

۲

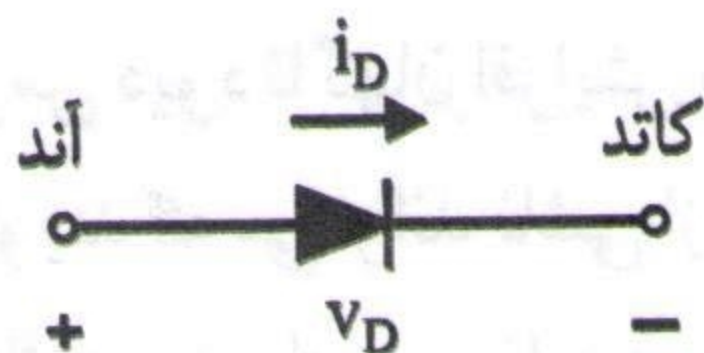
دیود نیمه هادی و مدارهای دیودی

۱-۲ چکیده

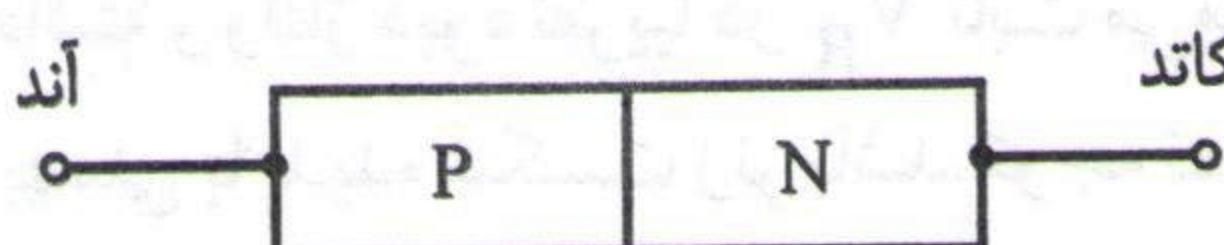
- دیود نیمه هادی، به پیوند دو بلور P و N گفته می شود که چنانچه در فصل قبل مشاهده شد دارای خاصیت یکسوکنندگی جریان است. ساختمان و نمایش مداری یک دیود نیمه هادی به ترتیب در شکل های ۱-۲ و ۲-۲ نشان داده شده است. می توان نشان داد که رابطه جریان - ولتاژ برای یک دیود نیمه هادی به صورت زیر است:*

$$i_D \approx I_S (e^{v_D/\eta V_T} - 1)$$

در مشخصه جریان - ولتاژ دیود، η ضریب ثابتی است که به جنس بلور و فناوری ساخت وابسته بوده و مقادیری بین ۱ تا ۲ دارد. معمولاً برای سیلیکن مقدار $1/4$ و برای ژرمانیم مقدار ۱ به کار می رود و در بعضی مواقع جهت سادگی همواره مقدار ۱ برای آن استفاده می شود. I_S جریان اشباع معکوس و $V_T = KT/q$ می باشد که در آن K ثابت بولتزمن است. در دمای اتاق ($T = 300^\circ K$) مقدار V_T برابر ۲۵ یا ۲۶ میلی ولت در نظر گرفته می شود.



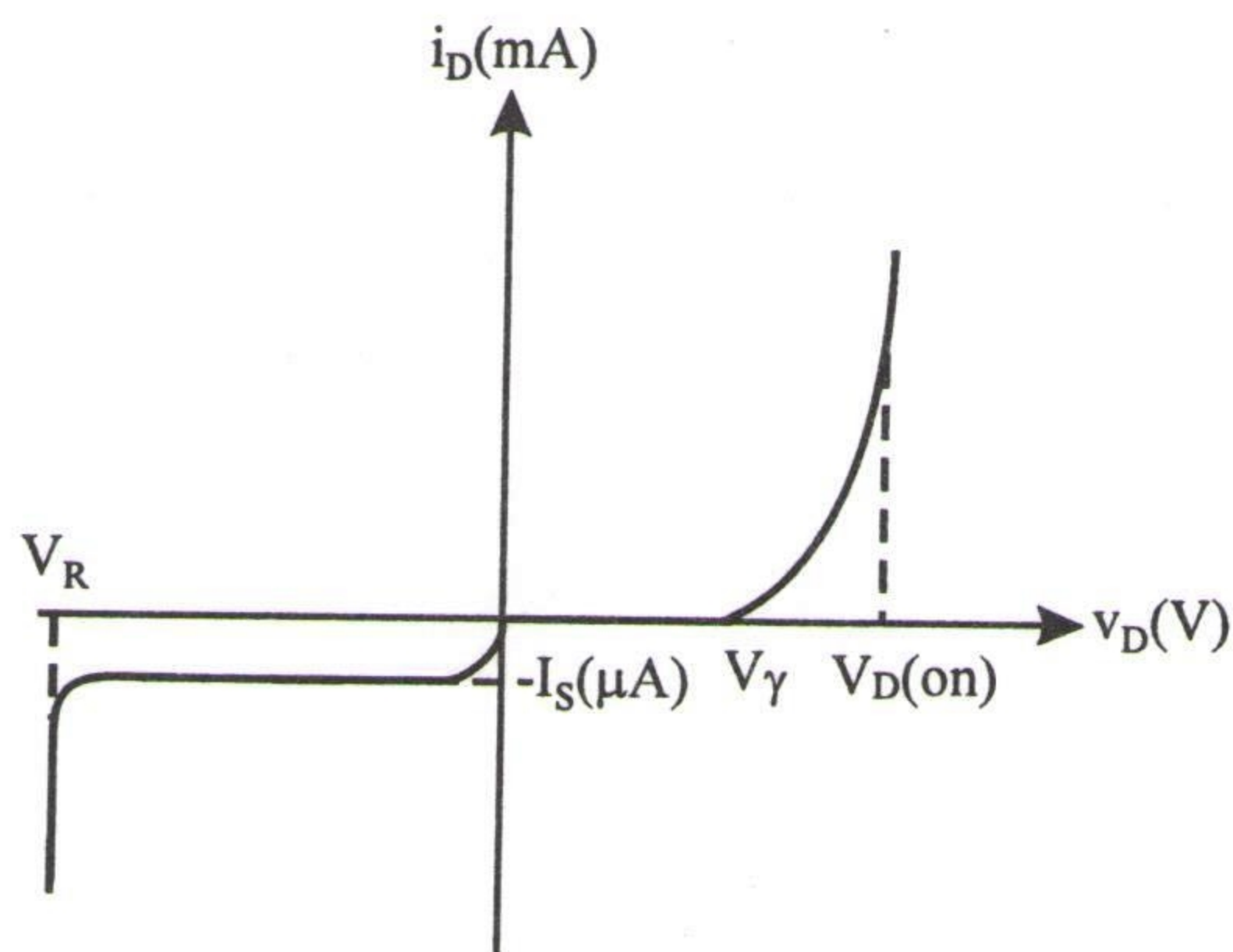
شکل ۲-۲



شکل ۱-۲

- مشخصه جریان - ولتاژ هر دیود معمولی با توجه به شکل ۲-۳ دارای سه ناحیه به ترتیب زیر است:

* از این پس برای نمایش مقادیر جریان و یا ولتاژ مؤلفه های ac و DC از روال زیر استفاده می کنیم. مثلاً برای جریان دیود، i_d مقدار لحظه ای سیگنال (ac خالص)، I_D مقدار DC خالص و i_D مقدار کل شامل ac و DC است ($i_D = I_D + i_d$). همچنین در مورد سیگنال سینوسی از I_d برای نمایش فازور آن استفاده می شود.



شکل ۲-۳

الف) ناحیه بایاس مستقیم ($v_D \geq 0$): در این ناحیه تا زمانی که $0 < v_D < V_\gamma$ باشد جریانی از دیود عبور نکرده و به عبارتی دیود خاموش است. وقتی که v_D به V_γ برسد دیود شروع به هدایت کرده و جریان آن با اندک افزایشی در v_D ، به سرعت افزایش می‌یابد و اصطلاحاً می‌گویند دیود روشن است. در این حالت ولتاژ دو سر دیود را می‌توان تقریباً ثابت گرفت که کمی بیشتر از V_γ بوده و با $V_D(on)$ نشان داده می‌شود. $V_D(on)$ ولتاژ هدایت دیود و V_γ ولتاژ آستانه هدایت نامیده می‌شود و مقادیر آنها به جنس دیود بستگی دارد. در حالت هدایت که $v_D \gg V_\gamma$ است معادله جریان - ولتاژ را می‌توان به صورت زیر ساده کرد:

$$i_D = I_S e^{v_D / \eta V_T}$$

ب) ناحیه بایاس معکوس ($0 \leq v_D \leq V_R$): در این حالت با توجه به معادله جریان - ولتاژ دیود، $i_D = -I_S$ است که مقدار ناچیزی می‌باشد. در این ناحیه می‌توان دیود را خاموش فرض کرد.

ج) ناحیه شکست ($v_D \leq V_R$): چنانچه ولتاژ معکوس دیود افزایش یابد و به حد معینی (V_R) برسد، جریان معکوس دیود ناگهان افزایش سریعی داشته و ولتاژ دیود تقریباً در V_R ثابت می‌ماند. این پدیده را شکست گویند که می‌تواند ناشی از ضرب بهمنی یا پدیده شکست زنر باشد. توجه نمایید که معادله جریان - ولتاژ دیود برای این ناحیه صادق نیست. V_R را ولتاژ شکست معکوس دیود گویند که به جنس دیود و چگالی ناخالصی وابسته بوده و قابل کنترل است.

● جریان اشباع معکوس دیود ناشی از حاملهای اقلیت می‌باشد و با توجه به قانون اثر جرم، چگالی این حاملها با n_i^2 متناسب است؛ بنابراین

الف) چون n_i به دما وابستگی نسبتاً زیادی دارد، جریان اشباع معکوس شدیداً تابع دما خواهد بود.
 ب) n_i برای ژرمانیم بزرگ‌تر از سیلیکن است از این رو دارای حاملهای اقلیت بیشتری است که در نتیجه جریان اشباع معکوس آن نیز بیشتر خواهد بود. جریان اشباع معکوس برای ژرمانیم در حد میکروآمپر و برای سیلیکن در حد نانوآمپر است.

- ولتاژ آستانه هدایت (V_T) برای دیودهای ژرمانیم تقریباً ۰/۱ ولت و برای دیودهای سیلیکن تقریباً ۰/۵ ولت است. ولتاژ هدایت $V_D(on)$ برای دیودهای ژرمانیم معمولاً ۰/۲ ولت و برای دیودهای سیلیکن ۰/۷ ولت در نظر گرفته می‌شود.

- مقاومت استاتیکی دیود در هر نقطه کار (Q) از مشخصه آن عبارت است از نسبت ولتاژ به جریان دیود در آن نقطه کار، یعنی

$$R_S = \left. \frac{v_D}{i_D} \right|_Q = \frac{V_{DQ}}{I_{DQ}}$$

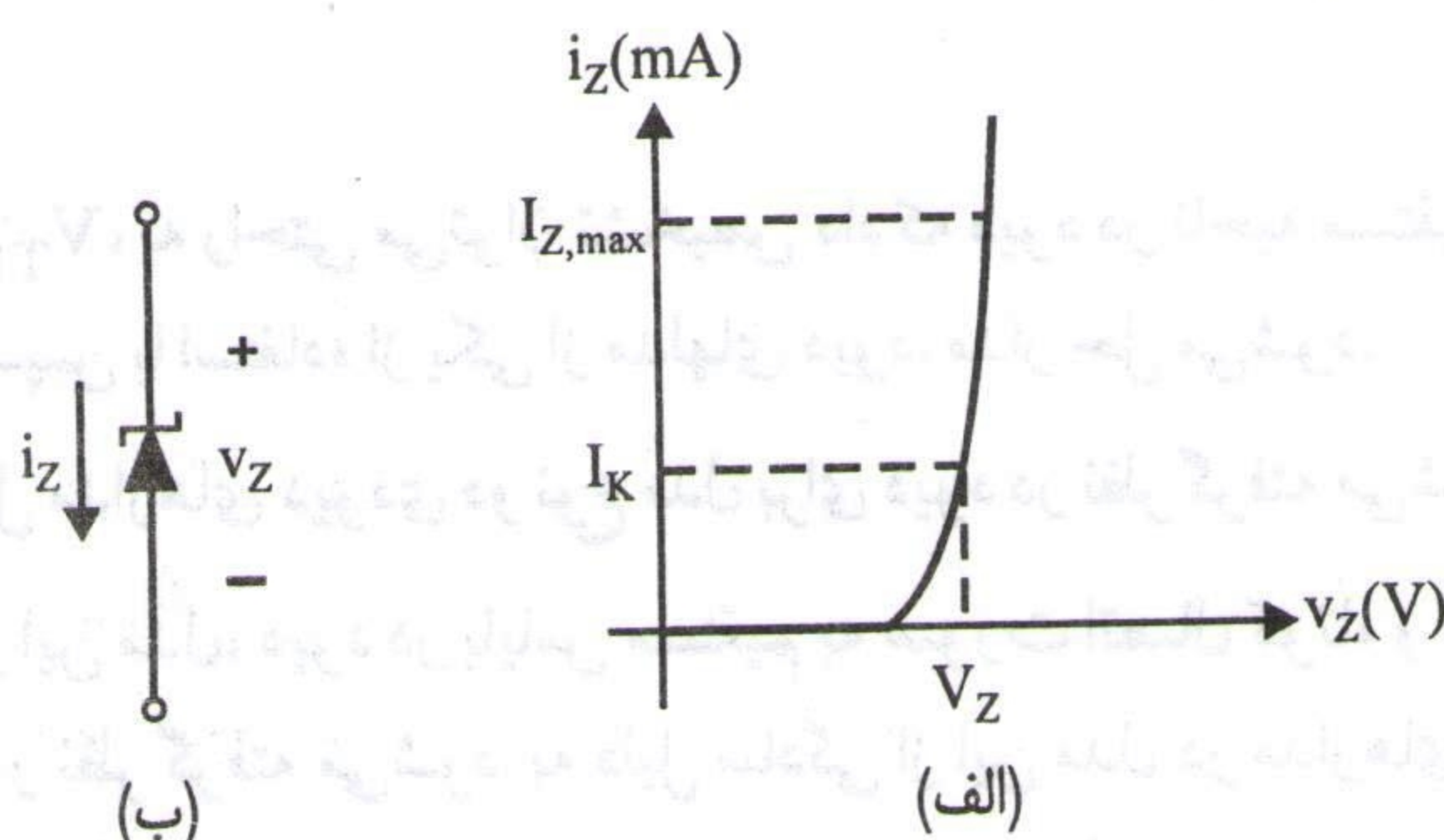
- مقاومت دینامیکی دیود، در واقع مقاومت از دید سیگنال کوچک می‌باشد و عبارت است از نسبت تغییرات ولتاژ به تغییرات جریان دیود حول نقطه کار، یعنی

$$r_d = \frac{\Delta v_D}{\Delta i_D} \cong \left(\frac{di_D}{dv_D} \right)^{-1} \bigg|_Q = \frac{\eta V_T}{I_{DQ} + I_S}$$

- نظر به اینکه در بایاس معکوس $I_{DQ} = -I_S$ است، بنابراین r_d در این حالت بی‌نهایت می‌شود. اما در بایاس مستقیم که $I_{DQ} \gg I_S$ است r_d به صورت زیر به دست می‌آید:

$$r_d \cong \frac{\eta V_T}{I_{DQ}}$$

- **دیود زنر:** مشخصه جریان و ولتاژ و نمایش مداری دیود زنر در شکل ۲-۴ نشان داده شده است. این دیود معمولاً در ناحیه شکست بایاس گردیده و به عنوان تنظیم کننده ولتاژ به کار می‌رود. در بایاس مستقیم مشخصه آن با دیودهای معمولی تفاوتی ندارد. ولتاژ شکست معکوس دیود زنر به چگالی ناخالصی بستگی دارد و در صورتی که شکست ناشی از پدیده زنر باشد، با افزایش ناخالصی، V_Z کاهش می‌یابد. دیودهای زنر با ولتاژها و توانهای مختلف به صورت تجارتي در دسترس می‌باشد. با توجه به مشخصه دیود زنر، برای آنکه به عنوان تنظیم کننده ولتاژ به کار رود باید جریان آن بین یک مقدار حداقل (I_K) و یک مقدار حداکثر ($I_{Z,max}$) محدود گردد.



شکل ۲-۴

- **دیود خازنی (ورکتور):** در یک پیوند P-N می‌توان نواحی P و N و ناحیه تهی را به یک خازن تشبیه کرد. دیودهایی که صرفاً به منظور خازن متغیر ساخته می‌شوند، ورکتور نام دارند و در ناحیه معکوس بایاس می‌گردند. نمایش مداری ورکتور در شکل ۵-۲ نشان داده شده است.



شکل ۵-۲

ظرفیت خازنی ناحیه تهی در واحد سطح، با فرض چگالی ناخالصی یکنواخت برابر است با

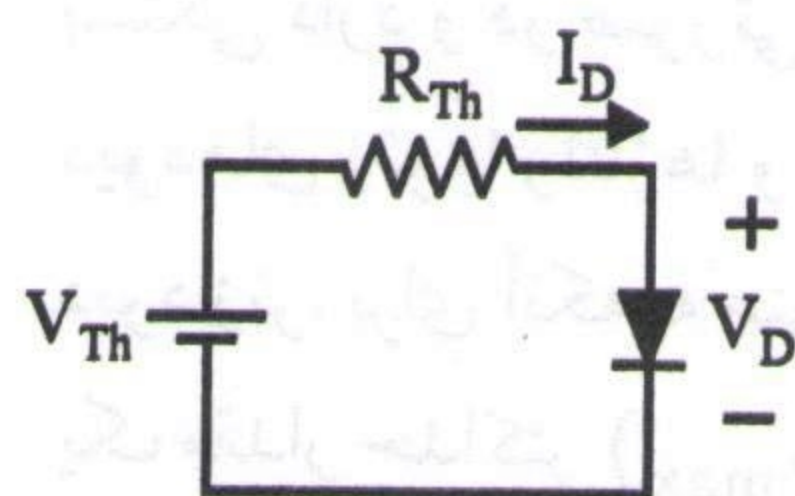
$$C_T = C_{T_0} \left(1 + \frac{V_R}{V_0} \right)^{-1/2}$$

$$C_{T_0} = \left[\frac{q\epsilon N_A N_D}{2V_0(N_A + N_D)} \right]^{1/2}$$

در این رابطه V_R ولتاژ معکوس، V_0 اختلاف پتانسیل تماس و ϵ ضریب دی‌الکتریک ناحیه تهی است.

تحلیل مدارهای دیودی

- به دلیل غیرخطی بودن مدارهای دیودی، برای تجزیه و تحلیل آنها، به طور کلی روش منظمی وجود ندارد. در ساده‌ترین حالت می‌توان یک مدار مقاومتی را به همراه یک دیود در نظر گرفت. با فرض اینکه مدار معادل تونن از دو سر دیود را قرار دهیم (شکل ۶-۲)، خط بار مدار از معادله KVL برابر است با



شکل ۶-۲

$$V_{Th} = R_{Th} I_D + V_D$$

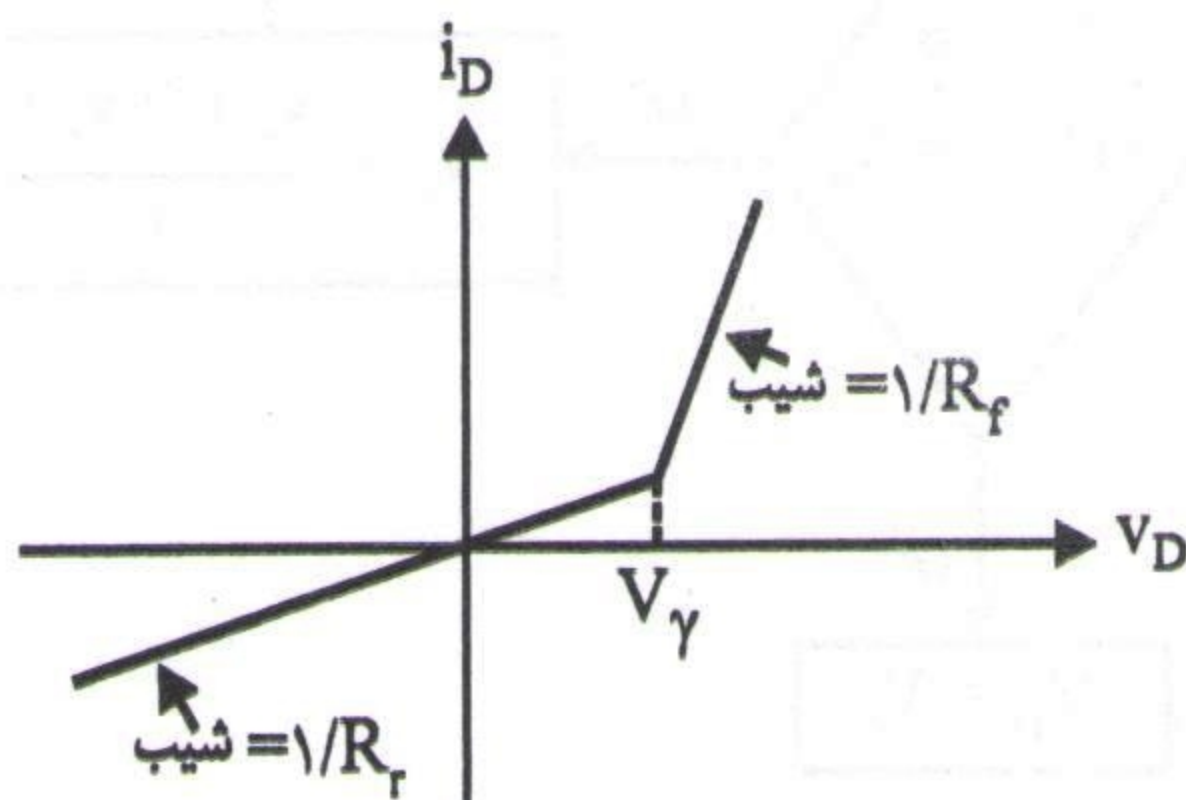
$$\Rightarrow I_D = \frac{1}{R_{Th}} (V_{Th} - V_D)$$

با توجه به مقدار V_{Th} ، به راحتی می‌توان تشخیص داد که دیود در ناحیه مستقیم یا ناحیه معکوس بایاس گردیده است. سپس با استفاده از یکی از مدل‌های دیود، مدار حل می‌شود.

- **مدل‌های دیود:** برای حل مدارهای دیودی دو نوع مدل برای دیود در نظر گرفته می‌شود که عبارتند از

الف) مدل ایده‌آل: در این مدل، دیود در بایاس مستقیم به صورت اتصال کوتاه و در بایاس معکوس به صورت اتصال باز در نظر گرفته می‌شود. به دلیل سادگی از این مدل در مدارهای چند دیودی و موارد عملی استفاده می‌شود و جواب حاصل، تقریب بسیار خوبی از حالت واقعی خواهد بود. برای اینکه این تقریب به حالت واقعی نزدیک‌تر شود، دیود را در حالت بایاس مستقیم با یک منبع ولتاژ با مقدار $V_D(on)$ جایگزین می‌نمایند.

ب) مدل خطی پاره‌ای دیود: در بایاس مستقیم و در حالت $V_D > V_\gamma$ ، دیود با یک منبع ولتاژ و مقاومت سری R_f جایگزین می‌گردد و در بایاس معکوس توسط مقاومت بزرگ R_r مدل می‌شود. این مدل در شکل ۷-۲ نمایش داده شده است.



