE_1}(\text{on}) + V_Z + V_{BE_2}(\text{sat}) = 1.4 \text{ V}$$

برای فعال بودن ترانزیستور  $Q_1$  باید داشته باشیم

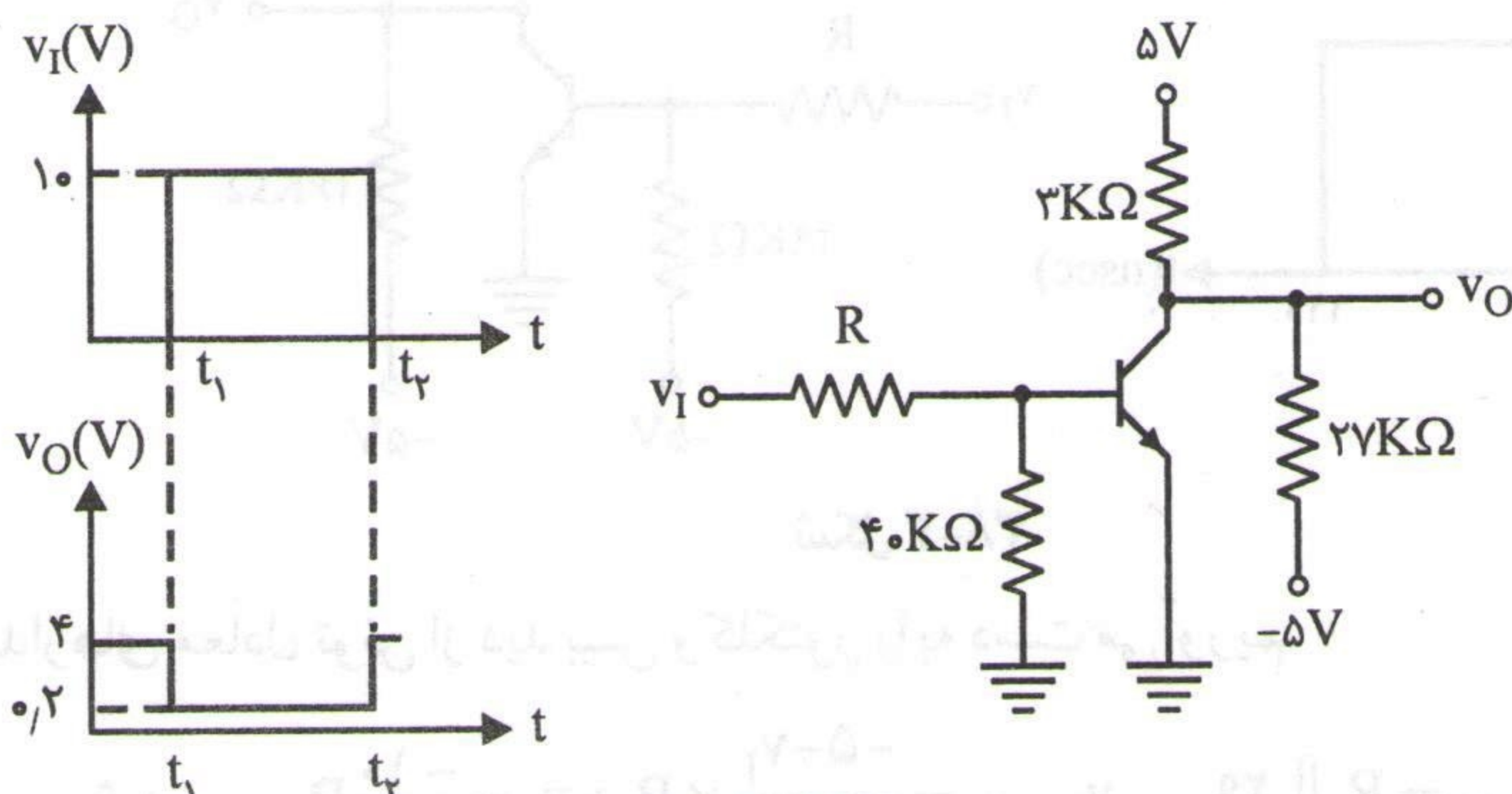
$$V_{CE_1} = V_{C_1} - V_{E_1} = V_{C_1} - (V_B - 0.7) \geq 0.2 \text{ V} \Rightarrow V_{C_1} \geq 1.9 \text{ V}$$

$$\Rightarrow V_{C_1} = 15 - R_1 I_1 \geq 1.9 \text{ V} \Rightarrow R_1 \leq 14.5 \text{ K}\Omega$$

با انتخاب  $R_1 = 10 \text{ K}\Omega$ ، با نوشتن KVL از منبع تا بیس ترانزیستور  $Q_1$  داریم

$$15 = R_1 I_1 + R_2 I_{B_1} + V_B \Rightarrow R_2 = 13.9 \text{ K}\Omega$$

۳۴. در مدار کلید ترانزیستوری شکل ۳-۳۷،  $\beta = 100$  و  $V_{CE}(\text{sat}) = 0.2 \text{ V}$  است. ورودی  $v_I$  مدار یک پالس با دامنه ۱۰ ولت می باشد. محدوده مقاومت  $R$  را به گونه ای تعیین کنید که خروجی  $v_O$  به صورت نشان داده شده باشد.



شکل ۳-۳۷



$$v_I = 0 \Rightarrow V_{BE} = 0, I_C = 0$$

حل:

$$\Rightarrow v_O = \frac{5 - (-5)}{3 + 27} \times 27 - 5 = 4 \text{ V}$$

به ازای ولتاژ ورودی  $10 \text{ V}$  ابتدا مدارهای معادل تونن از دید بیس و کلکتور را به دست می آوریم.

$$R_{Th,B} = R \parallel 40, \quad v_{Th,B} = \frac{0 - v_I}{40 + R} \times R + v_I = \frac{-1}{4} R_{Th,B} + 10$$

$$R_{Th,C} = 27 \parallel 3 = 2.7 \text{ K}\Omega, \quad v_{Th,C} = \left( \frac{5 - (-5)}{3 + 27} \right) \times 27 - 5 = 4 \text{ V}$$

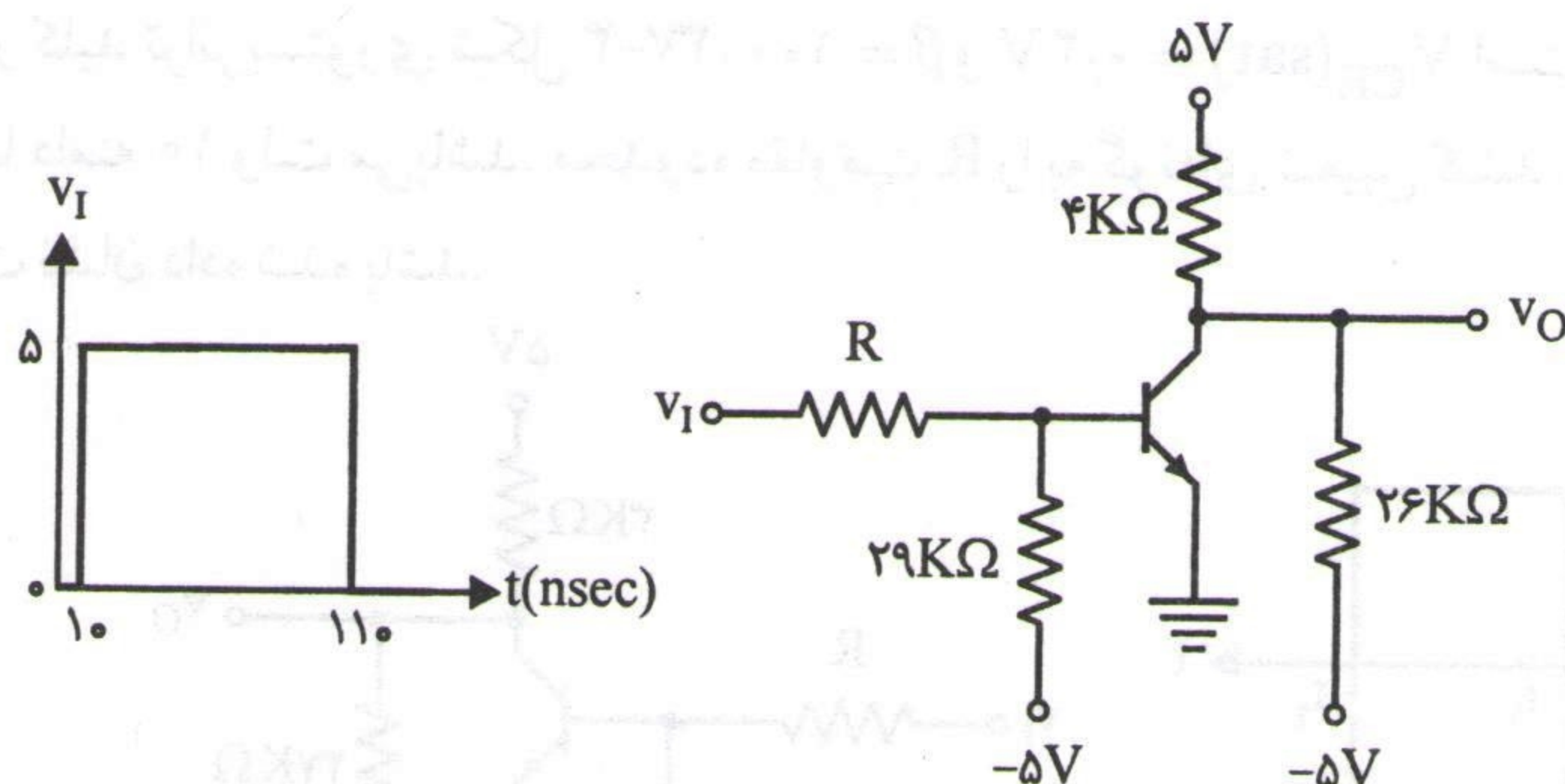
$$\beta I_B = 100 \cdot \left( \frac{v_{Th,B} - 0.7}{R_{Th,B}} \right) \geq I_C(\text{sat}) = \frac{v_{Th,C} - 0.7}{R_{Th,C}} = 1.41 \text{ mA}$$

با جایگذاری  $v_{Th,B}$  بر حسب  $R_{Th,B}$  در معادله فوق، داریم

$$R_{Th,B} \leq 35.2 \text{ K}\Omega$$

$$\Rightarrow R_{Th,B} = \frac{40 \cdot R}{40 + R} \leq 35.2 \Rightarrow R \leq 293.3 \text{ K}\Omega$$

۳۵. در مدار شکل ۳-۳۸، ترانزیستور از جنس سیلیکن با  $I_{CBO} \approx 0$  می باشد.
- الف) حداکثر مقدار  $R$  را طوری تعیین کنید که چنانچه پالسی با دامنه  $5 \text{ V}$  و ولت در ورودی قرار گیرد، ترانزیستور اشباع گردد.  $\beta_{min}$  را برابر  $100$  بگیرید.
- ب) در صورتی که ترانزیستور مورد استفاده دارای مشخصات  $t_s = 60 \text{ nsec}$ ,  $t_f = 10 \text{ nsec}$  و  $t_r = t_d = 20 \text{ nsec}$  باشد، شکل موج  $v_O$  را به ازای ورودی نشان داده شده محاسبه و رسم کنید.



شکل ۳-۳۸

حل: الف) مدارهای معادل تونن از دید بیس و کلکتور را به دست می آوریم.

$$R_{Th,B} = R \parallel 29, \quad v_{Th,B} = \frac{-5 - v_I}{R + 29} \times R + v_I = \frac{-10}{29} R_{Th,B} + 5$$



$$R_{Th,C} = 4 \parallel 26 = 3,47 K\Omega, \quad V_{Th,C} = \frac{5 - (-5)}{4 + 26} \times 26 - 5 = 3,67 V$$

$$\beta_{min} I_B \geq I_C(sat)$$

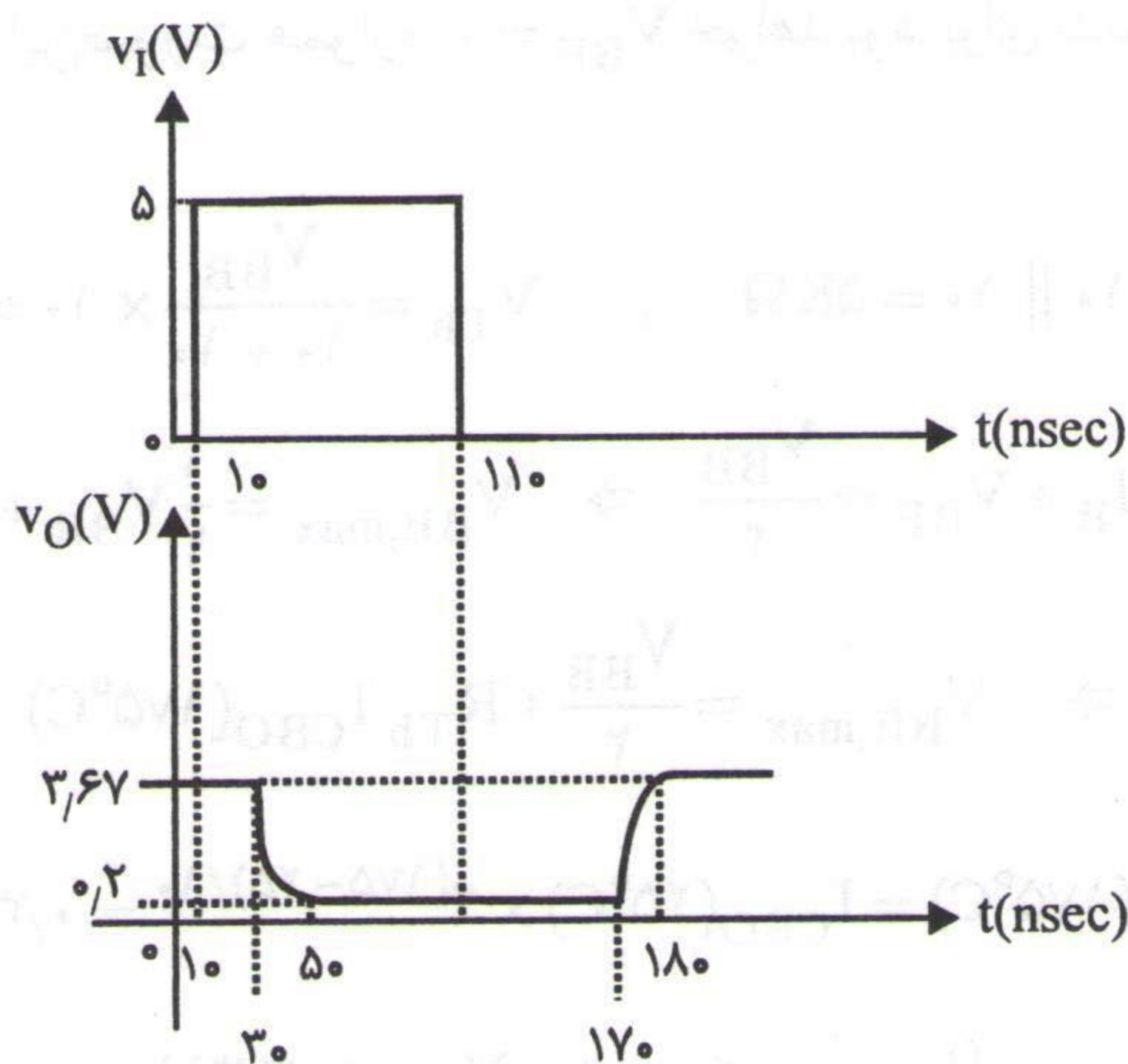
$$\Rightarrow 100 \left( \frac{V_{Th,B} - V_{BE}}{R_{Th,B}} \right) \geq \frac{V_{Th,C} - 0,2}{R_{Th,C}} \Rightarrow R_{Th,B} \leq 12,1 K\Omega$$

$$\Rightarrow \frac{29R}{R + 29} \leq 12,1 K\Omega \Rightarrow R \leq 20,76 K\Omega$$

$$v_I = 5V \Rightarrow Q: \text{اشباع} \Rightarrow v_O = 0,2V \quad (ب)$$

$$v_I = 0V \Rightarrow Q: \text{قطع} \Rightarrow v_O = \frac{5 - (-5)}{4 + 26} \times 26 - 5 = 3,67V$$

شکل موج ورودی و خروجی در شکل ۳-۳۹ رسم گردیده است.



شکل ۳-۳۹

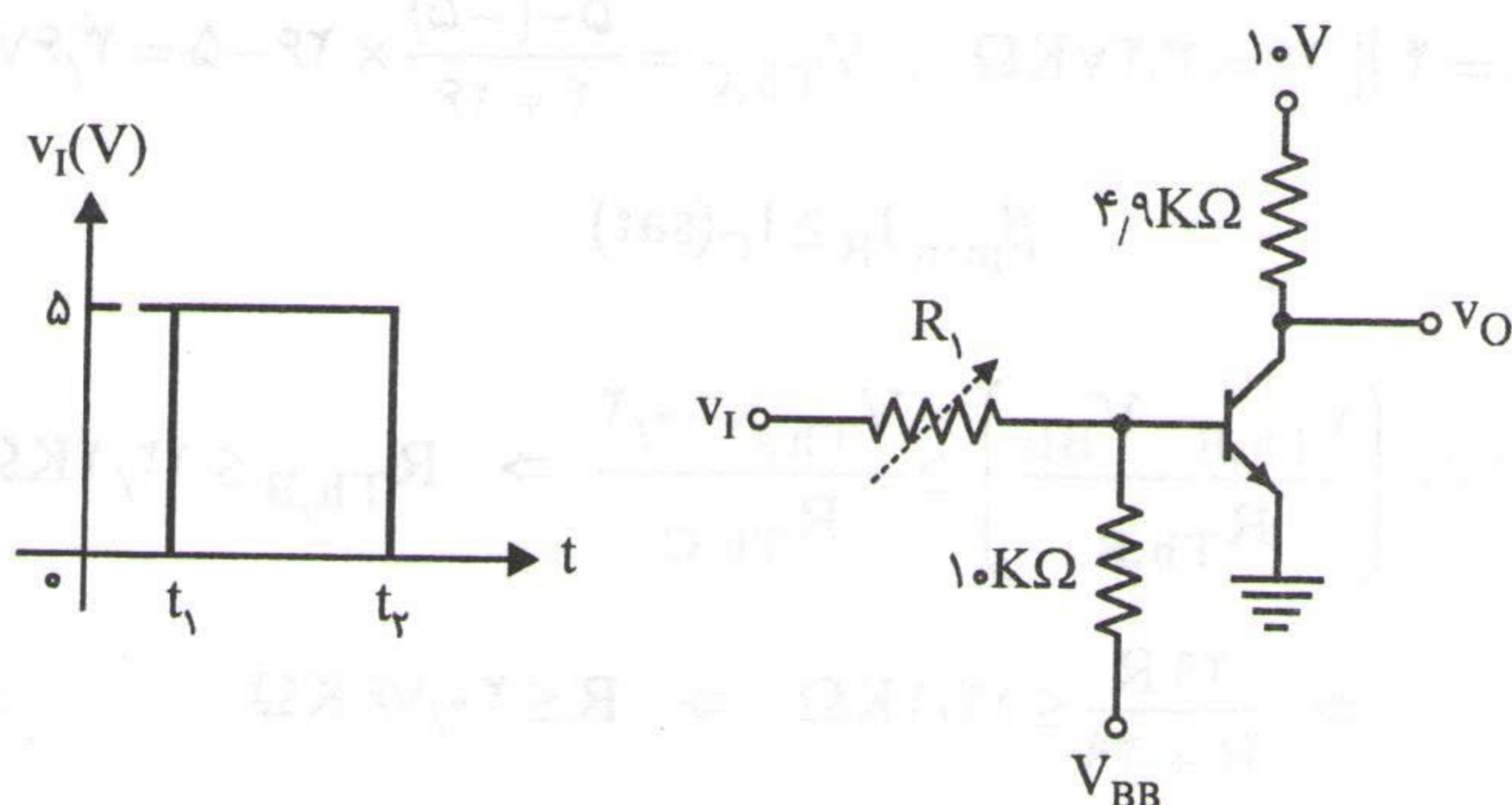
۳۶. در مدار کلید ترانزیستوری شکل ۳-۴۰، ترانزیستور دارای جریان اشباع معکوس  $I_{CBO} = 0,01 \mu A$  در دمای  $25^\circ C$  و  $20 \leq \beta \leq 50$  بوده و  $10 K\Omega \leq R_1 \leq \infty$  می باشد.

الف) برای اینکه ترانزیستور به ازای  $v_I = 0$  تا دمای  $175^\circ C$  در حالت قطع باشد، حداکثر مقدار ولتاژ منبع  $V_{BB}$  چقدر باید باشد؟ ( $V_{BE}(sat) = 0,8V$ ,  $V_{CE}(sat) = 0,2V$  و  $V_{BE}(cut) = 0$ )

ب) به ازای  $R_1 = 6 K\Omega$  و  $V_{BB} = -5V$ ، در دمای  $25^\circ C$ ، شکل موج ولتاژ خروجی را برای ورودی نشان داده شده به دست آورید. از زمانهای قطع و وصل ترانزیستور صرف نظر کنید.

