

الکترونیک ۱

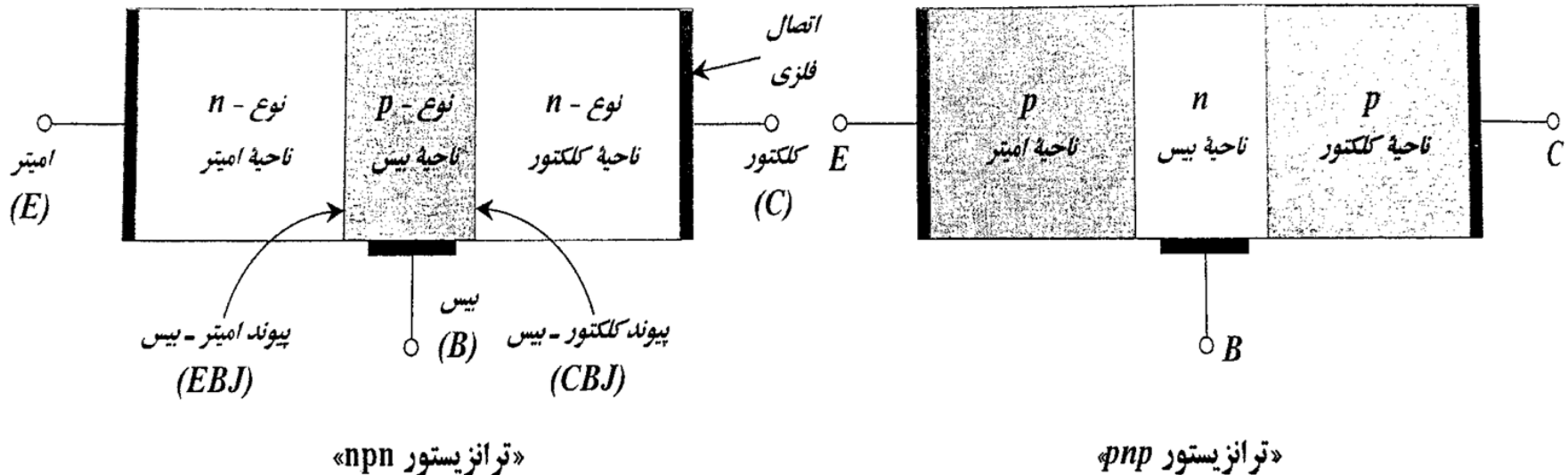
جلسه سوم

مدرس : سجاد قراگوزلو حصاری

دانشکده فنی انقلاب اسلامی

ترانزیستورهای دو قطبی (BJT)

ترانزیستور BJT قطعه‌ای است قابل کنترل که جریان عبوری آن توسط یک جریان اندک کنترل می‌شود. از اتصال سه نیمه‌هادی به صورت‌های زیر یک ترانزیستور BJT حاصل می‌شود که به دو نوع npn و pnp تقسیم می‌شود.



نکات کلی در مورد ترانزیستور BJT

۱- مقدار ناخالصی ناحیه بیس نسبت به نواحی کلکتور و امیتر کمتر و در حدود یک دهم نسبت به آنها می باشد. همچنین نامساوی زیر در مورد مقادیر ناخالصی بیس و کلکتور و امیتر برقرار است.

$$\text{ناخالصی } B > \text{ناخالصی } C > \text{ناخالصی } E$$

۲- در مورد هدایت الکتریکی نواحی B و C و E روابط زیر برقرار است.

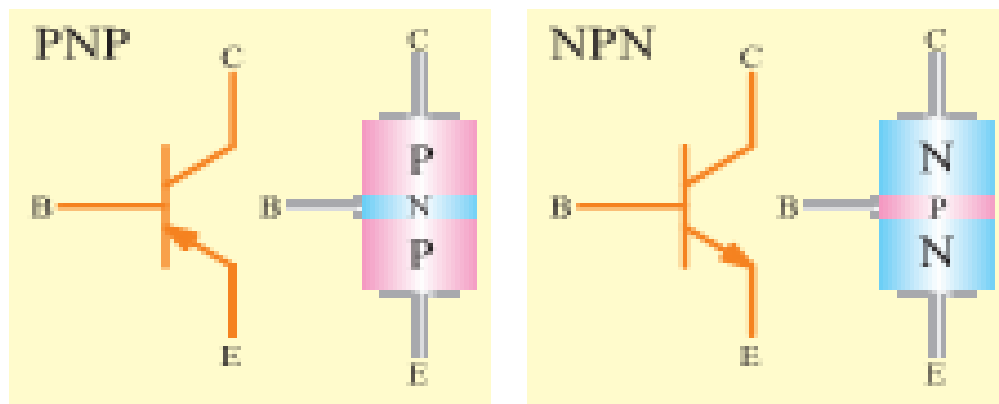
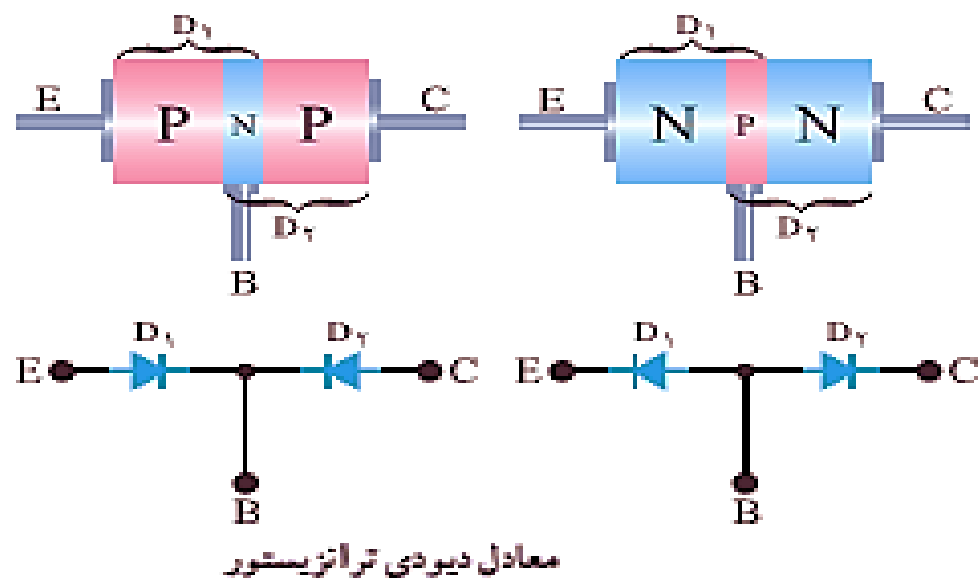
$$\text{هدایت الکتریکی } B > \text{هدایت الکتریکی } C > \text{هدایت الکتریکی } E$$

۳- از لحاظ اندازه در مورد نواحی بیس و امیتر و کلکتور رابطه زیر برقرار است.

$$\text{اندازه } B > \text{اندازه } E > \text{اندازه } C$$

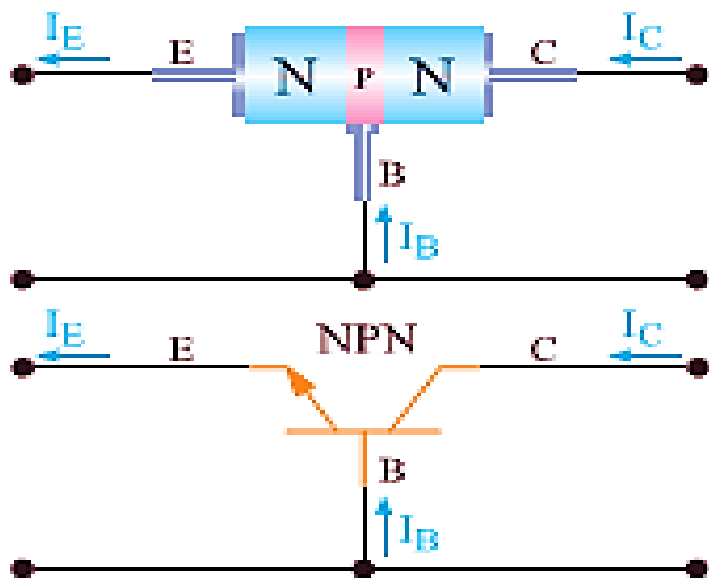
۴- توزیع ناخالصی در نواحی امیتر و کلکتور یکسان نمی باشد لذا نمی توان جای آنها را در مدار عوض کرد.