شکل ۷-۲

روشهای حل مدارهای دیودی

الف) چنانچه منحنی مشخصه دیود به کار رفته در یک مدار معلوم باشد، کافی است خط بار را روی آن رسم کرده و نقطه برخورد خط بار و منحنی مشخصه و در نتیجه جریان و ولتاژ دیود را به دست آورد. در غیر این صورت با توجه به ناحیه کار دیود و با به کارگیری یکی از مدل‌های دیود، آن را جایگزین و مدار را حل می‌نماییم

ب) در صورتی که معادله جریان - ولتاژ دیود معلوم باشد، ابتدا خط بار را به دست آورده و سپس دو معادله و دو مجهول را به روش عددی به صورت زیر حل نمایید:

$$I_D = \frac{1}{R_{Th}} (V_{Th} - V_D) \quad , \quad I_D = I_S (e^{V_D/\eta V_T} - 1)$$

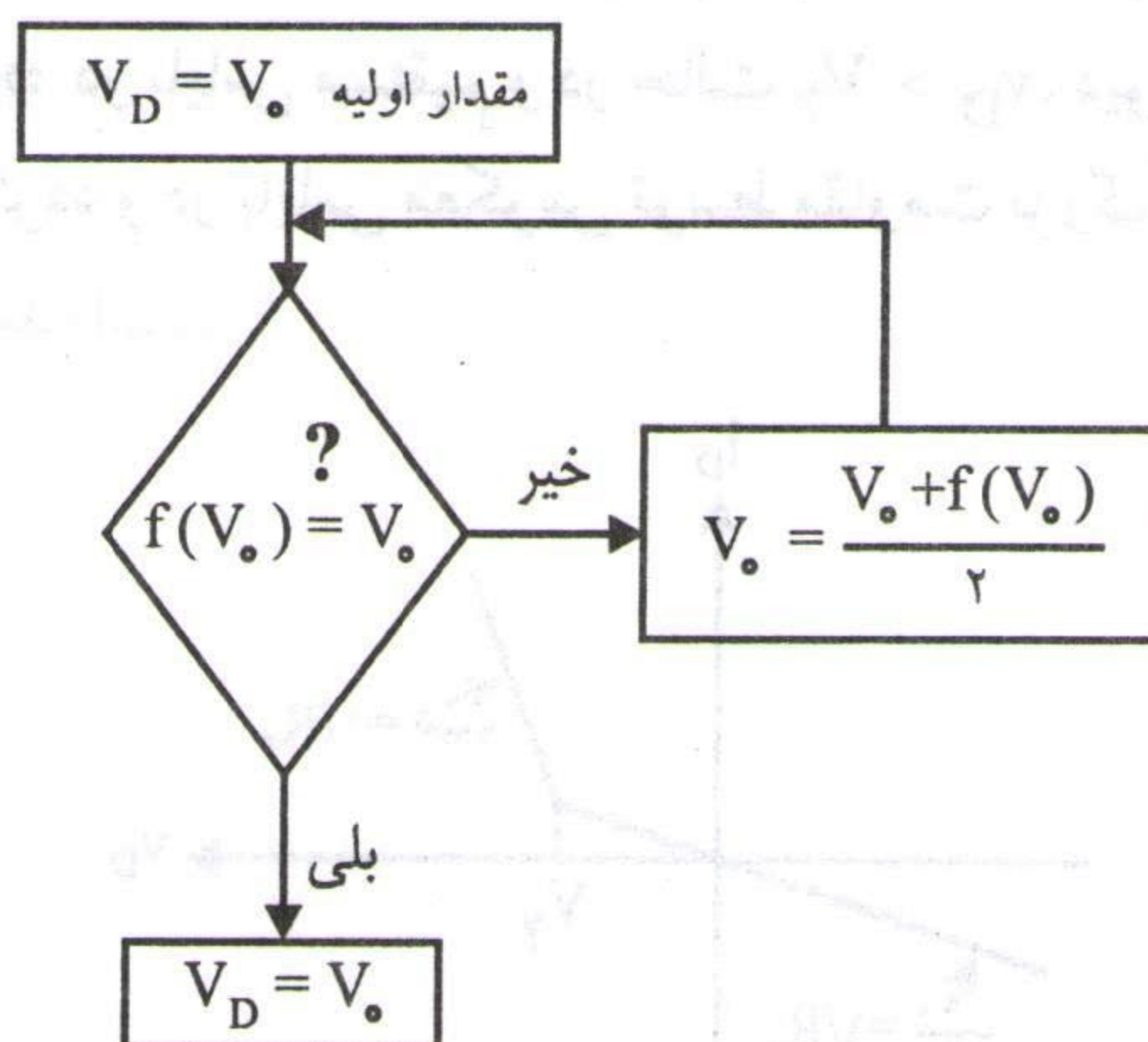
$$\Rightarrow \frac{V_{Th} - V_D}{R_{Th} I_S} + 1 = e^{V_D/\eta V_T}$$

روش سعی و خطا برای حل این معادله وقت گیر است از این رو از یک روش محاسبات عددی که مراحل آن در زیر توضیح داده شده استفاده کنید:

ابتدا برای اینکه محاسبه و اگرانشود از طرفین معادله فوق لگاریتم گرفته تا حالت نمایی آن حذف گردد.

$$V_D = \eta V_T \ln \left(\frac{V_{Th} - V_D}{R_{Th} I_S} \right) = f(V_D)$$

سپس با توجه به جنس دیود یک مقدار اولیه مناسب برای V_D انتخاب کرده و برنامه‌ای کوتاه برای روندنمای نشان داده شده در شکل ۸-۲ بنویسید. روندنمای مزبور برای معادله اخیر از همگرایی خوبی برخوردار بوده و معمولاً جواب می‌دهد.



شکل ۲-۸

● برای حل مدارهای دیودی که شامل بیش از یک دیود هستند از جمله مدارهای برش، بهتر است که از روش سه مرحله‌ای (فرض مناسب - حل مدار - بررسی صحت فرض) استفاده کرد و این روند را تا جایی که کلیه حالات مدار در نظر گرفته شوند ادامه داد. فرض، می‌تواند قطع یا وصل بودن یک یا چند دیود باشد و انتخاب فرض اولیه در ساده کردن تحلیل مدار بسیار مؤثر است. در این گونه مدارها جهت سادگی معمولاً از مدل ایده‌آل دیود استفاده می‌شود.

● تجزیه و تحلیل سیگنال کوچک دیود: برای این منظور مدار DC را حل کرده و مقدار مقاومت دینامیکی دیود از معادله $r_d = \eta V_T / I_{DQ}$ به دست می‌آید. سپس دیود در مدار معادل ac با مقاومت r_d جایگزین می‌گردد.

یکسوکنده‌ها و مدارهای صافی

● مقادیر متوسط و مؤثر برای یک سیگنال سینوسی با دامنه V_m به ترتیب برابر صفر و $V_m / \sqrt{2}$ است و مقادیر متوسط و مؤثر برای یک سیگنال سینوسی یکسو شده تمام موج به ترتیب V_m / π و $V_m / 2$ می‌باشد.

● برای یکسوساز نیم موج بدون صافی خازنی که به مقاومت R_L وصل شده و دیود دارای مقاومت مستقیم R_f می‌باشد، مقادیر متوسط و مؤثر ولتاژ بار برابر است با

$$V_{dc} = \frac{V_m R_L}{\pi (R_f + R_L)}, \quad V_{rms} = \frac{V_m R_L}{\sqrt{2} (R_f + R_L)}$$

● برای یکسوساز تمام موج بدون صافی خازنی، مقادیر متوسط و مؤثر ولتاژ بار تقریباً برابر است با

$$V_{dc} = \frac{2 V_m R_L}{\pi (R_f + R_L)}, \quad V_{rms} = \frac{V_m R_L}{\sqrt{2} (R_f + R_L)}$$

● در یکسوساز نیم موج با صافی خازنی مقدار DC ولتاژ خروجی عبارت است از

$$V_{dc} = V_m - \frac{1}{2} V_r - V_{D(on)}, \quad V_r = \frac{I_{dc}}{fC} = \frac{V_{dc}}{R_L fC}$$

در روابط فوق V_{dc} و I_{dc} به ترتیب ولتاژ و جریان مستقیم بار R_L ، f فرکانس برق ورودی، C مقدار خازن صافی، V_r ولتاژ ریپل و V_m دامنه ولتاژ سینوسی در خروجی ثانویه ترانسفورماتور است.

● در یکسوساز تمام موج با صافی خازنی مقدار DC ولتاژ خروجی برابر است با

$$V_{dc} = V_m - \frac{1}{2} V_r - m V_D(\text{on}), \quad V_r = \frac{I_{dc}}{2fC} = \frac{V_{dc}}{2R_L fC}$$

m برای یکسوساز با ترانسفورماتور سر وسط برابر ۱ و برای یکسوساز پل برابر ۲ است.

● می توان نشان داد که در یکسوساز تمام موج ولتاژ مؤثر ریپل با ولتاژ ریپل دارای رابطه زیر است:

$$v_r(\text{rms}) = \frac{V_r}{2\sqrt{3}}$$

● ضریب ریپل به صورت زیر تعریف می گردد:

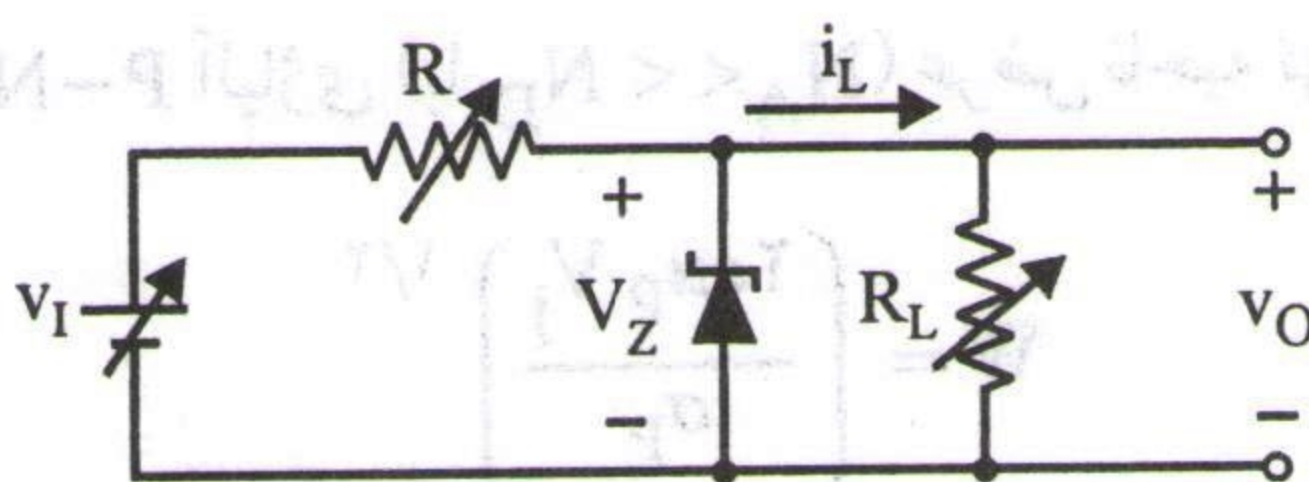
$$\% \text{r.f.} = \frac{v_r(\text{rms})}{V_{dc}} \times 100$$

● برای یک تنظیم کننده ولتاژ با استفاده از دیود زنر (شکل ۹-۲)، طراحی باید به گونه ای باشد که جریان زنر

در محدوده I_K تا $I_{Z,\text{max}}$ تغییر کند. بنابراین

$$i_{Z,\text{max}} \geq \frac{V_{I,\text{max}} - V_Z}{R_{\text{min}}} - i_{L,\text{min}}, \quad I_K \leq \frac{V_{I,\text{min}} - V_Z}{R_{\text{max}}} - i_{L,\text{max}}$$

$$i_{L,\text{max}} = \frac{V_Z}{R_{L,\text{min}}}, \quad i_{L,\text{min}} = \frac{V_Z}{R_{L,\text{max}}}$$



شکل ۹-۲

۲-۲ مسائل نمونه

۱. برای یک دیود سیلیکنی $N_A \gg N_D$, $N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ و $\epsilon = 12\epsilon_0$ و $V_0 = 0.5 \text{ V}$ می باشد. در

صورتی که یک ولتاژ معکوس ۱۰ ولتی به آن اعمال شود، مطلوب است:

(الف) عرض ناحیه تهی (W).

(ب) مقدار شدت میدان الکتریکی در محل پیوند.

(ج) مقدار ظرفیت خازنی ناحیه تهی.

$$W = \left[\frac{\epsilon V_j}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{حل: الف)}$$

$$N_A \gg N_D \Rightarrow W \cong \left[\frac{\epsilon V_j}{q} \left(\frac{1}{N_D} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$V_j = 1.0 + 0.5 = 1.5 \text{ V} \Rightarrow W = 3.73 \mu\text{m}$$

$$X_N = \left[\frac{\epsilon V_j}{q N_D (1 + N_D/N_A)} \right]^{\frac{1}{2}} \approx 3.73 \mu\text{m} = W \quad \text{ب)}$$

$$E_s = -\frac{q N_D X_N}{\epsilon} = -56.2 \times 10^3 \text{ V/cm}$$

$$C_T = C_{T_0} \left(1 + \frac{V_r}{V_0} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad \text{ج)}$$

$$C_{T_0} = \left[\frac{q \epsilon N_A N_D}{2 V_0 (N_A + N_D)} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{q \epsilon N_D}{2 V_0 (1 + N_D/N_A)} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{q \epsilon N_D}{2 V_0} \right]^{\frac{1}{2}} = 1.3 \times 10^{-8} \text{ F/cm}^2$$

$$\Rightarrow C_T = 2.84 \times 10^{-9} \text{ F/cm}^2$$

۲. ثابت کنید که در یک پیوند P-N آلایزی (با $N_A \ll N_D$) عرض ناحیه تهی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$W = \left(\frac{\epsilon \mu_p V_j}{\sigma_p} \right)^{1/2}$$

حل: از معادله پواسون داریم

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} \Rightarrow \frac{d}{dx} [-E(x)] = -\rho/\epsilon$$

در ناحیه P پیوند داریم

$$\rho = -q N_A \Rightarrow \frac{d}{dx} [-E] = \frac{q N_A}{\epsilon}$$

$$\Rightarrow \int_{-x_p}^x \frac{d}{dx} [-E] = \int_{-x_p}^x \frac{q N_A}{\epsilon} \Rightarrow E(x) - E(-x_p) = -\frac{q N_A}{\epsilon} (x + x_p)$$

$$N_A \ll N_D \Rightarrow x_p \gg x_n \Rightarrow W = x_p + x_n \approx x_p$$

بنابراین

$$E(x) - E(-x_p) = -\frac{q N_A}{\epsilon} (x + W)$$

مقدار شدت میدان الکتریکی در $x = -x_p$ برابر صفر است. پس

$$E(-x_p) = 0 \Rightarrow E(x) = -\frac{q N_A}{\epsilon} (x + W)$$

و تغییرات ولتاژ برابر است با

$$\frac{dV}{dx} = -E(x) \Rightarrow dV = \frac{q N_A}{\epsilon} (x + W) dx$$

$$\int_{-x_p}^x dV = \frac{q N_A}{\epsilon} \int_{-x_p}^x (t + W) dt \Rightarrow V(x) - V(-x_p) = \frac{q N_A}{\epsilon} \left[\frac{t^2}{2} + Wt \right]_{-x_p}^x$$

مقدار ولتاژ در $x = -x_p$ برابر صفر است. بنابراین

$$\Rightarrow V(x) = \frac{q N_A}{\epsilon} \left[\left(\frac{x^2}{2} + Wx \right) - \left(\frac{x_p^2}{2} - Wx_p \right) \right]$$

$$x_p \approx W \Rightarrow V(x) = \frac{q N_A}{\epsilon} \left[\left(\frac{x^2}{2} + Wx \right) + \frac{W^2}{2} \right]$$

تقریباً در $x=0$ ، ولتاژ $V(x)$ ماکزیمم می شود که همان V_j خواهد بود، پس

$$V_j = V(0) = \frac{q N_A W^2}{2\epsilon}$$

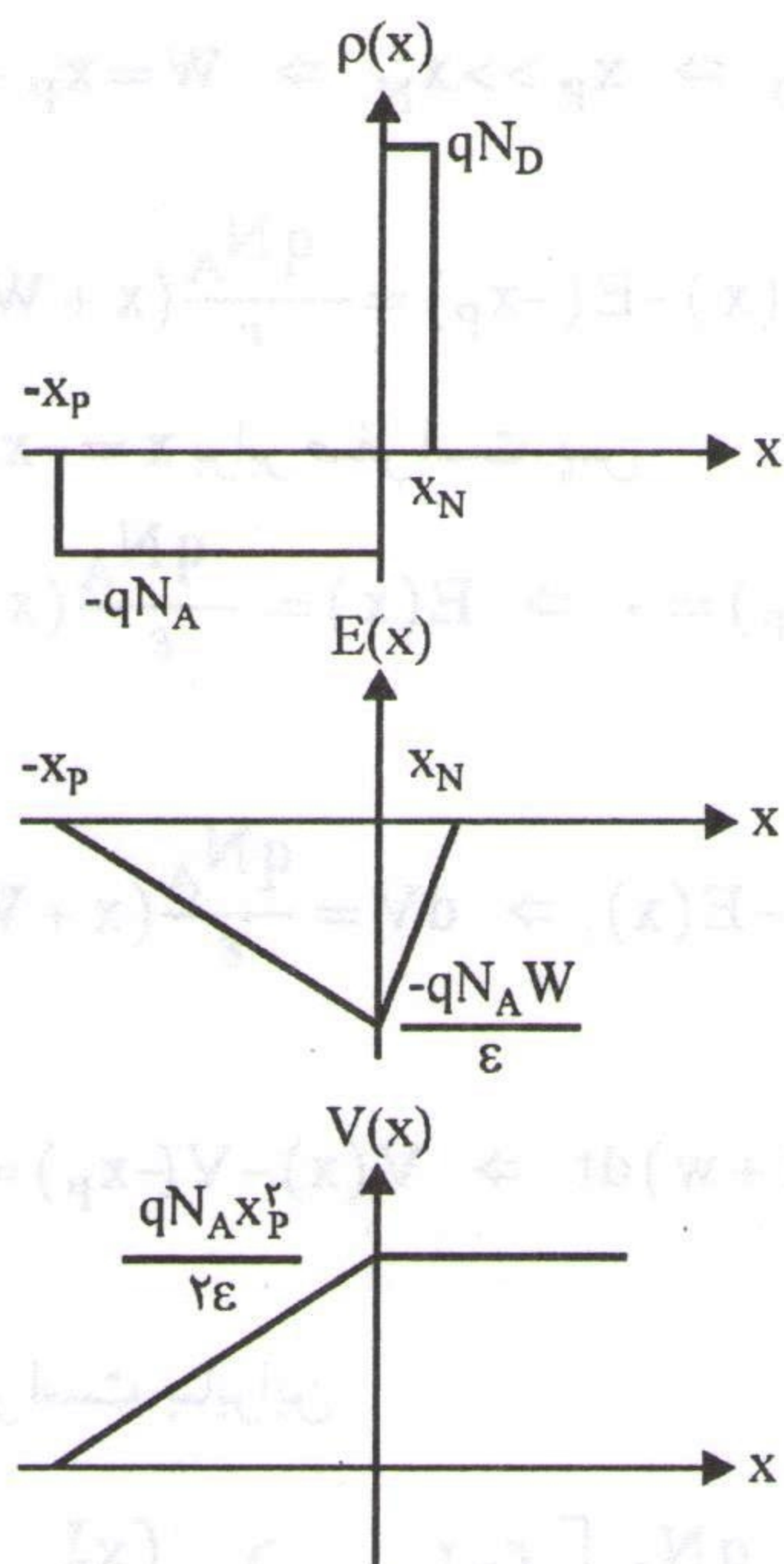
از طرفی برای ناحیه P پیوند داریم

$$\sigma = \sigma_p = n q \mu_n + p q \mu_p \approx p q \mu_p = N_A q \mu_p \Rightarrow N_A = \frac{\sigma_p}{q \mu_p}$$

$$\Rightarrow V_j = \frac{\sigma_p W^2}{2 \mu_p \epsilon}$$

$$\Rightarrow W = \left(\frac{2 \epsilon \mu_p V_j}{\sigma_p} \right)^{1/2}$$

در شکل ۲-۱۰ منحنی تغییرات $\rho(x)$ ، $E(x)$ و $V(x)$ رسم شده است.



شکل ۲-۱۰

۳. الف) ثابت کنید که برای یک پیوند آلیاژی P-N از جنس سیلیکن (با $N_A \ll N_D$)، ظرفیت خازنی ناحیه تهی (C_T) برحسب پیکوفاراد بر سانتیمتر مربع از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$C_T = 2.913 \times 10^{-4} \left(\frac{N_A}{V_j} \right)^{1/2}$$

ب) در صورتی که مقاومت ویژه (ρ) بلور برابر $4 \Omega\text{-cm}$ ، اختلاف پتانسیل تماس V_0 برابر 0.3 ولت، ولتاژ خارجی اعمال شده 4 ولت و سطح مقطع دایره‌ای به قطر 1.25 mm باشد، مقدار C_T را محاسبه نمایید.

حل: با توجه به مسأله ۲ برای حالت $N_A \ll N_D$ داریم

$$V_j = \frac{q N_A W^2}{2\epsilon}, \quad V_j = V_d + V_0$$

که V_j اختلاف پتانسیل دو سر پیوند با وجود ولتاژ معکوس خارجی V_d است. V_0 نیز اختلاف پتانسیل تماس است. با استفاده از تعریف ظرفیت خازنی داریم

$$C_T = \frac{dQ}{dV_d} = \left(\frac{dQ}{dW} \right) \left(\frac{dW}{dV_j} \right) \left(\frac{dV_j}{dV_d} \right)$$

$$\frac{dQ}{dW} = \frac{d}{dW} (q N_A A W) = q N_A A$$

که در آن A سطح مقطع پیوند است.

$$V_j = \frac{q N_A W^2}{2\epsilon} \Rightarrow dV_j = \frac{q N_A}{2\epsilon} (2W) dW \Rightarrow \frac{dW}{dV_j} = \frac{\epsilon}{q N_A W}$$

$$V_j = V_d + V_o \Rightarrow \frac{dV_j}{dV_d} = 1$$

$$\Rightarrow C_T = (q N_A A) \left(\frac{\epsilon}{q N_A W} \right) \times 1 = \frac{\epsilon A}{W}$$

$$V_j = \frac{q N_A W^2}{2\epsilon} \Rightarrow W = \left(\frac{2\epsilon V_j}{q N_A} \right)^{1/2} \Rightarrow C_T = \epsilon A \left(\frac{q N_A}{2\epsilon V_j} \right)^{1/2} = A \left(\frac{\epsilon q N_A}{2 V_j} \right)^{1/2}$$

بنابراین C_T در واحد سطح برابر است با

$$C_T = \sqrt{\frac{\epsilon q}{2}} \left(\frac{N_A}{V_j} \right)^{1/2}$$

برای سیلیکن داریم

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_o = 12\epsilon_o \Rightarrow C_T = 2.913 \times 10^{-4} \left(\frac{N_A}{V_j} \right)^{1/2} \text{ pF/cm}^2$$

۴. ظرفیت خازنی ناحیه تهی یک پیوند P-N ژرمانیم با سطح مقطع 0.25 mm^2 و عرض ناحیه تهی رابه $3 \times 10^{-4} \text{ cm}$ دست آورید.

حل: با جایگذاری مقادیر در رابطه ظرفیت خازنی داریم

$$C_T = \frac{\epsilon A}{W} = \frac{\epsilon_r \epsilon_o A}{W} = 11.8 \text{ pF}$$

۵. نشان دهید که در یک پیوند P-N با چگالی ناخالصی یکنواخت، ظرفیت خازنی ناحیه تهی در واحد سطح با ولتاژ معکوس دو سر پیوند V_r به صورت زیر ارتباط دارد:

$$C_T = C_{T0} \left(1 + \frac{V_r}{V_o} \right)^{-1/2}$$

که در آن V_o اختلاف پتانسیل تماس و C_{T0} به صورت زیر است:

$$C_{T0} = \left[\frac{q \epsilon N_A N_D}{2 V_o (N_A + N_D)} \right]^{1/2}$$

حل: برای ظرفیت خازن رابطه زیر برقرار است:

$$C_T = \frac{dQ}{dV_r} = \frac{dQ}{dx_p} \frac{dx_p}{dV_r}$$

برای بار الکتریکی ناحیه تهی طرف P پیوند داریم

$$Q = (qN_D)(Ax_p) \Rightarrow \frac{dQ}{dx_p} = qN_DA$$

اما x_p برابر است با

$$x_p = \left[\frac{\epsilon(V_0 + V_r)}{qN_A(1 + N_A/N_D)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\Rightarrow \frac{dx_p}{dV_r} = \frac{1}{2} \frac{\epsilon}{qN_A(1 + N_A/N_D)} \left[\frac{\epsilon(V_0 + V_r)}{qN_A(1 + N_A/N_D)} \right]^{\frac{1}{2} - 1}$$

$$= \left[\frac{\epsilon}{2qN_A(1 + N_A/N_D)V_0} \right]^{\frac{1}{2}} (1 + V_r/V_0)^{-\frac{1}{2}}$$

$$\Rightarrow C_T = A \left[\frac{q\epsilon N_A}{2(1 + N_A/N_D)V_0} \right]^{\frac{1}{2}} \left(1 + \frac{V_r}{V_0} \right)^{-\frac{1}{2}} = AC_T \cdot \left(1 + \frac{V_r}{V_0} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

بنابراین ظرفیت خازنی در واحد سطح عبارت است از

$$C_T = C_{T_0} \cdot \left(1 + \frac{V_r}{V_0} \right)^{-\frac{1}{2}} \text{ F/cm}^2$$

واضح است که با افزایش ولتاژ معکوس V_r ، عرض ناحیه تهی افزایش یافته و در نتیجه ظرفیت خازن کاهش می‌یابد که از عبارت فوق نیز همین نتیجه به دست می‌آید.

۶. در دیود ژرمانیم پدیده شکست زنر در $E_Z = 2 \times 10^7$ ولت بر متر اتفاق می‌افتد. نشان دهید $V_Z = 50.93 \rho_P$ است، که در آن ρ_P مقاومت ویژه بلور ژرمانیم نوع P می‌باشد. فرض کنید $N_A \ll N_D$ است.

حل: با توجه به نتایج مسأله ۲ در حالت $N_A \ll N_D$ داریم

$$V_j = \frac{qN_A W^2}{2\epsilon}, \quad E(x) = -\frac{qN_A}{\epsilon}(x + W), \quad -x_p \leq x < 0$$

قدر مطلق $E(x)$ به ازای $x=0$ ، حداکثر می‌گردد. بنابراین

$$E_Z = |E(\cdot)| = \frac{q N_A W}{\epsilon}$$

$$V_Z = V_j = \frac{q N_A}{2\epsilon} \left(\frac{\epsilon E_Z}{q N_A} \right)^2 = \frac{\epsilon E_Z^2}{2 q N_A}$$

$$\rho_P = \frac{1}{q P \mu_P} = \frac{1}{q N_A \mu_P} \Rightarrow q N_A = \frac{1}{\rho_P \mu_P}$$

$$\Rightarrow V_Z = \left(\frac{\epsilon \rho_P \mu_P}{2} \right) E_Z^2$$

با جایگذاری مقادیر $\mu_P = 1800 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ ، $\epsilon = 16\epsilon_0$ و $E_Z = 2 \times 10^4 \text{ V/cm}$ در رابطه فوق داریم

$$V_Z = 50.93 \rho_P$$

۷. ثابت کنید که در یک دیود زنر که در آن $N_A \gg N_D$ است، ولتاژ زنر (V_Z) از رابطه زیر به دست می آید:

$$V_Z = \frac{\epsilon E_Z^2}{2 q N_D}$$

که در آن E_Z میدان لازم برای شکست زنر است.