ج) اشکال عملی ناشی از وجود مقاومت متغیر  $R_1$  چیست؟





شکل ۳-۴۰

حل: الف) شرط ناحیه قطع به صورت زیر است:

$$V_{BE,max} \leq V_{BE}(cut) = 0, \quad I_B = -I_{CBO}, \quad I_C = I_{CBO}$$

چنانچه  $R_1 = 0$  باشد، در این صورت همواره  $V_{BE} = 0$  خواهد بود. برای بدترین حالت،  $R_1 = 10K\Omega$  در نظر گرفته می شود.

$$R_{Th} = 10 \parallel 10 = 5K\Omega, \quad V_{Th} = \frac{V_{BB}}{10 + 10} \times 10 = \frac{1}{2} V_{BB}$$

$$KVLBE: R_{Th} I_B + V_{BE} = \frac{V_{BB}}{2} \Rightarrow V_{BE,max} = \frac{1}{2} V_{BB} + R_{Th} I_{CBO,max}$$

$$\Rightarrow V_{BE,max} = \frac{V_{BB}}{2} + R_{Th} I_{CBO}(175^\circ C)$$

$$I_{CBO}(175^\circ C) = I_{CBO}(25^\circ C) \times 2^{(175-25)/10} = 0.33mA$$

$$V_{BE,max} \leq 0 \Rightarrow V_{BB} \leq -3.3V$$

$$R_1 = 6K\Omega, \quad V_{BB} = -5V$$

ب)

$$R_{Th} = 6 \parallel 10 = 3.75K\Omega, \quad V_{Th} = \frac{v_I - (-5)}{10 + 6} \times 10 - 5 = \frac{10v_I}{16} - 1.875$$

در حالتی که  $v_I = 0$  باشد طبق بند الف) ترانزیستور قطع و در نتیجه داریم

$$I_C = I_{CBO} = 0.1\mu A, \quad v_O = 10 - 4.9I_{CBO} \approx 10V$$

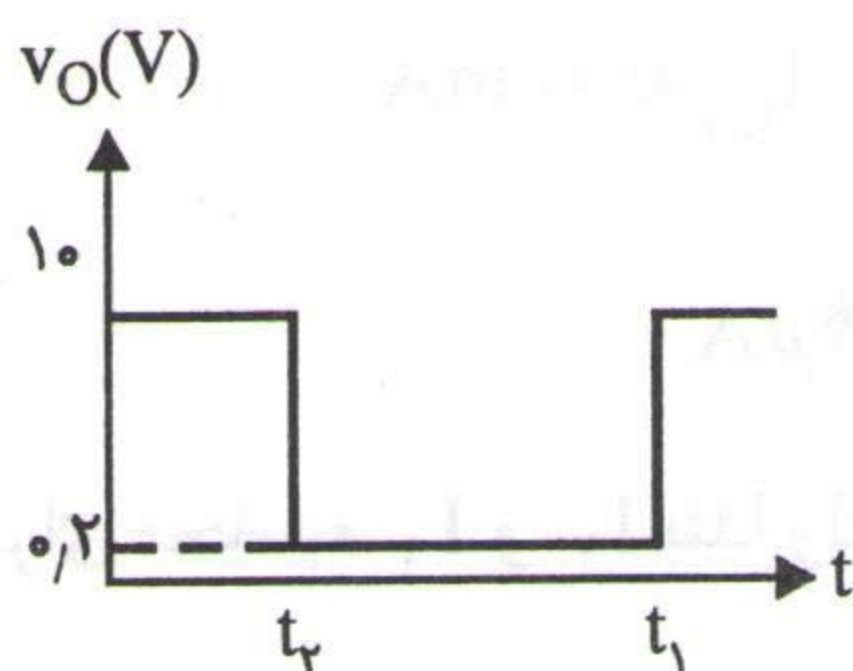
به ازای  $v_I = 5V$  داریم

$$V_{Th} = 1.25V, \quad R_{Th} = 3.75K\Omega$$



$$I_B = \frac{V_{Th} - V_{BE}}{R_{Th}} = 0.147 \text{ mA} , \quad I_C(\text{sat}) = \frac{V_{CC} - V_{CE}(\text{sat})}{R_C} = 2 \text{ mA}$$

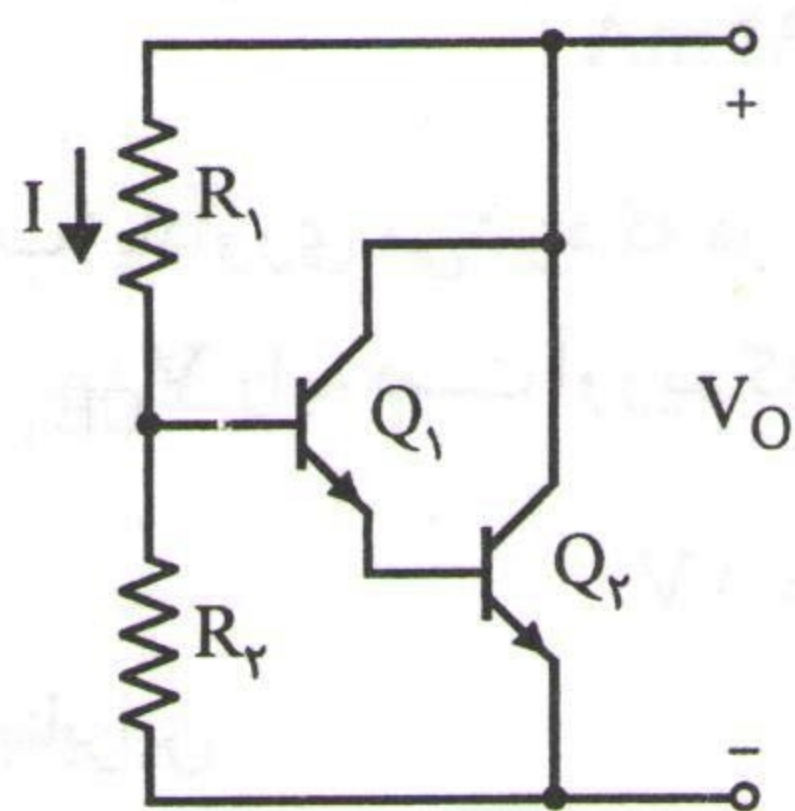
$$\beta_{\min} I_B = 2.94 > I_C(\text{sat}) = 2 \text{ mA}$$



شکل ۳-۴۱

بنابراین ترانزیستور در ناحیه اشباع خواهد بود و  $v_O = 0.2 \text{ V}$  است. شکل موج خروجی  $v_O$  مطابق شکل ۳-۴۱ است.

ج) با متغیر بودن  $R_1$  بین صفر تا ۱۰ کیلو اهم،  $R_{Th}$  بین صفر تا ۵ کیلو اهم متغیر خواهد بود. چنانچه پالس ورودی برابر ۵ ولت باشد و  $R_{Th}$  نیز مقدار کمی داشته باشد (خصوصاً صفر)، جریان بیس بیش از اندازه زیاد شده و به پیوند BE آسیب می‌رساند.



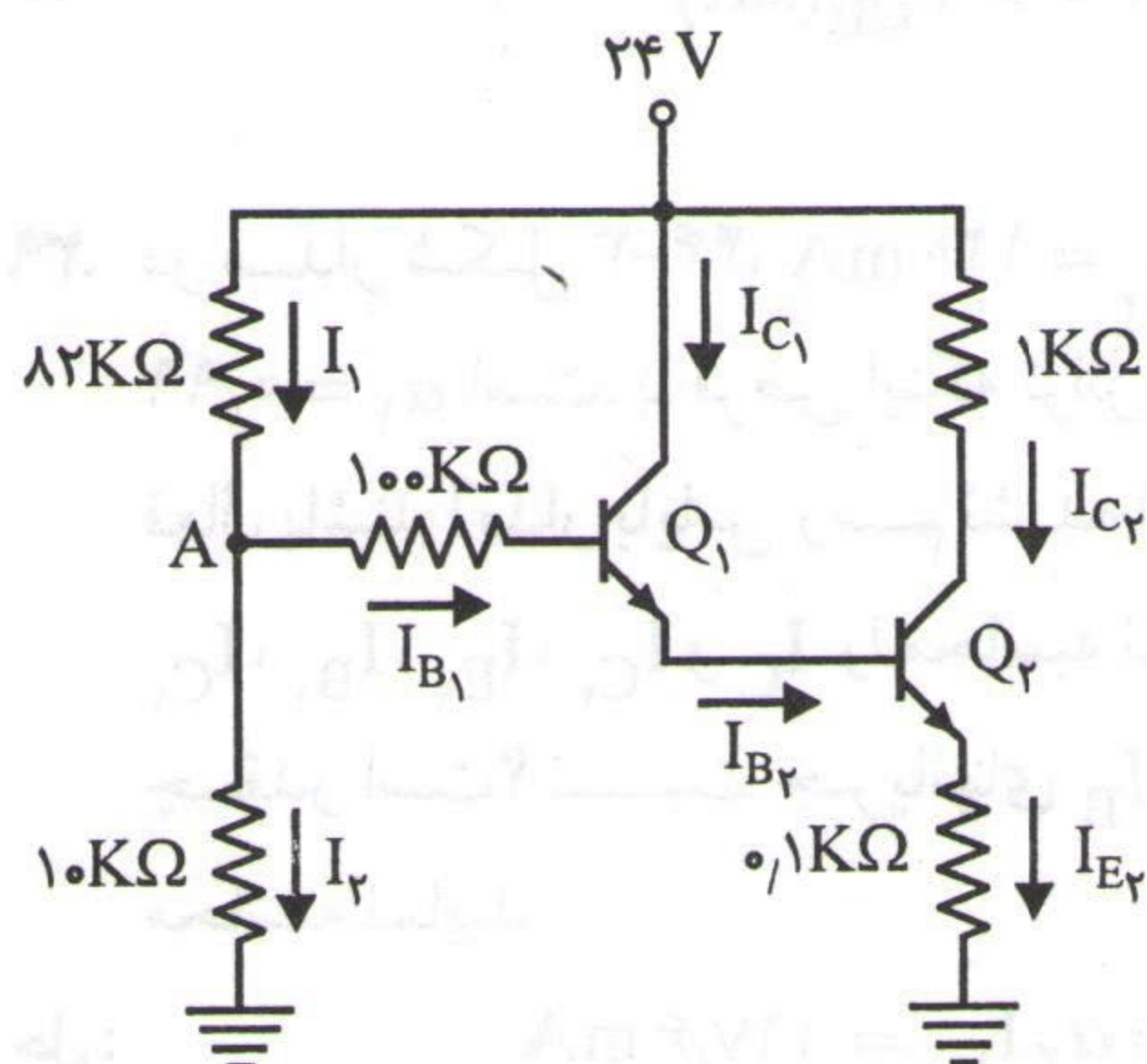
شکل ۳-۴۲

۳۷. مدار شکل ۳-۴۲ یک ضرب کننده ولتاژ  $V_{BE}$  را نشان می‌دهد. خروجی  $v_O$  را به دست آورید.  $\beta$  ترانزیستورها را بزرگ فرض نمایید.

حل: با صرف نظر از جریان بیس ترانزیستور  $Q_1$  داریم

$$v_O = (R_1 + R_2)I$$

$$= (R_1 + R_2) \frac{2V_{BE}}{R_2} = \frac{2(R_1 + R_2)}{R_2} V_{BE} = K \times V_{BE}$$



شکل ۳-۴۳

۳۸. در مدار شکل ۳-۴۳، ترانزیستورهای  $Q_1$  و  $Q_2$  در ناحیه فعال کار می‌کنند.  $\beta_1 = 100$  و  $\beta_2 = 50$  و  $V_{BE_1} = V_{BE_2} = 0.7 \text{ V}$  است. از جریان اشباع معکوس صرف نظر می‌گردد.

الف) جریانهای  $I_1, I_2, I_{B_1}, I_{B_2}, I_{E_1}, I_{E_2}, I_{C_1}, I_{C_2}$  را بیابید.

ب) ولتاژهای  $V_{C_2}$  و  $V_{E_2}$  را به دست آورید.

حل: ابتدا مدار معادل تونن از دید بیس ترانزیستور  $Q_1$  را به دست می‌آوریم.

$$R_{Th} = (82 \parallel 10) + 100 = 108.9 \text{ K}\Omega , \quad V_{Th} = \frac{24}{82 + 10} \times 10 = 2.61 \text{ V}$$

با توجه به فعال بودن ترانزیستورها داریم

$$I_{B_2} = I_{E_1} = (\beta_1 + 1) I_{B_1} = 101 I_{B_1}$$

$$I_{E_2} = (\beta_2 + 1) I_{B_2} = 51 I_{B_2} = 51 \times 101 I_{B_1} = 5151 I_{B_1}$$



با نوشتن KVL در حلقه BE دو ترانزیستور داریم

$$V_{Th} = R_{Th} I_{B_1} + 2V_{BE} + 0.1 I_{E_2}$$

$$\Rightarrow I_{B_1} = 1.94 \mu A, I_{B_2} = 10.1 I_{B_1} = 195.94 \mu A, I_{E_2} \approx 10 mA$$

$$I_{C_2} = \beta_2 I_{B_2} = 9.8 mA, I_{C_1} = \beta_1 I_{B_1} = 194 \mu A$$

برای محاسبه  $I_1$  و  $I_2$  ابتدا ولتاژ نقطه A را محاسبه می‌کنیم.

$$V_A = 100 \times I_{B_1} + 2V_{BE} + 0.1 \times I_{E_2} = 2.594 V$$

$$\Rightarrow I_1 = \frac{24 - V_A}{82} = 0.261 mA, I_2 = \frac{V_A}{10} = 0.2594 mA$$

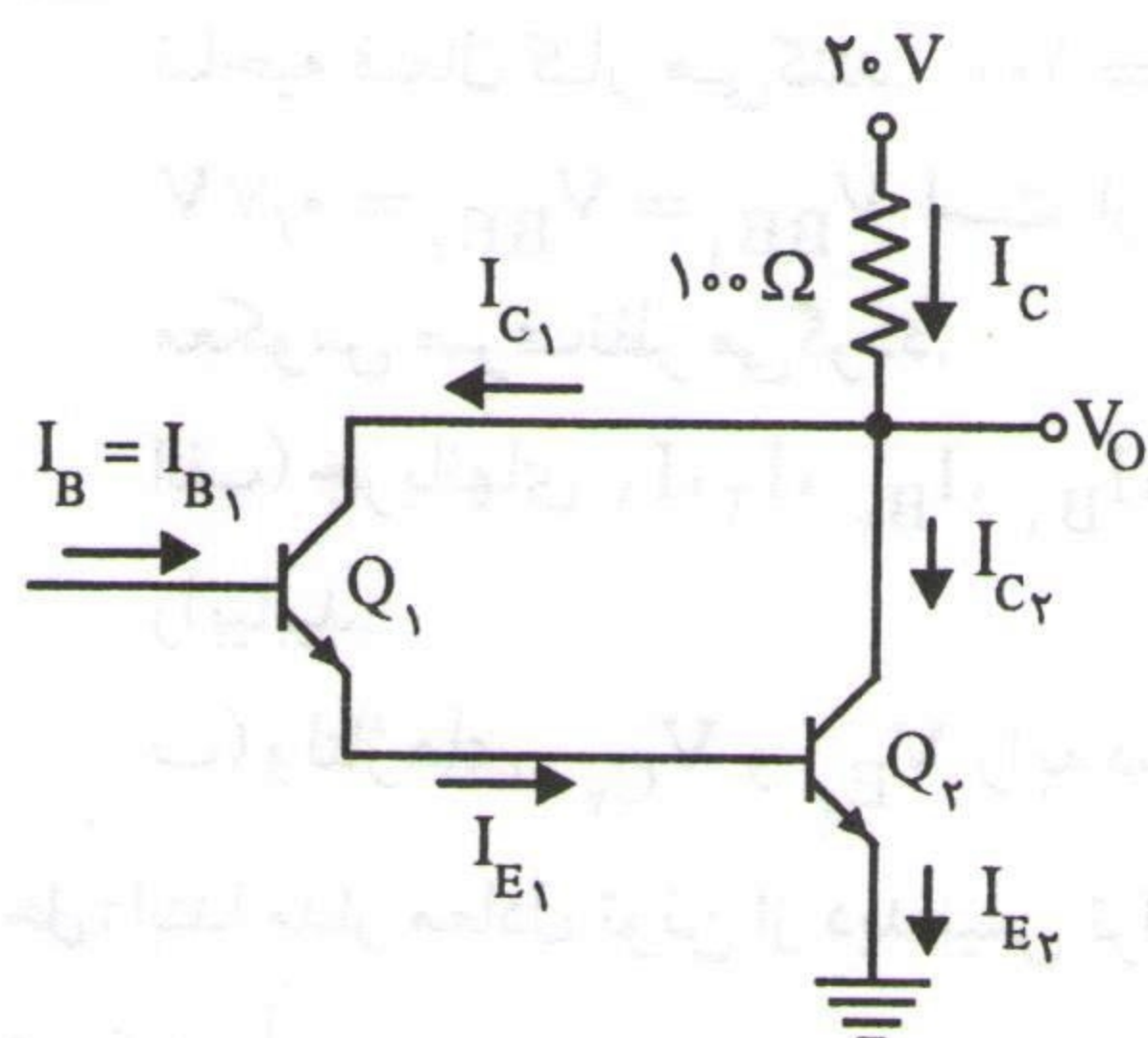
ب) یادآوری می‌شود که در بند (الف) باید جهت اطمینان از فعال بودن ترانزیستورها، ولتاژهای  $V_{CE_2}$  و  $V_{CE_1}$  را به دست آوریم که اکنون با به دست آوردن  $V_{C_2}$  و  $V_{E_2}$  این امر نیز بررسی می‌گردد.

$$V_{C_2} = 24 - 1 \times I_{C_2} = 14.2 V, V_{E_2} = 0.1 \times I_{E_2} = 1 V$$

بنابراین

$$V_{CE_2} = V_{C_2} - V_{E_2} = 13.2 V > V_{CE(sat)}$$

$$V_{CE_1} = 24 - V_{BE_2} - V_{E_2} = 22.3 V > V_{CE(sat)}$$



شکل ۳-۴۴

۳۹. در مدار شکل ۳-۴۴،  $I_{E_2} = 120 mA$ ،  $\alpha_2 = 0.98$  و  $\alpha_1 = 0.99$  است. با فرض اینکه ترانزیستورها در ناحیه فعال باشند (مدار بایاس رسم نشده است)، جریانهای  $I_C$  و  $I_{C_2}$ ،  $I_{E_1}$ ،  $I_{B_1}$ ،  $I_{C_1}$  را محاسبه نمایید. ولتاژ  $V_O$  چقدر است؟ نسبت جریانهای  $I_C/I_{E_2}$  و  $I_C/I_{B_1}$  را محاسبه نمایید.

$$I_{C_2} = \alpha_2 I_{E_2} = 117.6 mA \quad \text{حل:}$$

$$I_{E_1} = I_{B_2} = I_{E_2} - I_{C_2} = 2.4 mA$$

$$I_{C_1} = \alpha I_{E_1} = 2.376 mA$$

$$I_B = I_{B_1} = I_{E_1} - I_{C_1} = 0.024 mA$$

$$I_C = I_{C_1} + I_{C_2} = 119.976 mA$$



بنابراین

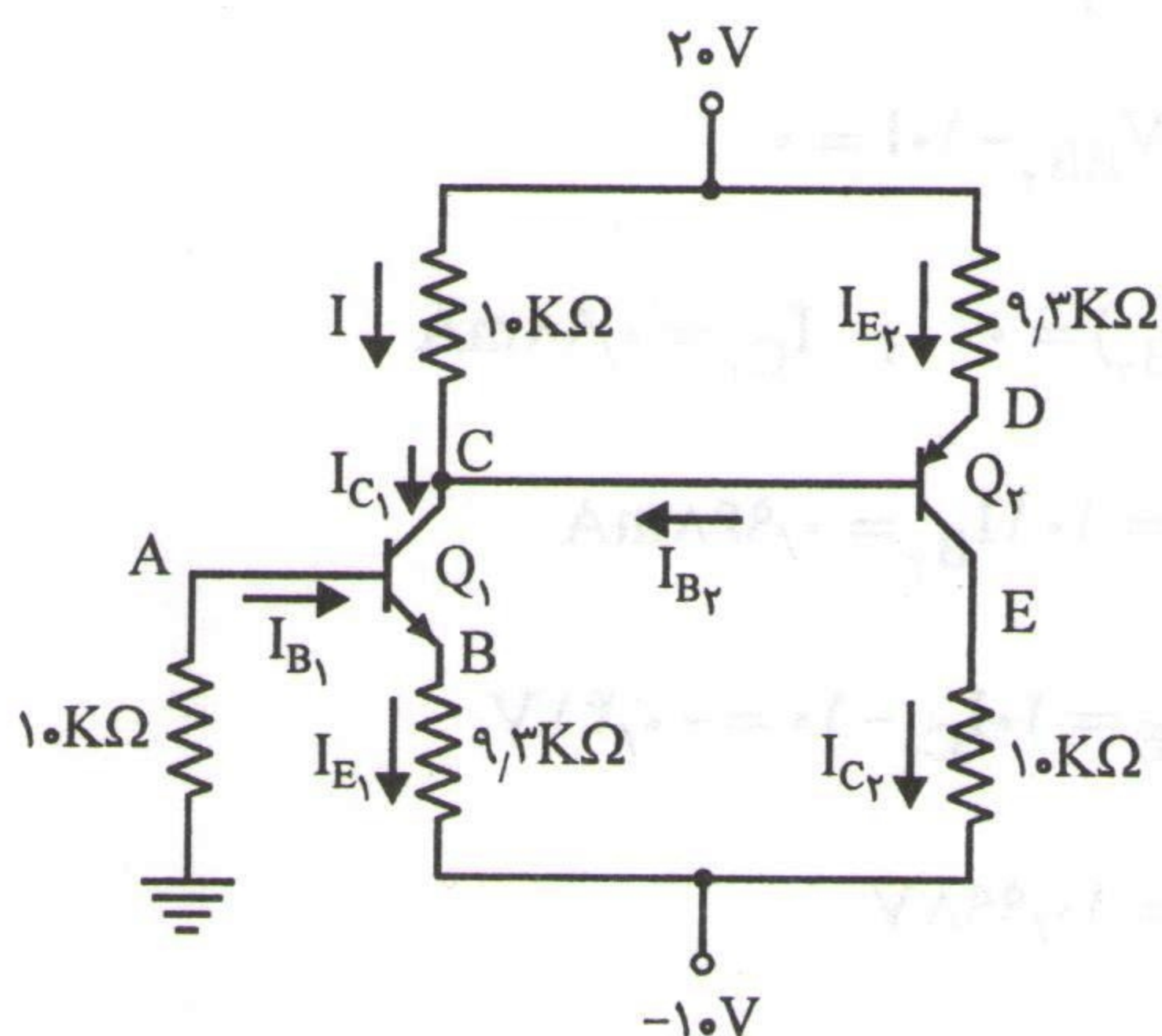
$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = 4999, \quad \alpha = \frac{I_C}{I_{E_r}} = 0.9998$$

برای اطمینان از فعال بودن ترانزیستورها، ولتاژهای CE را محاسبه می‌کنیم.

$$V_{CE_r} = 20 - 0.1 I_C = 8V > V_{CE}(\text{sat})$$

$$V_{CE_1} = V_{CE_r} - V_{BE_r} = 7.3V > V_{CE}(\text{sat})$$

■



شکل ۳-۴۵

۴۰ در مدار شکل ۳-۴۵، ترانزیستورها مشابه، و

دارای  $|V_{BE}(\text{on})| = 0.7V$  می‌باشند.