۵- عامل ایجاد کننده جریان در BJT هم الکترونها و هم حفره ها هستند.

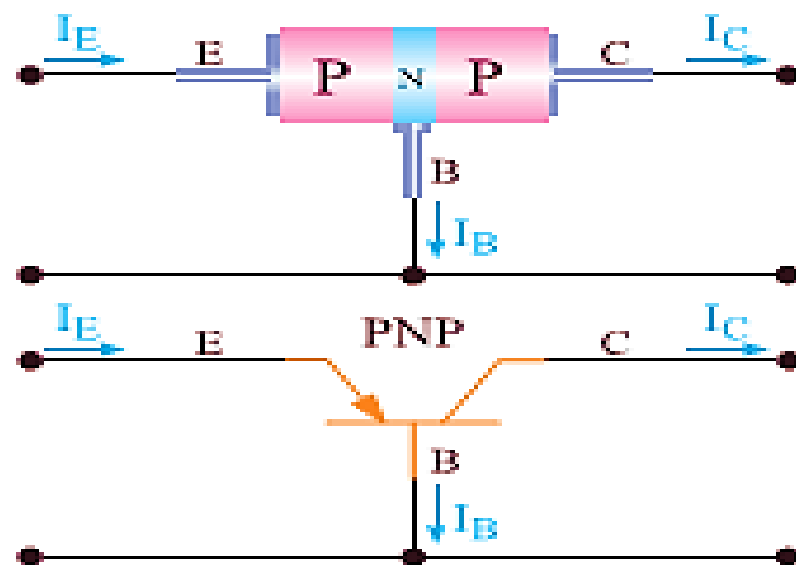


علامت قرار دادی ترانزیستورهای PNP و NPN

چگونگی عبور جریان در ترانزیستور BJT



جهت قراردادی جریان در ترانزیستور NPN



جهت قراردادی جریان در ترانزیستور PNP

$$I_E = I_C + I_B$$

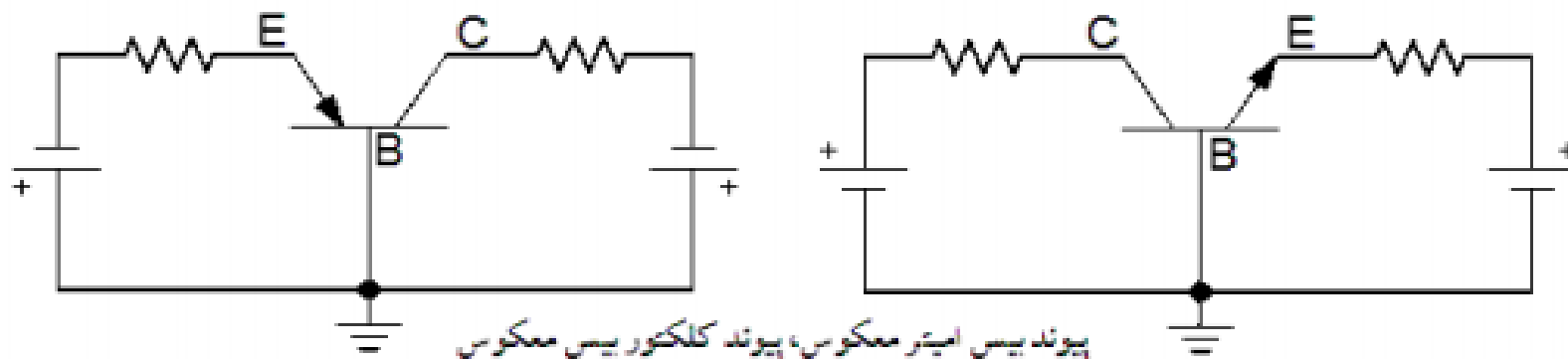
نواحی کار ترانزیستور BJT

۱- ناحیه ی قطع (Cutoff Region)

۲- ناحیه ی اشباع (Saturation Region)

۳- ناحیه ی فعال (Active Region)

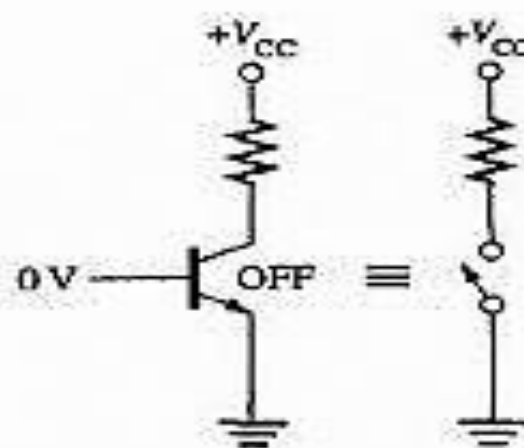
۱- ناحیه ی قطع (Cutoff Region)



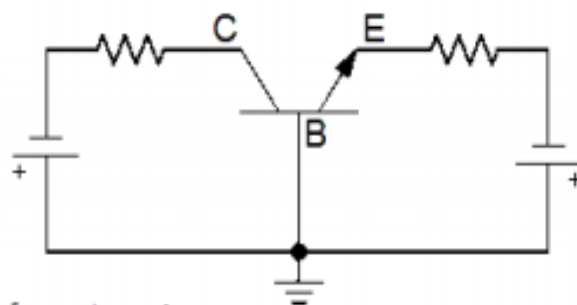
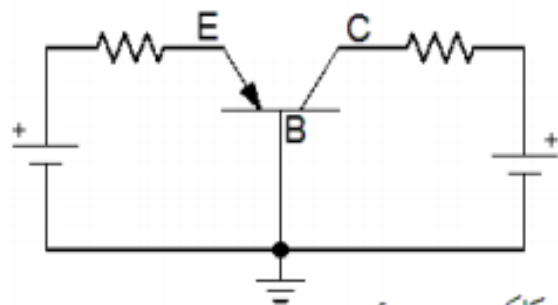
در این ناحیه در هر دو نوع ترانزیستور هر دو پیوند ترانزیستور خاموش می باشد.

$$\begin{cases} \text{(off): پیوند (EB یا BE)} \\ \text{(off): پیوند (CB یا BC)} \end{cases}$$

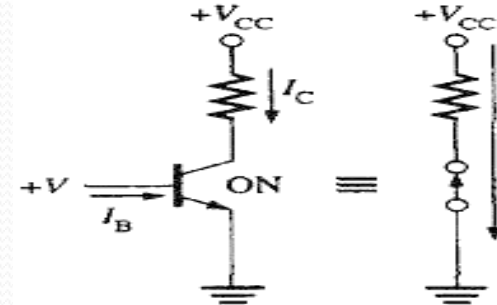
$$I_C = I_E = I_B = 0$$



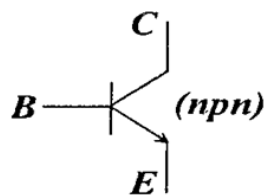
۲- ناحیه ی اشباع (Saturation Region)



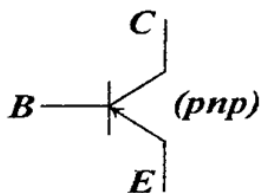
پیوند بیس امیتر مستقیم، پیوند کلکتور بیس مستقیم



۱- شرایط ناحیه اشباع برای این گرایش برای دو نوع ترانزیستور npn و pnp به صورت زیر است.