راهنمایی: از رابطه V_0 بر حسب W و نیز روابط E_0 استفاده کنید.

حل: در مسأله ۶ به ازای حالت $N_A \ll N_D$ رابطه $V_Z = \frac{\epsilon E_Z^2}{2 q N_A}$ را به دست آوردیم. بنابراین در حالت

$N_D \ll N_A$ به طور مشابه می توان رابطه زیر را به دست آورد:

$$V_Z = \frac{\epsilon E_Z^2}{2 q N_D}$$

۸. جریان یک دیود از جنس سیلیکن در ولتاژ 0.26 V و دمای 300°C درجه کلوین برابر یک میلی آمپر است. مشخصه $v-i$ آن را به دست آورید. برای این دیود η را برابر یک در نظر بگیرید.

حل: از معادله ولتاژ-جریان دیود داریم

$$I_D = I_S \left(e^{V_D / \eta V_T} - 1 \right)$$

V_T را در 300°C درجه کلوین برابر 26 mV و ولت می گیریم بنابراین با قرار دادن نقطه $(0.26 \text{ V}, 1 \text{ mA})$ در معادله فوق، جریان اشباع معکوس دیود مشخص می گردد.

$$1 = I_S \left(e^{0.26 / 0.026} - 1 \right) = 220.2547 I_S \Rightarrow I_S = 45.4 \text{ nA}$$

بنابراین مشخصه ولتاژ-جریان دیود برابر است با

$$I_D = 45.4 \times 10^{-9} \left(e^{38.46 V_D} - 1 \right)$$

۹. الف) مطلوب است محاسبه مقادیر I_S و η برای یک دیود پیوندی که در ولتاژ مستقیم 0.7 ولت، جریان 1 mA و در ولتاژ 0.8 ولت، جریان 10 mA از آن عبور می‌کند.

ب) مقاومت دینامیکی این دیود در ولتاژهای مستقیم 0.7 و 0.8 ولت چقدر است؟

حل: الف)
$$I_1 = I_S (e^{V_1/\eta V_T} - 1) \approx I_S e^{V_1/\eta V_T}, \quad I_2 = I_S (e^{V_2/\eta V_T} - 1) \approx I_S e^{V_2/\eta V_T}$$
$$\Rightarrow \frac{I_2}{I_1} = e^{(V_2 - V_1)/\eta V_T}$$

با جایگذاری مقادیر داده شده در عبارت فوق، $\eta = 1.67$ حاصل می‌شود. حال داریم

$$I_1 \approx I_S e^{V_1/\eta V_T} \Rightarrow I_S = I_1 e^{-V_1/\eta V_T} \Rightarrow I_S = 0.1 \text{ nA}$$

ب)
$$I_D \gg I_S \Rightarrow r_d = \frac{\eta V_T}{I_D}$$

$$I_D = 1 \text{ mA} \Rightarrow r_d = 43.4 \Omega, \quad I_D = 10 \text{ mA} \Rightarrow r_d = 4.34 \Omega$$

۱۰. مقدار جریان اشباع معکوس دیودی به ازای هر 10°C افزایش دما، دو برابر می‌شود.

الف) چه افزایش دمایی مقدار این جریان را تا 30° برابر مقدارش در دمای معمولی بالا می‌برد؟

ب) چه تغییری در دما باعث کاهش جریان اشباع معکوس تا سطح 0.1 مقدارش در دمای معمولی می‌شود؟

حل: الف)
$$I_S(T_2) = I_S(T_1) \times 2^{(T_2 - T_1)/10}$$

$$\Rightarrow 30 \cdot I_S(T_1) = I_S(T_1) \times 2^{(T_2 - T_1)/10}$$

$$\Rightarrow \log 30 = \frac{T_2 - T_1}{10} \Rightarrow T_2 - T_1 = 49.1^\circ \text{C}$$

بنابراین افزایش دما به اندازه 49.1°C ، جریان اشباع معکوس را 30 برابر می‌کند.

ب)
$$I_S(T_2) = 0.1 \times I_S(T_1) = I_S(T_1) \times 2^{(T_2 - T_1)/10}$$

$$\Rightarrow 0.1 = 2^{(T_2 - T_1)/10} \Rightarrow T_2 - T_1 = -33.2^\circ \text{C}$$

به عبارت دیگر کاهش دما به اندازه 33.2°C باعث می‌شود که جریان اشباع معکوس ده برابر کوچک‌تر گردد.

۱۱. از یک دیود سیلیکن در دمای 300°K و در ولتاژ 0.7 ولت، جریان 5 mA عبور می‌کند. چنانچه ولتاژ را تا

حد 0.8 ولت افزایش دهیم جریان دیود چقدر خواهد شد؟ برای این دیود I_S چقدر است؟ η را برابر

۲ فرض کنید.

$$I_D = I_S \left(e^{V_D/\eta V_T} - 1 \right) = I_S \left(e^{V_D/2 \times 0.026} - 1 \right) \quad \text{حل:}$$

به ازای ولتاژ ۰٫۷ ولت جریان ۵mA است، پس

$$I_S = 7.12 \text{ nA}$$

جریان دیود به ازای ولتاژ ۰٫۸ ولت برابر است با

$$I_D = I_S \left(e^{0.8/2 \times 0.026} - 1 \right) = 34.19 \text{ mA}$$

۱۲. الف) در دمای معمولی در چه ولتاژی جریان اشباع معکوس یک دیود سیلیکونی به ۹۵ درصد مقدار اشباع آن می‌رسد؟

ب) نسبت جریان دیود با ولتاژ مستقیم ۰٫۱ ولت را به جریان دیود با همان مقدار ولتاژ معکوس به دست آورید.

ج) با فرض $I_S = 10 \text{ nA}$ ، جریان دیود را برای ولتاژهای ۰٫۵، ۰٫۶ و ۰٫۷ ولت محاسبه نمایید.

$$I_D = -0.95 I_S = I_S (e^{V_D/\eta V_T} - 1) \quad \text{حل: الف)}$$

$$\Rightarrow V_D = \eta V_T \ln(0.05) = 2 \times 26 \ln(0.05) = -156 \text{ mV}$$

$$I_{D_1} = I_S (e^{0.1/\eta V_T} - 1) \quad \text{ب)}$$

$$I_{D_2} = I_S (e^{-0.1/\eta V_T} - 1)$$

با جایگذاری مقادیر $V_T = 26 \text{ mV}$ و $\eta = 2$ داریم

$$\frac{I_{D_1}}{I_{D_2}} = -6.84$$

$$I_D = I_S (e^{V_D/\eta V_T} - 1) \quad \text{ج)}$$

$$V_D = 0.5 \text{ V} \Rightarrow I_D = 0.15 \text{ mA}$$

$$V_D = 0.6 \text{ V} \Rightarrow I_D = 1.02 \text{ mA}$$

$$V_D = 0.7 \text{ V} \Rightarrow I_D = 7.02 \text{ mA}$$

۱۳. الف) در صورتی که جریان اشباع معکوس یک دیود سیلیکونی برابر ۱nA باشد به ازای چه ولتاژ مستقیمی جریان دیود برابر $0.5 \mu\text{A}$ خواهد شد؟

ب) چنانچه ولتاژ محاسبه شده در بند الف) را به یک دیود ژرمانیم در جهت مستقیم اعمال کنیم چه جریانی از آن عبور خواهد کرد؟ برای این دیود $I_S = 20 \mu\text{A}$ است.

$$I_D = I_S (e^{V_D/\eta V_T} - 1) \quad \text{حل: الف)}$$

$$\Rightarrow 0.5 = 1 \times 10^{-3} (e^{V_D/2 \times 26} - 1) \Rightarrow V_D = 0.323V$$

$$I_D = I_S (e^{V_D/\eta V_T} - 1) = 9.95mA \quad \text{ب)}$$

۱۴. یک دیود سیلیکن در ولتاژ مستقیم ۰.۷ ولت در حال کار است. چنانچه دما از ۲۵°C به ۵۵°C - تقلیل یابد جریان دیود با چه ضریبی تغییر خواهد کرد؟ η را برابر یک فرض کنید.

حل: جریان اشباع معکوس به ازای هر ۱۰°C افزایش دما دو برابر می‌شود بنابراین

$$I_S(-55^\circ C) = I_S(25^\circ C) \times 2^{(-55-25)/10} = I_S(25^\circ C) / 256$$

از طرفی V_T نیز با دما، تغییراتی به صورت زیر دارد:

$$V_T = \frac{KT}{q}, \quad K = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}, \quad q = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$T_1 = 273 + 25 = 298^\circ K \Rightarrow V_{T_1} = 25.7mV$$

$$T_2 = 273 - 55 = 218^\circ K \Rightarrow V_{T_2} = 19mV$$

حال با جایگذاری در معادله دیود در حالت هدایت مستقیم داریم

$$I_D(25^\circ C) = I_S(25^\circ C) e^{V_D/V_{T_1}} = I_S(25^\circ C) e^{0.7/0.0257} = 6.75 \times 10^{11} I_S(25^\circ C)$$

$$I_D(-55^\circ C) = \frac{1}{256} I_S(25^\circ C) e^{0.7/0.019} \approx 3.91 \times 10^{13} I_S(25^\circ C)$$

$$\Rightarrow \frac{I_D(-55^\circ C)}{I_D(25^\circ C)} \approx 57.93$$

۱۵. چنانچه در یک دیود ژرمانیم ولتاژ دو سر آن ۵۰mV افزایش یابد، جریان آن به چه نسبتی تغییری خواهد کرد ($\eta = 1$ و $V_T = 25mV$).

$$I_D = I_S (e^{V_D/\eta V_T} - 1) = I_S (e^{40 V_D} - 1) \quad \text{حل:}$$

برای $V \gg V_T$ داریم

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{I_S \exp[40 V_2]}{I_S \exp[40 V_1]} = \exp[40 (V_2 - V_1)] = \exp[40 \times 0.05] = 7.39$$

به عبارت دیگر، با افزایش ۵۰mv در ولتاژ دو سر دیود، جریان آن ۷.۳۹ برابر می‌گردد.

۱۶. یک دیود سیلیکونی در دمای 300°K و در ولتاژ 0.7V ولت، دارای جریان 5mA است. با فرض $\eta = 2$ و $V_T = 26\text{mV}$

(الف) جریان اشباع معکوس را محاسبه نمایید.

(ب) اگر ولتاژ به 0.8V ولت برسد جریان چقدر خواهد شد؟

(ج) چه تغییر ولتاژی در ناحیه هدایت باعث ده برابر شدن جریان می شود؟ (در دمای 300°K)

حل: (الف) $I_D = I_S (e^{V_D/\eta V_T} - 1) \Rightarrow 5 = I_S (e^{0.7/2 \times 0.026} - 1) \Rightarrow I_S = 7.12\text{nA}$

(ب) $I_D = I_S (e^{0.8/2 \times 0.026} - 1) = 34.2\text{mA}$

(ج) $I_2 = 10 I_1 \Rightarrow I_S e^{V_2/\eta V_T} = 10 I_S e^{V_1/\eta V_T}$

$\Rightarrow \Delta V = \eta V_T \ln 10 \approx 0.12\text{V}$

۱۷. یک دیود در دمای 125°C دارای جریان اشباع معکوس برابر $0.1\mu\text{A}$ است. با فرض $\eta = 2$ و $V_T = 26\text{mV}$

(الف) در دمای 105°C مقاومت دینامیکی را در ولتاژ مستقیم 0.8V ولت به دست آورید.

(ب) در همان دما مقاومت دینامیکی را در ولتاژ معکوس 0.8V ولت محاسبه نمایید.

حل: (الف) $I_S(125^\circ\text{C}) = 0.1\mu\text{A}$

$\star I_S(105^\circ\text{C}) = I_S(125^\circ\text{C}) \times 2^{(105-125)/10} = 0.025\mu\text{A}$

جریان دیود در دمای 105°C و در ولتاژ 0.8V ولت برابر است با

$I_D = 0.025 \times 10^{-6} \left(e^{0.8/2 \times 0.026} - 1 \right) \approx 0.12\text{A}$

$r_d = \frac{\eta V_T}{I_D} \approx 0.43\Omega$

(ب) $r_d = \frac{\eta V_T}{I_S e^{V_D/\eta V_T}} = \frac{2 \times 0.026}{0.025 \times 10^{-6} e^{-0.8/2 \times 0.026}} \approx 1.13\Omega$

۱۸. یک دیود پیوندی در یک مدار، توسط یک منبع جریان I تغذیه می شود. اگر این دیود با یک دیود مشابه خود موازی شود ولتاژ مستقیم دو سر آن چه تغییری می کند؟

حل: در حالت اول با توجه به بایاس مثبت دیود داریم

$I_{D1} = I = I_S (e^{V_{D1}/\eta V_T} - 1) \approx I_S e^{V_{D1}/\eta V_T}$

اگر دیود D_2 که مشابه دیود D_1 است موازی با آن شود، با توجه به اینکه ولتاژ دو سر آنها برابر است، جریان آنها نیز برابر خواهد بود. بنابراین در این حالت داریم

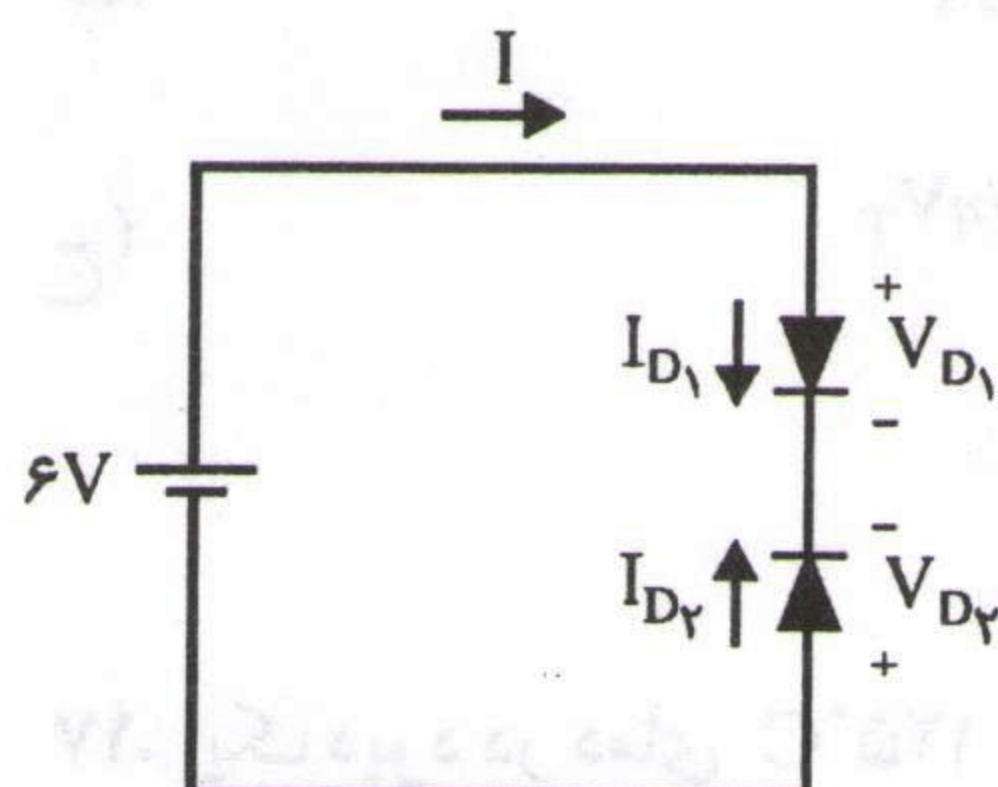
$$I_{D_1}' = I_{D_2} = \frac{I}{2} \approx I_S e^{V_{D_1}' / \eta V_T} \Rightarrow I = 2 I_S e^{V_{D_1}' / \eta V_T}$$

از دو رابطه فوق برای I داریم

$$I_S e^{V_{D_1}' / \eta V_T} = 2 I_S e^{V_{D_1}' / \eta V_T} \Rightarrow (V_{D_1}' - V_{D_1}) / \eta V_T = -\ln 2$$

$$\Rightarrow \Delta V_{D_1} = -\eta V_T \ln 2$$

■



شکل ۱۱-۲

۱۹. در مدار شکل ۱۱-۲ دیودها مشابه، از نوع سیلیکن و دارای

$I_S = 10 \text{ nA}$ می‌باشند ($\eta = 2$ و $V_T = 26 \text{ mV}$).

الف) در صورتی که ولتاژ شکست دیودها برابر ۱۰ ولت باشد، جریان I مدار و ولتاژ دو سر هر دیود را به دست آورید.

ب) با فرض اینکه ولتاژ شکست دیودها برابر ۵ ولت باشد جریان I مدار و ولتاژ دو سر هر دیود چقدر خواهد بود؟

حل: الف) در این حالت دیود D_2 که به صورت معکوس بایاس شده وارد ناحیه شکست نمی‌شود و جریان I برابر جریان اشباع معکوس این دیود خواهد شد. بنابراین ولتاژ دو سر دیود D_1 برابر است با

$$I_{D_1} = I_S (e^{V_{D_1} / \eta V_T} - 1) \Rightarrow I_S = I_S (e^{V_{D_1} / \eta V_T} - 1) \Rightarrow V_{D_1} = 36 \text{ mV}$$

$$V_{D_2} = -6 + V_{D_1} = -5.964 \text{ V}$$

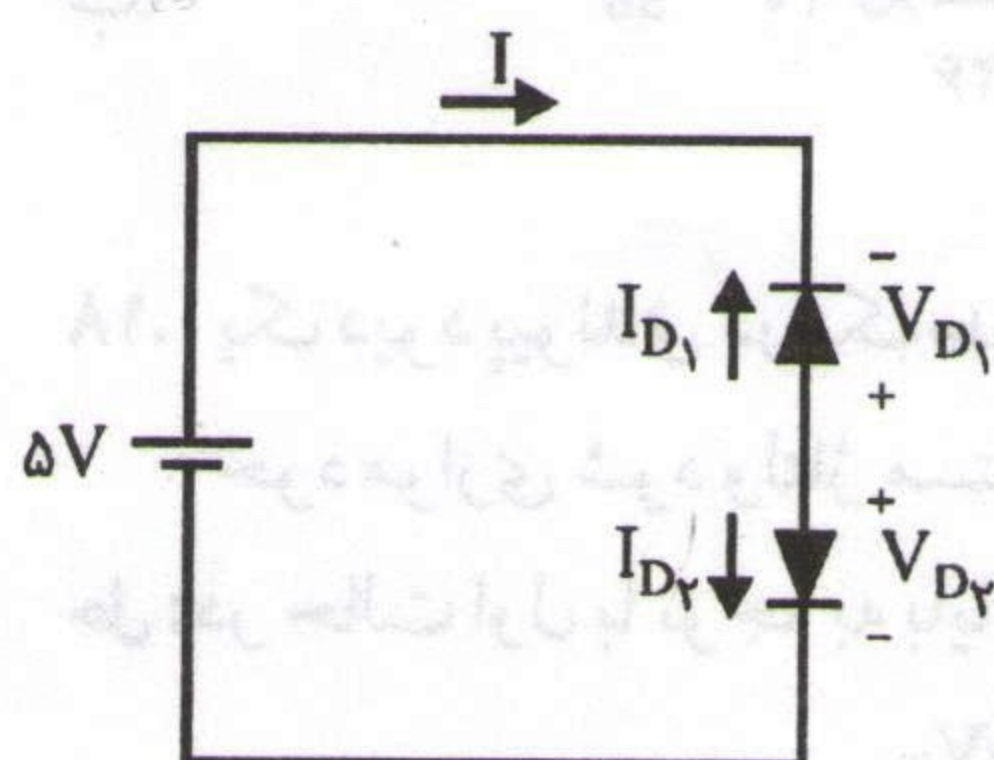
ب) در این حالت دیود D_1 هدایت می‌کند و چون ولتاژ معکوس دو سر دیود D_2 بیشتر از ولتاژ شکست آن است، این دیود وارد ناحیه شکست می‌شود. بنابراین

$$V_{D_2} = -5 \text{ V} \Rightarrow V_{D_1} = 6 + V_{D_2} = 1 \text{ V}$$

در این حالت جریان مدار توسط دیود D_1 تعیین می‌شود که برابر است با

$$I = I_{D_1} = I_S (e^{V_{D_1} / \eta V_T} - 1) = 2.25 \text{ A}$$

■



شکل ۱۲-۲

۲۰. در مدار شکل ۱۲-۲ دیودها مشابه و از جنس ژرمانیم با ولتاژ

شکست بیشتر از ۵ ولت است ($\eta = 2$ و $V_T = 26 \text{ mV}$).

الف) ولتاژ دو سر هر دیود را در دمای اتاق بیابید. توجه نمایید که نتیجه مستقل از جریان اشباع معکوس است.

ب) چنانچه ولتاژ شکست دیودها برابر ۴/۹ ولت و جریان اشباع معکوس $5 \mu\text{A}$ باشد، جریان مدار چقدر است؟

(ج) با فرض ولتاژ شکست ۲ ولت و جریان اشباع معکوس $5\mu A$ ، جریان مدار را محاسبه کنید.
(د) در بند قبل با فرض وجود یک مقاومت 100Ω به صورت سری در مدار، جریان مدار چقدر خواهد بود؟

حل: الف) دیود D_1 به صورت معکوس بایاس شده است ولی وارد ناحیه شکست نمی‌گردد. بنابراین

$$I_{D_1} = -I_{D_2} = -I_S$$

که I_S جریان اشباع معکوس دیود D_1 است. حال ولتاژ دوسر دیود D_2 را که به صورت مستقیم بایاس شده است می‌یابیم.

$$I_{D_2} = I_S \left(e^{V_{D_2}/\eta V_T} - 1 \right) \Rightarrow I_S = I_S \left(e^{V_{D_2}/2 \times 0.026} - 1 \right)$$

$$\Rightarrow V_{D_2} \approx 36 \text{ mV} \Rightarrow V_{D_1} = V_{D_2} - 5 = -4.96 \text{ V}$$

(ب) با توجه به نتیجه بند قبل، در این حالت دیود D_1 وارد ناحیه شکست می‌شود. بنابراین

$$V_{D_1} = -4.9 \text{ V} \Rightarrow V_{D_2} = 5 - 4.9 = 0.1 \text{ V}$$

پس جریان مدار توسط دیود D_2 تعیین می‌شود که برابر است با

$$I_{D_2} = 5 \left(e^{0.1/2 \times 0.026} - 1 \right) \approx 29.21 \mu A$$

(ج) در این حالت نیز دیود D_1 در ناحیه شکست قرار می‌گیرد. پس

$$V_{D_1} = -2 \text{ V} \Rightarrow V_{D_2} = 5 - 2 = 3 \text{ V}!$$

$$\Rightarrow I_{D_2} = 5 \times 10^{-6} \left(e^{3/2 \times 0.026} - 1 \right) = 5.68 \times 10^{-4} \text{ A}!$$

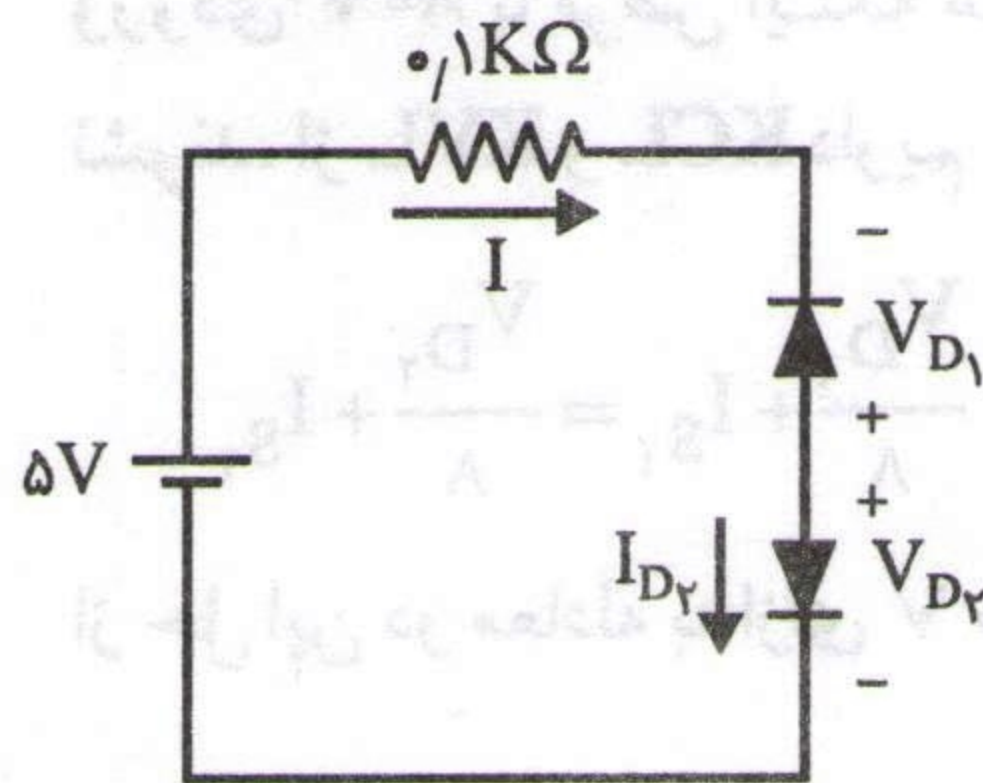
(د) در این حالت مدار به صورت شکل ۲-۱۳ خواهد بود و دیود D_1

در ناحیه شکست قرار خواهد داشت و داریم

$$V_{D_1} = -2 \text{ V}$$

$$\Rightarrow V_{D_2} = 5 - 2 - 0.1I \Rightarrow I = 30 - 10V_{D_2}$$

از طرفی

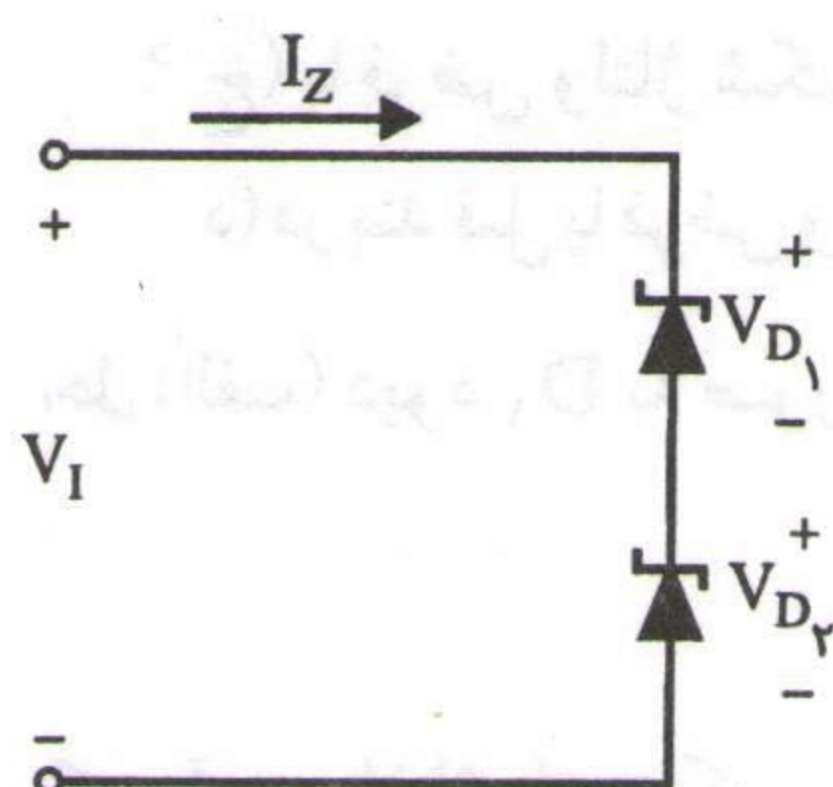


شکل ۲-۱۳

$$I = I_{D_2} \approx 5 \times 10^{-3} e^{19.23V_{D_2}} \Rightarrow \ln(30 - 10V_{D_2}) + 5/3 = 19.23V_{D_2}$$

توجه کنید جریانها برحسب میلی آمپر در نظر گرفته شده‌اند. از حل عددی این معادله داریم

$$V_{D_2} = 0.444 \text{ V}, \quad I_{D_2} = I = 25.56 \text{ mA}$$



شکل ۲-۱۴

۲۱. در شکل ۲-۱۴ جریان اشباع معکوس دیودها به ترتیب ۱ و ۲ میکروآمپر است. ولتاژ شکست دو دیود مساوی و برابر ۱۰۰ ولت است. (الف) جریان و ولتاژ هر دیود را برای ولتاژهای ورودی ۸۰ و ۱۲۰ ولت به دست آورید. (ب) برای حالتی که هر دیود با یک مقاومت $8\text{ M}\Omega$ موازی شود، بند (الف) را حل نمایید.