ولتاژ نقاط A، B، C، D و E را به ازای حالتی

زیر به دست آورید:

الف)  $\beta = \infty$  ب)  $\beta = 100$

حل: الف) در این حالت از جریانهای بیس می‌توان صرف‌نظر کرد.

$$I_{B_1} \approx I_{B_r} \approx 0$$

$$\text{KVL } BE_1: 10 I_{B_1} + 0.7 + 9.3 I_{E_1} - 10 = 0 \Rightarrow I_{E_1} = 1\text{mA}$$

$$I \approx I_{C_1} = I_{E_1} = 1\text{mA}$$

$$\text{KVL } EB_r: 9.3 I_{E_r} + 0.7 - 10 I = 0 \Rightarrow I_{E_r} = 1\text{mA}$$

$$I_{C_r} \approx I_{E_r} = 1\text{mA}$$

$$V_B = 9.3 I_{E_1} - 10 = -0.7V, \quad V_A = V_B + 0.7 = 0V, \quad V_C = 20 - 10 I = 10V$$

$$V_E = 10 I_{C_r} - 10 = 0V, \quad V_D = 20 - 9.3 I_{E_r} = 10.7V$$

$$V_{CE_1} = V_C - V_B = 10.7V, \quad V_{EC_r} = V_D - V_E = 10.7V$$

که فعال بودن ترانزیستورها نیز تأیید می‌گردد.

ب) در این حالت از جریانهای بیس صرف‌نظر نکرده و آنها را در نظر می‌گیریم.

$$I_{E_1} = (\beta + 1) I_{B_1} = 101 \left[ \frac{0 - V_A}{10} \right] = -10.1 V_A$$



از طرف دیگر برای  $I_{E_1}$  داریم

$$I_{E_1} = \frac{V_B - (-10)}{9.3} = (V_B + 10)/9.3$$

$$\Rightarrow -10.1 V_A = (V_B + 10)/9.3, \quad V_A = V_B + 0.7$$

از حل دو رابطه فوق  $V_A = -0.98 V$  و  $V_B = -0.798 V$  به دست می آید.

$$I_{C_1} = \beta I_{B_1} = 100 \left( \frac{-V_A}{10} \right) = 0.98 mA$$

$$KVL_{E_2}: 9.3 I_{E_2} + V_{E_2} - 10 I = 0$$

$$\Rightarrow 9.3 \times 10.1 I_{B_2} + 0.7 - 10 (I_{C_1} - I_{B_2}) = 0, \quad I_{C_1} = 0.98 mA$$

$$\Rightarrow I_{B_2} = 9.586 \mu A \Rightarrow I_{E_2} = 10.1 I_{B_2} = 0.968 mA$$

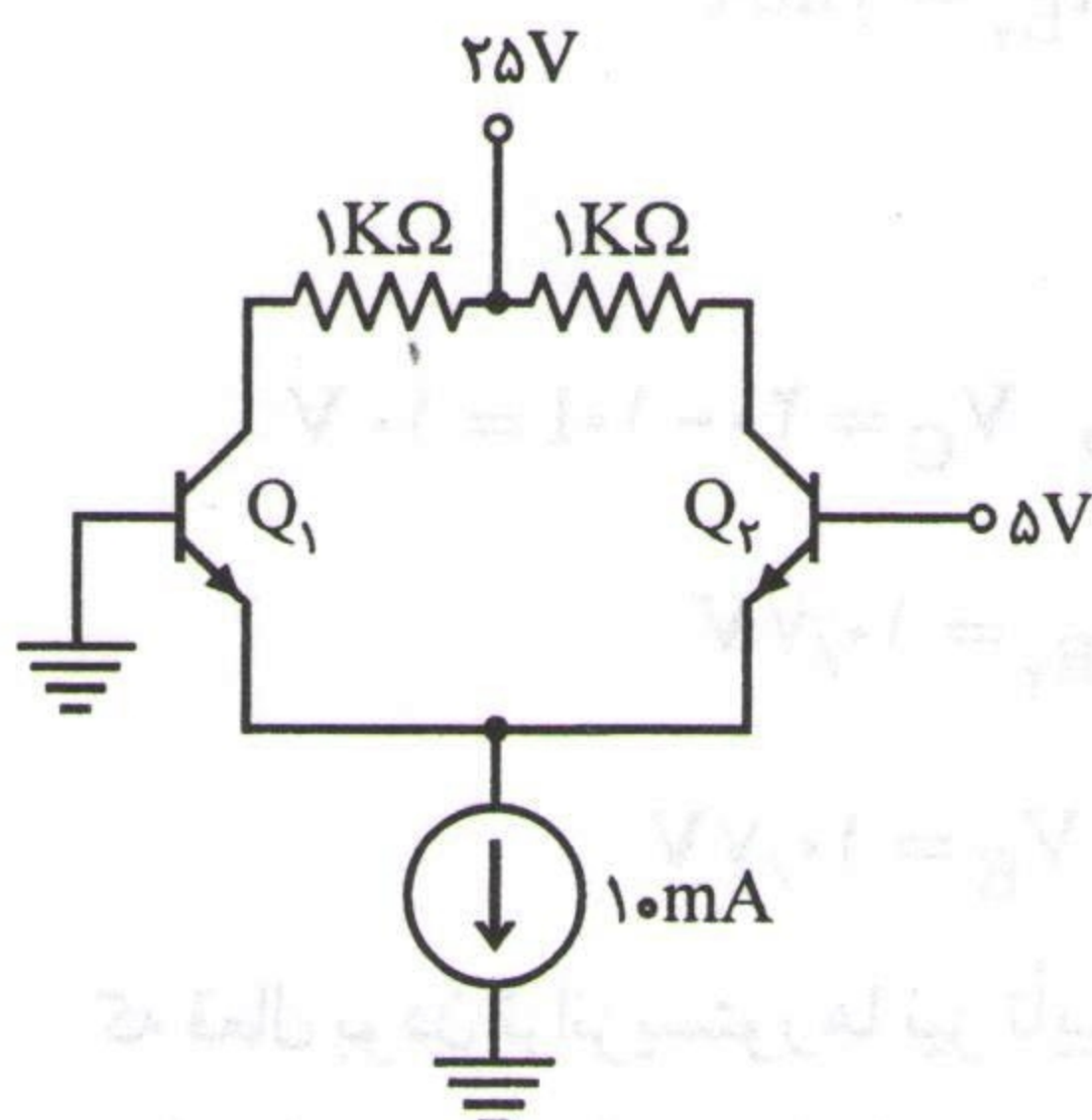
$$I_{C_2} = 100 I_{B_2} = 0.959 mA, \quad V_E = 10 I_{C_2} - 10 = -0.41 V$$

$$V_D = 20 - 9.3 I_{E_2} = 10.998 V$$

$$V_C = 20 - 10 I = 20 - 10 (I_{C_1} - I_{B_2}) \approx 10.2 V$$

$$V_{CE_1} = V_C - V_B \approx 11 V, \quad V_{EC_2} = V_D - V_E \approx 11.41 V$$

که فعال بودن ترانزیستورها تأیید می گردد. مقایسه مقادیر جریانها و ولتاژها در حالت (الف) و (ب) جالب توجه است.



شکل ۳-۴۶

۴۱. در تقویت کننده تفاضلی مدار شکل ۳-۴۶، ترانزیستورها مشابه هستند. نقطه کار و ناحیه کار هر ترانزیستور را بیابید.

حل: با توجه به نحوه بایاس ترانزیستورهای  $Q_1$  و  $Q_2$  به نظر می رسد که ترانزیستور  $Q_2$  روشن و ترانزیستور  $Q_1$  قطع باشد. بنابراین

$$I_{E_2} = 10 mA$$

$$V_{E_1} = V_{E_2} = 5 - 0.7 = 4.3 V \Rightarrow V_{BE_1} = -4.3 V$$

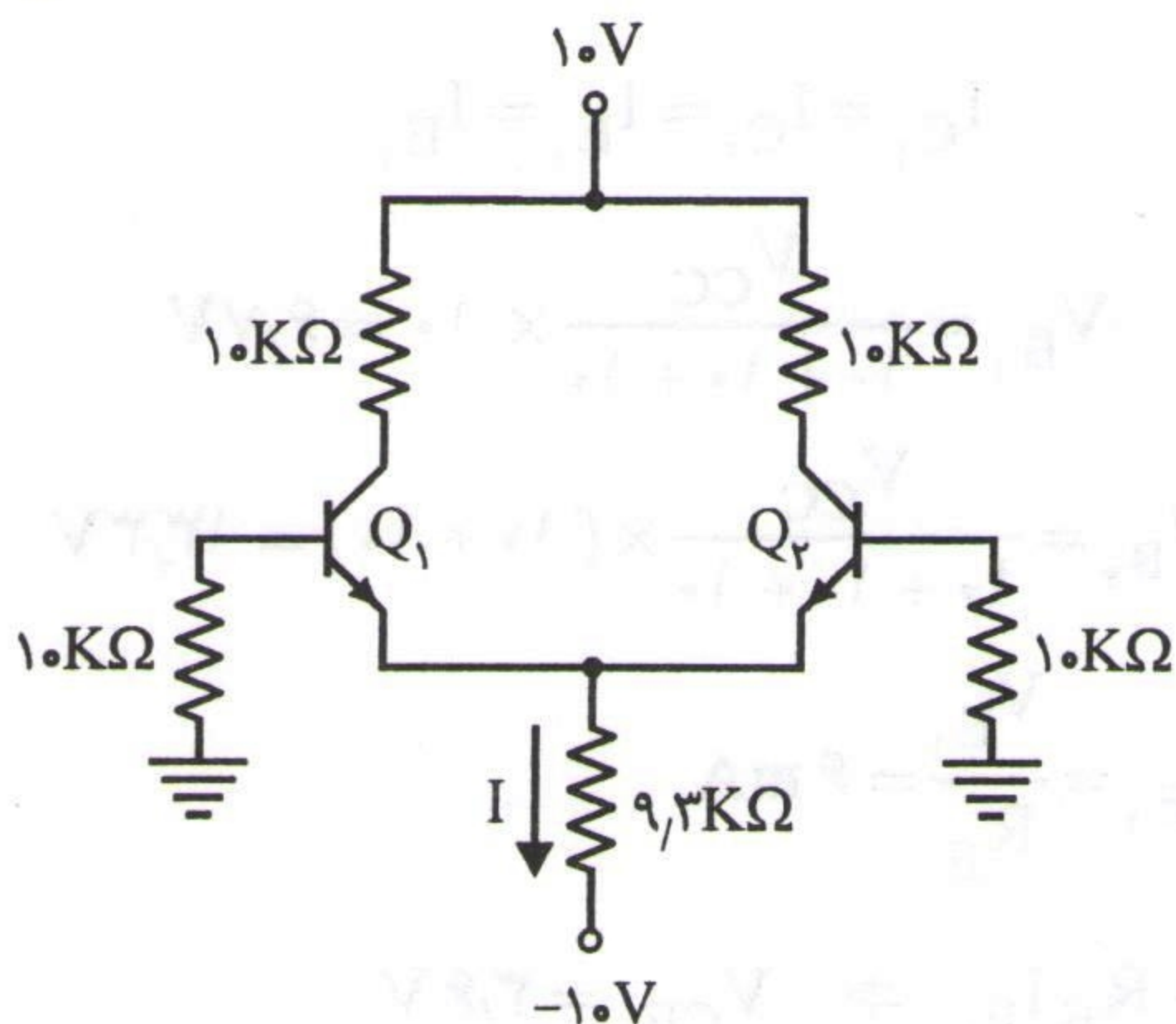


که قطع بودن ترانزیستور  $Q_1$  را تأیید می‌کند.

$$I_{C_2} \approx I_{E_2} = 10 \text{ mA} , \quad V_{CE_2} = 25 - 10 - 4/3 = 10/7 \text{ V}$$

بنابراین فرض فعال بودن ترانزیستور  $Q_1$  نیز صحیح است. و نقاط کار برابر است با

$$Q_1(0, 20/7 \text{ V}) , \quad Q_2(10 \text{ mA}, 10/7 \text{ V})$$



شکل ۴۷-۳

۴۲. در مدار شکل ۳-۴۷، ترانزیستورها کاملاً مشابه و

دارای  $V_{BE} = 0/7$  ولت هستند. نقطه کار

ترانزیستورها را برای حالت‌های زیر به دست آورید:

$$\beta_1 = \beta_2 = 100 \text{ (ب)} \quad \beta_1 = \beta_2 = \infty \text{ (الف)}$$

حل: (الف) به دلیل تقارن مدار و تشابه ترانزیستورها،

جریان نقطه کار هر دو ترانزیستور برابر است که می‌توان

با نوشتن KVL در حلقه  $B_1 B_2$  این نکته را دید.

$$10 I_{B_1} + V_{BE_1} - V_{BE_2} - 10 I_{B_2} = 0$$

$$\Rightarrow I_{B_1} = I_{B_2} , \quad I_{E_1} = I_{E_2} = I_E$$

بنابراین  $I = 2I_E$  خواهد بود. به ازای  $\beta = \infty$  می‌توان از جریان بیس صرف‌نظر نمود. بنابراین از KVL در

حلقه  $BE_1$  داریم

$$V_{BE_1} + 9/3 I - 10 = 0 \Rightarrow I = 1 \text{ mA} \Rightarrow I_E = 0/5 \text{ mA}$$

از KVL در حلقه  $CE_1$  داریم

$$10 = 10 I_{C_1} + V_{CE_1} + 9/3 (2 I_E) - 10 = 0$$

به ازای  $\beta = \infty$ ، جریانهای  $I_{C_1} = I_{E_1}$  خواهد بود و در نتیجه  $V_{CE_1} = 5/7 \text{ V}$  است. بنابراین نقطه کار هر

دو ترانزیستور  $(0/5 \text{ mA}, 5/7 \text{ V})$  خواهد بود.

$$\text{KVL } BE_1: 10 I_{B_1} + V_{BE_1} + 9/3 I - 10 = 0 , \quad I_{E_1} = 10/1 I_{B_1} \quad (\text{ب})$$

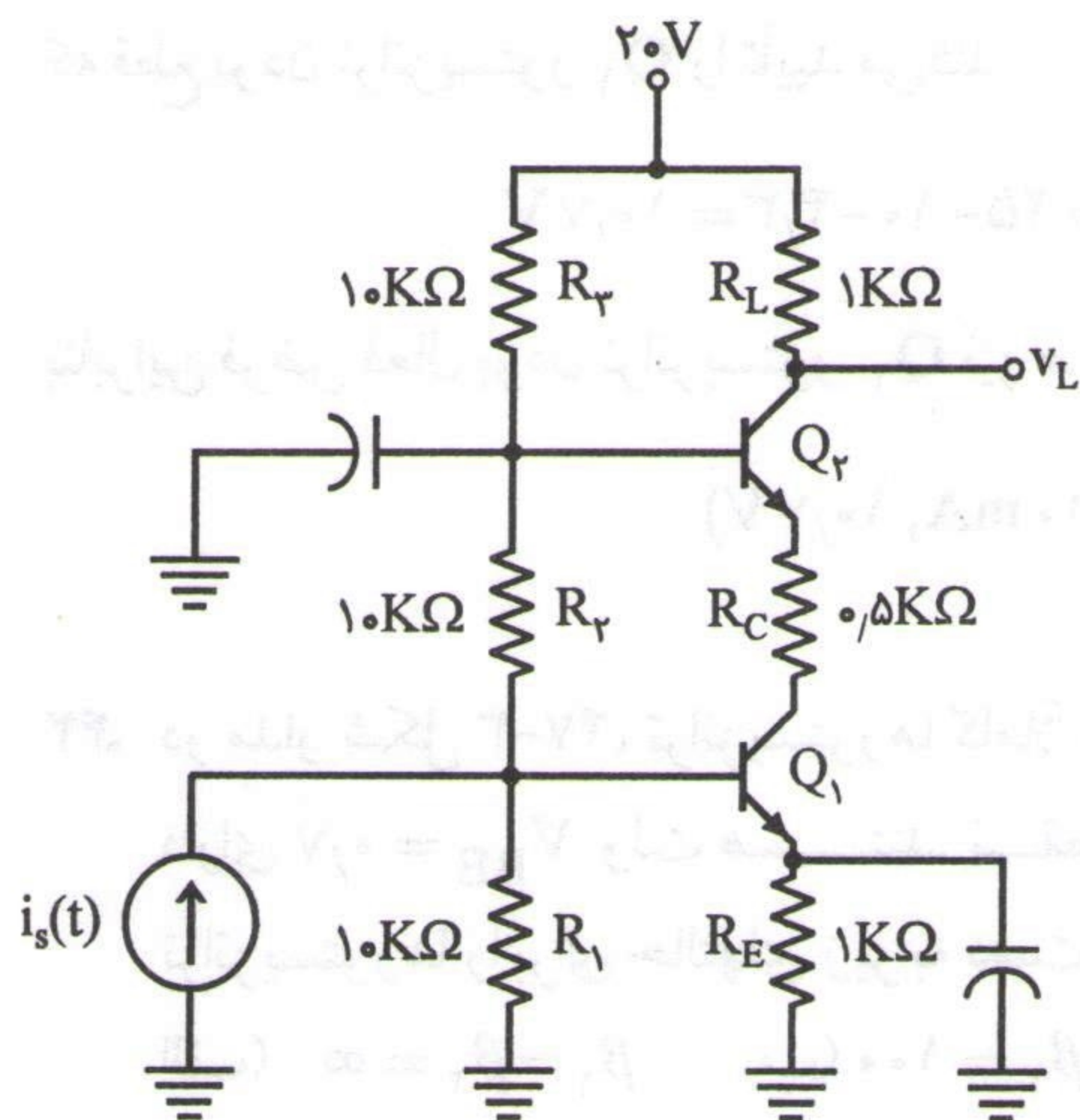
$$\Rightarrow I_{B_1} = 4/92 \mu\text{A} , \quad I_{C_1} = 0/49 \text{ mA} , \quad I_{E_1} = 0/497 \text{ mA}$$

$$\text{KVL } CE_1: 10 = 10 I_{C_1} + V_{CE_1} + 9/3 (2 I_E) - 10 \Rightarrow V_{CE_1} = 5/86 \text{ V}$$

به دلیل تقارن مدار، همین مقادیر برای ترانزیستور  $Q_2$  به دست خواهد آمد. پس نقطه کار هر دو ترانزیستور

$(0/49 \text{ mA}, 5/86 \text{ V})$  می‌باشد.





شکل ۳-۴۸

۴۳. مدار شکل ۳-۴۸ یک تقویت کننده کاسکود را نشان می دهد. نقاط کار هر دو ترانزیستور را به دست آورید.  $\beta$  را برای ترانزیستورها، بزرگ فرض کنید.