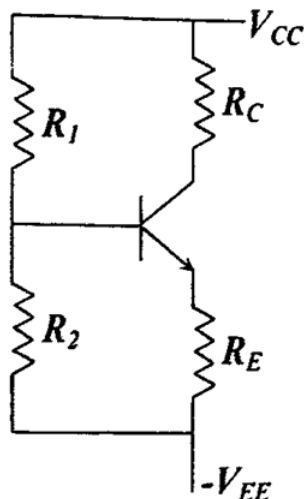


$$\begin{cases} V_B > V_C + V_{BC(on)} \Rightarrow \text{پیوند BC در گرایش مستقیم} \\ \Rightarrow V_B > V_E + V_{BE(on)} \Rightarrow \text{پیوند BE در گرایش مستقیم} \\ 0 \cong V_{CE} \text{ یا } 0.2 \end{cases}$$



$$\begin{cases} V_C > V_B + V_{CB(on)} \Rightarrow \text{پیوند CB در گرایش مستقیم} \\ \Rightarrow V_E > V_B + V_{EB(on)} \Rightarrow \text{پیوند EB در گرایش مستقیم} \\ 0 \cong V_{EC} \text{ یا } 0.2 \end{cases}$$

۲- در ناحیه اشباع به علت مستقیم شدن پیوند BC، جریان کلکتور تابع V_{BC} خواهد بود.



اگر یک ترانزیستور در ناحیه اشباع کار کند هر دو پیوند آن در بایاس مستقیم هستند لذا مقدار V_{CE} بین صفر تا $0.2V$ تغییر می کند در حالت اشباع روابط زیر برقرار است:

$$\Rightarrow I_C(\text{sat}) = \frac{V_{CC} + V_{EE} - V_{CE}(\text{sat})}{R_C + R_E}$$

اگر $-V_{EE}$ برابر صفر باشد داریم:

$$I_C(\text{sat}) = \frac{V_{CC} - V_{CE}(\text{sat})}{R_C + R_E}$$

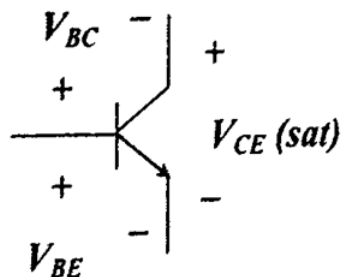
دقت شود در حالت اشباع باتوجه به اینکه هر دو پیوند ترانزیستور در حالت مستقیم بایاس شده اند R_C به طور مستقیم در I_C تأثیر دارد. باتوجه به مطالب بیان شده هرگاه یک مدار ترانزیستوری تحلیل dc شود باید I_C بدست آمده با $I_C(\text{sat})$ مقایسه شود لذا داریم:

if $I_C (\text{بدست آمده}) < I_C(\text{sat}) \Rightarrow I_C (\text{ق.ق})$

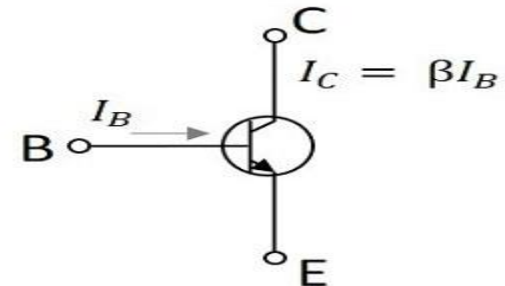
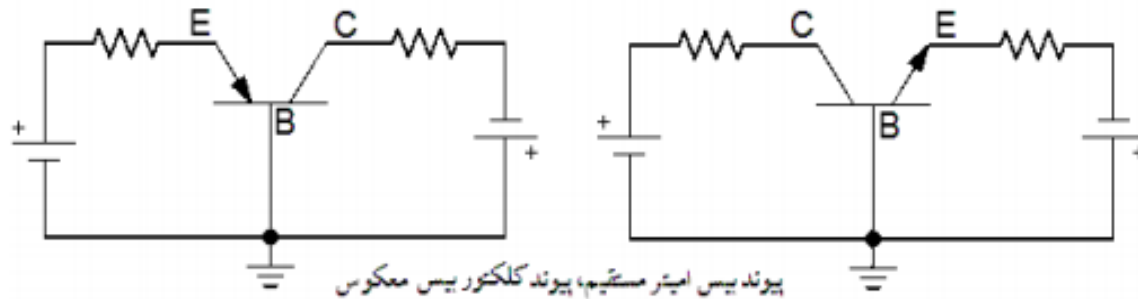
if $I_C (\text{بدست آمده}) > I_C(\text{sat}) \Rightarrow I_C (\text{غ.ق.ق}) \Rightarrow \text{Tr(اشباع)} \Rightarrow I_C = I_C(\text{sat})$

همچنین در حالت اشباع برای ترانزیستور رابطه زیر برقرار است:

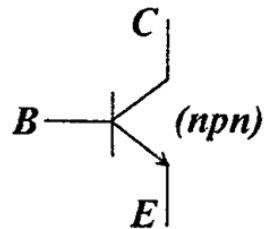
$$V_{BE} - V_{CE}(\text{sat}) = V_{BC}$$



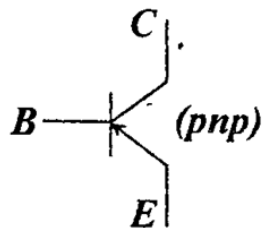
۳- ناحیه ی فعال (Active Region)



شرایط ناحیه فعال برای دو نوع ترانزیستور BJT به صورت زیر است.

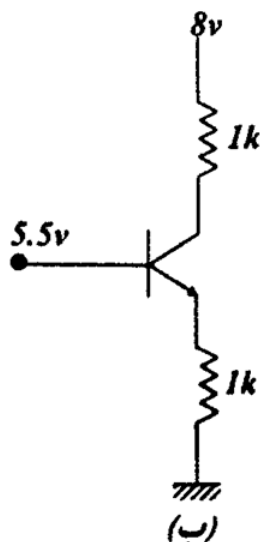
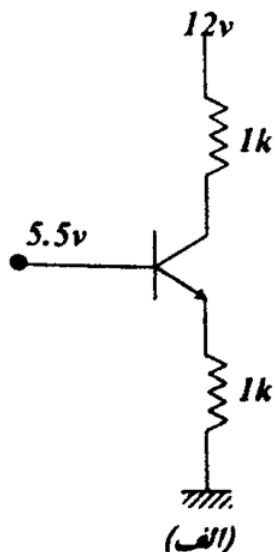


$$\begin{cases} V_B < V_C + V_{BC(on)} \Rightarrow \text{پیوند BC در گرایش معکوس} \\ V_B > V_E + V_{BE(on)} \Rightarrow \text{پیوند BE در گرایش مستقیم} \\ V_{CE} > 0 \text{ یا } 0.2 \end{cases}$$



$$\begin{cases} V_C < V_B + V_{CB(on)} \Rightarrow \text{پیوند CB در گرایش معکوس} \\ \Rightarrow V_E > V_B + V_{EB(on)} \Rightarrow \text{پیوند EB در گرایش مستقیم} \\ V_{EC} > 0 \text{ یا } 0.2 \end{cases}$$

در ناحیه فعال جریان I_C تقریباً برابر جریان I_E است زیرا می توان از I_B صرفه نظر کرد.