حل: (الف) به ازای ورودی 80 V ، هیچ‌کدام از دیودها وارد ناحیه شکست نمی‌شوند. بنابراین جریان مدار برابر جریان اشباع معکوس کوچک‌تر خواهد بود؛ چراکه در غیر این صورت دیود با جریان اشباع معکوس کوچک‌تر وارد ناحیه شکست می‌شود که غیر ممکن است. بنابراین

$$I_Z = I_{S1} = 1\mu\text{A}$$

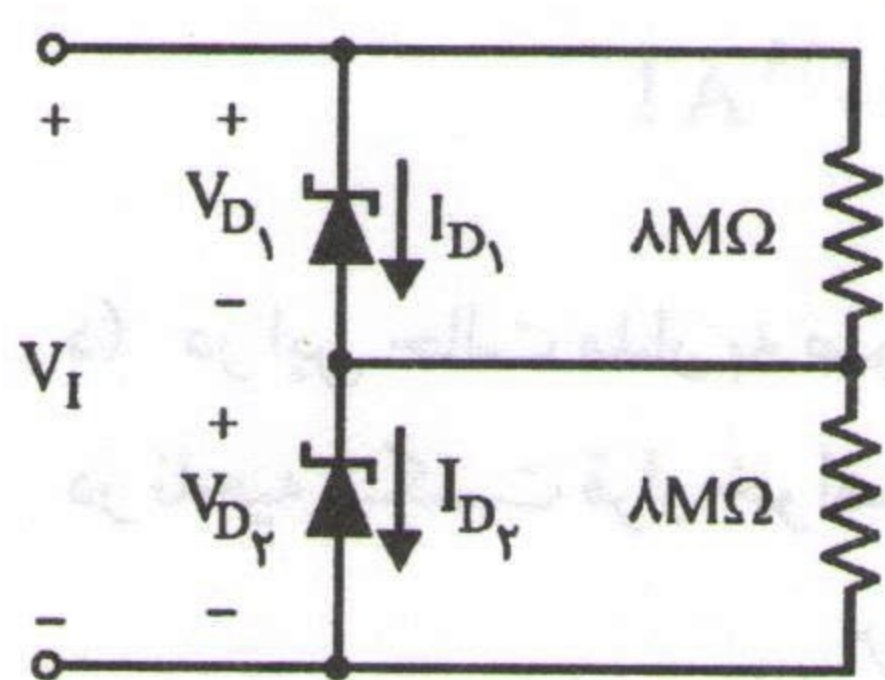
ولتاژ دو سر دیود D_2 چنین به دست می‌آید:

$$I_{D2} = I_{S2} (e^{-V_{D2}/\eta V_T} - 1) \Rightarrow -1 = 2 (e^{-V_{D2}/2 \times 26} - 1) \Rightarrow V_{D2} = 36\text{ mV}$$

$$V_{D1} = 80 - V_{D2} = 79.964\text{ V}$$

به ازای ورودی 120 V ، فقط یکی از دیودها می‌تواند وارد ناحیه شکست شود، بنابراین دیود با جریان اشباع معکوس کوچک‌تر یعنی دیود D_1 وارد ناحیه شکست شده و جریان مدار برابر جریان اشباع معکوس بزرگ‌تر یعنی جریان اشباع معکوس دیود D_2 که $2\mu\text{A}$ است، می‌شود. بنابراین

$$V_{D1} = 100\text{ V} \Rightarrow V_{D2} = 120 - V_{D1} = 20\text{ V}$$



شکل ۲-۱۵

(ب) در این حالت مدار به صورت شکل ۲-۱۵ خواهد بود. به ازای ورودی 80 V با فرض اینکه هیچ‌کدام از دیودها وارد ناحیه شکست نشوند، از KVL و KCL داریم

$$V_{D1} + V_{D2} = V_I, \quad \frac{V_{D1}}{8} + I_{S1} = \frac{V_{D2}}{8} + I_{S2}$$

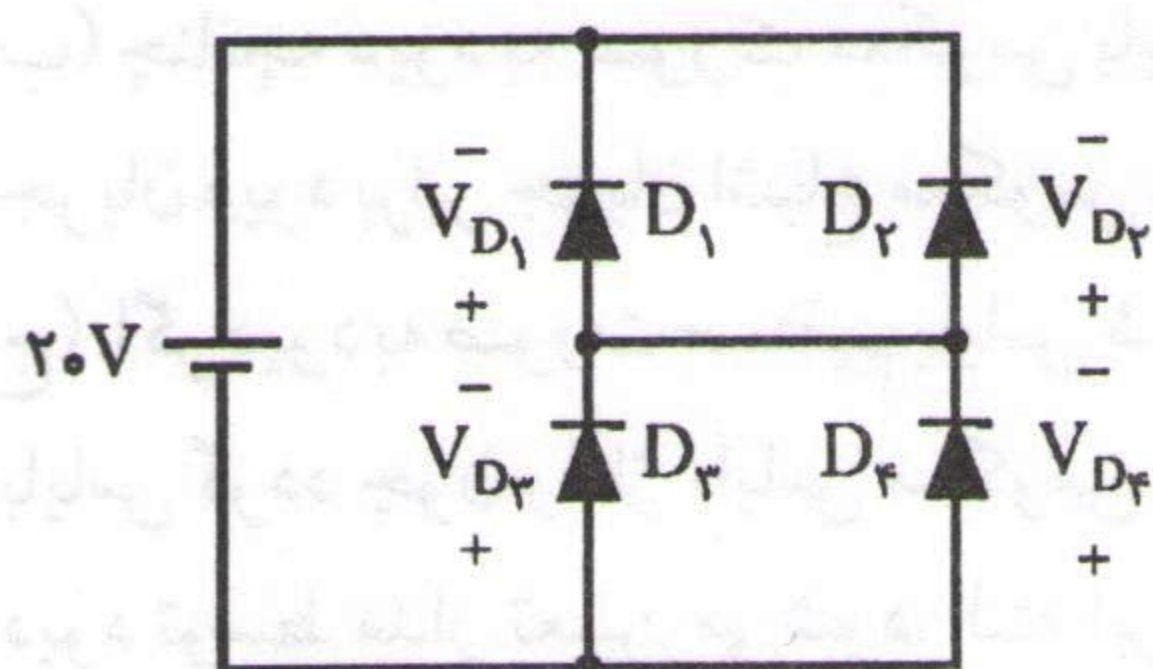
از حل این دو معادله به ازای $V_I = 80\text{ V}$ داریم

$$V_{D1} = 44\text{ V}, \quad V_{D2} = 36\text{ V}$$

بنابراین فرض فوق صحیح است. به ازای ورودی 120 V نیز داریم

$$V_1 = 64\text{ V}, \quad V_2 = 56\text{ V}$$

در این حالت نیز هیچ‌کدام از دیودها وارد ناحیه شکست نمی‌شوند و به ازای هر دو ورودی جریان دیودها برابر جریان اشباع معکوس آنها خواهد بود.



شکل ۲-۱۶

۲۲. در مدار شکل ۲-۱۶، با فرض $I_{S_1} = I_{S_2} = 15 \text{ nA}$ و $I_{S_3} = 2I_{S_4} = 40 \text{ nA}$ ، ولتاژها و جریانهای دیودها را به دست آورید.

حل: $V_{D_1} = V_{D_2}, I_{S_1} = I_{S_2} \Rightarrow I_{D_1} = I_{D_2}$

$V_{D_3} = V_{D_4}, I_{S_3} = 2I_{S_4} \Rightarrow I_{D_3} = 2I_{D_4}$

I_{D_1} و I_{D_2} حداکثر 15 nA خواهند بود که مجموع آنها 30 nA می باشد. بنابراین

$$I_{D_3} + I_{D_4} = -30 \text{ nA}, \quad I_{D_3} = 2I_{D_4}$$

$$\Rightarrow I_{D_3} = -10 \text{ nA}, \quad I_{D_4} = -20 \text{ nA}$$

جریان دیودهای D_3 و D_4 از جریان اشباع معکوس این دیودها کوچک تر است، بنابراین این دیودها وارد ناحیه اشباع معکوس خود نشده اند و در نتیجه ولتاژ دو سر آنها مقدار کوچکی است که چنین به دست می آید:

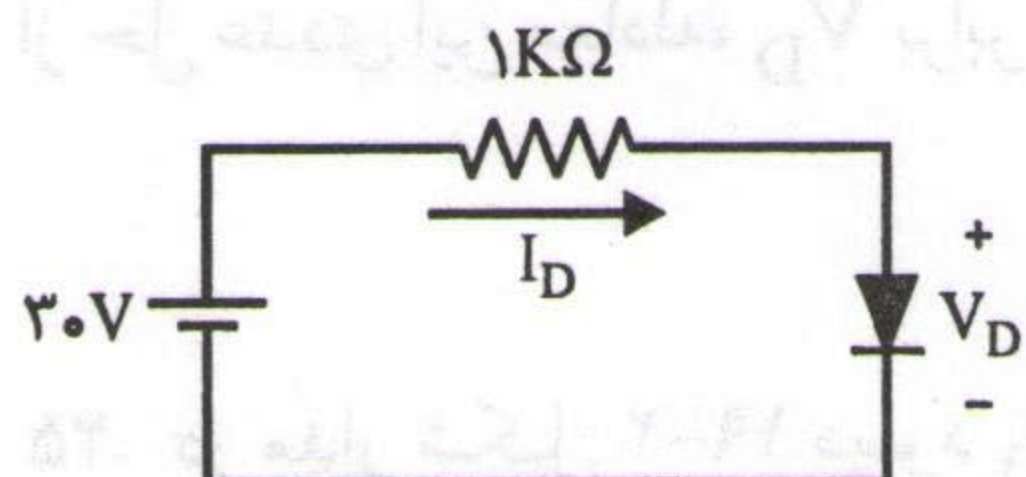
$$I_{D_4} = I_{S_4} (e^{V_{D_4}/\eta V_T} - 1) \Rightarrow -20 = 40 (e^{V_{D_4}/\eta V_T} - 1)$$

$$\Rightarrow V_{D_3} = V_{D_4} = -36 \text{ mV}$$

و ولتاژ دو سر دیودهای D_1 و D_2 برابر است با

$$V_{D_1} = V_{D_2} = -20 - V_{D_4} = -19.964 \text{ V}$$

۲۳. یک دیود ژرمانیم در دمای اتاق دارای جریان اشباع معکوس $10 \mu\text{A}$ ، مقاومت اهمی ناچیز و ولتاژ شکست 100 ولت می باشد. این دیود با یک مقاومت $1 \text{ K}\Omega$ به منبع تغذیه 30 ولت وصل شده است (شکل ۲-۱۷). جریان مدار را در دو حالت زیر به دست آورید ($V_T = 26 \text{ mV}$ و $\eta = 2$):



شکل ۲-۱۷

(الف) دیود به صورت مستقیم بایاس شده باشد.

(ب) دیود به صورت معکوس بایاس شده باشد.

(ج) با فرض ولتاژ شکست 10 ولت، بندهای فوق را تکرار نمایید.

حل: (الف) با نوشتن KVL در مدار داریم

$$30 = 1 \times I_D + V_D \Rightarrow V_D = 30 - I_D$$

$$I_D = 0.1 [e^{(30 - I_D)/\eta V_T} - 1] \Rightarrow \eta V_T \ln(100 I_D + 1) = 30 - I_D$$

با حل عددی این معادله جواب برابر است با

$$I_D = 29.6 \text{ mA} \Rightarrow V_D = 0.4 \text{ V}$$

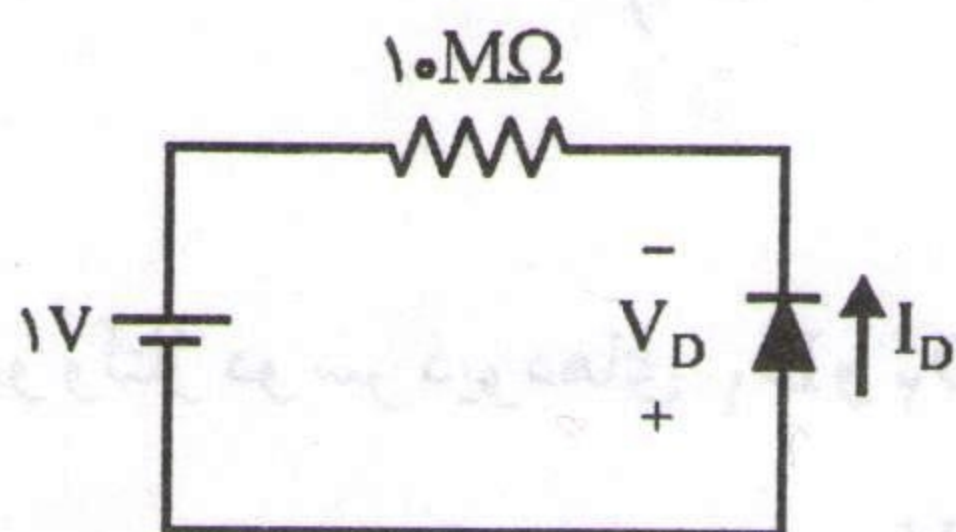
ب) چنانچه دیود به صورت معکوس بایاس گردد، از آنجا که ولتاژ معکوس کمتر از ولتاژ شکست است، جریان دیود برابر جریان اشباع معکوس یعنی $10 \mu A$ خواهد بود.

ج) اگر دیود به صورت مستقیم بایاس شود پاسخ با بند (الف) تفاوتی ندارد. چنانچه دیود به صورت معکوس بایاس گردد چون ولتاژ بایاس معکوس بیشتر از ولتاژ شکست است دیود به ناحیه شکست رفته و جریان دیود توسط مدار تعیین می‌شود. البته این در صورتی خواهد بود که دیود تحمل این مقدار جریان را داشته باشد. همچنین ولتاژ دیود برابر $10 -$ ولت ثابت خواهد ماند.

$$V_D = -10 \Rightarrow I_D = \frac{-30 + 10}{1} = -20 \text{ mA}$$

۲۴. یک دیود سیلیکنی با $I_S = 1 \text{ nA}$ ، با یک مقاومت $10 \text{ M}\Omega$ سری شده و توسط یک منبع ولتاژ 1 ولتی به صورت معکوس بایاس شده است ($V_T = 26 \text{ mV}$ و $\eta = 2$).
الف) ولتاژ دو سر دیود را به دست آورید.

ب) در صورتی که جای قطبهای منبع ولتاژ را عوض کنیم، ولتاژ دو سر دیود چقدر خواهد شد؟
حل: الف) شکل مدار به صورت شکل ۱۸-۲ خواهد بود که با نوشتن KVL در این مدار داریم



شکل ۱۸-۲

$$1 = -10 \times 10^6 I_D - V_D$$

$$\Rightarrow 1 = -10 \times 10^6 I_S (e^{V_D/\eta V_T} - 1) - V_D$$

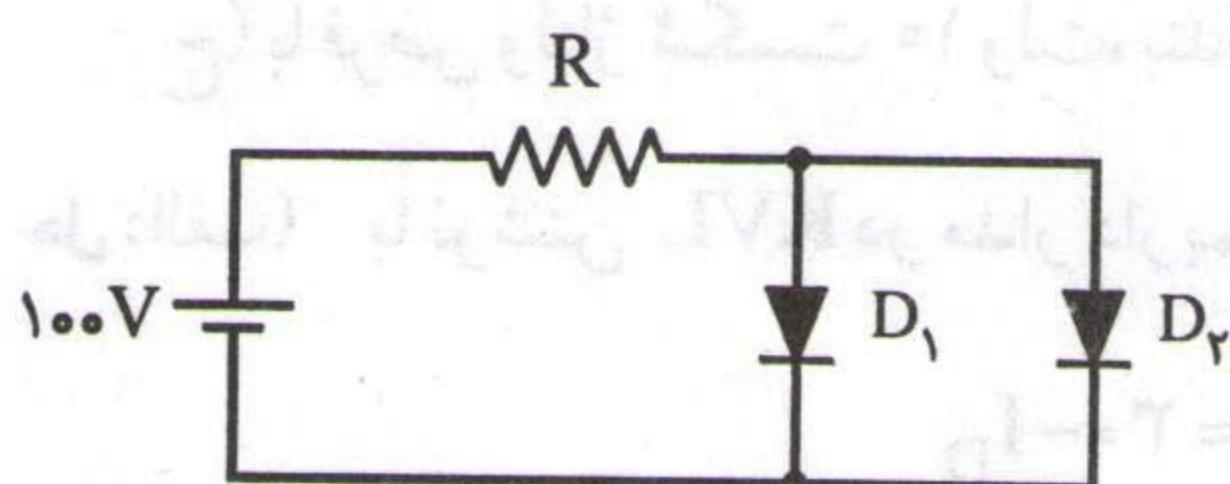
از حل عددی این معادله، مقدار V_D برابر 0.99 V - به دست می‌آید.

ب) با تعویض جای قطبهای منبع ولتاژ، دیود به صورت مستقیم بایاس شده و با نوشتن KVL داریم

$$1 = V_D + 10 \times 10^6 I_D = V_D + 10 \times 10^6 I_S (e^{V_D/\eta V_T} - 1)$$

از حل عددی این معادله، V_D برابر است با

$$V_D \approx 0.227 \text{ V}$$



شکل ۱۹-۲

۲۵. در مدار شکل ۱۹-۲ دیود D_1 از جنس ژرمانیم با

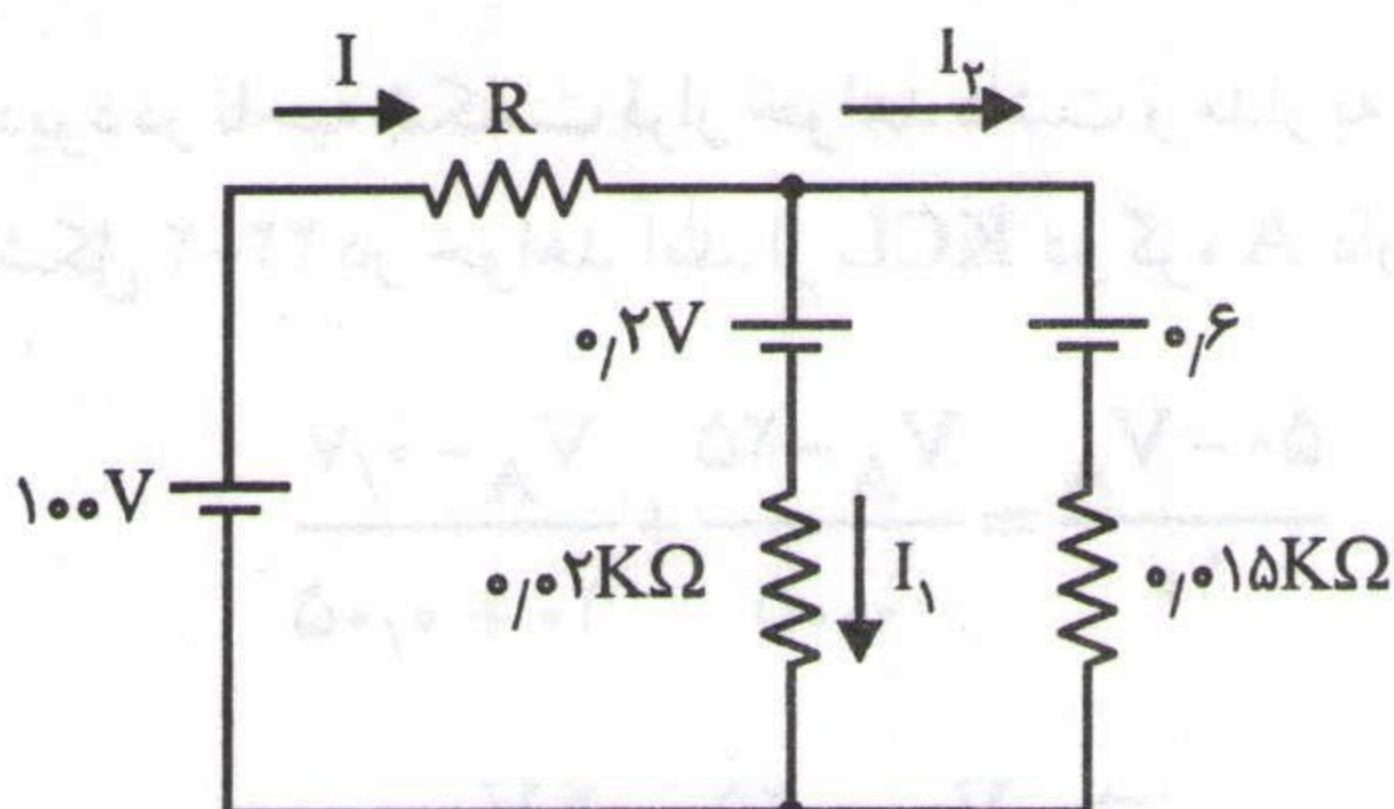
$V_\gamma = 0.2 \text{ V}$ و $R_f = 20 \Omega$ و دیود D_2 از جنس

سیلیکن با $V_\gamma = 0.6 \text{ V}$ و $R_f = 15 \Omega$ است. جریان

دیودها را در دو حالت زیر بیابید:

الف) $R = 1 \text{ K}\Omega$ ب) $R = 10 \text{ K}\Omega$

حل: هر دو دیود D_1 و D_2 به صورت مستقیم بایاس شده‌اند بنابراین مدار معادل به صورت شکل ۲۰-۲ خواهد بود.