حل: از آنجا که  $\beta$  بزرگ است می توان از جریانهای بیس صرف نظر کرد.

$$I_{C1} = I_{C2} = I_{E1} = I_{E2}$$

$$V_{B1} = \frac{V_{CC}}{10 + 10 + 10} \times 10 = 6.7V$$

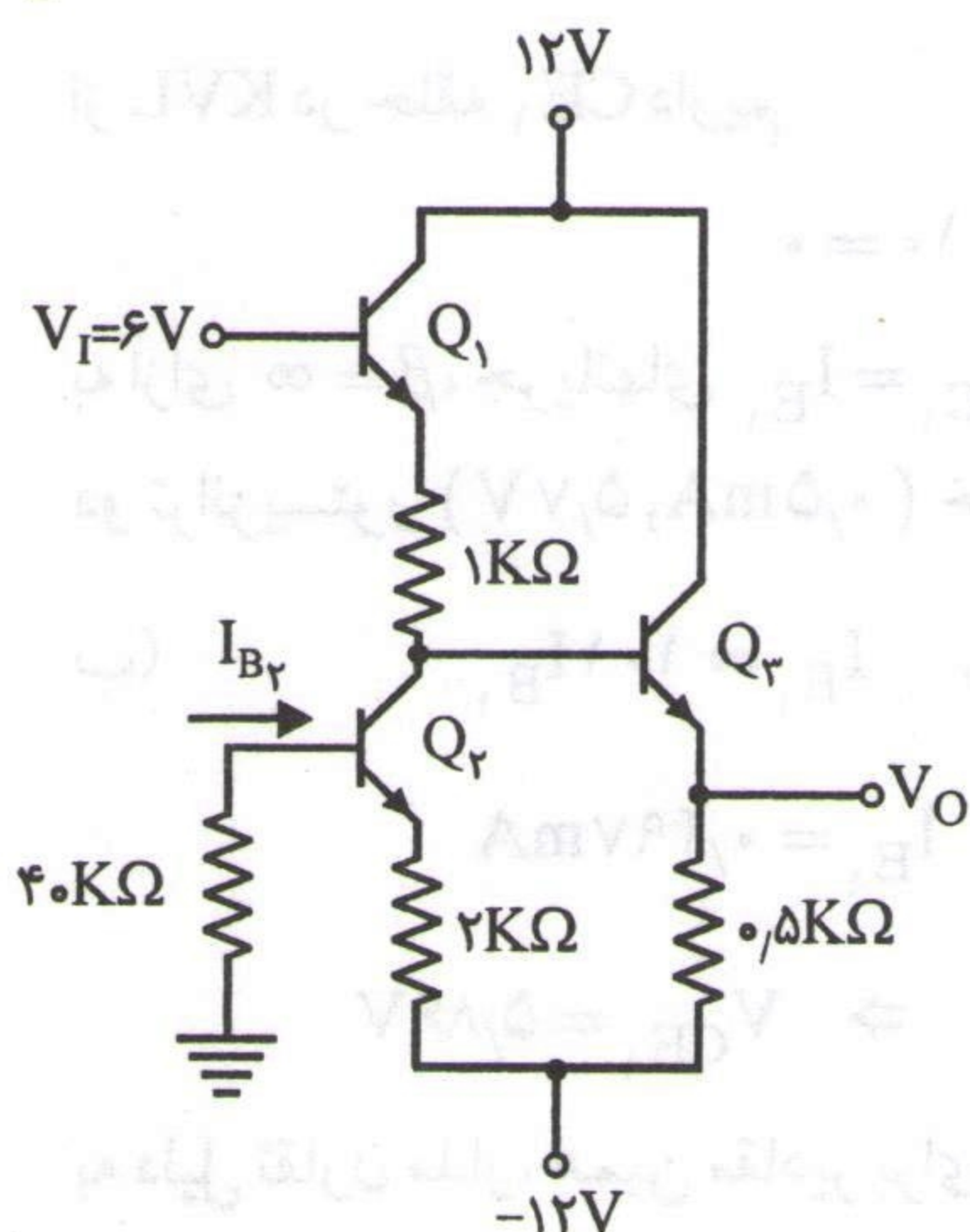
$$V_{B2} = \frac{V_{CC}}{10 + 10 + 10} \times (10 + 10) = 13.3V$$

$$V_{E1} = V_{B1} - 0.7V = 6V, \quad I_{E1} = \frac{V_{E1}}{R_E} = 6mA$$

$$KVL: V_{B2} = V_{BE2} + R_C I_{E2} + V_{CE1} + R_E I_{E1} \Rightarrow V_{CE1} = 3.6V$$

$$KVL: V_{CC} = R_L I_{C2} + V_{CE2} + R_C I_{E2} + V_{CE1} + R_E I_{E1} \Rightarrow V_{CE2} = 1.4V$$

بنابراین نقاط کار ترانزیستورها  $Q_1 (6mA, 3.6V)$  و  $Q_2 (6mA, 1.4V)$  است که هر دو در ناحیه فعال کار می کنند.



شکل ۳-۴۹

۴۴. در مدار شکل ۳-۴۹، ترانزیستورها مشابه و از جنس سیلیکن با  $\beta = 100$  می باشند. نقاط کار ترانزیستورها و خروجی را محاسبه کنید. برای ترانزیستورها  $V_{BE(on)}$  را برابر  $0.6V$  در نظر بگیرید.

$$KVL_{BE2}: 40 I_{B2} + V_{BE2} + 2(\beta + 1) I_{B2} = 12$$

$$\Rightarrow I_{B2} = 48\mu A, \quad I_{C2} = 4.8mA$$

با صرف نظر از  $I_{B3}$  داریم

$$I_{C1} \approx I_{C2} = 4.8mA$$



$$V_{B_3} = V_I - V_{BE_1(on)} - 1 \times I_{C_3} = 0.6V, \quad V_O = V_{B_3} - V_{BE_3(on)} = 0V$$

بنابراین خروجی برابر صفر است. در واقع اگر سیگنالی با سطح DC برابر ۶ ولت به مدار وارد شود، سطح DC ولتاژ خروجی برابر صفر خواهد بود. به این مدار انتقال دهنده سطح ولتاژ می‌گویند.

$$V_{B_3} = V_{CE_3} + 2I_{E_3} - 12 \Rightarrow V_{CE_3} = 3V$$

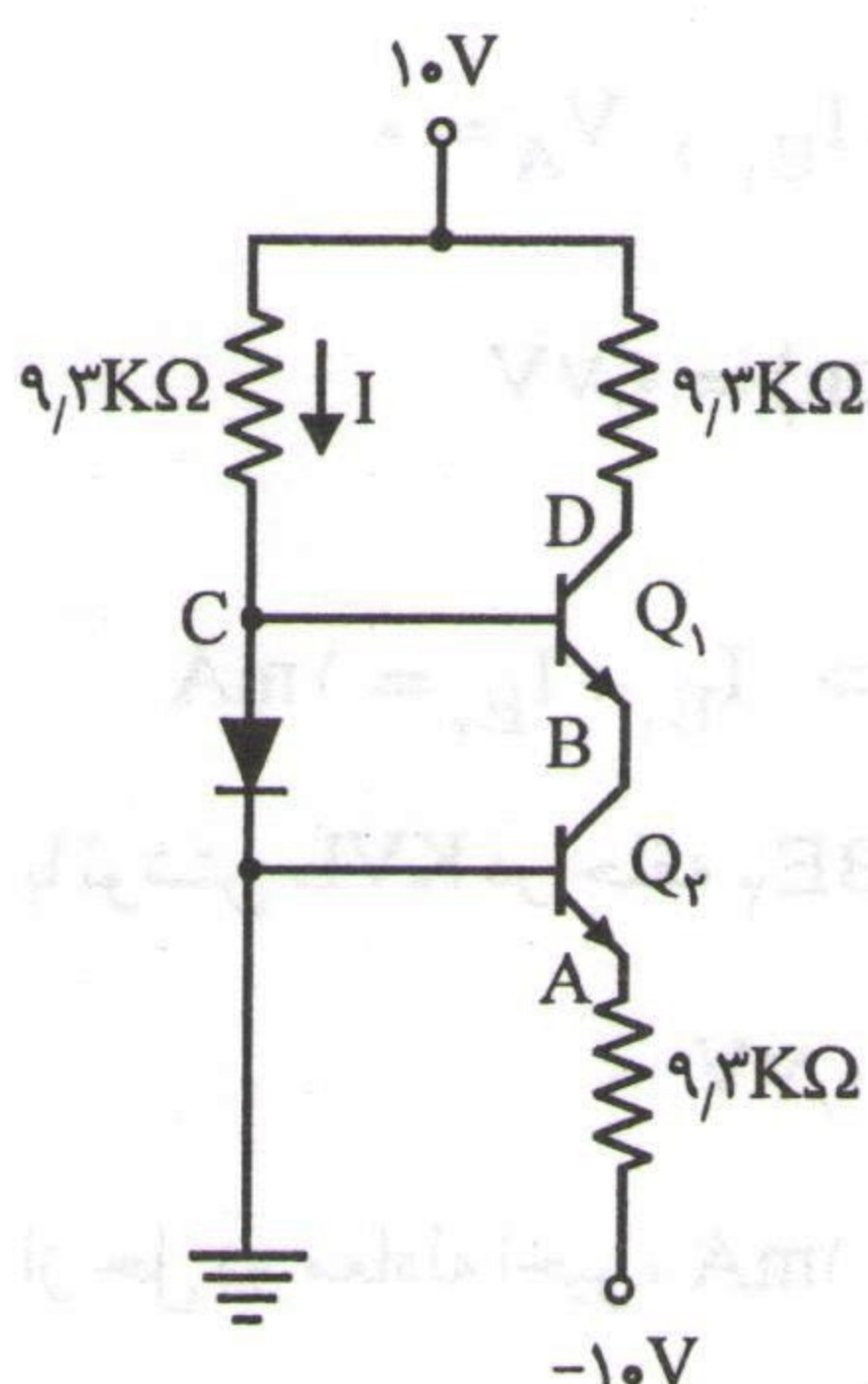
$$V_{CE_1} = V_{C_1} - V_{E_1} = 12 - (V_I - V_{BE_1}) = 6.6V$$

$$12 = V_{CE_3} + V_O \Rightarrow V_{CE_3} = 12V$$

$$I_{C_3} = \frac{V_O - (-12)}{0.5} = 24mA$$

بنابراین همه ترانزیستورها در ناحیه فعال کار می‌کنند و نقاط کار برابرند با

$$Q_1(4.8mA, 6.6V), \quad Q_2(4.8mA, 3V), \quad Q_3(24mA, 12V)$$



۴۵. در مدار شکل ۳-۵۰، ترانزیستورها مشابه و دارای  $V_{BE(on)} = 0.7V$  و  $V_D(on) = 0.7V$  می‌باشد. ولتاژ نقاط A، B، C و D را در حالت‌های زیر بیابید.

$$\beta = \infty \quad (\text{الف}) \quad \beta = 10 \quad (\text{ب})$$

حل: الف) در این حالت می‌توان از جریانهای بیس صرف نظر کرد، بنابراین

$$V_C = V_D(on) = 0.7V, \quad V_B = V_C - V_{BE(on)} = 0V$$

$$V_A = 0 - V_{BE(on)} = -0.7V, \quad I_E = \frac{V_A - (-10)}{9.3} = 1mA$$

شکل ۳-۵۰

پس جریانهای کلکتور و امیتر هر دو ترانزیستور برابر ۱mA می‌باشد.

$$V_D = 10 - 9.3I_C = 0.7V$$

$$V_{CE_1} = V_D - V_B = 0.7 > 0.2V$$

$$V_{CE_2} = V_B - V_A = 0.7 > 0.2V$$

که فعال بودن هر دو ترانزیستور را تأیید می‌کند.



$$\text{KVL BE}_r: V_{\text{BE}_r} + 9.3 I_{E_r} - 10 = 0 \Rightarrow I_{E_r} = 1 \text{ mA} \quad (\text{ب})$$

$$I_{B_r} = \frac{I_{E_r}}{\beta + 1} = \frac{1}{11} \text{ mA}$$

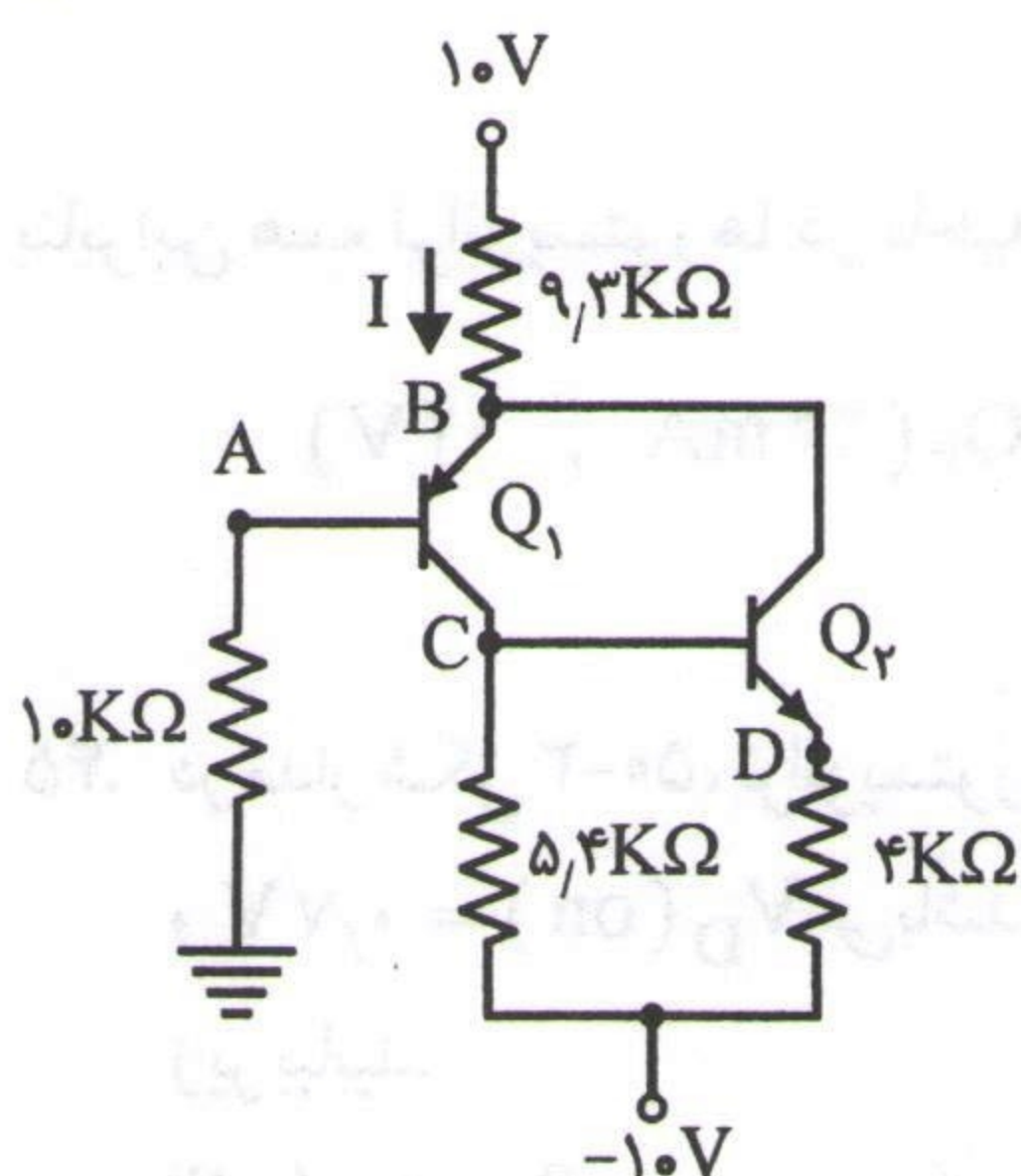
$$I_{E_1} = I_{C_r} = \beta I_{B_r} = \frac{10}{11} \text{ mA} \Rightarrow I_{B_1} = \frac{I_{E_1}}{\beta + 1} = \frac{10}{121} \text{ mA}$$

$$I_{C_1} = \beta I_{B_1} = \frac{100}{121} \text{ mA}, \quad V_C = V_D(\text{on}) = 0.7 \text{ V}, \quad V_A = -0.7 \text{ V}$$

$$V_B = V_C - 0.7 = 0 \text{ V}, \quad V_D = 10 - 9.3 I_{C_1} = 2.3 \text{ V}$$

ملاحظه می شود که فقط  $V_D$  نسبت به بند (الف) تغییر کرده است.

■



۴۶. در مدار شکل ۳-۵۱، با فرض  $|V_{\text{BE}}(\text{on})| = 0.7 \text{ V}$ ، نقطه کار ترانزیستورها و ولتاژ نقاط A، B، C و D را به دست آورید.

الف) به ازای  $\beta = \infty$       ب) به ازای  $\beta = 100$

حل: الف) به ازای  $\beta = \infty$  می توان از جریانهای بیس صرف نظر کرد.

$$I_{C_r} = I_{E_r}, \quad I_{C_1} = I_{E_1}, \quad V_A = 0$$

$$V_B = V_A + V_{\text{EB}_1}(\text{on}) = 0.7 \text{ V}$$

$$I = I_{E_1} + I_{C_r} = \frac{10 - V_B}{9.3} = 1 \text{ mA} \Rightarrow I_{E_1} + I_{E_r} = 1 \text{ mA}$$

با نوشتن KVL در حلقه  $\text{BE}_r$  داریم

$$5.4 I_{C_1} = V_{\text{BE}_r} + 4 I_{E_r} \Rightarrow 5.4 I_{E_1} - 4 I_{E_r} = 0.7 \text{ V}$$

از حل دو معادله اخیر،  $I_{E_1} = I_{E_r} = 1 \text{ mA}$  به دست می آید.

$$V_D = 4 I_{E_r} - 10 = -8 \text{ V}, \quad V_C = 5.4 I_{C_1} - 10 = -7.3 \text{ V}$$

$$V_{\text{CE}_r} = V_B - V_D = 8.7 \text{ V}, \quad V_{\text{CE}_1} = V_B - V_C = 7.7 \text{ V}$$

پس هر دو ترانزیستور در ناحیه فعال قرار دارند و نقاط کار آنها عبارتند از

$$Q_1 (0.5 \text{ mA}, 8 \text{ V}), \quad Q_2 (0.5 \text{ mA}, 8.7 \text{ V})$$

$$\text{KVL E}_1: 10 = 9.3 (I_{E_1} + I_{C_r}) + V_{\text{EB}_1} + 10 I_{B_1} \quad (\text{ب})$$



$$\text{KVL BE}_2: V_{BE_2} + 4I_{E_2} - 5/4(I_{C_1} - I_{B_2}) = 0$$

$$V_{EB_1} = 0.7V, \quad I_{E_1} = 10.1I_{B_1}, \quad I_{C_2} = 100I_{B_2}$$

$$I_{C_1} = 100I_{B_1}, \quad I_{E_2} = 10.1I_{B_2}$$

از روابط فوق، دو معادله و دو مجهول زیر حاصل می شود:

$$9.3 = 949.3I_{B_1} + 930I_{B_2}, \quad 0.7 = 540I_{B_1} - 409.4I_{B_2}$$

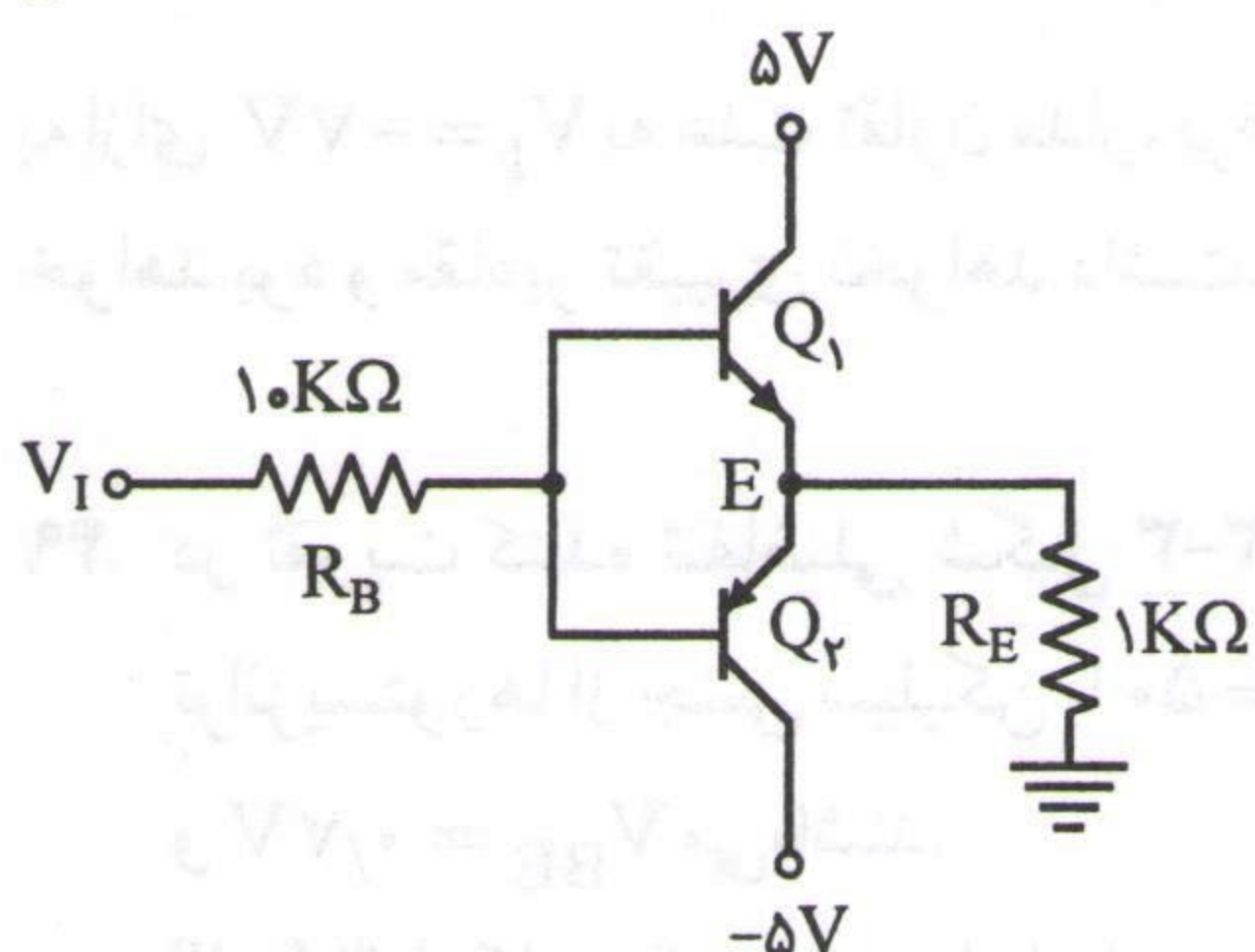
$$\Rightarrow I_{B_1} \approx I_{B_2} = 4.9\mu A, \quad I_{E_1} = I_{E_2} = I_E \approx 0.5mA$$

$$\text{KVL CE}_2: 10 = 9.3(I_C + I_E) + V_{CE_2} + 4I_E - 10 \Rightarrow V_{CE_2} = 8.7V$$

$$\text{KVL EC}_1: 10 = 9.3(I_C + I_E) + V_{EC_1} + 5/4(I_C - I_B) - 10 \Rightarrow V_{EC_1} = 8.1V$$

پس هر دو ترانزیستور در ناحیه فعال کار می کنند و نقاط کار آنان عبارتند از

$$Q_1(0.49mA, 8.1V), \quad Q_2(0.49mA, 8.7V)$$



شکل ۵۲-۳

۴۷. در مدار شکل ۵۲-۳، برای دو حالت  $V_I = \pm 5V$ ، ولتاژ و جریان نقطه کار ترانزیستورها را بیابید.  $\beta = 100$  و  $|V_{BE}| = 0.7V$  است.