تحليل مدار (ب):

$$V_E = V_B - V_{BE} = 5.5 - 0.5 = 5V$$

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{5}{1k} = 5mA$$

$$I_{E(sat)} = \frac{V_{CC} - V_{CE(sat)}}{R_C + R_E}$$

$$\Rightarrow I_{E(sat)} = \frac{12}{1+1} = 6mA$$

$$\Rightarrow I_E > I_{E(sat)} \Rightarrow Tr \text{ (اشباع)}$$

$$\Rightarrow I_E = I_{E(sat)} = 6mA$$

مثال: نواحی کار مدار (الف) و مدار (ب) کدام است؟

$$\beta = 100$$

$$V_{CE(sat)} = 0$$

$$V_{BE} = 0.5$$

تحليل مدار (الف):

$$V_E = V_B - V_{BE} = 5.5 - 0.5 = 5V$$

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{5}{1k} = 5mA$$

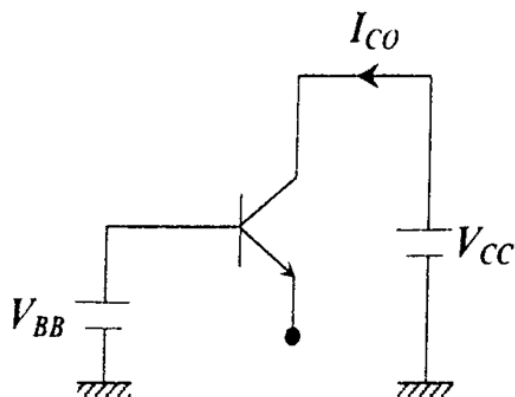
$$I_{E(sat)} = \frac{V_{CC} - V_{CE(sat)}}{R_C + R_E}$$

$$I_{E(sat)} = \frac{8}{1+1} = 4mA$$

$$I_{E(sat)} > I_E \Rightarrow Tr \text{ (فعال)}$$

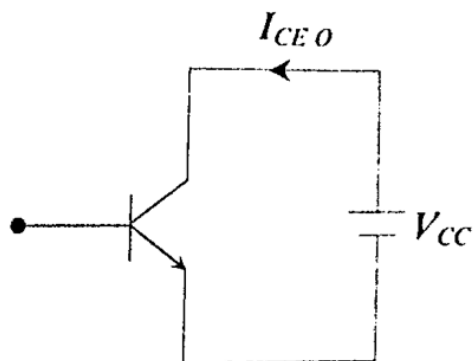
$$\Rightarrow I_E = 5mA$$

تعریف جریان I_{CO} یا I_{CBO}



I_{CO} یا I_{CBO} مقدار جریانی است که اگر E باز باشد و پیوند CB در گرایش معکوس باشد از کلکتور عبور می کند که برابر همان جریان اشباع معکوس است.

تعریف جریان I_{CEO}



I_{CEO} مقدار جریانی است که از کلکتور به سمت امیتر می رود در صورتی که بیس به صورت مدار باز باشد.

لازم به ذکر است که ارتباط میان I_{CO} و I_{CEO} به صورت زیر است:

$$I_{CEO} = (1 + \beta) I_{CO}$$

پارامترهای α و β

تعریف پارامتر β (ضریب تقویت جریان) :

ارتباط بین I_C و I_B در دو حالت dc و ac به صورت زیر تعریف می شود :

$$\left. \begin{aligned} \beta_{dc} &= \frac{I_C}{I_B} \\ \beta_{ac} &= \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \bigg|_{V_{CE} = \text{cte}} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \beta_{dc} \cong \beta_{ac}$$

تعریف پارامتر α :

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{dc} &= \frac{I_C}{I_E} \\ \alpha_{ac} &= \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E} \bigg|_{V_{CB} = \text{cte}} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \alpha_{dc} \cong \alpha_{ac}$$

روابط حاکم در BJT

$$I_{CEO} = (1 + \beta) I_{CO}$$

$$I_{CEO} = \frac{1}{1 - \alpha} I_{CO}$$

$$\frac{1}{1 - \alpha} = \beta + 1$$

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

$$I_C = \beta I_B$$

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

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

$$I_C = \beta I_B + I_{CEO}$$

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

$$I_E = I_C + I_B$$

$$V_{BE} (\text{Si-Tr}) = 0.5 \text{ تا } 0.7$$

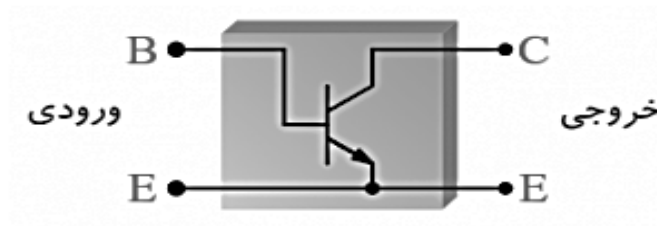
$$V_{BE} (\text{Ge-Tr}) = 0.2 \text{ تا } 0.5$$

$$I_E = I_{co} \cdot e^{\frac{V_{BE}}{\eta V_T}}$$

انواع آرایش های ترانزیستور BJT

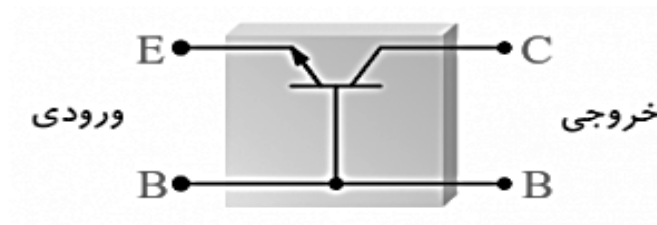
۱) آرایش امیتر مشترک (Common Emitter):

در این آرایش پایه ی امیتر ، بین ورودی و خروجی مدار مشترک است و سبب نام گذاری این آرایش نیز به دلیل مشترک بودن پایه ی امیتر است. در هر آرایشی پایه ی مشترک را مبنا قرار می دهند و ولتاژ های نقاط مختلف را نسبت به آن اندازه می گیرند. شکل زیر آرایش امیتر مشترک را بدون رسم سایر المان های مورد نیاز ، نشان می دهد. این آرایش در مدارات کاربرد بیش تری دارد.



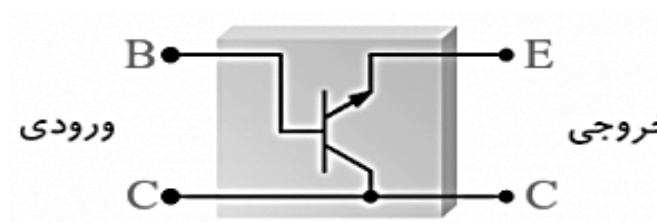
۲) آرایش بیس مشترک (Common Base):

در این آرایش پایه ی بیس بین ورودی و خروجی مدار مشترک است. شکل زیر این آرایش را به طور ساده نشان می دهد.