شکل ۲-۲

$$V_{D_1} = 0.2 + 0.2 I_1$$

$$V_{D_2} = 0.6 + 0.15 I_2$$

$$V_{D_1} = V_{D_2} \Rightarrow I_1 = 20 + 0.75 I_2$$

$$\text{KCL: } I = I_1 + I_2 = 20 + 1.75 I_2$$

$$100 = RI + 0.6 + 0.15 I_2 = R(20 + 1.75 I_2) + 0.6 + 0.15 I_2$$

الف) به ازای $R = 1 \text{ K}\Omega$ داریم

$$100 = 20.6 + 1.765 I_2 \Rightarrow I_2 = 45 \text{ mA} \Rightarrow I_1 = 53.75 \text{ mA}$$

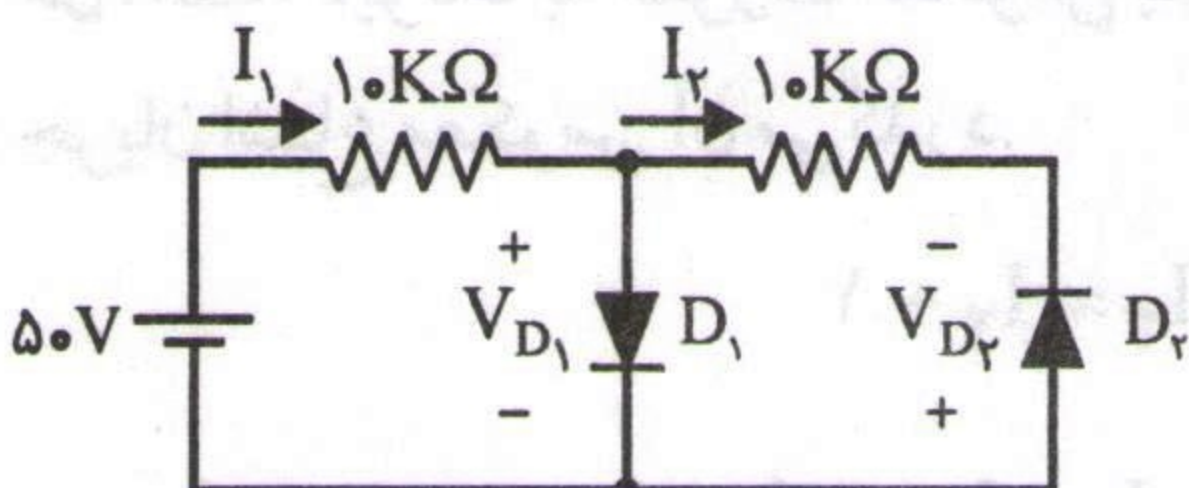
ب) به ازای $R = 10 \text{ K}\Omega$ داریم

$$100 = 200.6 + 17.52 I_2 \Rightarrow I_2 < 0$$

بنابراین دیود D_2 هدایت نمی‌کند و $I_2 = 0$ است. اگر فرض کنیم فقط دیود D_1 هدایت می‌کند در این صورت داریم

$$I = I_1 = \frac{100 - 0.2}{10 + 0.2} = 9.96 \text{ mA} \Rightarrow V_{D_2} = 0.2 + 0.2 I_1 \approx 0.4 \text{ V}$$

که از V_{D_2} کوچک‌تر است و فرض قطع بودن دیود D_2 را تأیید می‌کند.



شکل ۲-۲۱

۲۶. در مدار شکل ۲-۲۱، دیودها دارای $R_f = r_z = 50 \Omega$

$V_{D(on)} = 0.7 \text{ V}$ و ولتاژ شکست 25 V هستند.

مطلوب است

الف) I_1, I_2, V_{D_1} و V_{D_2} .

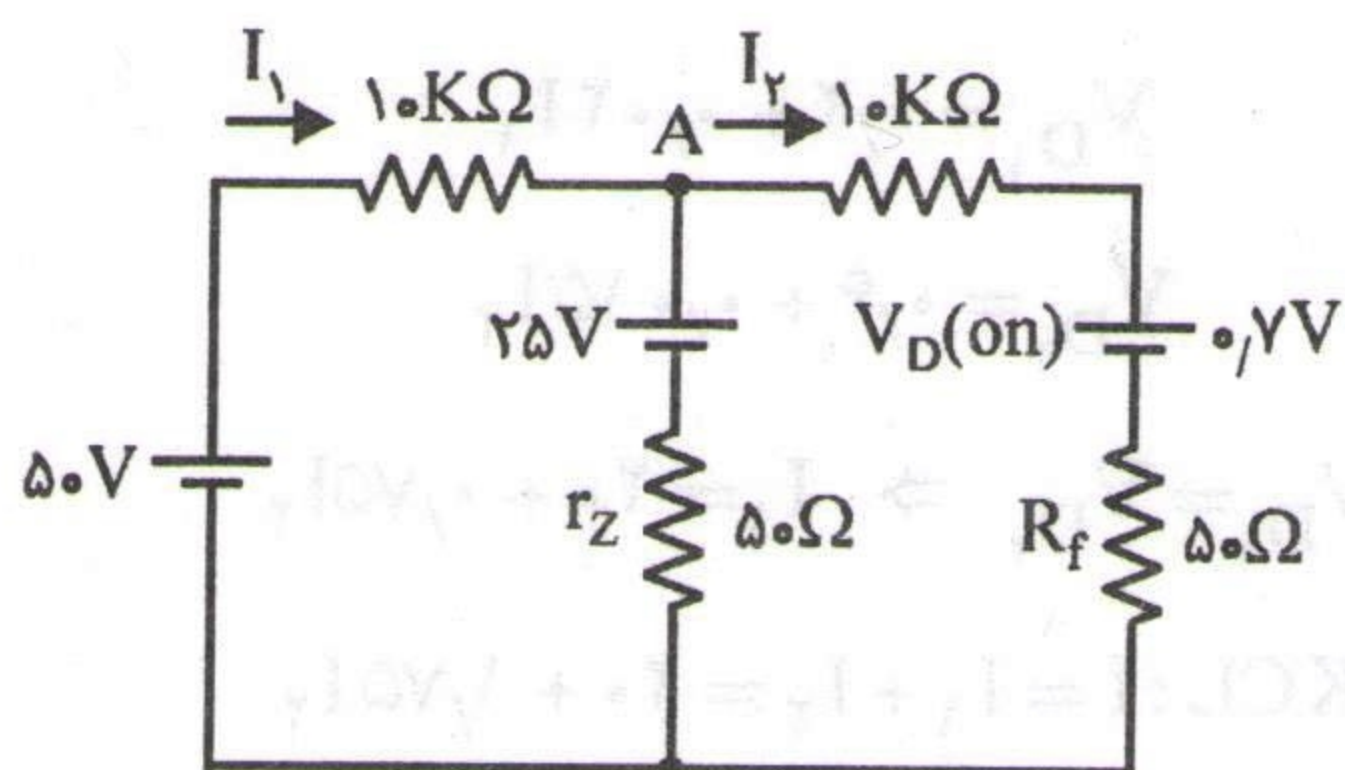
ب) با تغییر جهت هر دو دیود، بند الف) را تکرار کنید.

حل: الف) دیود D_1 به صورت مستقیم و دیود D_2 به صورت معکوس بایاس شده است. بنابراین دیود D_1 وصل خواهد بود و در این صورت دیود D_2 نمی‌تواند وارد ناحیه شکست شود؛ چرا که با توجه به روشن بودن دیود D_1 ، ولتاژ معکوس دوسر دیود D_2 کوچک خواهد بود. بنابراین

$$I_2 \approx 0, I_1 = \frac{50 - V_{D_1(on)}}{10 + R_f} = 4.9 \text{ mA}$$

$$V_{D_1} = V_{D_1(on)} + R_f I_1 = 0.945 \text{ V} \Rightarrow V_{D_2} = -V_{D_1} = -0.945 \text{ V}$$

ب) با تغییر جهت دیودهای D_1 و D_2 ، این دو دیود به ترتیب به صورت معکوس و مستقیم بایاس می‌شوند و بنابراین دیود D_2 وصل خواهد بود. اگر دیود D_1 را قطع در نظر بگیریم، جریان تقریبی مدار برابر 2.5 mA خواهد بود که در این صورت ولتاژ معکوس دوسر دیود D_1 بیشتر از 25 V شده و در نتیجه این



شکل ۲-۲۲

دیود در ناحیه شکست قرار خواهد داشت و مدار به صورت شکل ۲-۲۲ در خواهد آمد. از KCL در گره A داریم

$$\frac{50 - V_A}{10} = \frac{V_A - 25}{0.05} + \frac{V_A - 0.7}{10 + 0.05}$$

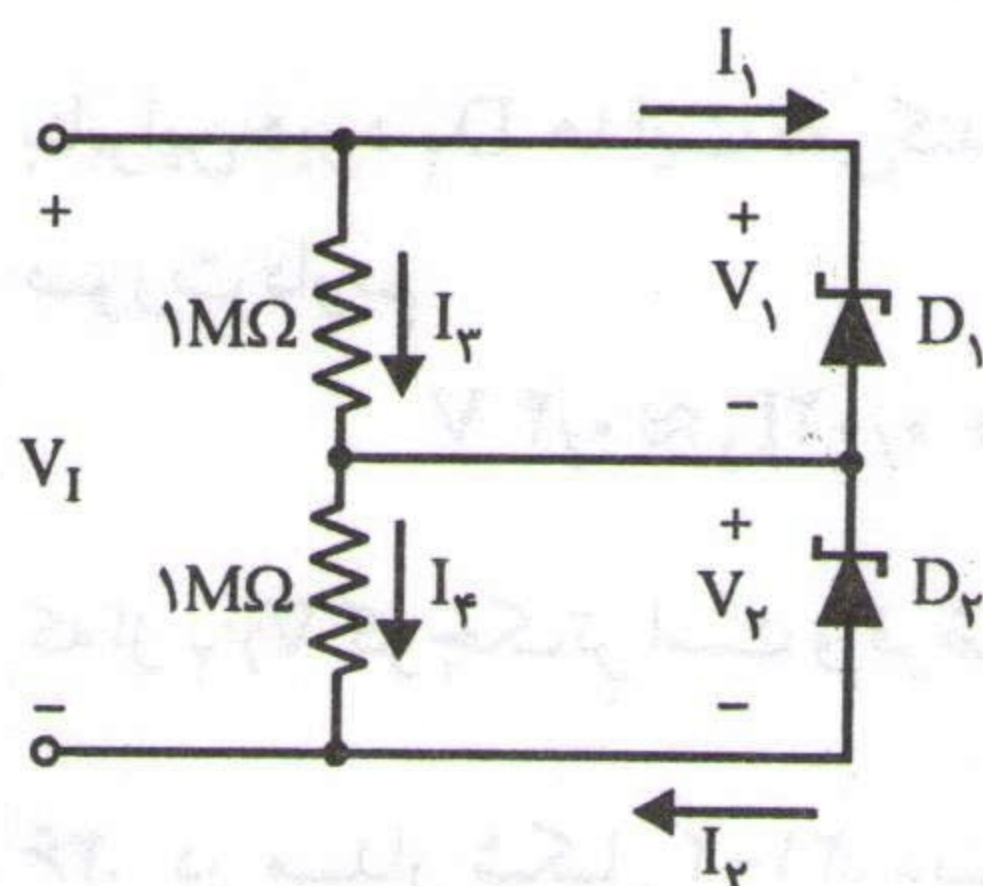
$$\Rightarrow V_A = 25.004V$$

که وارد ناحیه شکست شدن دیود D_1 را تأیید می‌کند.

$$I_1 = \frac{50 - V_A}{10} = 2.5mA, \quad I_2 = \frac{V_A - 0.7}{10 + 0.05} = 2.42mA$$

$$V_{D1} = -V_A = -25V, \quad V_{D2} = 0.7 + R_f I_2 = 0.821V$$

■



شکل ۲-۲۳

۲۷. در مدار شکل ۲-۲۳ دیودهای زنر دارای ولتاژ شکست برابر ۱۰۰ ولت هستند و جریان اشباع معکوس آنها به ترتیب $1\mu A$ و $2\mu A$ است.

الف) جریان و ولتاژ هر دیود را به ازای $V_I = 90V$ به دست آورید.

ب) جریان و ولتاژ هر دیود را به ازای $V_I = 110V$ به دست آورید.

حل: الف) دیودها به صورت معکوس بایاس شده‌اند و از هر دیود جریان اشباع معکوس آن می‌گذرد.

$$KCL: I_1 + I_3 = I_4 + I_2 \Rightarrow I_3 = I_4 + 1$$

$$KVL: V_I = 1 \times I_3 + 1 \times I_4 \Rightarrow 90 = I_3 + I_4 = 2I_4 + 1$$

$$\Rightarrow I_4 = 44.5\mu A, \quad I_3 = 45.5\mu A$$

$$\Rightarrow V_1 = 1 \times I_3 = 45.5V, \quad V_2 = 1 \times I_4 = 44.5V$$

ب) اگر فرض کنیم که دیود D_1 وارد ناحیه شکست می‌شود در این صورت داریم

$$V_1 = 100V, \quad V_2 = 10V$$

بنابراین جریان $I_2 = 2\mu A$ خواهد بود و برای بقیه جریانها داریم

$$I_3 = \frac{V_1}{1} = 100\mu A, \quad I_4 = \frac{V_2}{1} = 10\mu A$$

$$I_3 + I_1 = I_2 + I_4 \Rightarrow I_1 = 12 - 100 = -88\mu A$$

پس فرض در ناحیه شکست بودن دیود D_1 درست نیست چرا که در این صورت باید I_1 مثبت باشد. به همین ترتیب فرض در ناحیه شکست بودن دیود D_2 نیز غلط است. بنابراین هر دو دیود در ناحیه بایاس معکوس قرار گرفته و $I_1 = 1 \mu A$ و $I_2 = 2 \mu A$ خواهند بود.

$$KCL: I_1 + I_3 = I_2 + I_4 \Rightarrow I_3 = I_4 + 1$$

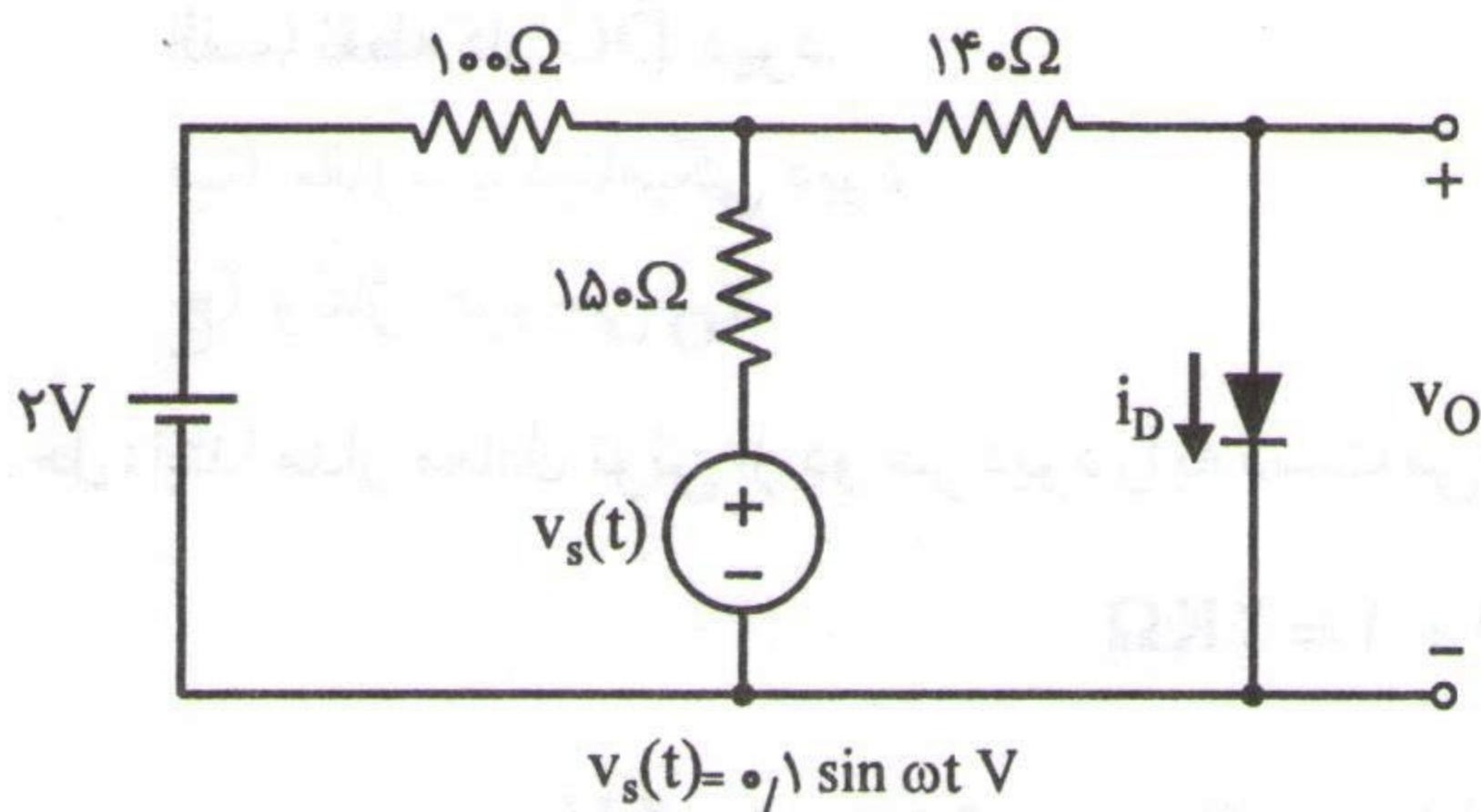
$$KVL: 110 = I_3 + I_4 = 2I_4 + 1 \Rightarrow I_4 = 54.5 \mu A, I_3 = 55.5 \mu A$$

ولتاژ دو سر دیودها برابر است با

$$V_1 = 1 \times I_3 = 55.5 V, V_2 = 1 \times I_4 = 54.5 V$$

■

۲۸. معادله ولتاژ-جریان دیود مدار شکل ۲-۲۴ به صورت زیر است ($V_T = 26 mV$ و $\eta = 1$):



شکل ۲-۲۴

$$i_D = 10^{-6} (e^{v_D/V_T} - 1)$$

(i_D بر حسب آمپر و v_D بر حسب ولت)

مطلوبست محاسبه مقادیر زیر:

(الف) مدار معادل تونن دو سر دیود.

(ب) جریان ثابت گذرنده از دیود.

(ج) مقاومت دینامیکی دیود (r_d).

(د) ولتاژ خروجی v_O .

$$R_{Th} = 140 + (100 \parallel 150) = 200 \Omega$$

(حل: الف)

$$v_{Th} = \left(\frac{2}{100 + 150} \right) \times 150 + \left(\frac{0.1 \sin \omega t}{100 + 150} \right) \times 100 = 1/2 + 0.04 \sin \omega t V$$

بنابراین مدار معادل به صورت شکل ۲-۲۵ خواهد بود.

(ب) در مدار DC، ولتاژ دو سر دیود از KVL برابر است با

$$V_D = 1/2 - 0.2 I_D, I_D = 10^{-3} (e^{V_D/V_T} - 1)$$

در معادلات فوق V_D بر حسب ولت، I_D بر حسب میلی

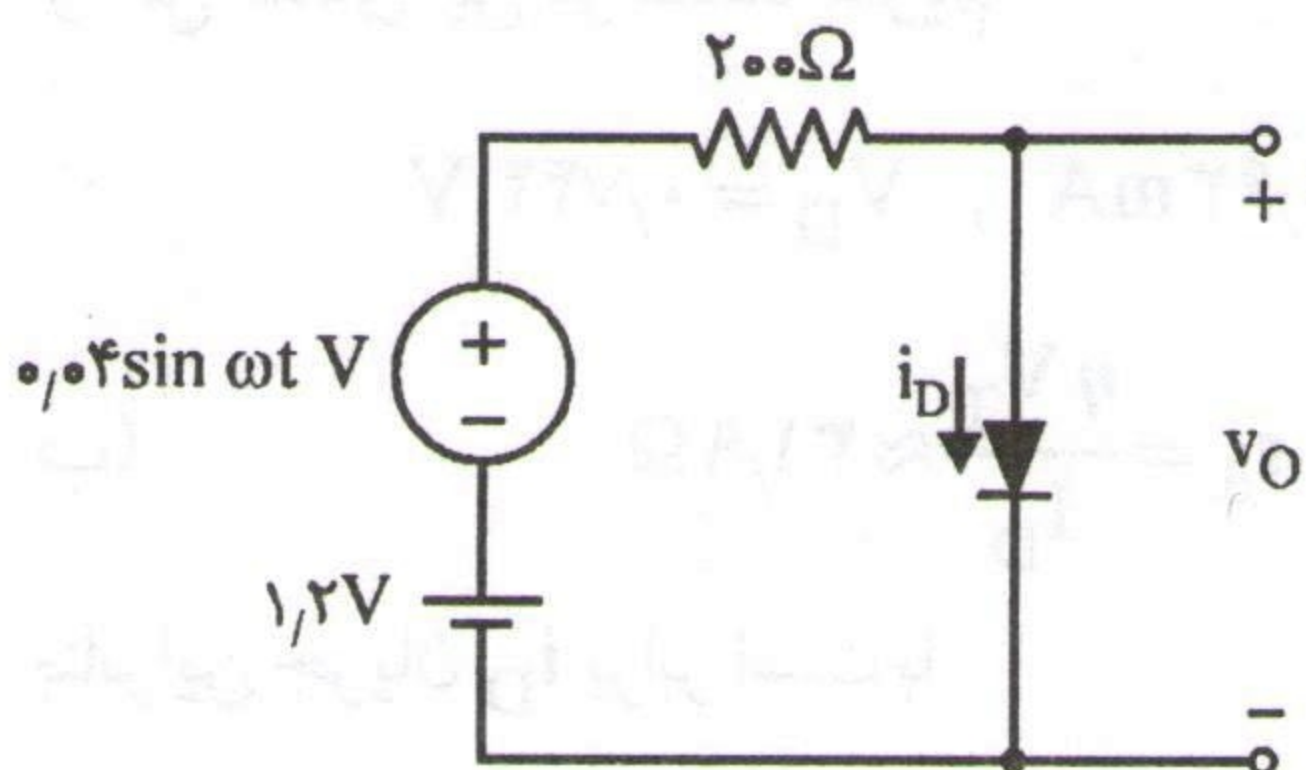
آمپر و V_T برابر $0.026 V$ است. از حل عددی دو معادله

اخیر داریم

$$I_D = 4.89 mA, V_D = 0.2209 V$$

$$r_d = \frac{V_T}{I_D} = \frac{26}{4.89} = 5.32 \Omega$$

(ج)



شکل ۲-۲۵

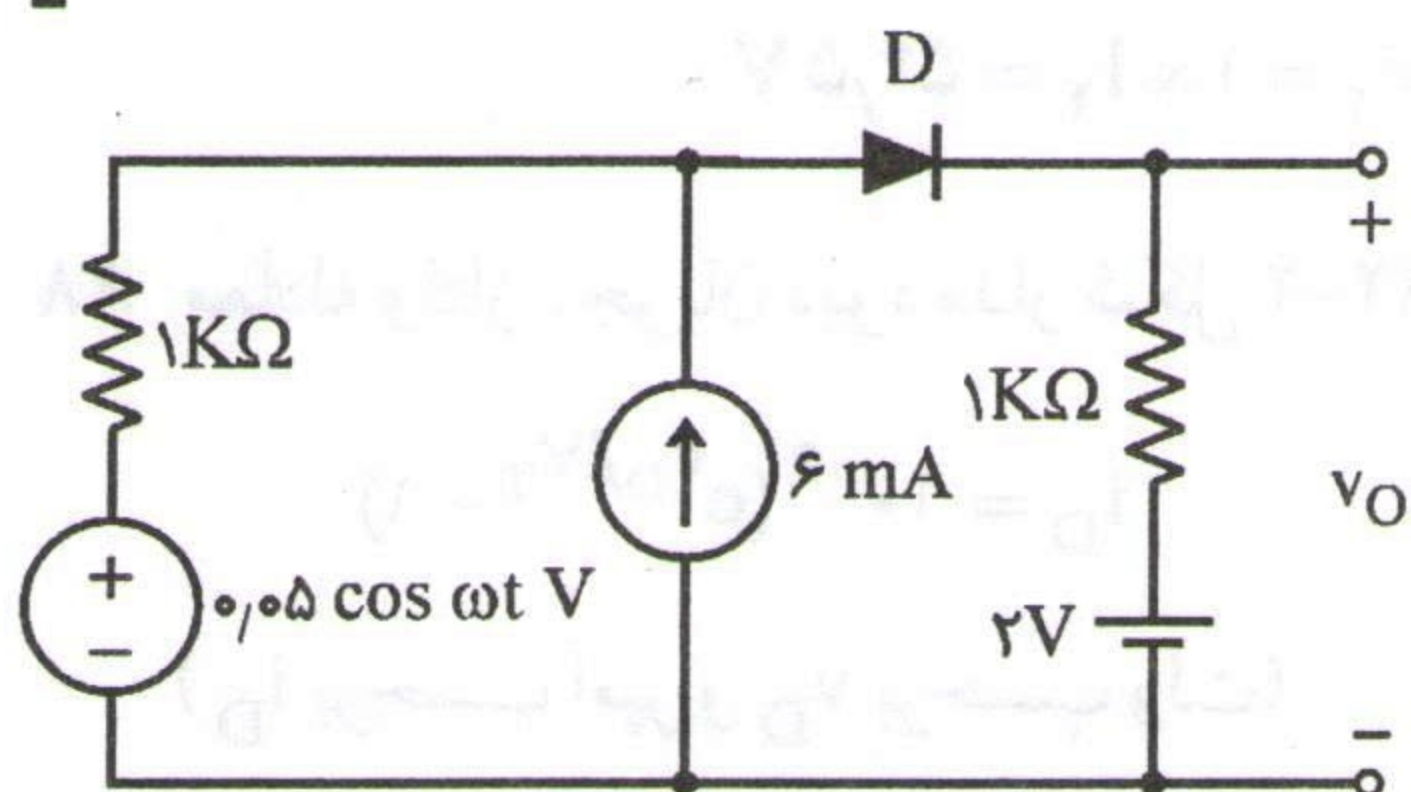
$$v_O = V_D + v_d \quad (د)$$

v_d مؤلفه ac ولتاژ خروجی ناشی از منبع سیگنال ورودی برابر است با

$$v_d = \left(\frac{0.4 \sin \omega t}{R_{Th} + r_d} \right) \times r_d \approx 1.4 \sin \omega t \text{ mV}$$

$$\Rightarrow v_O = V_D + v_d = 220 + 1.4 \sin \omega t \text{ mV}$$

■



شکل ۲-۲۶

۲۹. در مدار شکل ۲-۲۶ با فرض $I_S = 1 \text{ nA}$

$V_T = 26 \text{ mV}$ و $\eta = 2$ ؛ مطلوبست محاسبه

(الف) نقطه کار DC دیود.