حل: به ازای  $V_I = 5V$ ، با توجه به جهت جریانهای بیس، ترانزیستور  $Q_2$  قطع و ترانزیستور  $Q_1$  وصل خواهد بود.

$$I_{B_1} = \frac{V_I - V_{BE_1}}{R_B + (\beta + 1)R_E} = 38.74\mu A$$

$$I_{E_1} = (\beta + 1)I_{B_1} = 3.913mA, \quad I_{C_1} = \beta I_{B_1} = 3.874mA$$

$$\text{KVL CE}_1: 5 = V_{CE_1} + R_E I_{E_1} \Rightarrow V_{CE_1} = 1.1V$$

پس نقطه کار ترانزیستور  $Q_1$  عبارت است از

$$Q_1(3.874mA, 1.1V)$$

$$\text{KVL EC}_2: V_{EC_2} = R_E I_{E_1} - (-5) = 8.913V$$

$$V_{EB_2} = -V_{BE_1} = -0.7V$$

بنابراین ترانزیستور  $Q_2$  قطع خواهد بود.



با توجه به نحوه اتصال BE دو ترانزیستور به یکدیگر، این دو ترانزیستور نمی‌توانند همزمان روشن باشند. به ازای  $V_I = -5V$  برعکس حالت قبل ترانزیستور  $Q_1$  قطع و ترانزیستور  $Q_2$  فعال خواهد بود و مقادیر به علت تقارن مدار تغییری ندارند.

۴۸. مسأله شماره ۴۷ را به ازای ولتاژ ورودی  $\pm 7V$  ولت حل کنید.  
حل: در مسأله قبل دیدیم که به ازای  $V_I = 5V$ ، ترانزیستور  $Q_1$  فعال و ترانزیستور  $Q_2$  قطع بود. به نظر می‌رسد به ازای  $V_I = 7V$ ، ترانزیستور  $Q_1$  به ناحیه اشباع برود و ترانزیستور  $Q_2$  نیز در حالت قطع باقی بماند.

$$\text{KVL } CE_1: 5 = V_{CE}(\text{sat}) + 1 \times I_{E_1} \Rightarrow I_{E_1} = 4.8 \text{ mA}$$

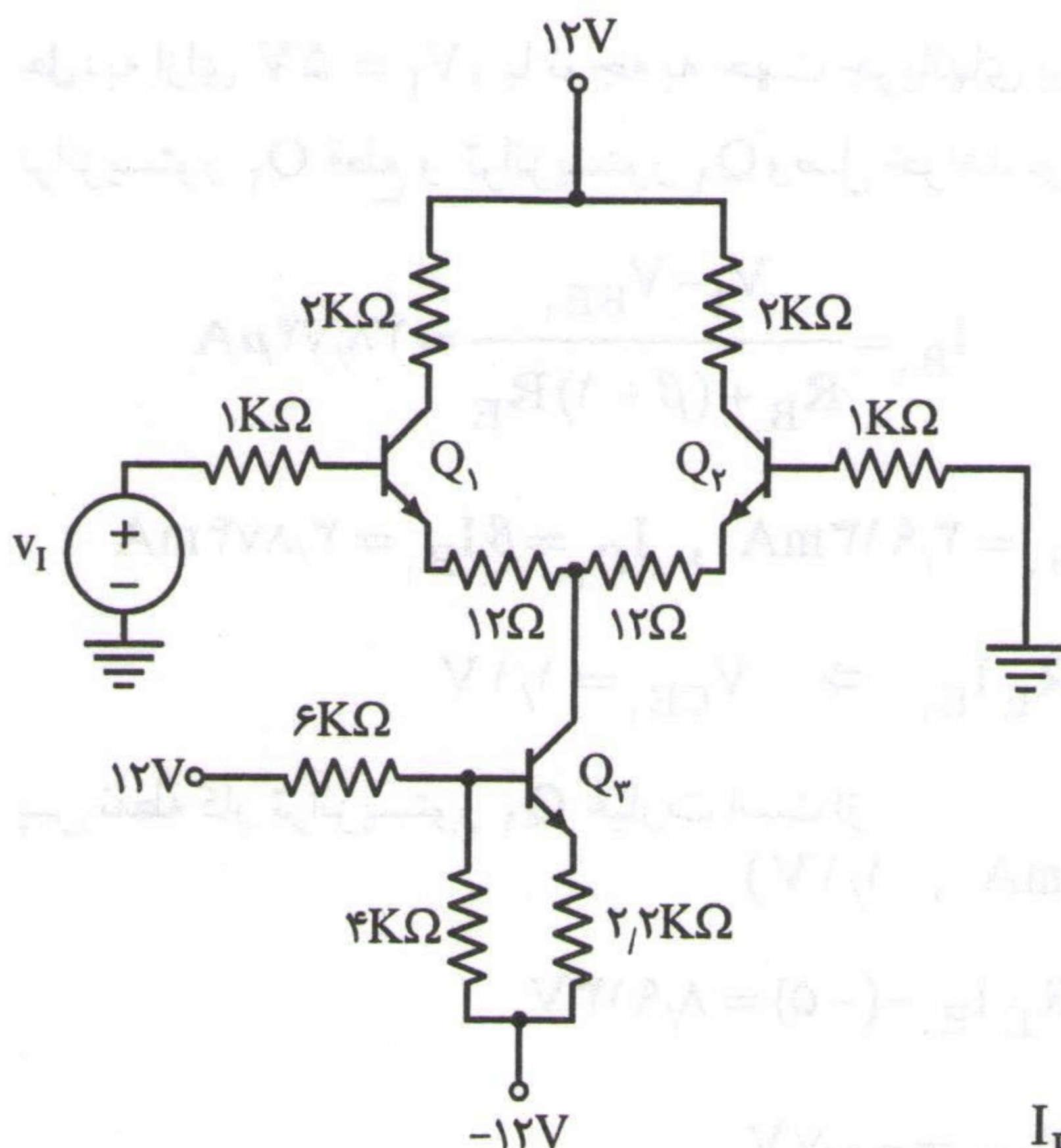
$$\text{KVL } BE_1: V_I = 10 I_{B_1} + V_{BE_1} + 1 \times I_{E_1} \Rightarrow I_{B_1} = 0.15 \text{ mA}$$

$$I_{C_1} = I_{E_1} - I_{B_1} = 4.65 \text{ mA}$$

ملاحظه می‌شود که شرط اشباع  $Q_1$  یعنی  $\beta I_{B_1} \geq I_{C_1}(\text{sat})$  برقرار است. پس نقطه کار ترانزیستور  $Q_1$  برابر است با

$$Q_1(4.65 \text{ mA}, 0.2V)$$

به ازای  $V_I = -7V$  به علت تقارن مدار، برعکس حالت قبل ترانزیستور  $Q_1$  قطع و ترانزیستور  $Q_2$  اشباع خواهد بود و مقادیر تغییری نخواهد داشت.



شکل ۳-۵۳

۴۹. در تقویت کننده تفاضلی شکل ۳-۵۳،

ترانزیستورها از جنس سیلیکن با  $\beta = 50$

و  $V_{BE} = 0.7V$  می‌باشند.

الف) نقطه کار ترانزیستورها را بیابید.

ب) نقش ترانزیستور  $Q_3$  چیست؟

حل: الف) برای ترانزیستور  $Q_3$  مدار معادل تونن از دید بیس را به دست می‌آوریم.

$$R_{Th} = 6 \parallel 4 = 2.4 \text{ k}\Omega$$

$$V_{Th} = \frac{12 - (-12)}{6 + 4} \times 4 - 12 = -2.4 \text{ V}$$

$$I_{B_3} = \frac{V_{Th} - V_{BE}(\text{on}) - (-12)}{R_{Th} + (\beta + 1)R_{E_3}} = 0.077 \text{ mA}$$

$$\Rightarrow I_{C_3} = 3.9 \text{ mA} = I_{E_1} + I_{E_2}$$



از آنجا که مدار بایاس ترانزیستورهای  $Q_1$  و  $Q_2$  متقارن است؛ جریان نقطه کار آنها برابر خواهد بود. بنابراین

$$I_{E_1} = I_{E_2} = I_E = 1.95 \text{ mA} , \quad I_{B_1} = I_{B_2} = I_B = \frac{I_E}{\beta + 1} = 0.382 \text{ mA}$$

$$\Rightarrow I_{C_1} = I_{C_2} = I_C = \beta I_B = 1.9 \text{ mA}$$

$$\text{KVL } BE_2, CE_3: 1 \times I_B + V_{BE} + 0.12 I_E + V_{CE_3} + 2.2 I_{C_3} - 12 = 0$$

$$\Rightarrow V_{CE_3} = 2.66 \text{ V} > 0.2 \text{ V}$$

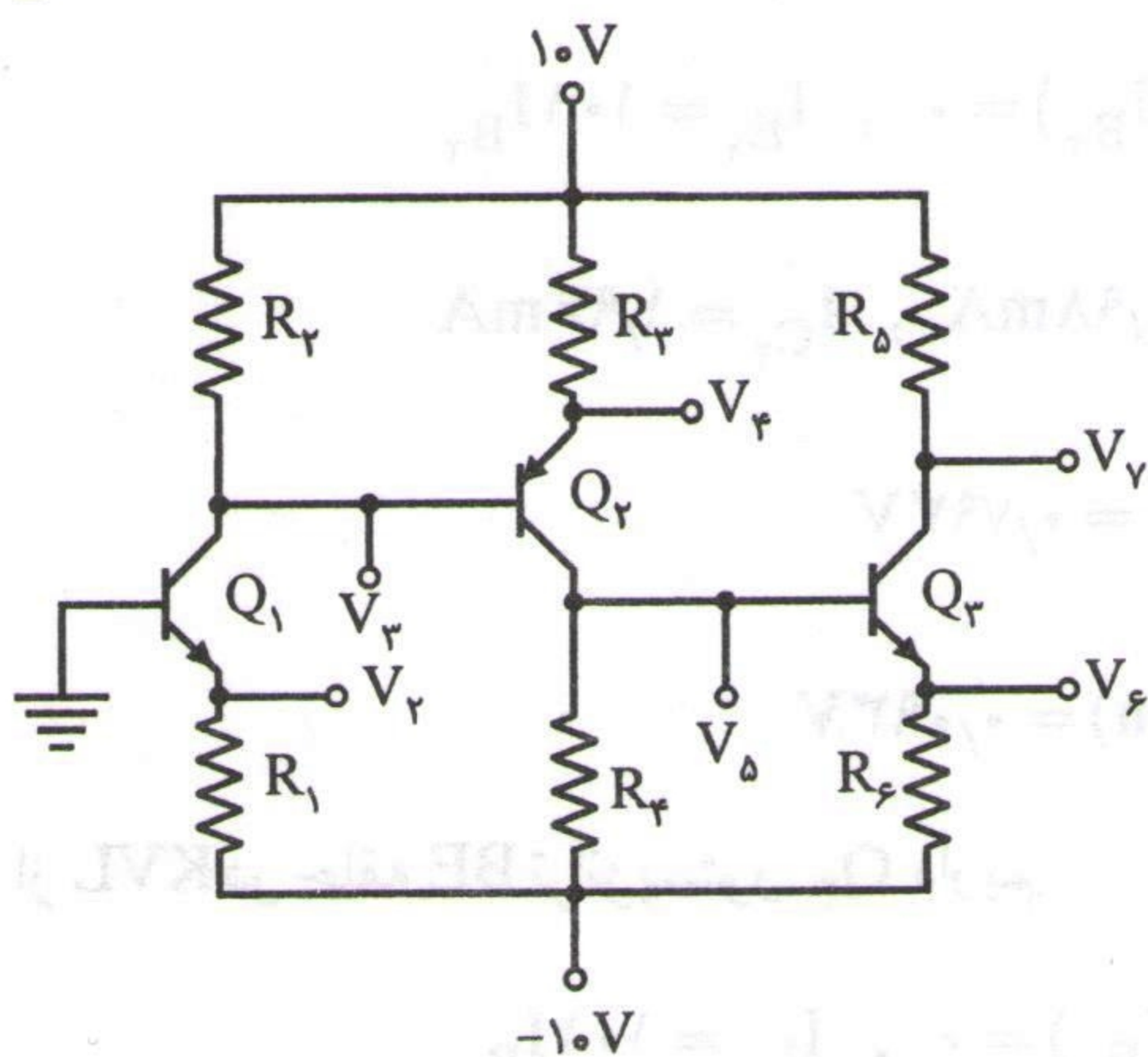
$$\text{KVL } CE_2, CE_3: 12 = 2 I_C + V_{CE_2} + 0.12 I_E + V_{CE_3} + 2.2 I_{C_3} - 12$$

$$\Rightarrow V_{CE_2} = V_{CE_1} = 8.94 \text{ V} > 0.2 \text{ V}$$

بنابراین هر سه ترانزیستور در ناحیه فعال بوده و نقاط کار آنها عبارت است از

$$Q_1, Q_2 (1.9 \text{ mA} , 8.94 \text{ V}) , \quad Q_3 (3.9 \text{ mA} , 2.66 \text{ V})$$

ب) همان طور که در بند (الف) مشاهده شد، ترانزیستور  $Q_3$  همانند یک منبع جریان عمل نموده و نقطه کار ترانزیستورهای  $Q_1$  و  $Q_2$  را تعیین می کند.



شکل ۳-۵۴

۵۰. در مدار شکل ۳-۵۴، با فرض  $\beta = \infty$ ، مقادیر

مقاومتها را طوری تعیین کنید که جریان

کلکتورهای  $Q_1, Q_2, Q_3$  به ترتیب ۲، ۲ و ۴

میلی آمپر؛  $V_3 = 0$ ،  $V_5 = -4$  و  $V_7 = 2$  ولت

باشد. با مقادیر به دست آمده فوق به ازای

$\beta = 100$  مقادیر  $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6$  و  $V_7$

را به دست آورید.

حل: با فرض  $\beta = \infty$ ، جریانهای بیس برابر صفر بوده

و جریانهای امیتر و کلکتور هر ترانزیستور با یکدیگر

برابر خواهند بود.

$$V_2 = V_{B_1} - V_{BE_1}(\text{on}) = -0.7 \text{ V}$$

$$R_1 = \frac{V_2 - (-10)}{I_{E_1}} = 4.65 \text{ K}\Omega$$

$$V_3 = 0 \text{ V} , \quad R_2 = \frac{10 - V_3}{I_{C_1}} = 5 \text{ K}\Omega$$



$$R_3 = \frac{10 - V_F}{I_{C_2}} = \frac{10 - [V_3 + V_{EB_2}(\text{on})]}{I_{C_2}} = 4,65 \text{ K}\Omega$$

$$V_\Delta = -4 \text{ V}, \quad R_F = \frac{V_\Delta - (-10)}{I_{C_2}} = 3 \text{ K}\Omega$$

$$V_V = 2 \text{ V}, \quad R_\Delta = \frac{10 - V_V}{I_{C_2}} = 2 \text{ K}\Omega$$

$$R_6 = \frac{V_6 - (-10)}{I_{C_3}} = \frac{[V_\Delta - V_{BE_3}(\text{on})] + 10}{I_{C_3}} = 1,325 \text{ K}\Omega$$

به ازای  $\beta = 100$  و با مقادیر به دست آمده قبلی داریم

$$V_2 = V_{B_1} - V_{BE_1}(\text{on}) = -0,7 \text{ V}$$

$$I_{E_1} = \frac{V_2 - (-10)}{R_1} = 2 \text{ mA} \Rightarrow I_{C_1} = \left( \frac{\beta}{1 + \beta} \right) I_{E_1} = 1,98 \text{ mA}$$

از KVL در حلقه EB ترانزیستور  $Q_2$  داریم

$$R_3 I_{E_2} + V_{EB_2}(\text{on}) - R_2 (I_{C_1} - I_{B_2}) = 0, \quad I_{E_2} = 10,1 I_{B_2}$$

$$\Rightarrow I_{B_2} = 0,196 \text{ mA}, \quad I_{E_2} = 1,98 \text{ mA}, \quad I_{C_2} = 1,96 \text{ mA}$$

$$V_F = 10 - R_3 I_{E_2} = 0,793 \text{ V}$$

$$V_3 = V_F - V_{EB_2}(\text{on}) = 0,093 \text{ V}$$

از KVL در حلقه BE ترانزیستور  $Q_3$  داریم

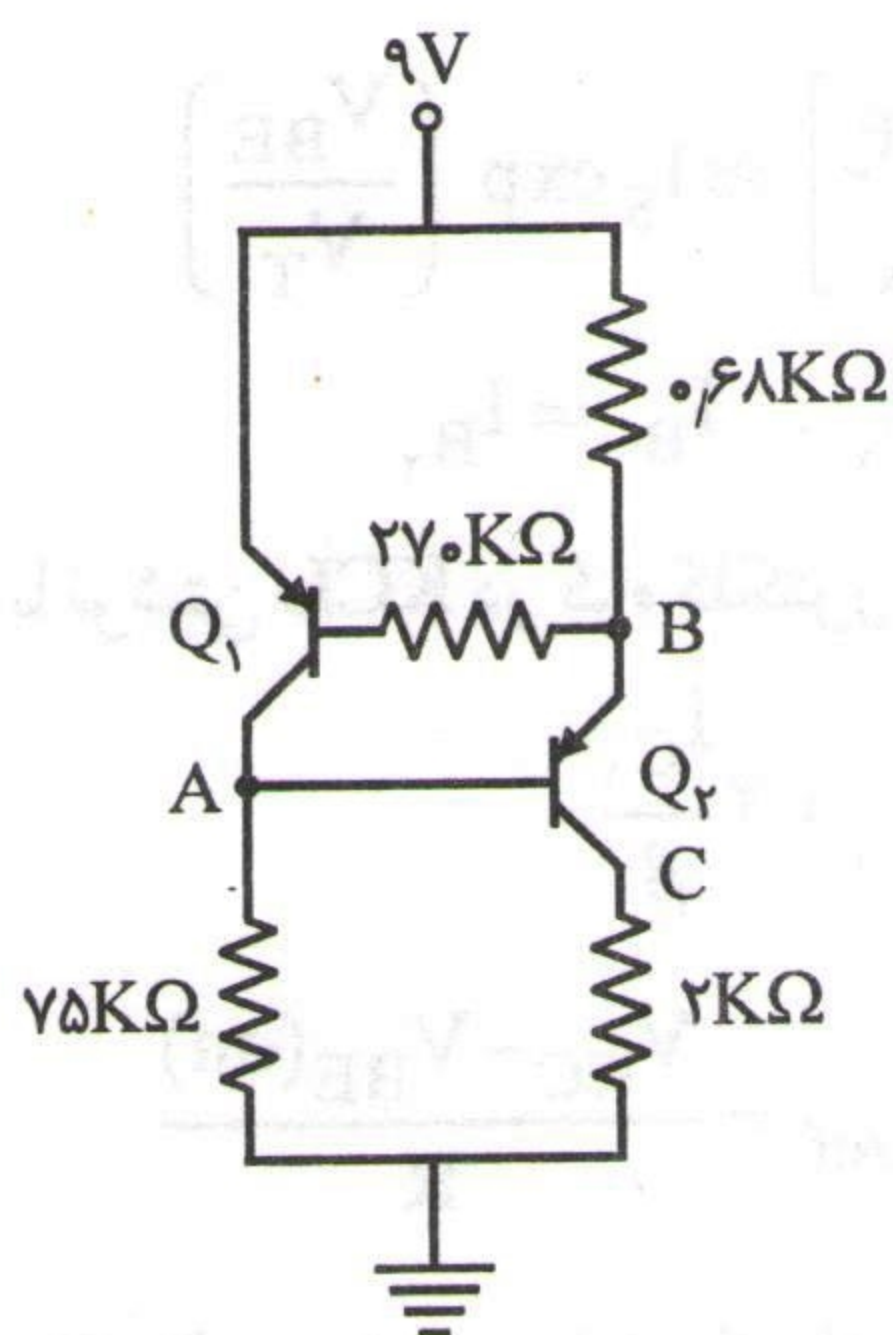
$$V_{BE_3}(\text{on}) + R_6 I_{E_3} - R_4 (I_{C_2} - I_{B_3}) = 0, \quad I_{E_3} = 10,1 I_{B_3}$$

$$\Rightarrow I_{B_3} = 0,379 \text{ mA}, \quad I_{E_3} = 3,83 \text{ mA}, \quad I_{C_3} = 3,79 \text{ mA}$$

$$V_6 = R_6 I_{E_3} - 10 = -4,93 \text{ V}, \quad V_\Delta = V_6 + V_{BE_3}(\text{on}) = -4,23 \text{ V}$$

$$V_V = 10 - R_\Delta I_{C_3} = 2,42 \text{ V}$$





شکل ۵۵-۳

۵۱. در مدار شکل ۳-۵۵، ولتاژ گره‌های A، B و C را به دست آورید.  
( $V_{EB}(on) = 0.7V$  و  $V_{EC}(sat) = 0.2V$ )