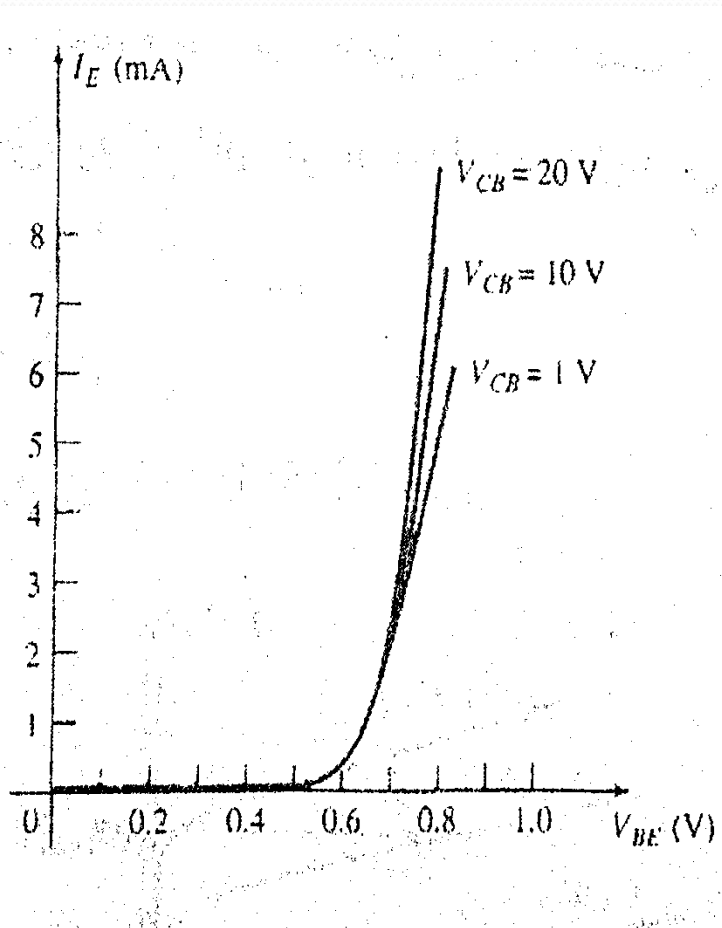


۳) آرایش کلکتور مشترک (Common Collector):

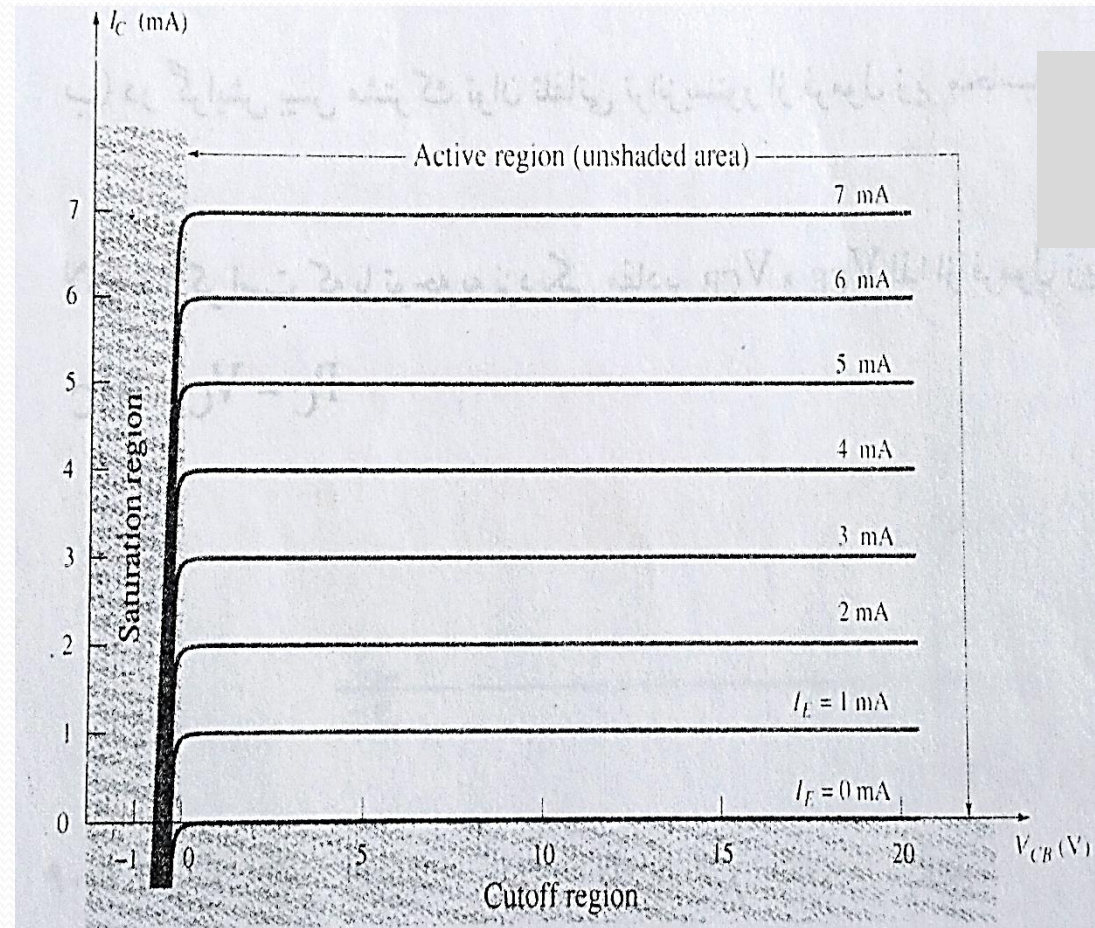
پایه ی مشترک بین ورودی و خروجی ، در این آرایش ، کلکتور است و به دلیل مشترک بودن پایه ی کلکتور نیز به آن کلکتور مشترک می گویند. این آرایش را امیتر فالوور (Emitter Follower) نیز می گویند.