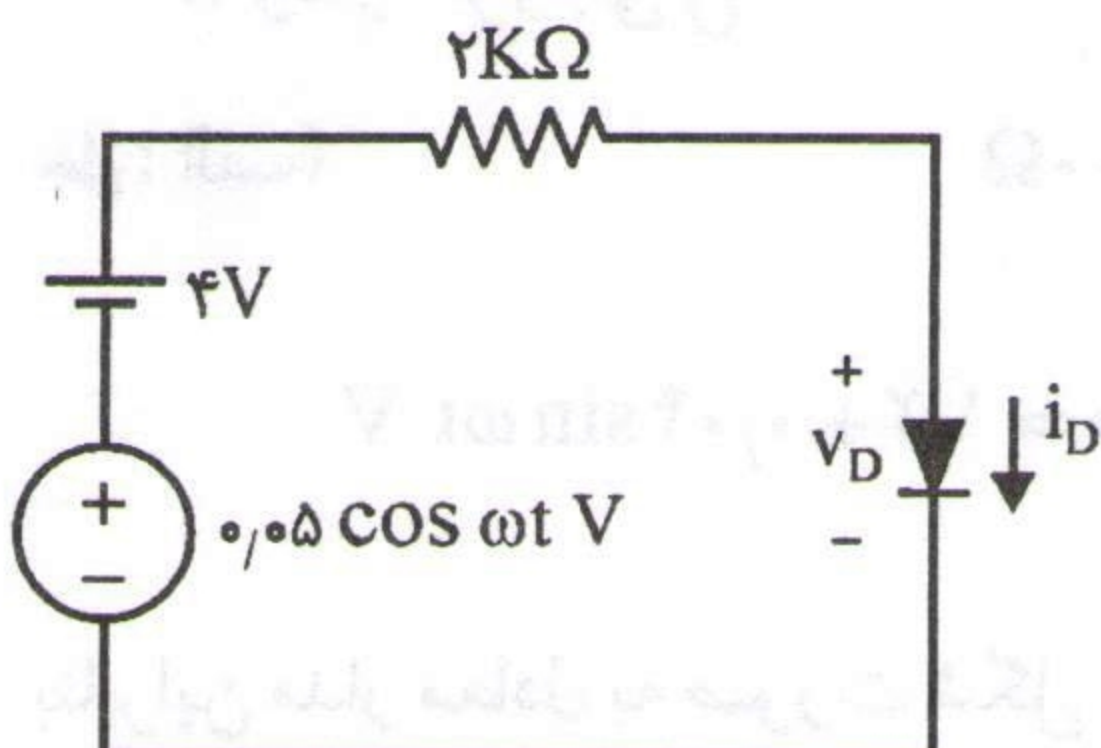
(ب) مقاومت دینامیکی دیود.

(ج) ولتاژ خروجی v_O .

حل: ابتدا مدار معادل تونن از دو سر دیود را به دست می‌آوریم.

$$R_{Th} = 1 + 1 = 2 \text{ K}\Omega$$

$$v_{Th} = 0.5 \cos \omega t + (6 \times 1) + (-2) = 0.5 \cos \omega t + 4 \text{ V}$$



شکل ۲-۲۷

بنابراین مدار معادل به صورت شکل ۲-۲۷ در خواهد آمد.

(الف) برای محاسبه نقطه کار DC دیود از KVL داریم

$$V_D = 4 - 2I_D, \quad I_D = I_S (e^{V_D/\eta V_T} - 1)$$

از حل عددی این دو معادله داریم

$$I_D = 1.63 \text{ mA}, \quad V_D = 0.744 \text{ V}$$

$$r_d = \frac{\eta V_T}{I_D} \approx 31.9 \Omega \quad (ب)$$

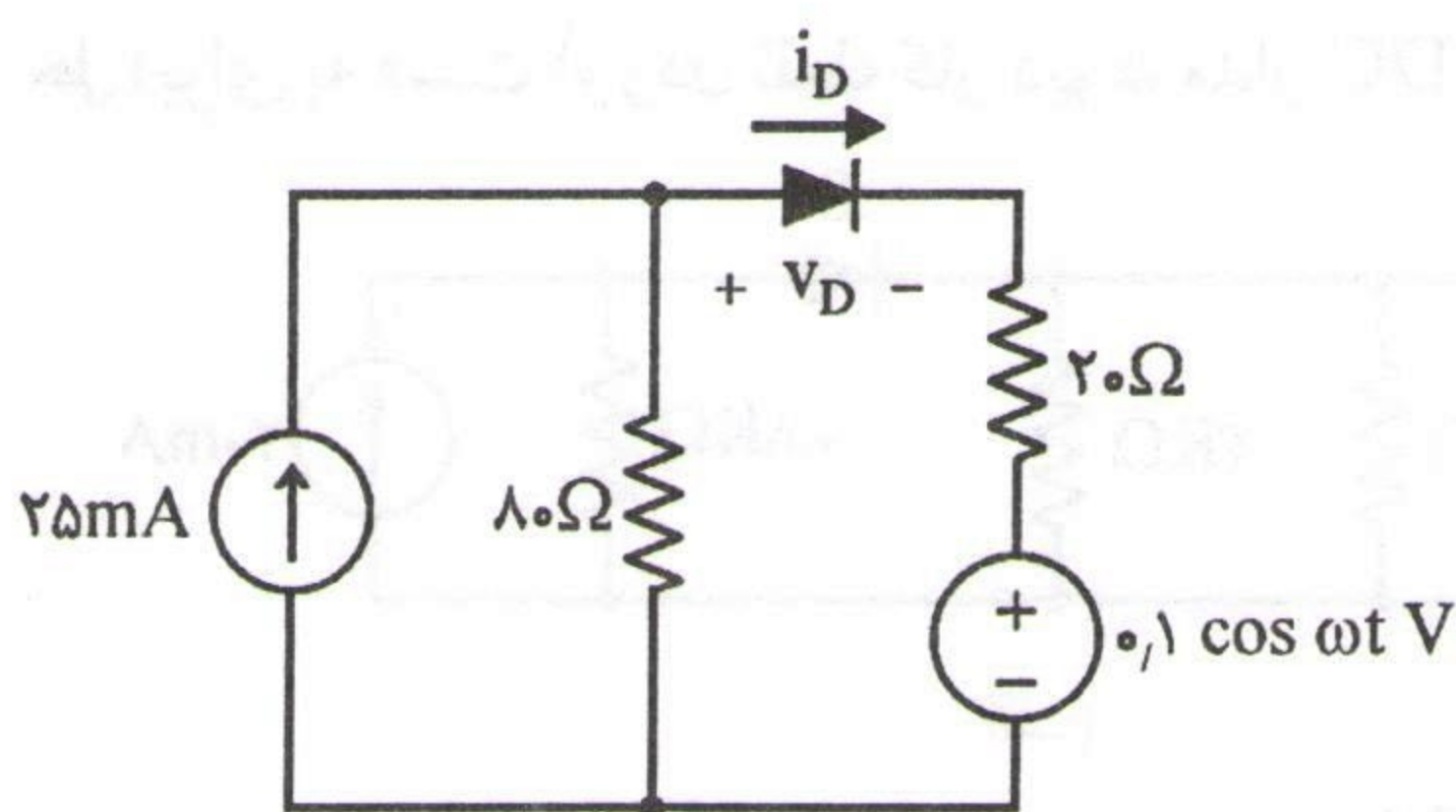
بنابراین جریان i_D برابر است با

$$i_D = I_D + i_d = 1.63 + \left(\frac{0.5 \cos \omega t}{R_{Th} + r_d} \right) = 1.63 + 0.25 \cos \omega t \text{ mA}$$

(ج) با توجه به شکل مدار ۲-۲۶ ولتاژ خروجی برابر است با

$$v_O = 1 \times i_D + 2 = 3.63 + 0.25 \cos \omega t \text{ V}$$

■



شکل ۲-۲۸

۳۰. در مدار شکل ۲-۲۸ معادله مشخصه دیود را به صورت زیر در نظر بگیرید:

$$i_D = \begin{cases} 200 (v_D - 0.5)^2 & v_D \geq 0.5 \\ 0 & v_D \leq 0.5 \end{cases}$$

(i_D بر حسب mA و v_D بر حسب V)

مطلوبست محاسبه

الف) نقطه کار DC دیود. ب) مقاومت دینامیکی دیود. ج) جریان i_D .

حل: ابتدا مدار معادل تونن از دو سر دیود را به دست می آوریم.

$$R_{Th} = 80 + 20 = 100 \Omega$$

$$v_{Th} = -0.1 \cos \omega t + (0.08)(25) = 2 - 0.1 \cos \omega t \text{ V}$$

الف) از KVL در مدار DC داریم

$$V_{Th} = R_{Th} I_D + V_D \Rightarrow V_D = 2 - 0.1 I_D$$

با جایگزینی رابطه فوق در معادله مشخصه جریان - ولتاژ دیود و حل آن داریم

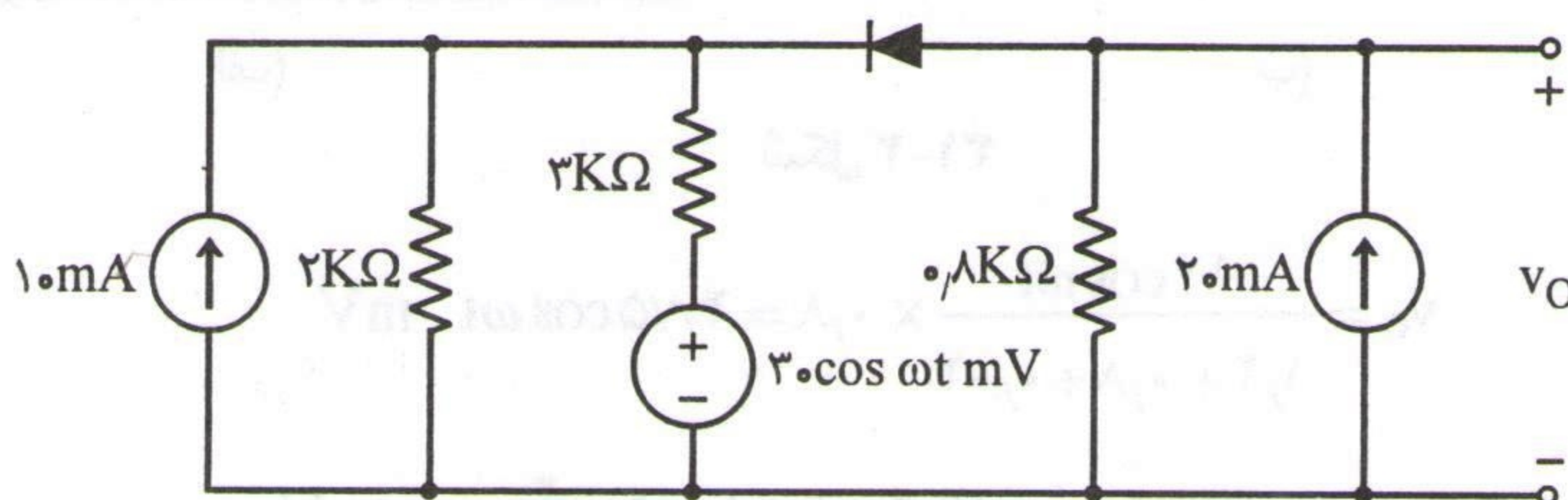
$$I_D = 12.5 \text{ mA}, V_D = 0.75 \text{ V}$$

ب) مقاومت دینامیکی دیود برابر است با

$$\frac{1}{r_d} = g_d = \left. \frac{di_D}{dv_D} \right|_Q = 400 (v_D - 0.5) \bigg|_{V_D = 0.75} = 100 \text{ mA/V} \Rightarrow r_d = 10 \Omega$$

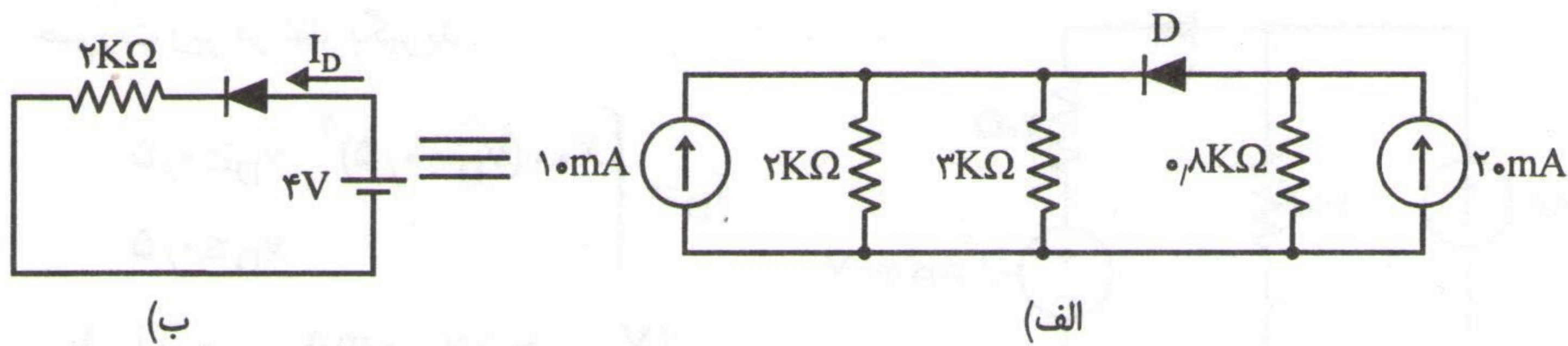
$$i_D = I_D + i_d = I_D + \frac{-0.1 \cos \omega t}{R_{Th} + r_d} = 12.5 - \frac{10}{11} \cos \omega t \text{ mA} \quad \text{ج}$$

۳۱. در مدار شکل ۲-۲۹ دیود دارای جریان اشباع معکوس یک نانو آمپر و $\eta = 1.4$ است. ولتاژ خروجی v_O مدار را به دست آورید ($V_T = 25 \text{ mV}$).



شکل ۲-۲۹

حل: برای به دست آوردن نقطه کار دیود، مدار DC که به صورت شکل ۲-۳۰ است را حل می‌کنیم.



شکل ۲-۳۰

$$I_D = I_S (e^{V_D / \eta V_T} - 1) = 10^{-6} (e^{28.57 V_D} - 1) \text{ mA}$$

$$\text{KVL: } 4 = 2I_D + V_D \Rightarrow I_D = 2 - 0.5V_D$$

$$\Rightarrow 2 - 0.5V_D = 10^{-6} (e^{28.57 V_D} - 1) \approx 10^{-6} e^{28.57 V_D}$$

$$\Rightarrow 13.82 + \ln(2 - 0.5V_D) = 28.57 V_D$$

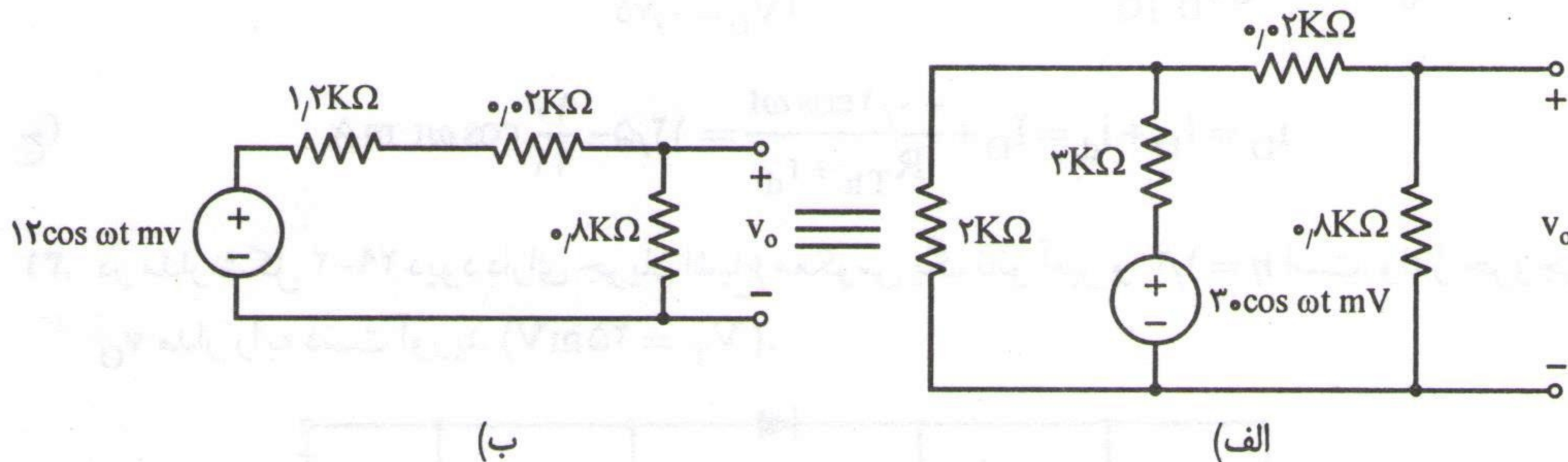
از حل عددی معادله فوق، V_D و در نتیجه I_D به دست می‌آید.

$$V_D \approx 0.503 \text{ V}, \quad I_D \approx 1.75 \text{ mA} \Rightarrow r_d = \frac{\eta V_T}{I_D} = 20 \Omega$$

برای محاسبه v_O به ترتیب مؤلفه‌های DC و ac آن را می‌یابیم.

$$V_O = (20 - I_D) \times 0.8 = 14.6 \text{ V}$$

مؤلفه ac را از مدار شکل ۲-۳۱ می‌توان یافت.

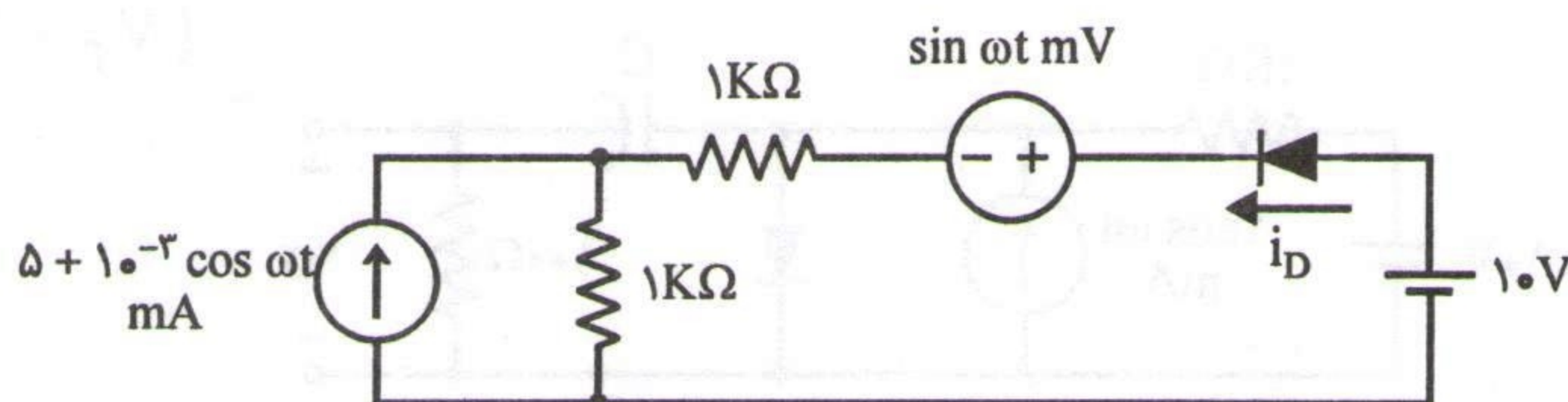


شکل ۲-۳۱

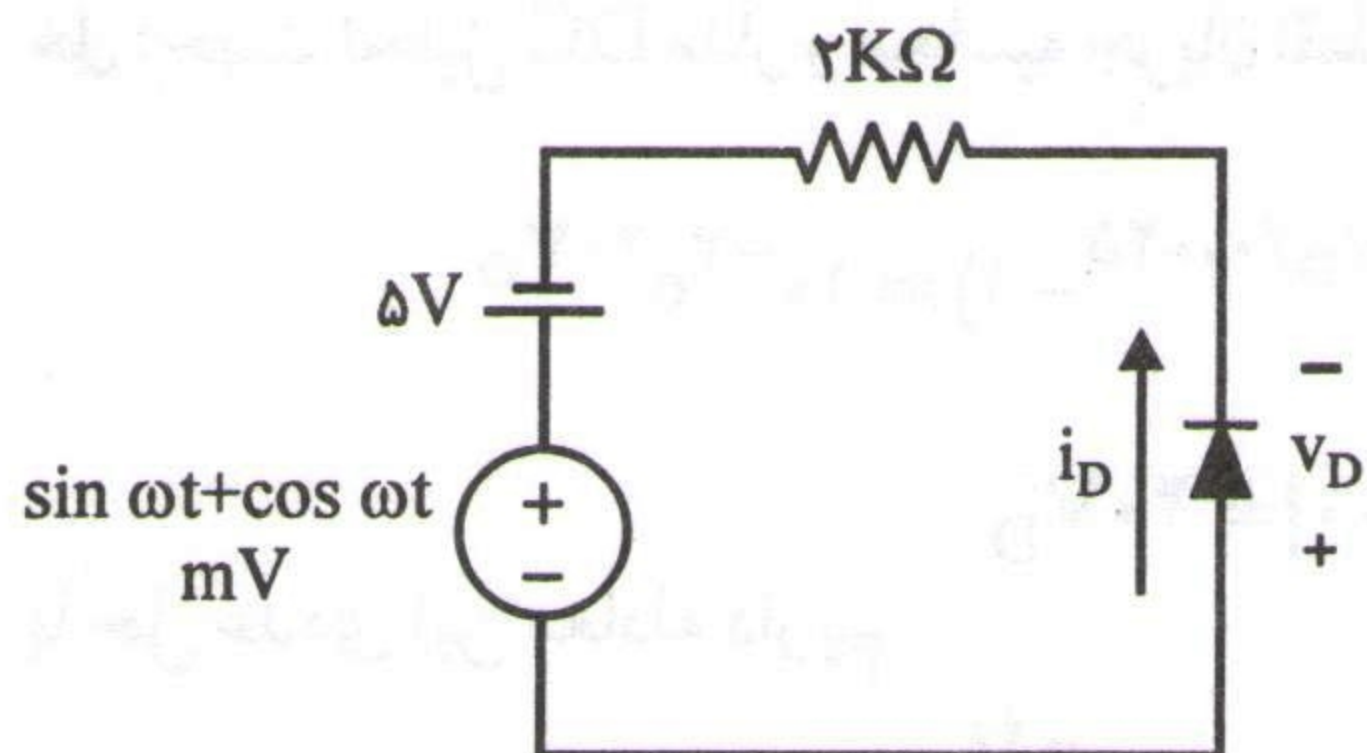
$$v_O = \frac{12 \cos \omega t}{1.2 + 0.8 + 0.2} \times 0.8 = 4.75 \cos \omega t \text{ mV}$$

$$\Rightarrow v_O = v_o + V_O = 14.6 + 4.75 \times 10^{-3} \cos \omega t \text{ V}$$

۳۲. در مدار شکل ۳۲-۲ دیود دارای جریان اشباع معکوس 1 nA است. جریان دیود را محاسبه نمایید ($V_T = 25\text{ mV}$ و $\eta = 1$).