الف)  $\beta = \infty$  ب)  $\beta = 100$

حل: الف) به ازای  $\beta = \infty$ ، جریان بیس ترانزیستورها را صفر در نظر می‌گیریم. بنابراین

$$V_B = 9 - V_{EB1}(on) = 8.3V, \quad V_A = V_B - V_{EB2}(on) = 7.6V$$

$$I_{C1} = I_{E1} = \frac{9 - V_B}{0.68} = 1.3mA, \quad I_{E1} = I_{C1} = \frac{V_A}{75} = 0.1mA$$

$$V_C = 2I_{C1} = 2.6V$$

$$V_{EC1} = 9 - V_A = 1.4V > V_{EC}(sat)$$

$$V_{EC2} = V_B - V_C = 6.24V > V_{EC}(sat)$$

ب) با نوشتن دو معادله KVL به صورت زیر داریم

$$9 = V_{EB1}(on) + 27 \cdot I_{B1} + V_{EB2}(on) + 75(I_{C1} + I_{B1})$$

$$9 = 0.68(I_{E1} - I_{B1}) + V_{EB2}(on) + 75(I_{C1} + I_{B1})$$

$$I_{C1} = \beta I_{B1}, \quad I_{E1} = (1 + \beta)I_{B1}$$

از حل این دو معادله داریم

$$I_{B1} = 84.75nA \Rightarrow I_{C1} = 8.475\mu A, \quad I_{E1} = 8.56\mu A$$

$$I_{B2} = 13.53\mu A \Rightarrow I_{C2} = 1.53mA, \quad I_{E2} = 1.37mA$$

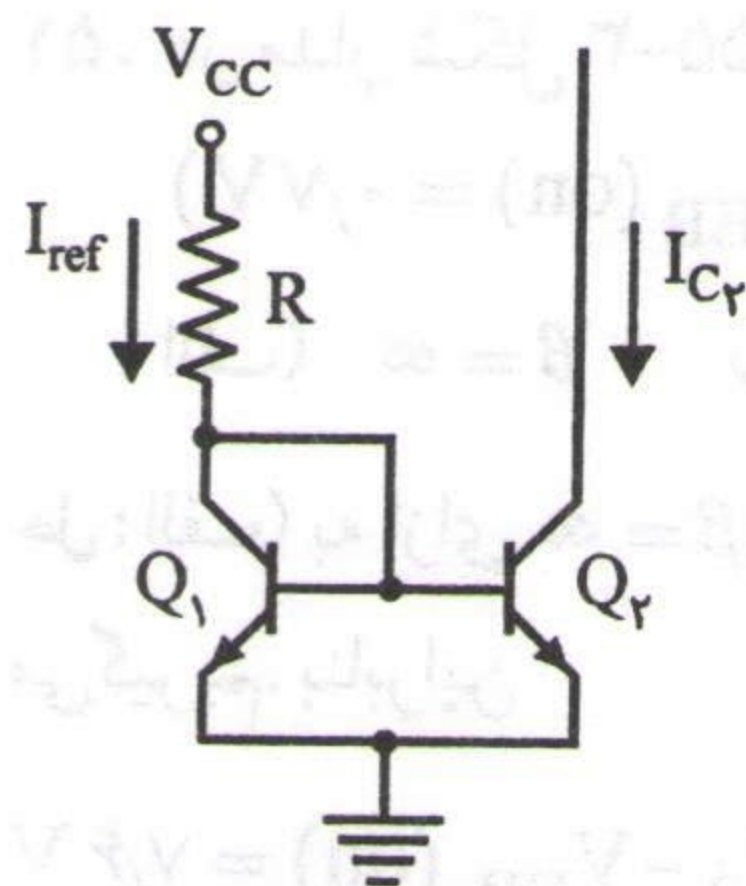
$$V_A = 75(I_{C1} + I_{B2}) = 7.371V, \quad V_B = V_A + V_{EB}(on) = 8.071V$$

$$V_C = 2I_{C2} = 2.7V$$

۵۲. در مدار شکل ۳-۵۶، با فرض اینکه ترانزیستورها مشابه باشند، جریان  $I_{C1}$  را بر حسب جریان  $I_{ref}$  محاسبه کنید. این مدار به منبع جریان آینه‌ای معروف است.

حل:  $V_{BE1} = V_{BE2}$  است. بنابراین با فرض اینکه  $V_A$  (ولتاژ ارلی) نسبت به  $V_{CE}$  خیلی بزرگ‌تر باشد، با توجه به رابطه زیر برای جریان  $I_C$ ، جریانهای  $I_{C1}$  و  $I_{C2}$  برابر خواهند بود.





شکل ۳-۵۶

$$I_C = I_S \left[ \exp \left( \frac{V_{BE}}{V_T} \right) \right] \left[ 1 + \frac{V_{CE}}{V_A} \right] \approx I_S \exp \left( \frac{V_{BE}}{V_T} \right)$$

$$V_{BE1} = V_{BE2} \Rightarrow I_{C1} = I_{C2}, \quad I_{B1} = I_{B2}$$

با نوشتن KCL در گره کلکتور ترانزیستور  $Q_1$  داریم

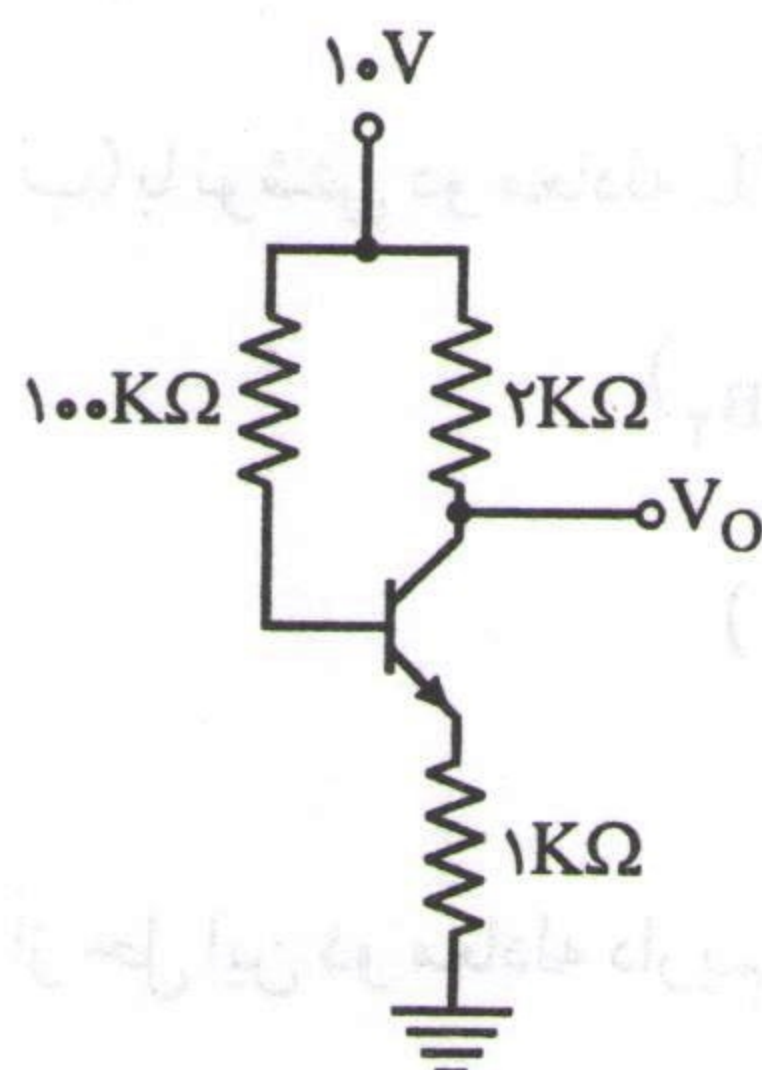
$$I_{ref} = I_{C1} + 2I_{B1} = I_{C1} + 2 \frac{I_{C1}}{\beta}$$

$$\Rightarrow I_{C1} = I_{C2} = \frac{I_{ref}}{1 + 2/\beta}, \quad I_{ref} = \frac{V_{CC} - V_{BE(on)}}{R}$$

ملاحظه می شود به ازای  $\beta$  های بزرگ، برای ترانزیستورها داریم

$$I_{C2} = I_{C1} = I_{ref} = \frac{V_{CC} - V_{BE(on)}}{R}$$

### ۳-۳ تمرین



شکل ۳-۵۷

۱. در مدار شکل ۳-۵۷، ترانزیستور از جنس سیلیکن با  $\beta = 100$  و

$$V_{CE(sat)} = 0.2V \text{ می باشد.}$$

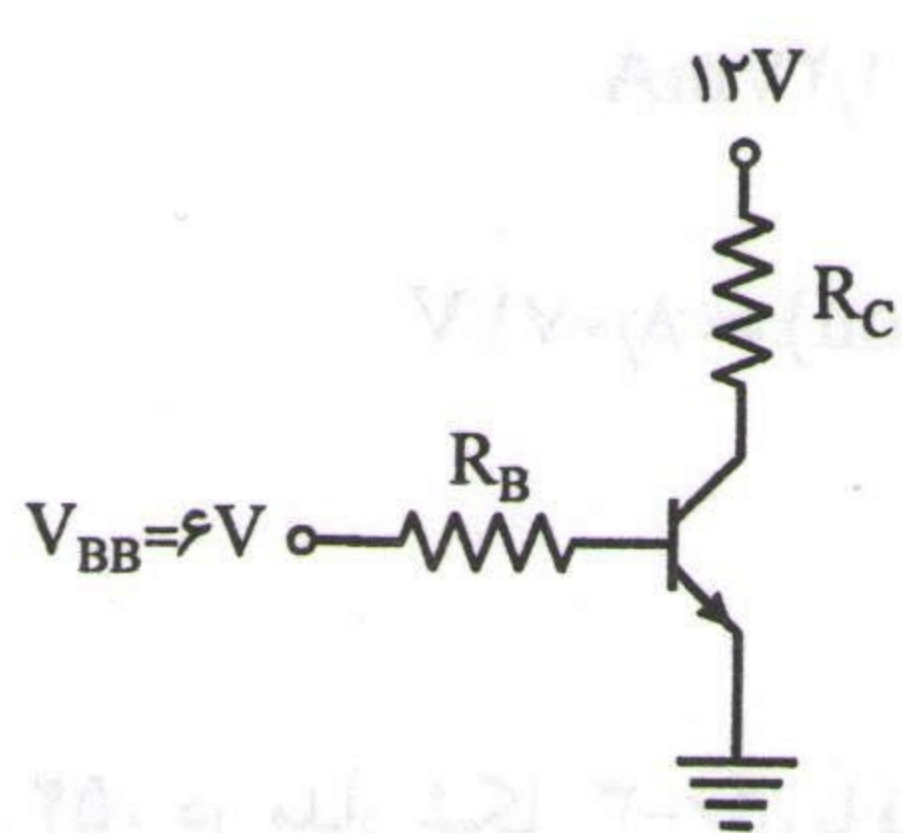
الف) ناحیه کار و نقطه کار ترانزیستور را تعیین کنید و  $V_O$  را به دست آورید.

ب) حداقل  $\beta$  که به ازای آن ترانزیستور در ناحیه اشباع قرار می گیرد را بیابید.

پاسخ:

$$V_O = 3.5V, \quad V_{CE} = 0.2V, \quad I_C = 3.25mA \text{ (الف)}$$

$$\beta_{min} = 55.2 \text{ (ب)}$$



شکل ۳-۵۸

۲. در مدار شکل ۳-۵۸، ترانزیستور دارای  $V_{CE(sat)} = 0.2V$  و

$$\beta = 100 \text{ و } V_{BE(on)} = 0.7V \text{ می باشد.}$$

الف)  $R_B$  و  $R_C$  را به گونه ای تعیین کنید که نقطه کار ترانزیستور

$$I_C = 12mA \text{ و } V_{CE} = 6V \text{ گردد.}$$

ب) مقاومت  $R_E = 200\Omega$  را به مدار افزوده و بند (الف) را تکرار نمایید.

ج) در بند (ب) مقدار  $R_B$  را به گونه ای تعیین کنید که ترانزیستور

اشباع گردد.  $R_C$  را همان مقدار قبلی در نظر بگیرید.

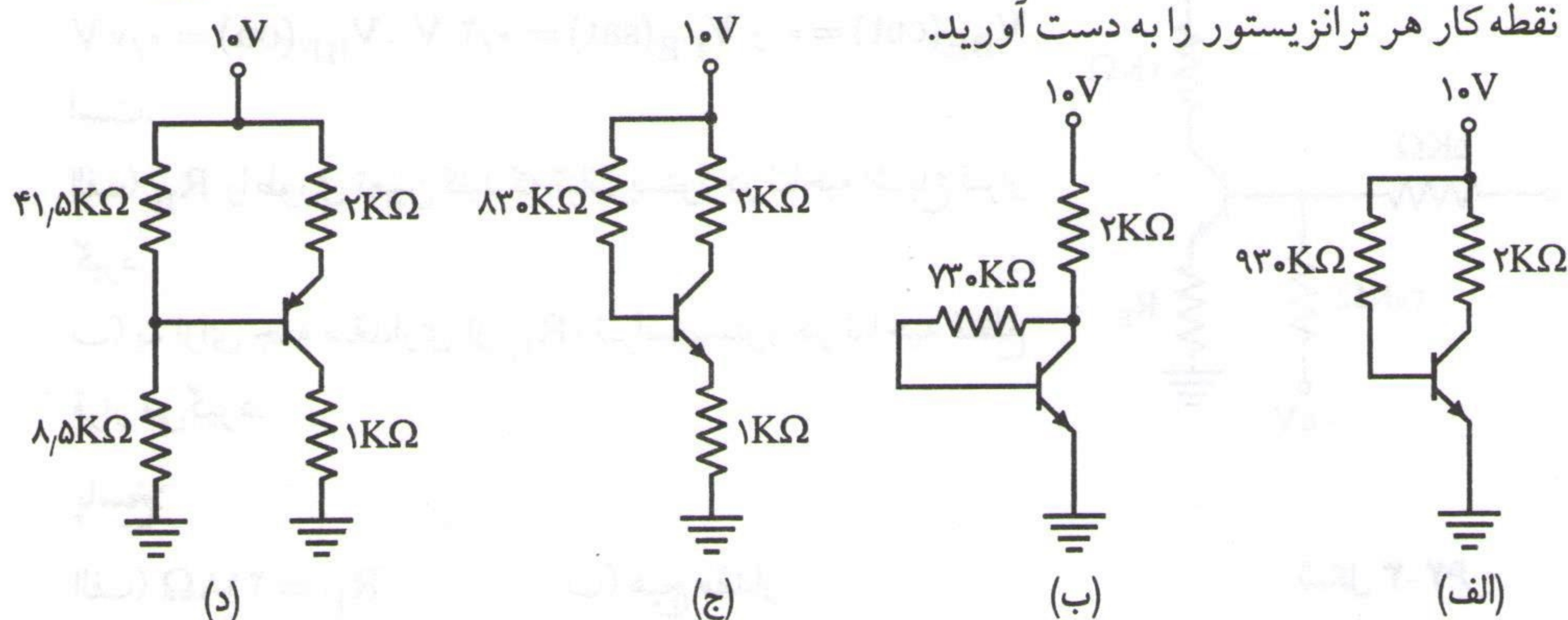
پاسخ:

$$R_B = 23.8K\Omega, \quad R_C = 0.3K\Omega \text{ (ب)} \quad R_B = 44.2K\Omega, \quad R_C = 0.5K\Omega \text{ (الف)}$$

$$R_B \leq 2.25K\Omega \text{ (ج)}$$



۳. با فرض اینکه برای ترانزیستورهای مدارهای شکل ۳-۵۹،  $\beta = 100$  و  $V_{BE(on)} = 0.7V$  باشد، نقطه کار هر ترانزیستور را به دست آورید.



شکل ۳-۵۹

پاسخ:

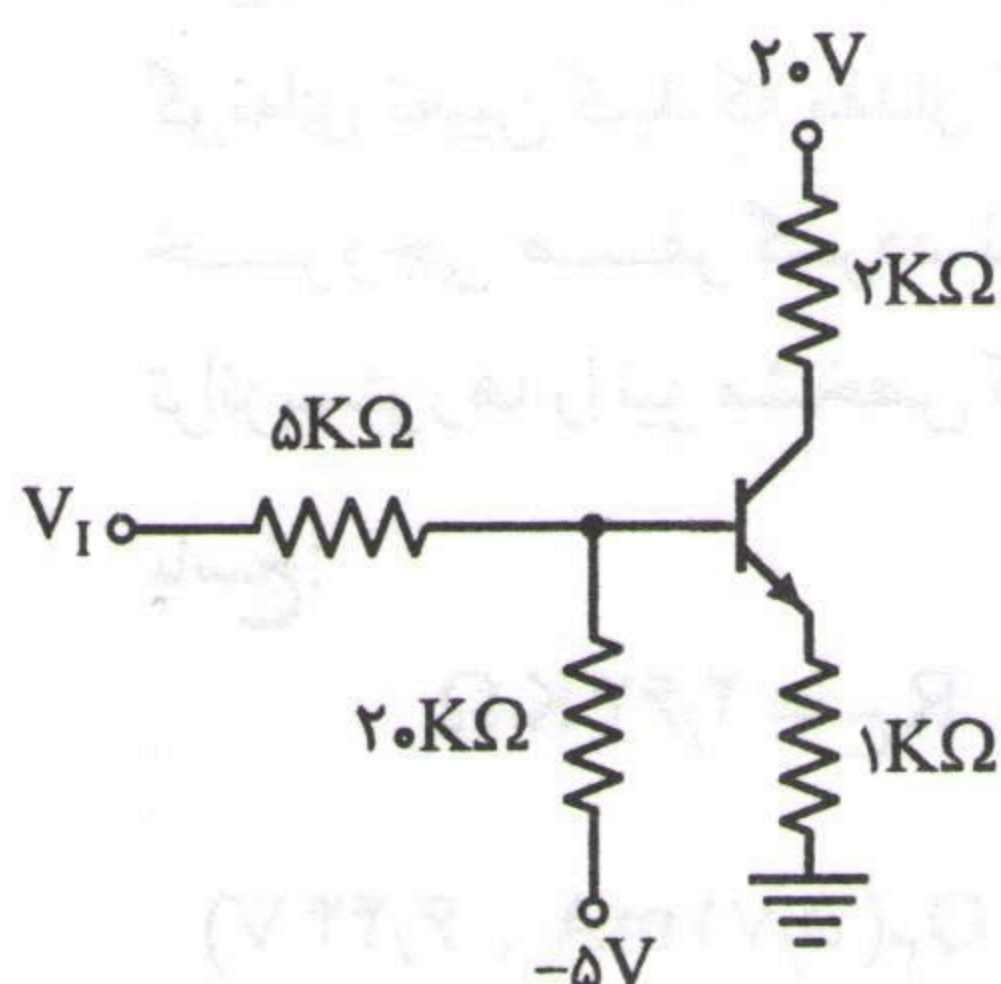
(ب)  $Q(1mA, 8V)$

(الف)  $Q(1mA, 8V)$

(د)  $Q(0.93mA, 7.2V)$

(ج)  $Q(1mA, 7V)$

۴. در مدار شکل ۳-۶۰، ترانزیستور دارای مشخصات  $\beta = 100$ ،  $V_{BE(cut)} = 0$  و  $V_{CE(sat)} = 0.2V$ ،  $V_{BE(on)} = 0.7V$  می باشد.