منحنی مشخصه ی ترانزیستور BJT در آرایش بیس مشترک

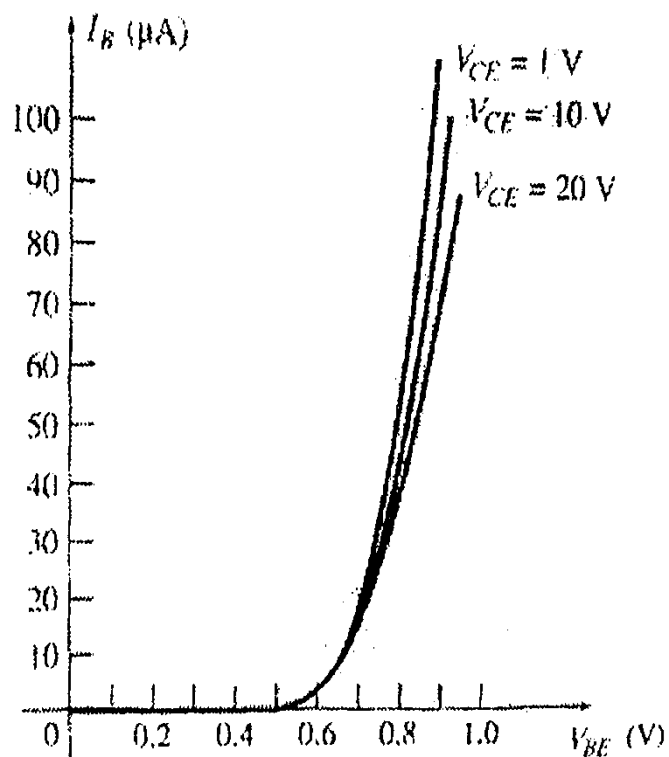


منحنی مشخصه ورودی

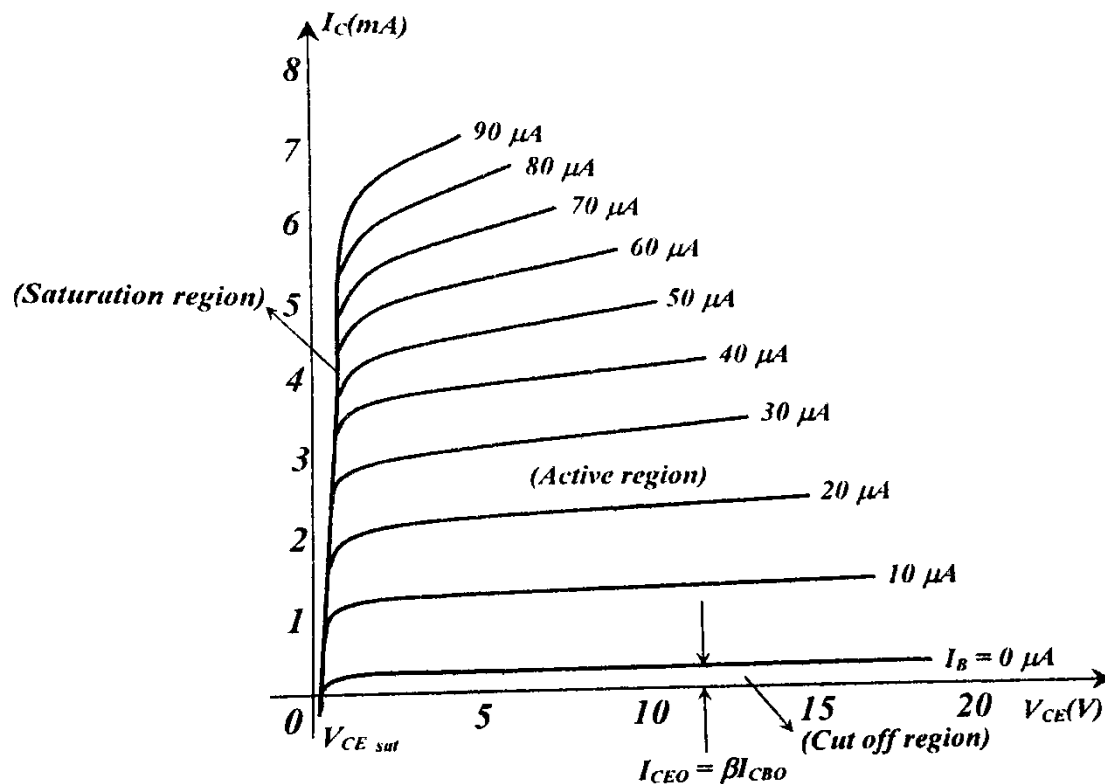


منحنی مشخصه خروجی

منحنی مشخصه ی ترانزیستور BJT در آرایش امیتر مشترک و کلکتور مشترک

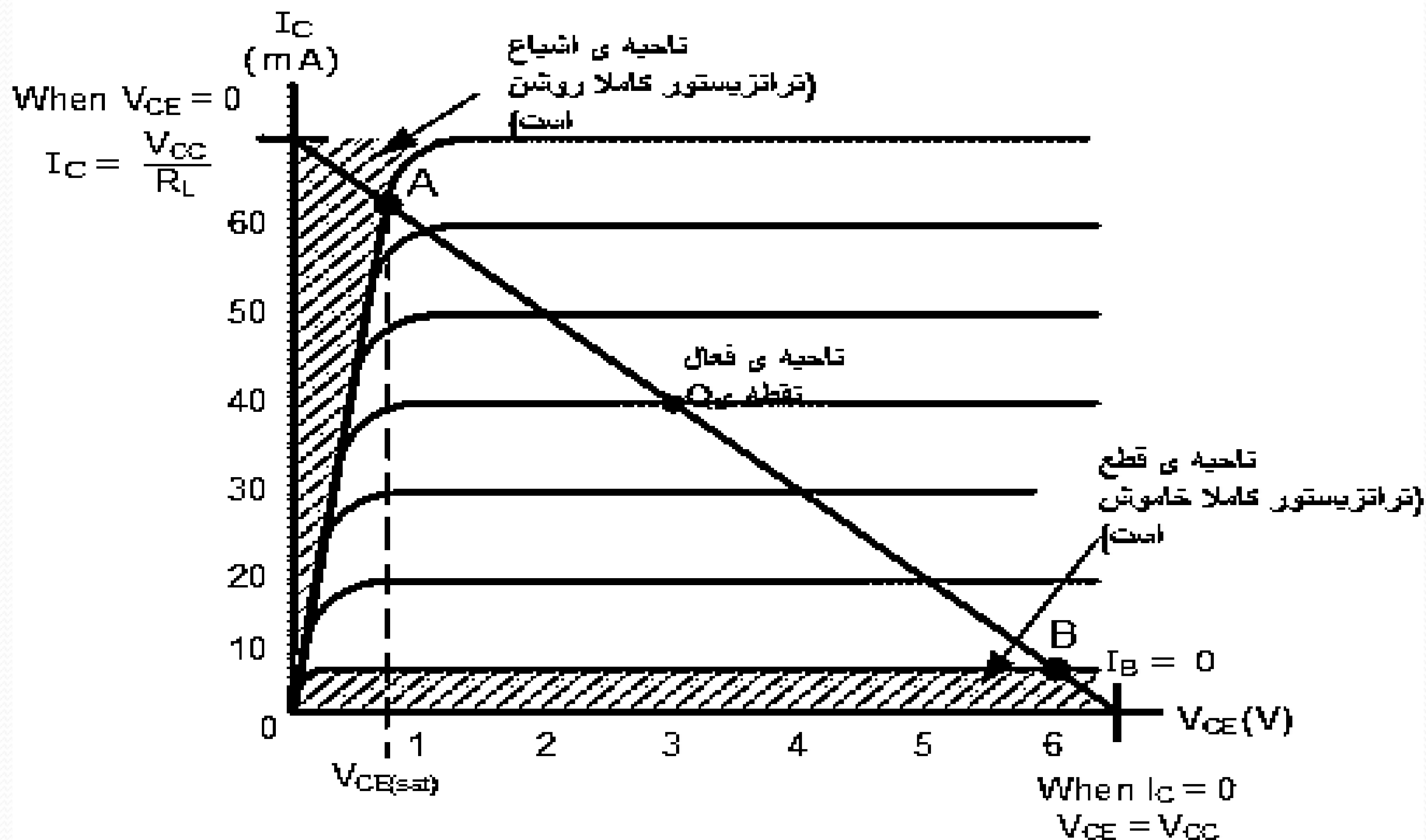


منحنی مشخصه ورودی



منحنی مشخصه خروجی

نواحی قطع و اشباع و فعال ترانزیستور روی منحنی مشخصه ی خروجی



توان تلفاتی در ترانزیستور

الف) در گرایش‌های امیتر مشترک و کلکتور مشترک توان تلفاتی از فرمول زیر محاسبه می‌شود.

$$P_C = V_{CE} \times I_C$$

ب) در گرایش بیس مشترک توان تلفاتی ترانزیستور از فرمول زیر محاسبه می‌شود.