شکل ۳۲-۲



شکل ۳۳-۲

حل: چنانچه مدار معادل تونن از دو سر دیود را جایگزین کنیم، مدار شکل ۳۳-۲ حاصل می شود. ابتدا با تحلیل DC مدار جریان نقطه کار دیود را به دست می آوریم.

$$I_D = I_S (e^{V_D/\eta V_T} - 1) = 10^{-6} (e^{40 V_D} - 1) \text{ mA}$$

$$\text{KVL: } V_D + 2I_D - 5 = 0 \Rightarrow I_D = 2.5 - 0.5 V_D$$

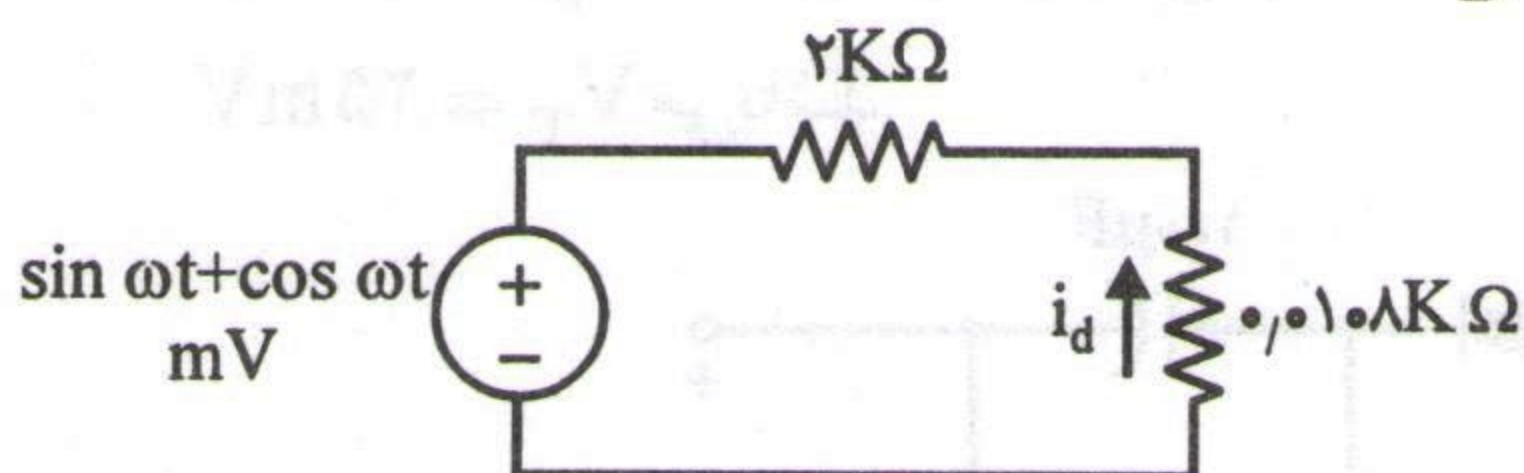
$$\Rightarrow 2.5 - 0.5 V_D = 10^{-6} (e^{40 V_D} - 1) \approx 10^{-6} e^{40 V_D}$$

از حل عددی این معادله داریم

$$V_D \approx 0.3664 \text{ V}, \quad I_D \approx 2.32 \text{ mA}$$

$$r_d = \frac{\eta V_T}{I_D} \approx 10.8 \Omega$$

مدار معادل ac به صورت شکل ۳۴-۲ است.



شکل ۳۴-۲

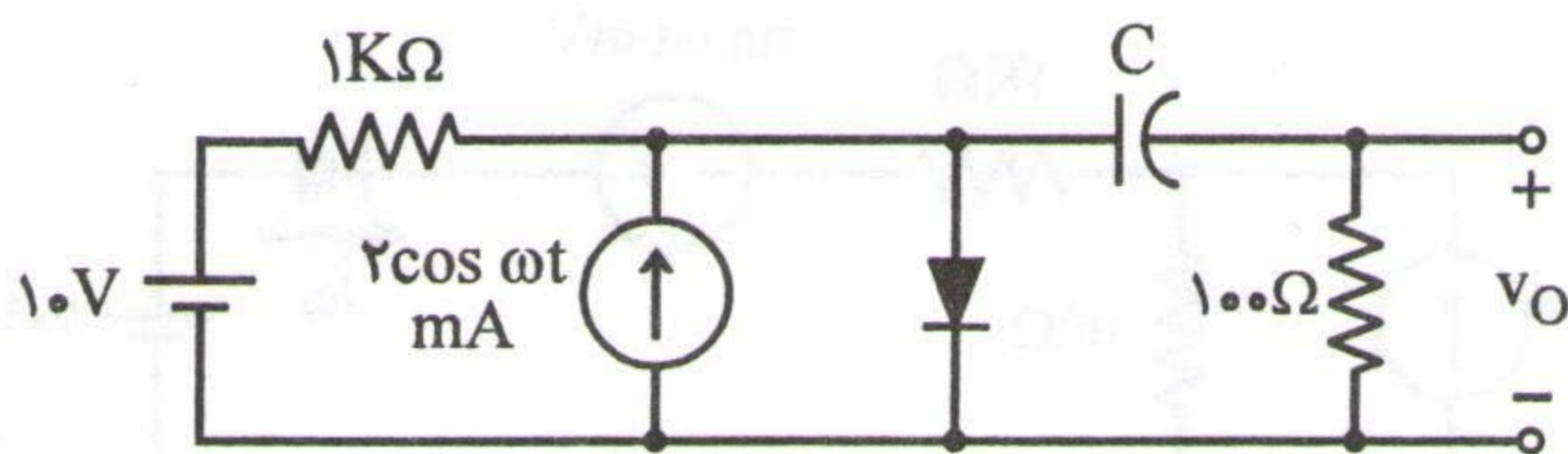
$$i_d = - \frac{\sin \omega t + \cos \omega t}{2 + 0.108} \times 10^{-3} \text{ mA}$$

بنابراین برای کل جریان i_D داریم

$$i_D = I_D + i_d = 2.32 - \frac{\sin \omega t + \cos \omega t}{2 + 0.108} \times 10^{-3} \text{ mA}$$

$$= 2.32 - 0.5 \times 10^{-3} (\sin \omega t + \cos \omega t) \text{ mA}$$

۳۳. در مدار شکل ۳۵-۲ دیود دارای جریان اشباع معکوس $1\mu A$ است. با فرض اینکه خازن در فرکانس کار مدار اتصال کوتاه باشد، مقدار سیگنال خروجی (v_o) را به دست آورید ($\eta = 1$) و $(V_T = 25\text{ mV})$.



شکل ۳۵-۲

حل: جهت تحلیل DC مدار و محاسبه جریان نقطه کار دیود، خازن را اتصال باز و منبع سیگنال را حذف می‌نماییم.

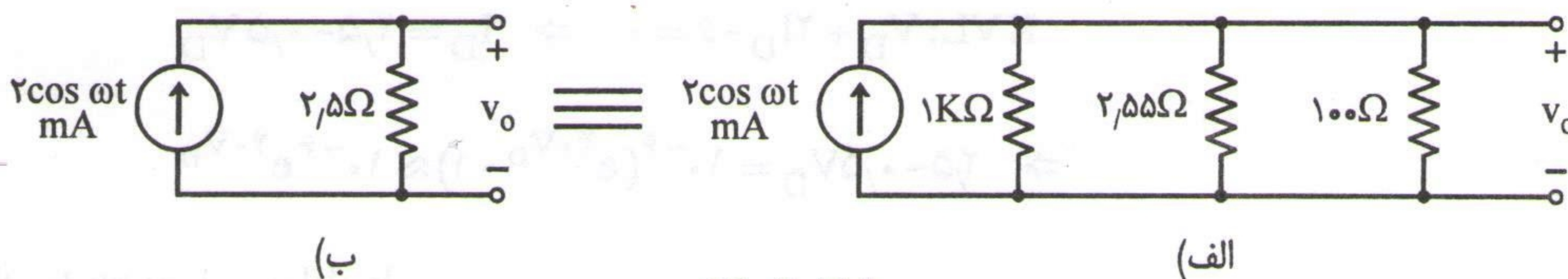
$$I_D = 10 - V_D \Rightarrow 10 - V_D = 10^{-3} (e^{V_D/0.025} - 1) \approx 10^{-3} e^{40V_D}$$

$$\Rightarrow \ln[(10 - V_D) 1000] = 40V_D$$

با حل عددی این معادله داریم

$$V_D \approx 0.229\text{ V}, \quad I_D \approx 9.8\text{ mA} \Rightarrow r_d = \frac{\eta V_T}{I_D} \approx 2.55\Omega$$

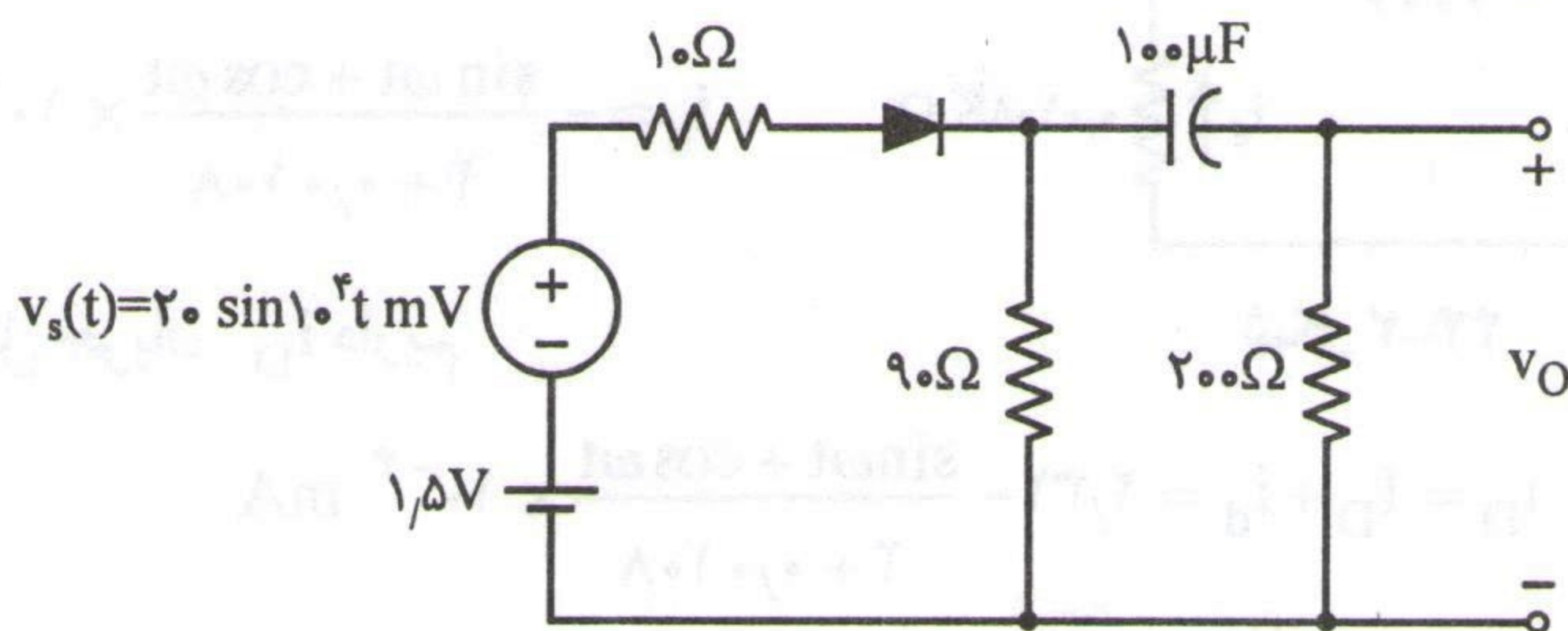
برای محاسبه v_o ، مدار معادل ac را به صورت شکل ۳۶-۲ در نظر می‌گیریم.



شکل ۳۶-۲

$$\Rightarrow v_o = 2\cos \omega t \times 2.5 = 5\cos \omega t\text{ mV}$$

۳۴. در مدار شکل ۳۷-۲ ولتاژ خروجی v_o را محاسبه کنید. دیود دارای $V_D(\text{on}) = 0.75\text{ V}$ ، $\eta = 1$ و $V_T = 25\text{ mV}$ می‌باشد.

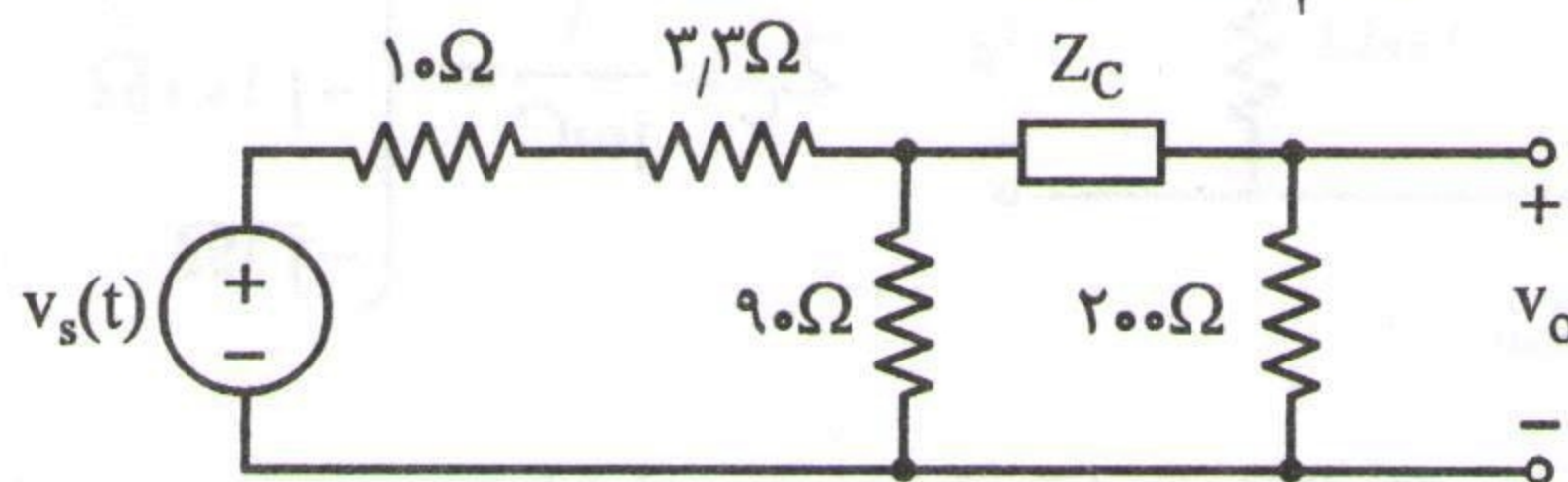


شکل ۳۷-۲

حل: دیود به صورت مستقیم بایاس شده است؛ بنابراین جریان DC دیود برابر است با

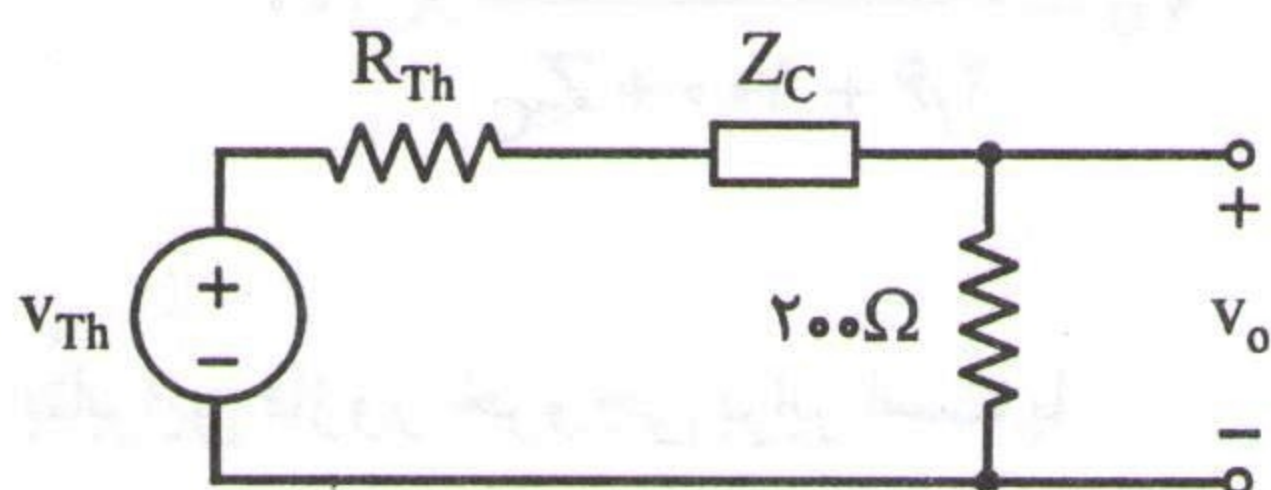
$$I_D = \frac{1.5 - 0.75}{10 + 90} = 7.5 \text{ mA} \Rightarrow r_d = \eta V_T / I_D \approx 3.3 \Omega$$

مدار معادل ac در شکل ۳۸-۲ رسم شده است.



شکل ۳۸-۲

برای سمت چپ مدار، مدار تونن را قرار می دهیم تا مدار شکل ۳۹-۲ حاصل شود.



شکل ۳۹-۲

$$R_{Th} = 90 \parallel 13.3 = 11.59 \Omega$$

$$v_{Th} = 0.87 v_s(t)$$

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} = -j\Omega$$

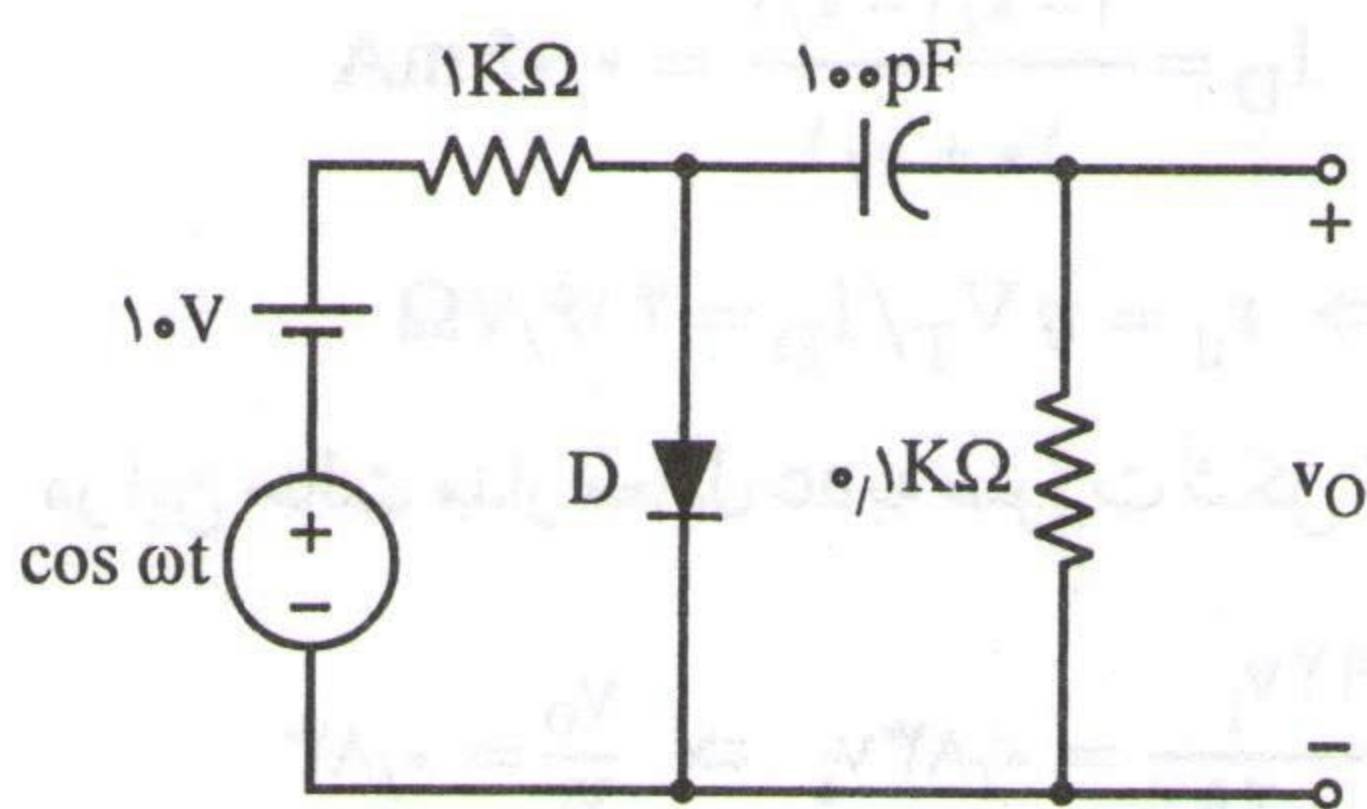
فازور خروجی برابر است با

$$V_o = \frac{200 V_{Th}}{R_{Th} + 200 + Z_C} = \frac{200 \times 0.87 \times 20 \angle 0^\circ}{11.59 + 200 - j} = \frac{3480 \angle 0^\circ}{211.59 \angle -0.27^\circ} = 16.447 \angle 0.27^\circ \text{ mV}$$

و از آنجا که 0.27° درجه در مقابل 10^4 رادیان ناچیز می باشد، ورودی و خروجی تقریباً اختلاف فازی ندارند و در نتیجه خروجی برابر است با

$$v_o \approx 16.447 \sin 10^4 t \text{ mV}$$

■



شکل ۴۰-۲

۳۵. در مدار شکل ۴۰-۲ دیود از جنس ژرمانیم با ولتاژ

هدایت 0.2 ولت است. فازور ولتاژ خروجی را به

ازای $\omega = 10^6, 10^8, 10^{10}$ رادیان بر ثانیه

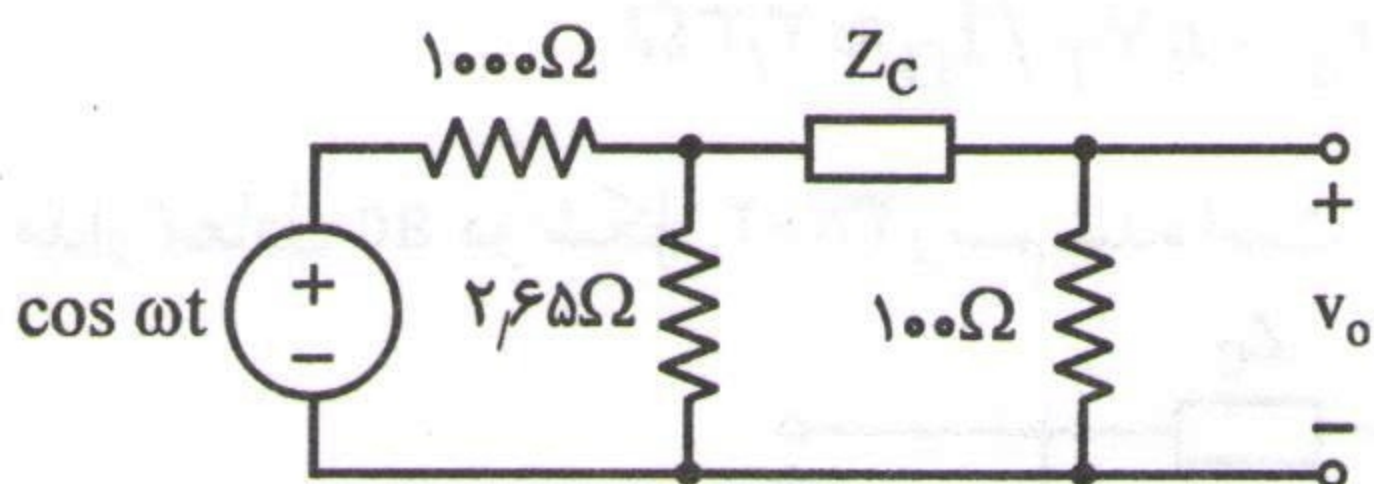
بیابید ($V_T = 26 \text{ mV}$ و $\eta = 1$).

حل: مدار معادل DC را در نظر گرفته، جریان دیود را

محاسبه می کنیم.

$$I_D = \frac{10 - 0.2}{1} = 9.8 \text{ mA} \Rightarrow r_d = \frac{\eta V_T}{I_D} \approx 2.65 \Omega$$

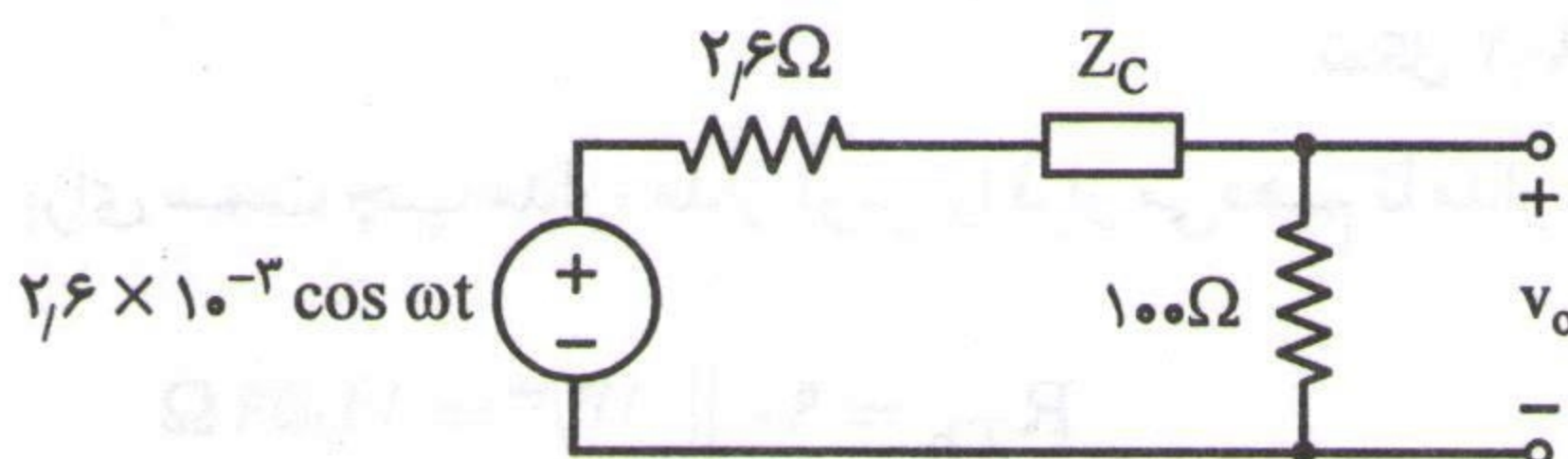
خروجی به دلیل وجود خازن مؤلفه DC ندارد. برای محاسبه خروجی مدار معادل ac را به صورت شکل ۴۱-۲ در نظر می‌گیریم.