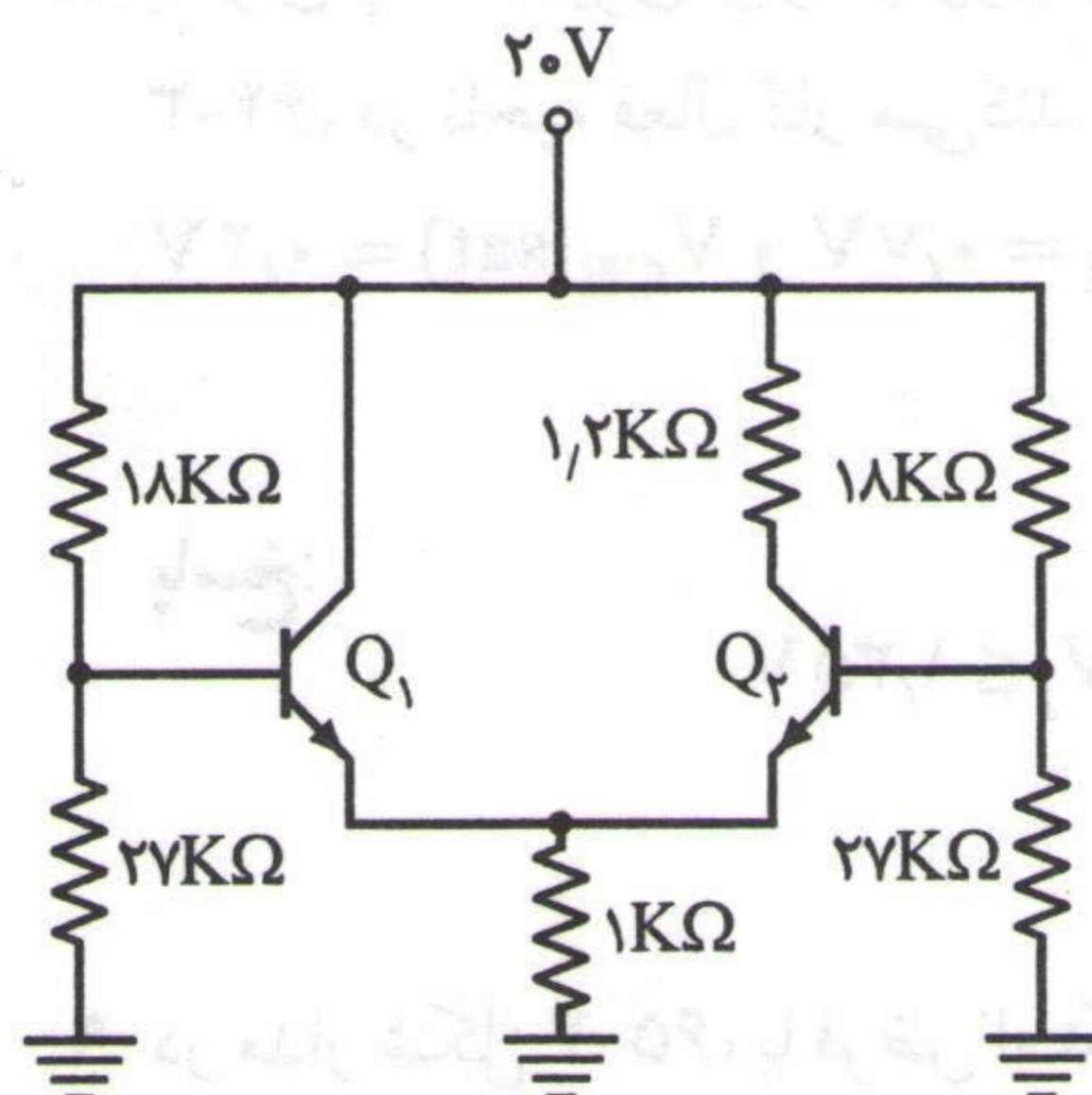
شکل ۳-۶۰

(الف)  $V_I$  را به گونه ای تعیین کنید که ترانزیستور در مرز اشباع قرار گیرد.  
(ب)  $V_I$  را به گونه ای تعیین کنید که ترانزیستور در ناحیه قطع گیرد.

پاسخ:

(الف)  $V_I = 10.71V$  (ب)  $V_I \leq 1.25V$

۵. در مدار شکل ۳-۶۱، ترانزیستورها مشابه و دارای  $\beta = 50$  می باشند. نقطه کار ترانزیستورها را به دست آورید.

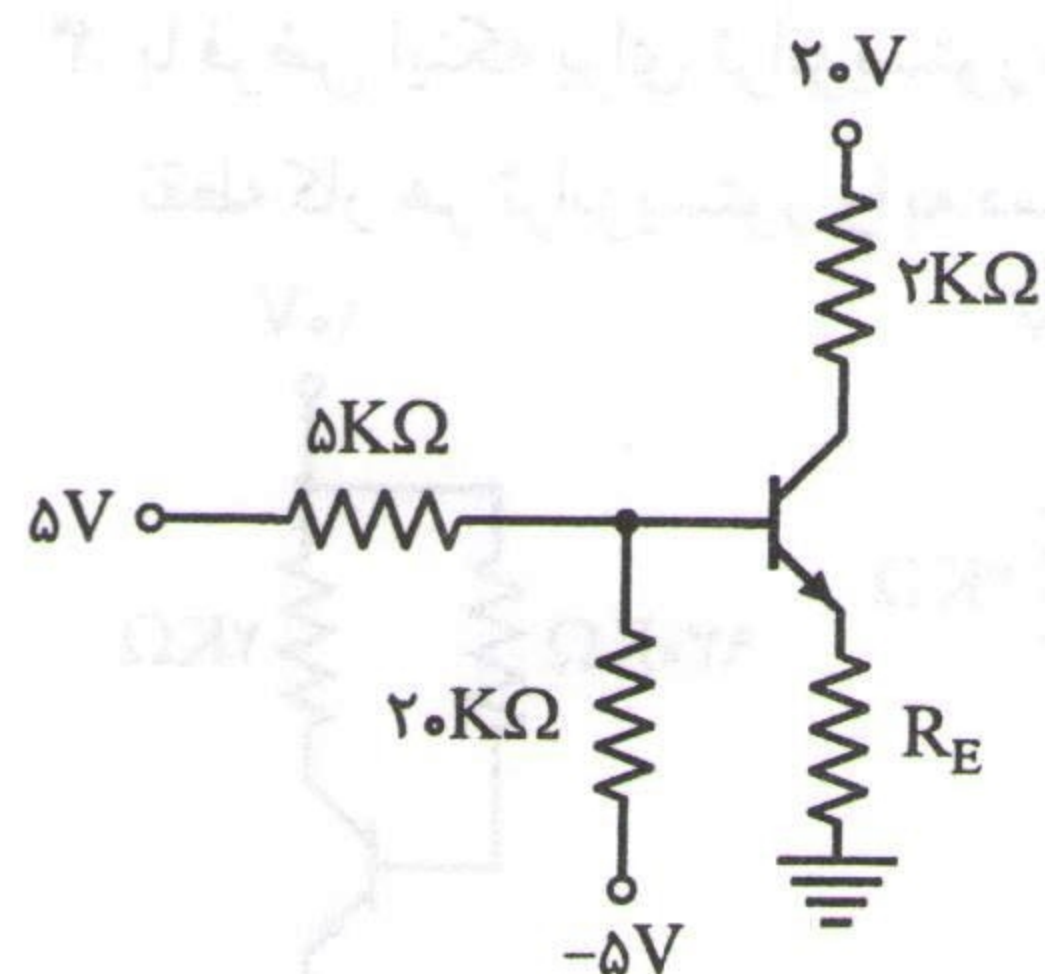


شکل ۳-۶۱

پاسخ:

$Q_1(5mA, 9.8V)$  ،  $Q_2(5mA, 3.8V)$





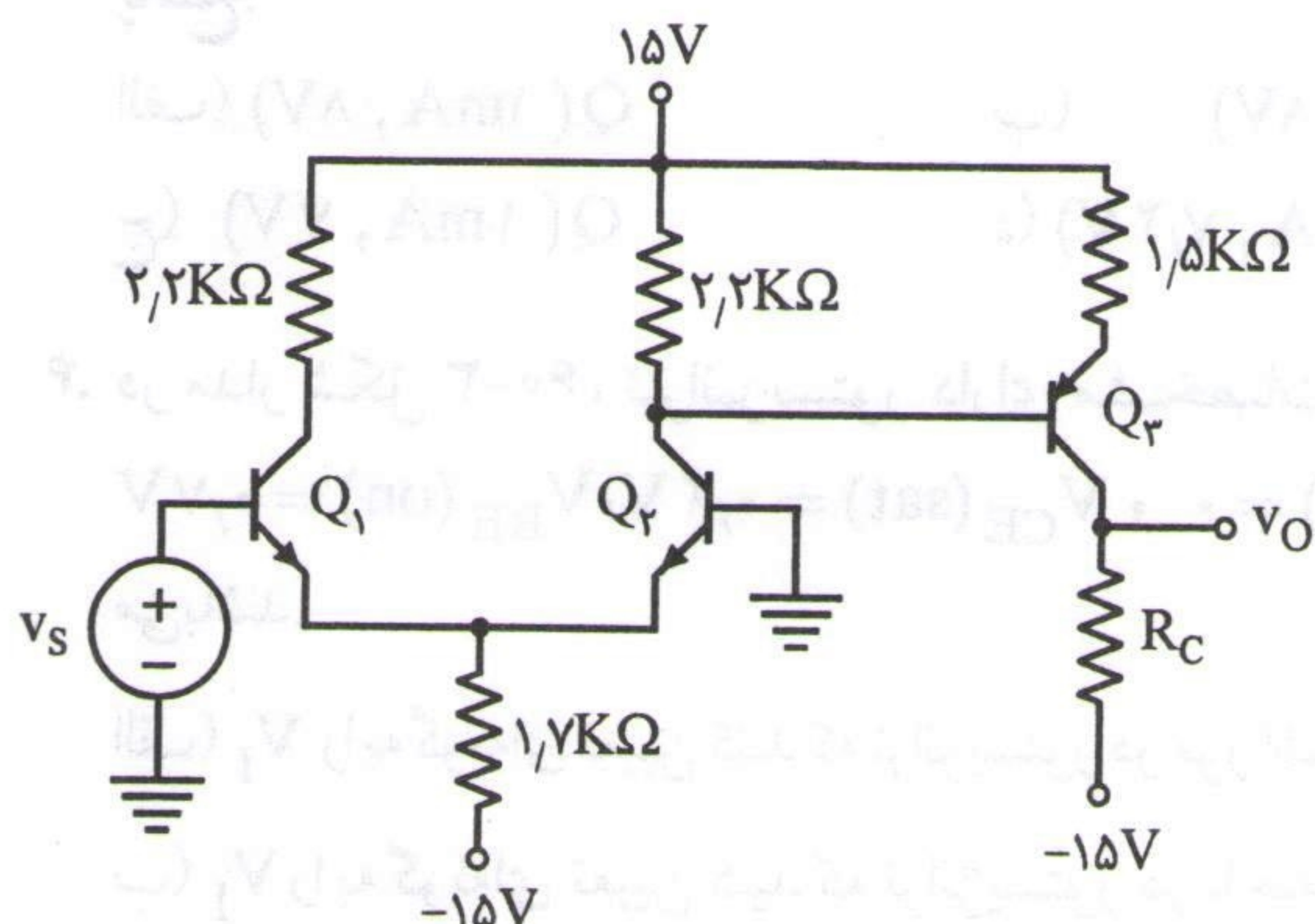
شکل ۳-۶۲

۶. در مدار شکل ۳-۶۲، ترانزیستور دارای مشخصات  $\beta = 100$ ،  $V_{BE}(on) = 0.7V$ ،  $V_{BE}(cut) = 0$  و  $V_{CE}(sat) = 0.2V$  است.

الف)  $R_E$  را طوری تعیین کنید که ترانزیستور در ناحیه اشباع قرار گیرد.  
ب) به ازای چه مقداری از  $R_E$ ، ترانزیستور در ناحیه قطع قرار می‌گیرد.

پاسخ:

الف)  $R_E = 218\Omega$  (ب) هیچ مقدار



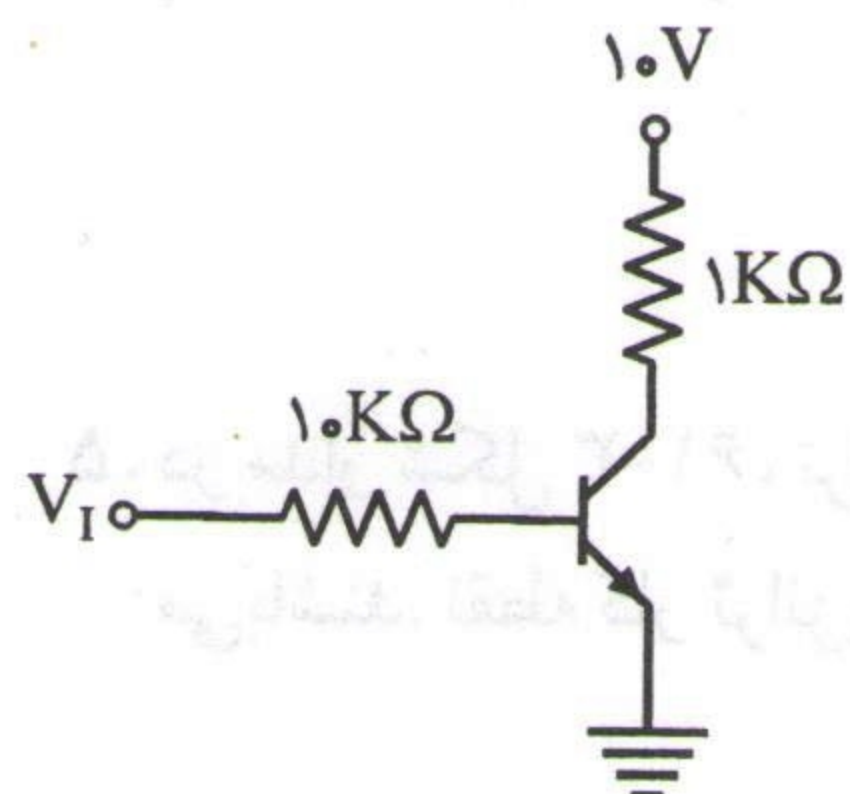
شکل ۳-۶۳

$Q_1, Q_2 (4.21mA, 6.43V)$ ،  $Q_3 (5.71mA, 6.44V)$

۷. در مدار شکل ۳-۶۳، ترانزیستورها دارای  $|V_{BE}(on)| = 0.7V$  و  $\beta = 150$  می‌باشند. مقدار مقاومت  $R_C$  را به گونه‌ای تعیین کنید که مقدار DC ولتاژ خروجی صفر گردد. نقطه کار ترانزیستورها را نیز مشخص کنید.

پاسخ:

$R_C = 2.63K\Omega$



شکل ۳-۶۴

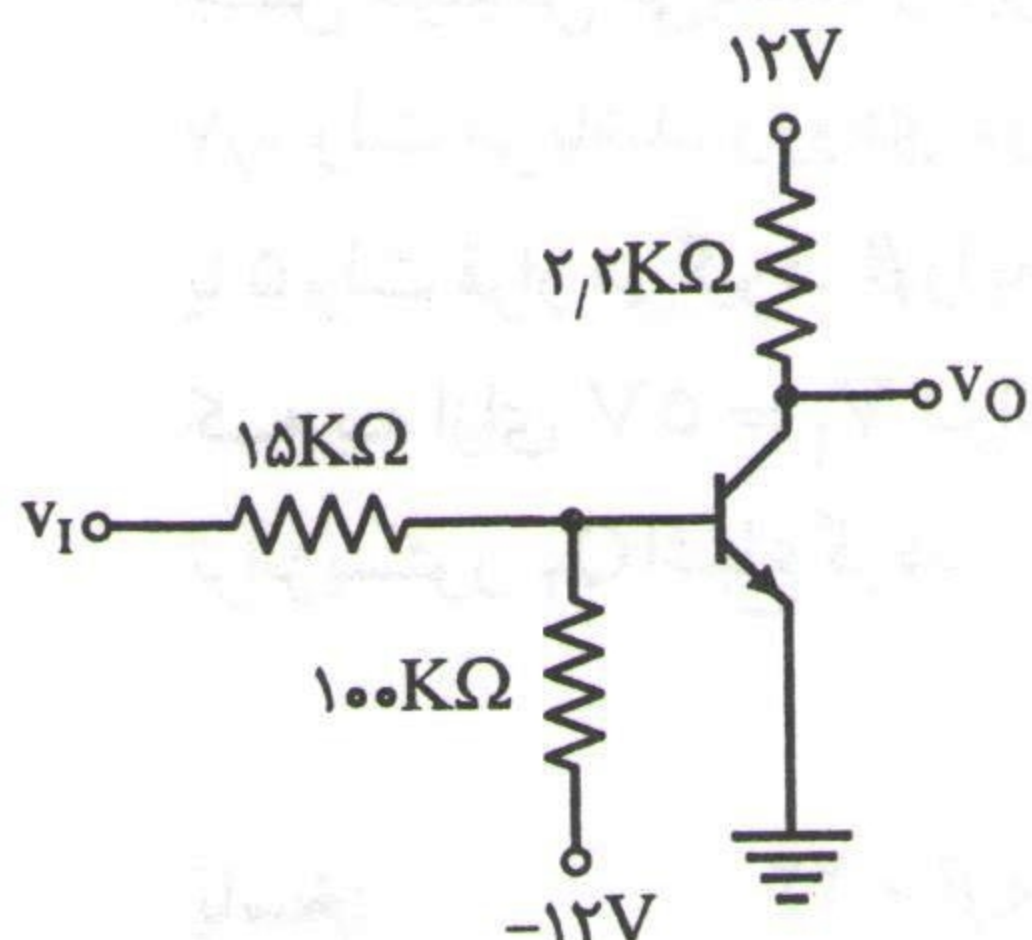
۸. به ازای چه مقادیری از ولتاژ ورودی  $V_I$  ترانزیستور مدار شکل ۳-۶۴، در ناحیه فعال کار می‌کند. ترانزیستور دارای  $\beta = 150$ ،  $V_{BE}(on) = 0.7V$  و  $V_{CE}(sat) = 0.2V$  می‌باشد.

پاسخ:

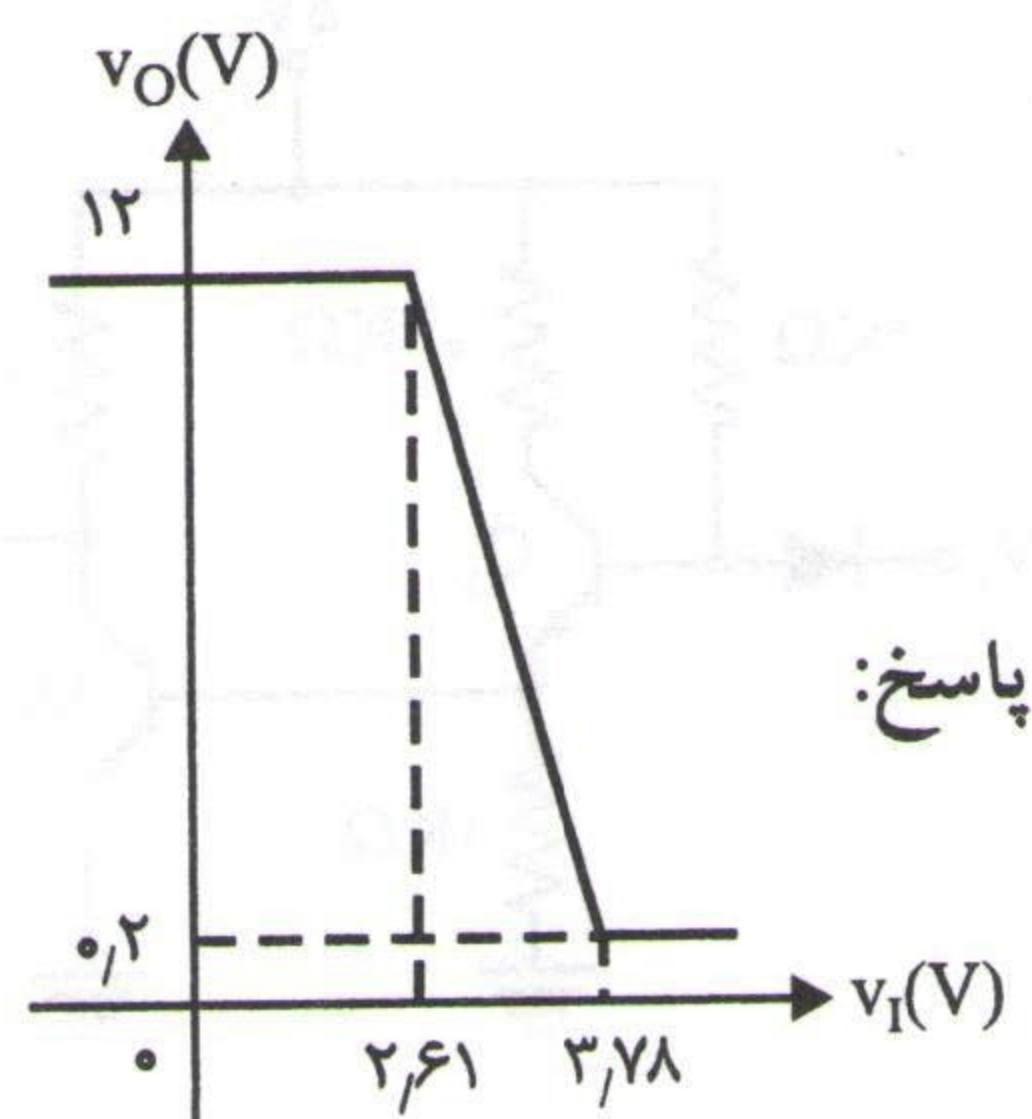
$0.7V \leq V_I \leq 1.35V$

۹. در مدار شکل ۳-۶۵، با فرض اینکه ترانزیستور دارای مشخصات  $\beta = 75$ ،  $V_{BE}(on) = 0.7V$  و  $V_{CE}(sat) = 0.2V$  می‌باشد، مشخصه انتقالی را رسم نمایید.