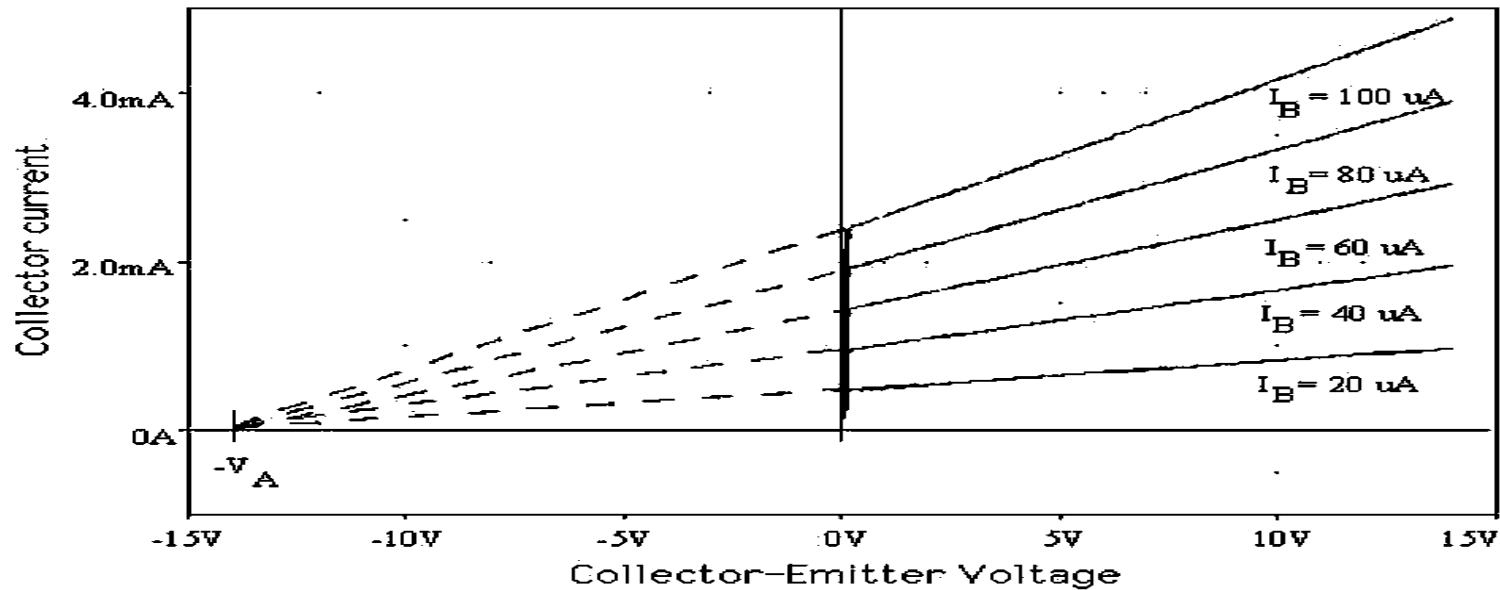
$$P_C = V_{CB} \times I_C$$

لازم به ذکر است که با توجه به نزدیکی مقادیر V_{CE} و V_{CB} لذا از فرمول زیر برای تمامی حالات و گرایش‌ها می‌توان استفاده نمود.

$$P_C = V_{CE} \times I_C$$

ولتاژ اری

محل تقاطع منحنی‌های مشخصه خروجی در ربع دوم ولتاژ اری نام دارد و با V_A نمایش داده می‌شود.



محدوده ولتاژ اری برای ترانزیستورهای npn و pnp به صورت زیر است.

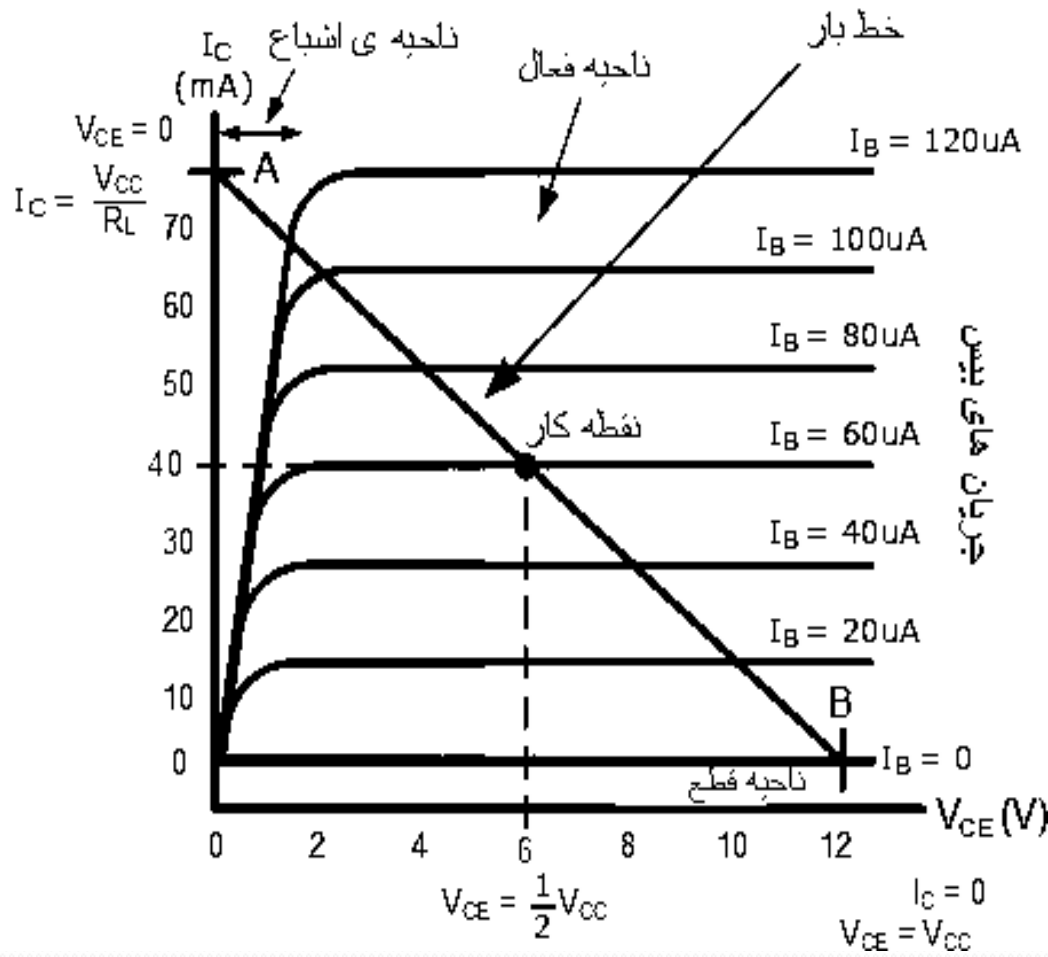
$$10 < V_A < 130 \text{ (nnp)} , \quad 50 < V_A < 100 \text{ (pnp)}$$

رابطه دقیق جریان I_C با در نظر گرفتن V_A

$$I_C = I_{CO} \times e^{\frac{V_{BE}}{\eta V_T}} \times \left(1 + \frac{V_{CE}}{V_A}\right)$$

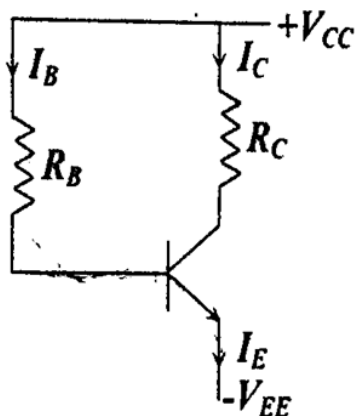
تعریف منطقه کار DC یک ترانزیستور :

به مقادیر V_{CE} و I_C که در حالت کار دائم مدار وجود دارد نقطه کار dc ترانزیستور گفته می شود. نقطه کار dc از محل برخورد خط بار DC با منحنی $(I_C - V_{CE})$ به دست می آید.