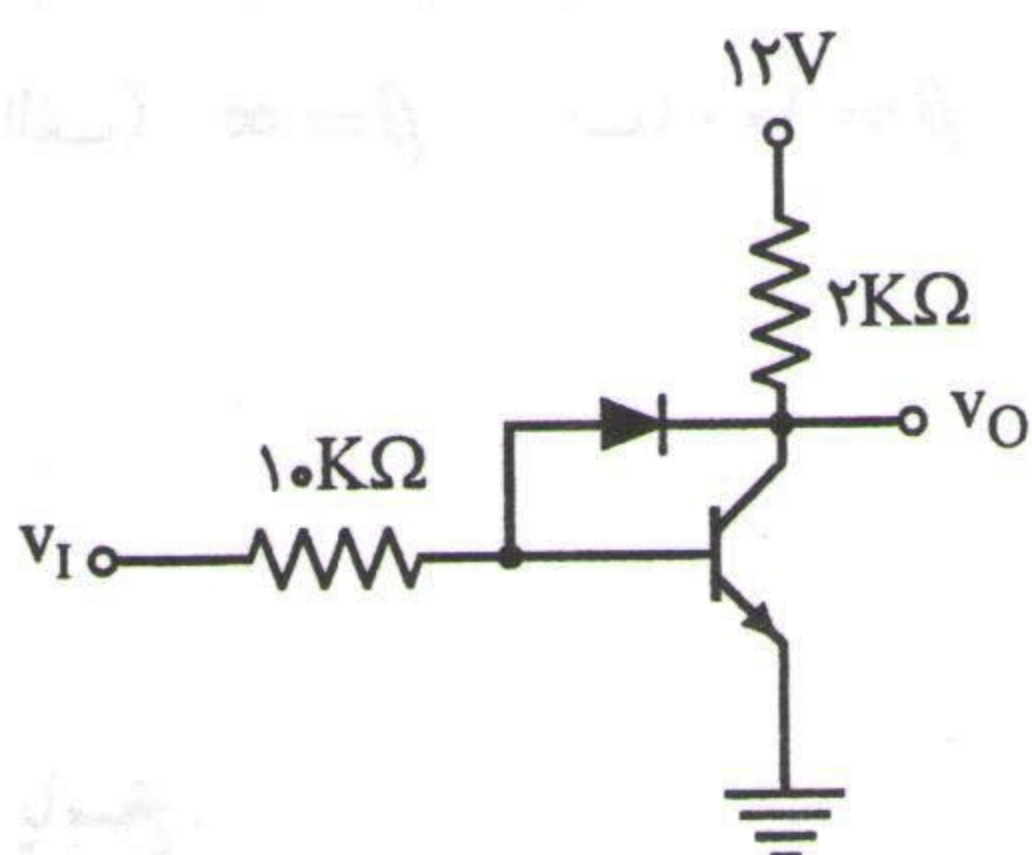


شکل ۳-۶۵

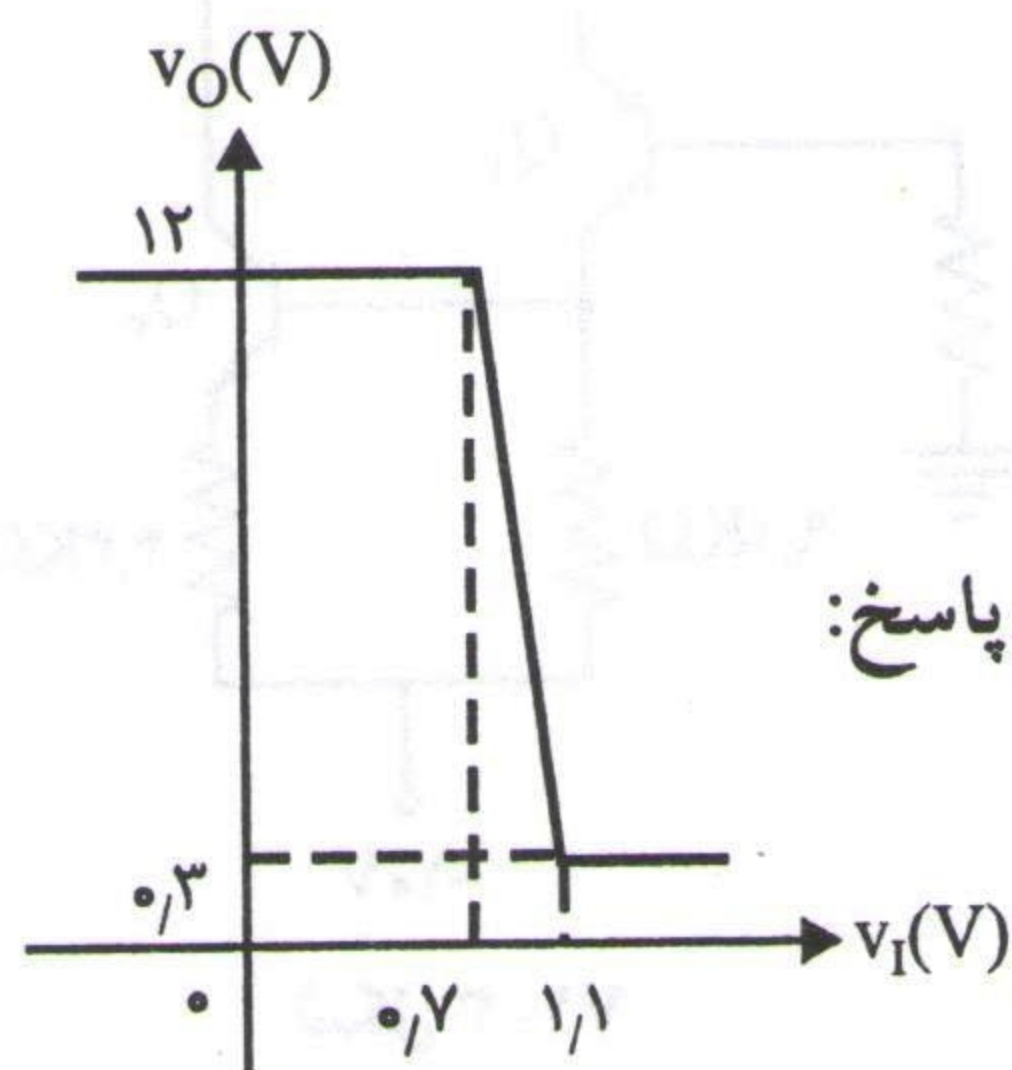


شکل ۳-۶۶

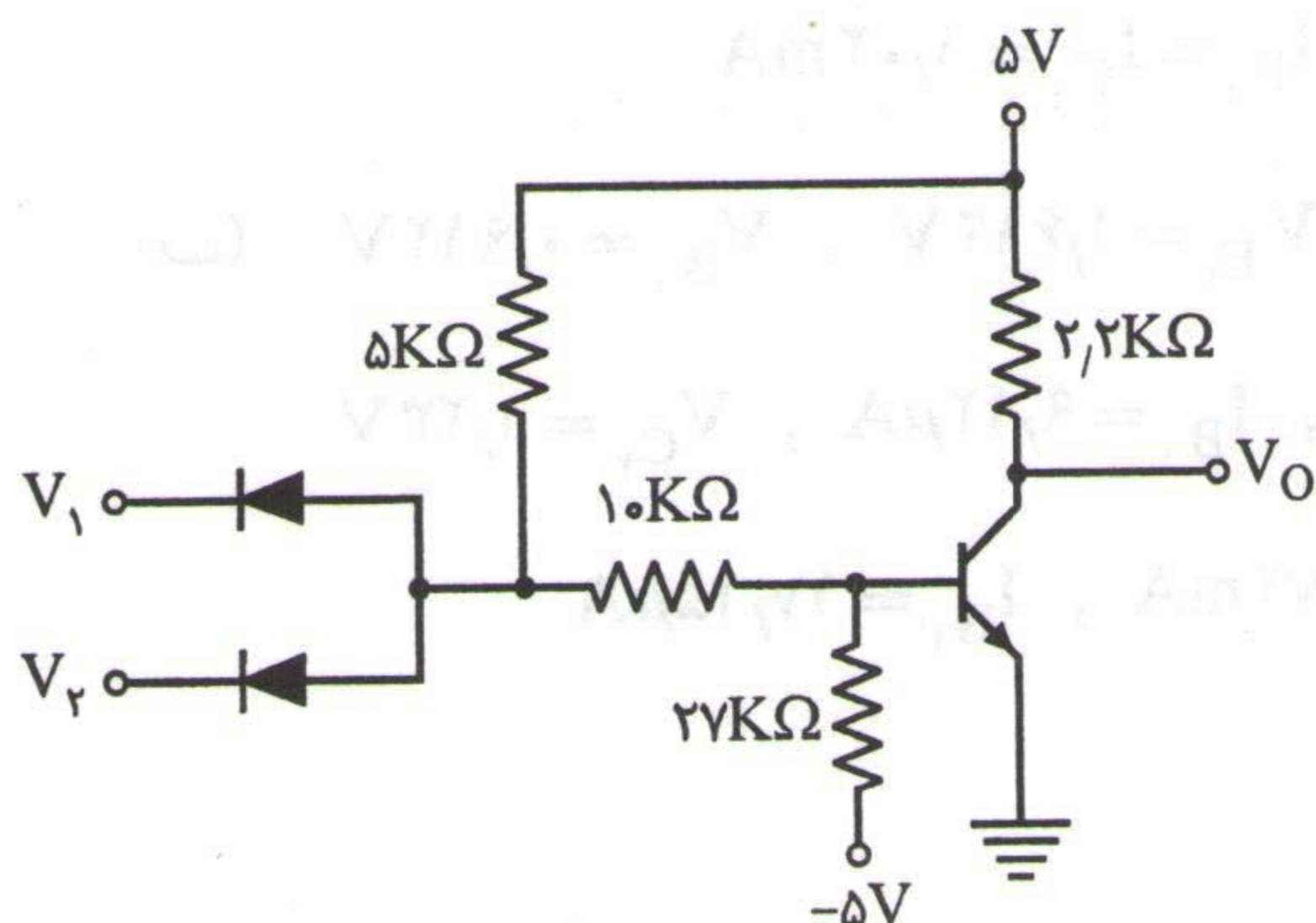
۱۰. در مدار شکل ۳-۶۷، ترانزیستور دارای  $\beta = 150$  است. با فرض اینکه ولتاژ هدایت دیود برابر  $0.4V$  ولت باشد، مشخصه انتقالی مدار را رسم نمایید.



شکل ۳-۶۷



شکل ۳-۶۸

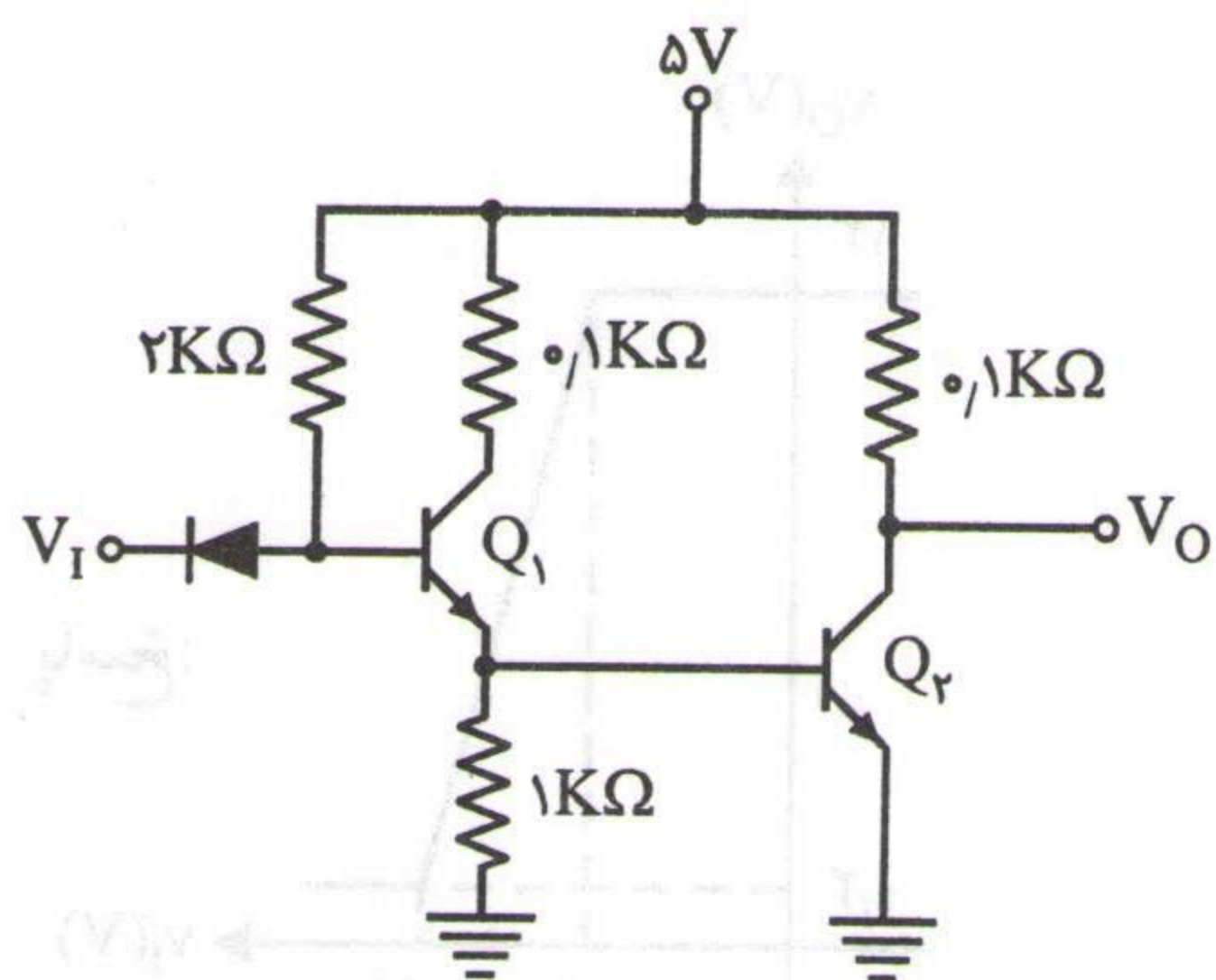


شکل ۳-۶۹

۱۱. در مدار شکل ۳-۶۹، ترانزیستور دارای  $\beta$  حداقل  $50$  و  $V_{BE(on)}$  و  $V_{CE(sat)}$  به ترتیب  $0.7V$  و  $0.2V$  ولت می باشد. دیودها مشابه و دارای ولتاژ هدایت  $0.7V$  ولت هستند. ورودیهای  $V_1$  و  $V_2$  دیجیتال بوده و می توانند در یکی از سطوح  $0.2V$  یا  $5V$  ولت قرار گیرند. خروجی را به ازای حالت های مختلف ورودی به دست آورید. مدار همانند چه دروازه منطقی عمل می کند؟

پاسخ: دروازه NAND

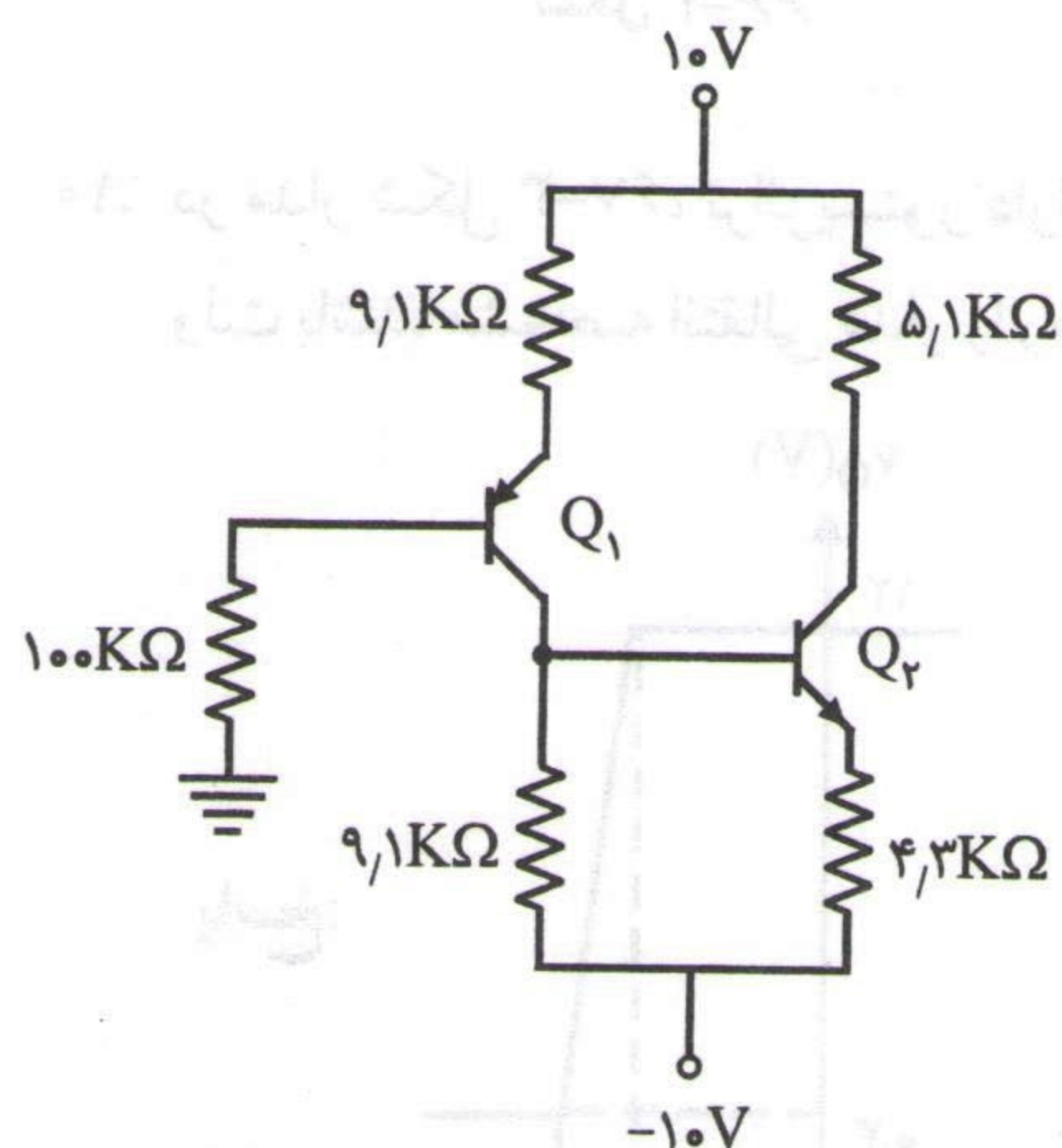




شکل ۳-۷۰

۱۲. در مدار شکل ۳-۷۰، ترانزیستورها مشابه و از جنس سیلیکن می باشند و دیود دارای ولتاژ هدایت ۰٫۷ ولت می باشد. ورودی در یکی از دو سطح ۰٫۲ یا ۵ ولت قرار می گیرد.  $\beta$  را به گونه ای انتخاب کنید که به ازای  $V_I = 5V$  ترانزیستور  $Q_1$  فعال و ترانزیستور  $Q_2$  اشباع گردد.

پاسخ:  $5 < \beta < 22$



شکل ۳-۷۱

۱۳. در مدار شکل ۳-۷۱، ولتاژ و جریان سرهای ترانزیستورها را در حالت های زیر به دست آورید.  $|V_{BE(on)}|$  را برابر ۰٫۷V در نظر بگیرید.

الف)  $\beta = \infty$  ب)  $\beta = 100$

پاسخ:

الف)  $V_{C_2} = -0.2V, V_{E_2} = -1.4V, V_{B_2} = V_{C_1} = -0.7V, V_{E_1} = 0.7V, V_{B_1} = 0$

$I_{E_2} = I_{C_2} = 2mA, I_{E_1} = I_{C_1} = 1.2mA$

ب)  $V_{E_2} = -2.56V, V_{B_2} = V_{C_1} = -1.86V, V_{E_1} = 1.612V, V_{B_1} = 0.912V$

$I_{E_1} = 0.92mA, I_{C_1} = 0.91mA, I_{B_1} = 9.12\mu A, V_{C_2} = 1.23V$

$I_{E_2} = 1.73mA, I_{C_2} = 1.72mA, I_{B_2} = 17.15\mu A$