انواع مدارات برای بایاس DC ترانزیستور BJT

- ۱- مدار بایاس ثابت
- ۲- مدار بایاس با وجود مقاومت امیتر
- ۳- بایاس مقسم ولتاژ
- ۴- بایاسینگ از طریق مقاومت فیدبک



۱) مدار بایاس ثابت (fixed Bias circuit)

در مسیر روبرو یک KVL می‌زنیم $(V_{CC}, R_B, BE, (-V_{EE}))$ لذا داریم:

$$-V_{CC} + R_B \cdot I_B + V_{BE} - V_{EE} = 0$$

$$\Rightarrow I_B = \frac{V_{CC} + V_{EE} - V_{BE}}{R_B} \Rightarrow I_C = \beta I_B = \frac{\beta(V_{CC} + V_{EE} - V_{BE})}{R_B}$$

$$I_E = (1 + \beta)I_B \cong I_C \Rightarrow I_C \cong I_E$$

برای بدست آوردن V_{CE} باید در مسیر روبرو KVL زده شود. $(V_{CC}, R_C, CE, V_{EE})$ لذا داریم:

$$-V_{CC} + R_C I_C + V_{CE} - V_{EE} = 0 \Rightarrow V_{CE} = V_{CC} + V_{EE} - I_C \times R_C$$

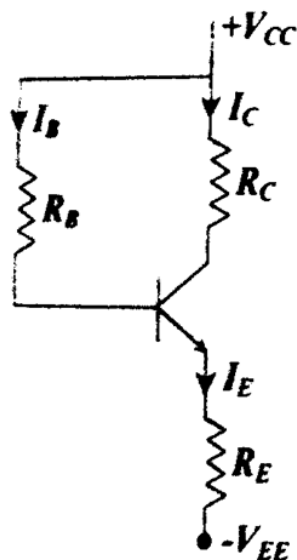
با صفر بودن $-V_{EE}$ روابط I_C و I_B و V_{CE} به صورت زیر ساده می‌شود:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}, \quad I_C = \frac{\beta(V_{CC} - V_{BE})}{R_B} \Rightarrow V_{CE} = V_{CC} - R_C \times I_C$$

$$V_C = V_{CC} - R_C \times I_C$$

لازم به ذکر است V_C به صورت رابطه روبرو بدست می‌آید.

۲) مدار بایاس با وجود مقاومت امیتر (Emitter stabilized Bias circuit)



اگر در مسیر $(+V_{CC}, R_B, BE, R_E, -V_{EE})$ یک KVL زده شود.

$$\begin{cases} -V_{CC} + R_B I_B + V_{BE} + R_E I_E - V_{EE} = 0 \\ I_E = (1 + \beta) I_B \end{cases}$$

$$\Rightarrow I_B = \frac{V_{CC} + V_{EE} - V_{BE}}{R_B + (1 + \beta) R_E}, \quad I_C = \beta I_B = \frac{\beta (V_{CC} + V_{EE} - V_{BE})}{R_B + (1 + \beta) R_E}$$

با اعمال یک KVL در مسیر $(-V_{EE}, R_E, CE, R_C, +V_{CC})$ داریم:

$$V_{CE} = V_{CC} + V_{EE} - I_C (R_C + R_E)$$

در صورتی که $-V_{EE} = 0$ باشد داریم:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (1 + \beta) R_E}, \quad I_C = \frac{\beta (V_{CC} - V_{BE})}{R_B + (1 + \beta) R_E}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E) I_C$$

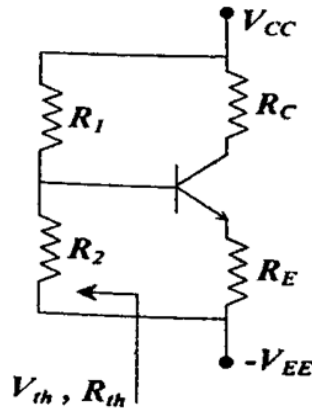
نکته ۱: دقت شود که وجود R_E باعث پایداری حرارتی و تثبیت نقطه کار می شود.

نکته ۲: تغییر مقدار مقاوت R_C بر روی I_C در ناحیه فعال اثری ندارد.

۳) بایاس مقسم ولتاژ (Voltage Divider Bias Circuit)

روش دقیق :

اگر با توجه به جهت فلش مدار معادل تونن دیده شود داریم:



$$\begin{cases} R_{th} = R_1 \parallel R_2 \\ V_{th} = \frac{V_{CC} \times R_2 - V_{EE} \times R_1}{R_1 + R_2} \end{cases}$$

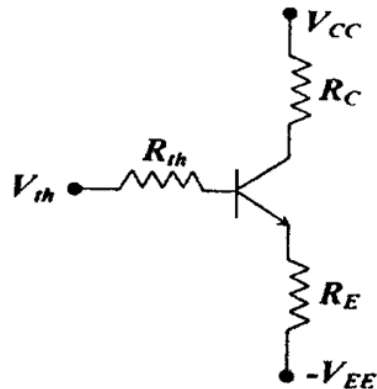
حال مدار معادل به صورت زیر می شود. لذا داریم :

$$-V_{th} + R_{th}.I_B + V_{BE} + R_E.I_E - V_{EE} = 0$$

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

$$\Rightarrow I_C = \frac{\beta(V_{th} + V_{EE} - V_{BE})}{R_{th} + (1 + \beta)R_E}$$

$$\Rightarrow V_{CE} = V_{CC} + V_{EE} - (R_C + R_E).I_C$$



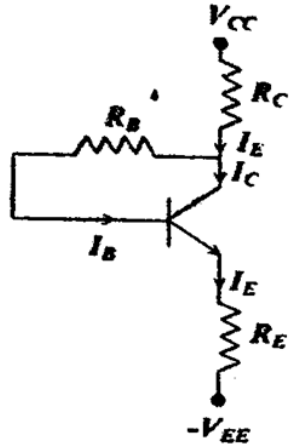
$$R_{th} = R_1 \parallel R_2, \quad V_{th} = \frac{V_{CC} \times R_2}{R_1 + R_2} \Rightarrow I_B = \frac{V_{th} - V_{BE}}{R_{th} + (1 + \beta)R_E}$$

با فرض صفر بودن $-V_{EE}$ داریم:

$$I_C = \frac{\beta.(V_{th} - V_{BE})}{R_{th} + (1 + \beta)R_E}, \quad V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E).I_C$$

۶) بایاسینگ از طریق مقاومت فیدبک (DC Bias With Voltage feed Back)

مدار (الف) :

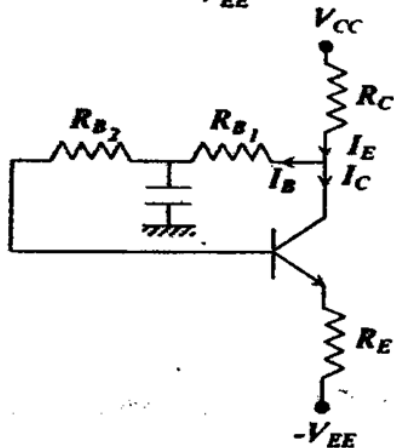


$$V_{CC} + V_{EE} = R_C \cdot I_E + R_B \cdot I_B + V_{BE} + R_E \cdot I_E$$

$$\Rightarrow I_B = \frac{V_{CC} + V_{EE} - V_{BE}}{R_B + (1 + \beta)(R_C + R_E)} \Rightarrow I_C = \beta I_B = \frac{\beta(V_{CC} + V_{EE} - V_{BE})}{R_B + (1 + \beta)(R_C + R_E)}$$

$$V_{CE} = V_{CC} + V_{EE} - I_C(R_C + R_E)$$

مدار (ب) :



$$I_B = \frac{V_{CC} + V_{EE} - V_{BE}}{R_{B1} + R_{B2} + (1 + \beta)(R_E + R_C)}$$

$$I_C = \beta I_B = \frac{\beta(V_{CC} + V_{EE} - V_{BE})}{R_{B1} + R_{B2} + (1 + \beta)(R_E + R_C)}$$

$$V_{CE} = V_{CC} + V_{EE} - (R_C + R_E)I_C$$

در صورت صفر بودن $-V_{EE}$ روابط بالا به صورت زیر ساده می شود:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_{B1} + R_{B2} + (1 + \beta)(R_E + R_C)}, \quad I_C = \beta I_B = \frac{\beta(V_{CC} - V_{BE})}{R_{B1} + R_{B2} + (1 + \beta)(R_E + R_C)}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E)I_E$$