شکل ۴۱-۲

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} = \begin{cases} -j10^4 \Omega & \omega = 10^6 \text{ rad/sec} \\ -j100 \Omega & \omega = 10^8 \text{ rad/sec} \\ -j1 \Omega & \omega = 10^{10} \text{ rad/sec} \end{cases}$$

برای سادگی، مدار معادل تونن سمت چپ را قرار می‌دهیم (شکل ۴۲-۲). فازور خروجی برابر است با



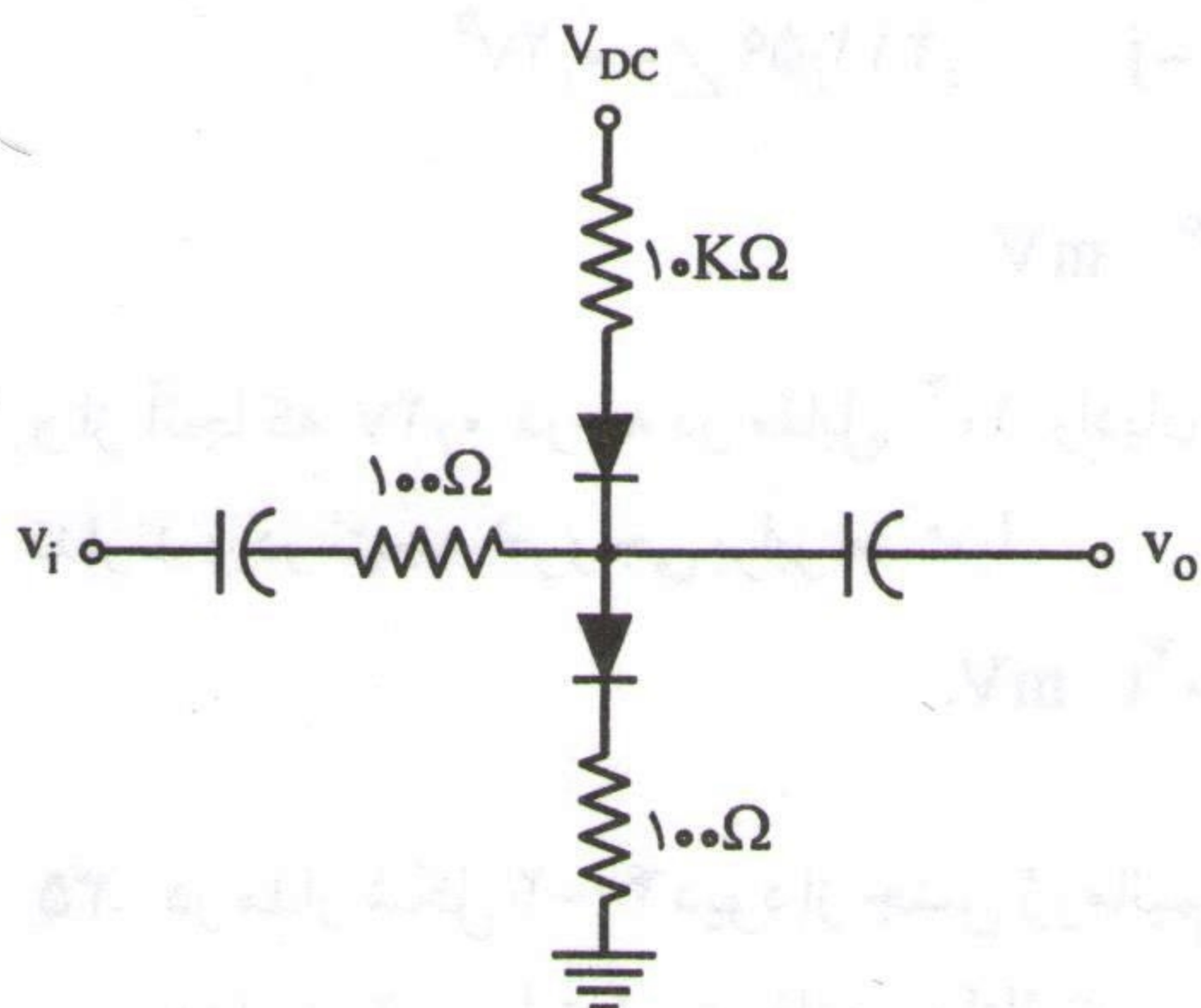
شکل ۴۲-۲

$$V_o = \frac{2.6 \times 10^{-3} \angle 0^\circ}{2.6 + 100 + Z_C} \times 100$$

بنابراین فازور خروجی برابر است با

$$V_o = \begin{cases} 2.6 \times 10^{-5} \angle 89.4^\circ & \omega = 10^6 \text{ rad/sec} \\ 1.81 \times 10^{-3} \angle 44.26^\circ & \omega = 10^8 \text{ rad/sec} \\ 2.5 \times 10^{-3} \angle 0.56^\circ & \omega = 10^{10} \text{ rad/sec} \end{cases}$$

■



شکل ۴۳-۲

۳۶. در مدار کنترل خودکار بهره‌شکل ۴۳-۲، دیودها از

جنس ژرمانیم و دارای ولتاژ هدایت ۰٫۲ ولت هستند.

نسبت v_o/v_i را برای ولتاژهای ۱۰، ۱، ۰، V_{DC}

ولت به دست آورید ($\eta = 1$ و $V_T = 25 \text{ mV}$).

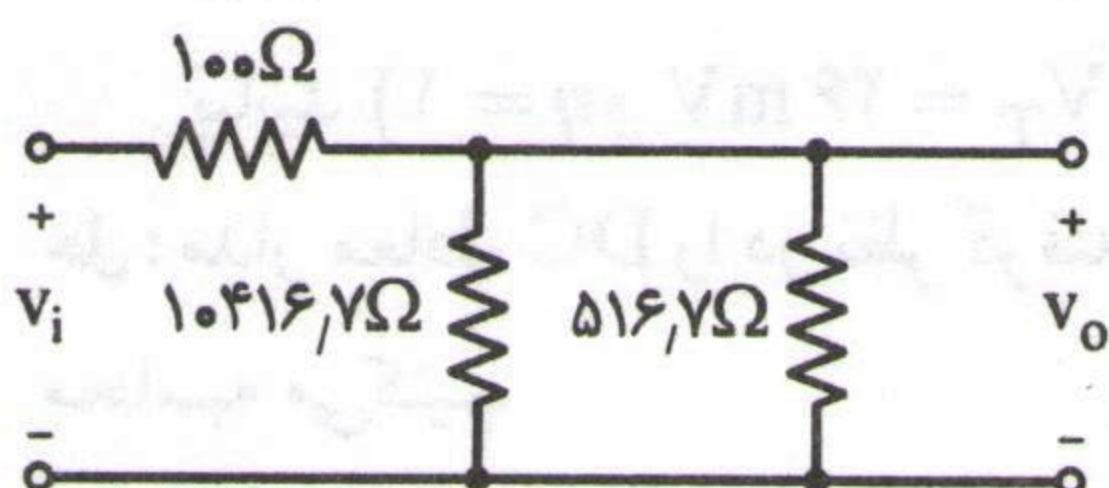
حل: به ازای $V_{DC} = 0$ دیودها قطع و در نتیجه $v_o = v_i$

است. به ازای $V_{DC} = 1 \text{ V}$ دیودها روشن شده و داریم

$$I_D = \frac{1 - 0.2 - 0.2}{10 + 0.1} = 0.06 \text{ mA}$$

$$\Rightarrow r_d = \eta V_T / I_D = 416.7 \Omega$$

در این حالت مدار معادل ac به صورت شکل ۴۴-۲ است.



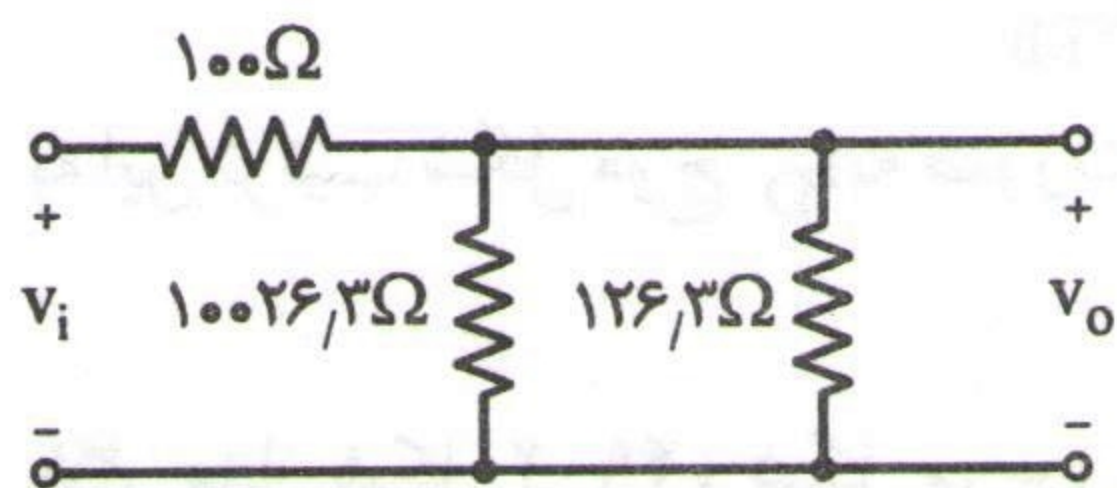
شکل ۴۴-۲

$$v_o = \frac{492 v_i}{100 + 492} = 0.83 v_i \Rightarrow \frac{v_o}{v_i} = 0.83$$

اما به ازای $V_{DC} = 10V$ داریم

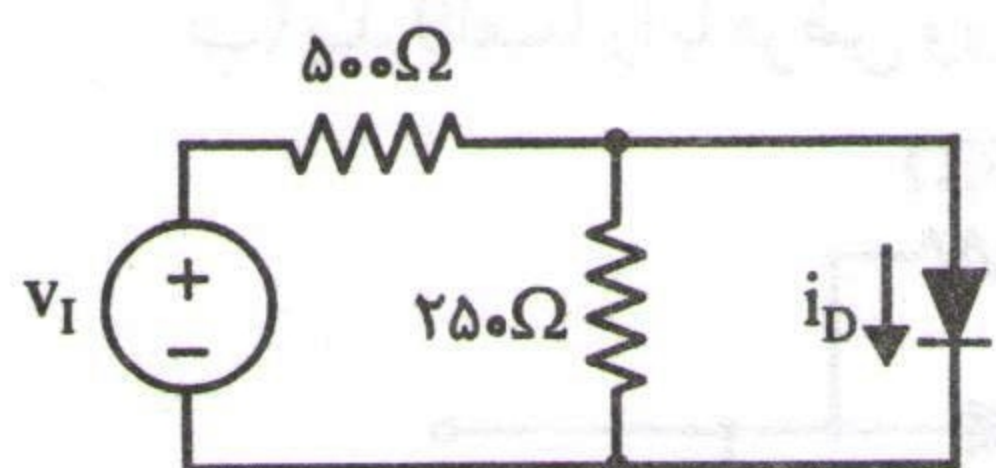
$$I_D = \frac{10 - 0.4}{10.1} = 0.95 \text{ mA} \Rightarrow r_d = \eta V_T / I_D = 26.3 \Omega$$

بنابراین با توجه به مدار معادل ac شکل ۴۵-۲ داریم



شکل ۴۵-۲

$$v_o = \frac{124.73 v_i}{100 + 124.73} = 0.555 v_i \Rightarrow \frac{v_o}{v_i} = 0.555$$

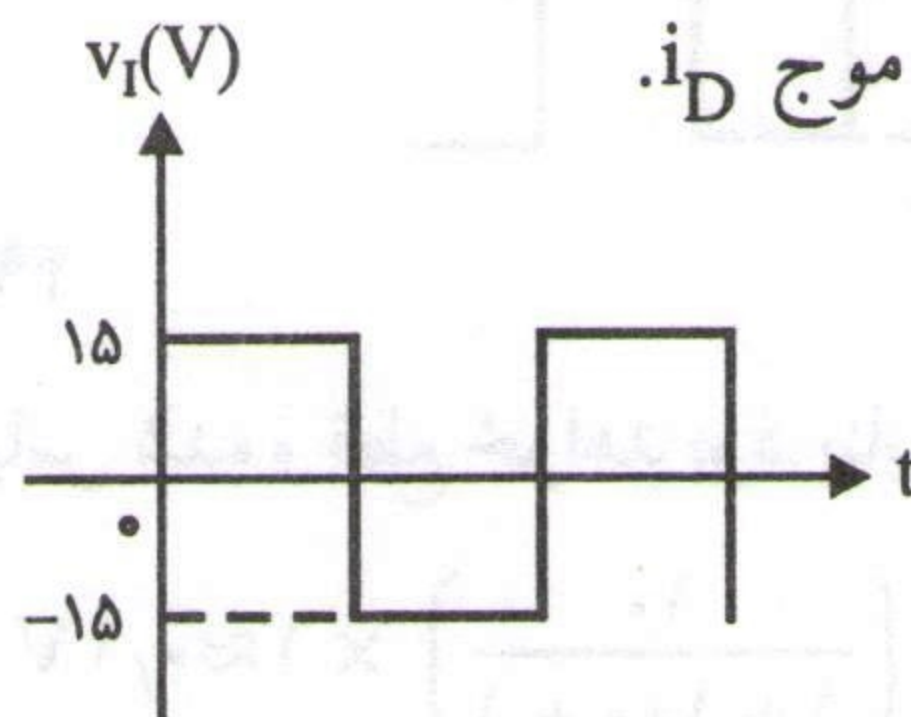
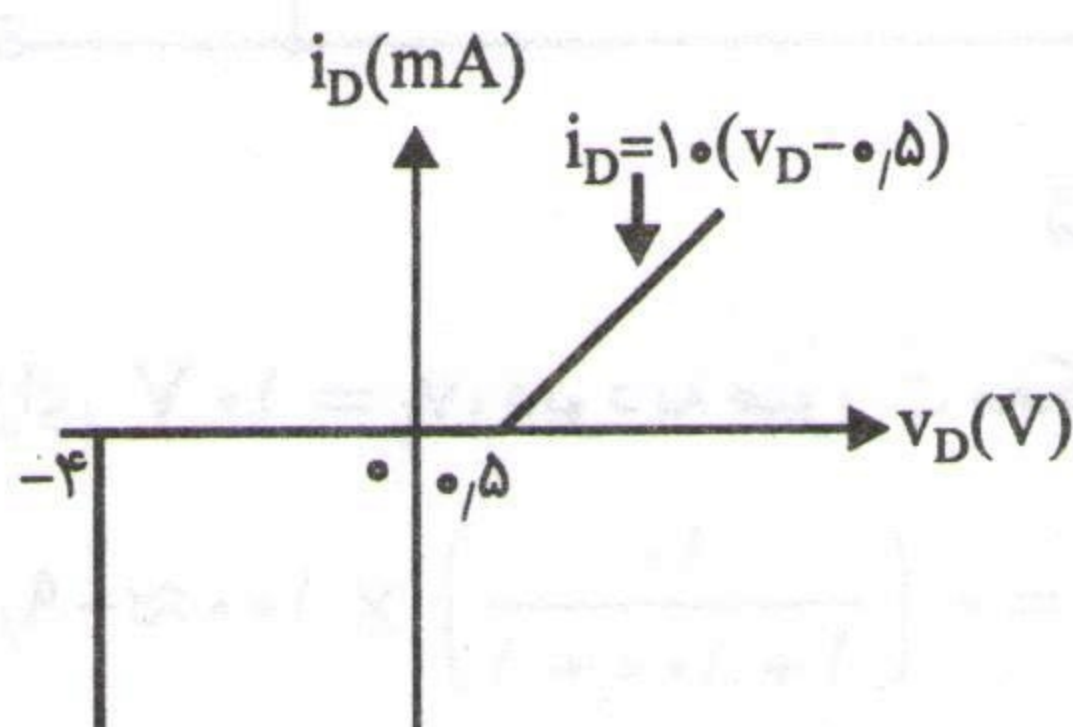


شکل ۴۶-۲

۳۷. مدار شکل ۴۶-۲ را در نظر بگیرید، با توجه به شکل موج ورودی و مشخصه ولتاژ-جریان دیود که در شکل ۴۷-۲ آمده، مطلوب است

الف) مدار معادل تونن دو سر دیود.

ب) شکل موج i_D .



شکل ۴۷-۲

حل: الف) $R_{Th} = 500 \parallel 250 = \frac{500}{3} \Omega$, $v_{Th} = \left(\frac{v_i}{500 + 250} \right) \times 250 = \frac{1}{3} v_i$

ب) از معادله KVL در مدار داریم

$$v_{Th} = R_{Th} i_D + v_D \Rightarrow v_D = \frac{1}{3} v_i - \frac{0.5}{3} i_D = \frac{1}{3} v_i - \frac{1}{6} i_D$$

به ازای $v_i = 15V$ ، دیود به صورت مستقیم بایاس شده و در ناحیه خطی خود کار می‌کند.

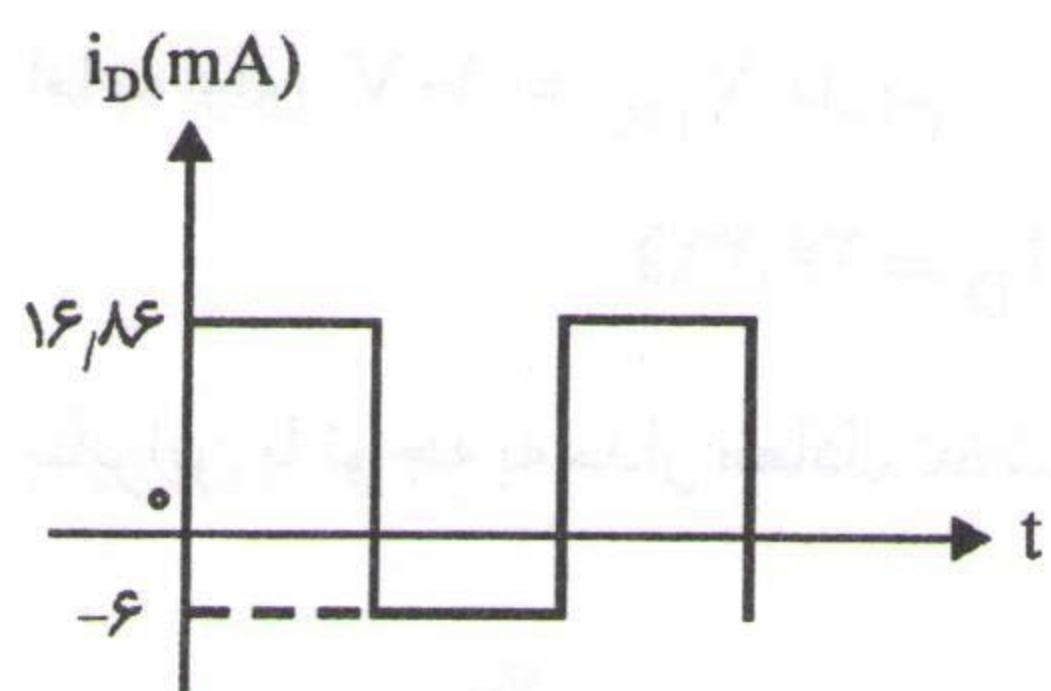
$$v_D = 5 - \frac{1}{6} i_D \Rightarrow i_D = 30 - 6 v_D \text{ mA}$$

اگر در معادله ناحیه خطی قرار دهیم، داریم

$$30 - 6 v_D = 10(v_D - 0.5) \Rightarrow v_D = 2.19V , i_D = 16.86 \text{ mA}$$

به ازای $v_i = -15V$ ، دیود به صورت معکوس بایاس شده و داریم

$$v_{Th} = \frac{1}{3} v_i = -5V$$



شکل ۴۸-۲

بنابراین دیود وارد ناحیه شکست شده و ولتاژ دوسر آن برابر -4 ولت است و داریم

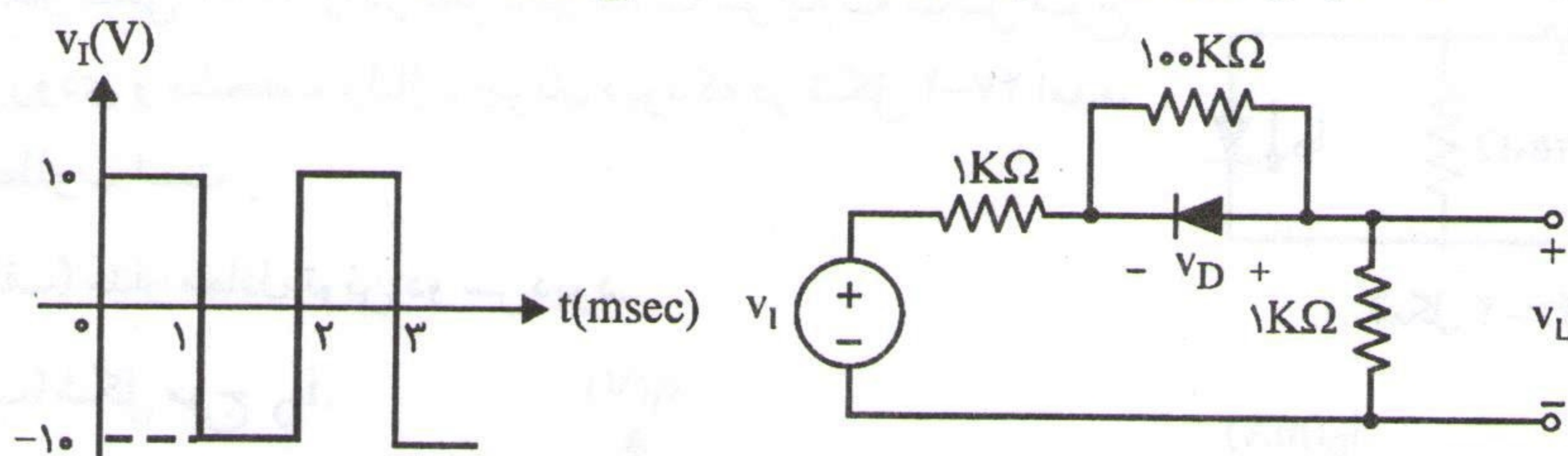
$$i_D = \frac{-5 - (-4)}{R_{Th}} = -6 \text{ mA}$$

به این ترتیب شکل موج i_D به صورت شکل ۴۸-۲ خواهد بود.

۳۸. مدار شکل ۴۹-۲ و شکل موج ورودی آن را در نظر بگیرید.

(الف) با فرض ایده‌آل بودن دیود ولتاژ v_L را به دست آورده و رسم کنید.

(ب) بند (الف) را با فرض ورودی مثلی تکرار کنید (دامنه موج ورودی را 10 ولت در نظر بگیرید).



شکل ۴۹-۲

حل: (الف) به ازای $v_I = 10 \text{ V}$ ، دیود به صورت معکوس بایاس شده و قطع خواهد بود. بنابراین

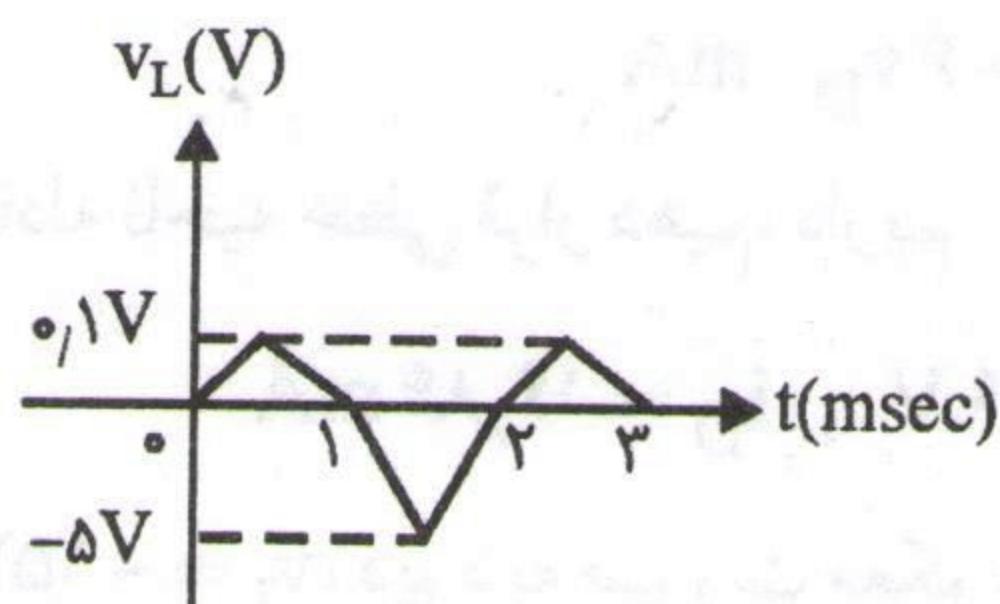
$$v_L = \left(\frac{10}{1 + 100 + 1} \right) \times 1 \approx 0.1 \text{ V}, \quad v_D = - \left(\frac{10}{1 + 100 + 1} \right) \times 100 \approx -9.8 \text{ V}$$

که قطع بودن دیود را تأیید می‌کند. به ازای $v_I = -10 \text{ V}$ ، دیود به صورت مستقیم بایاس شده و وصل خواهد بود. بنابراین مقاومت $100 \text{ K}\Omega$ حذف شده و داریم

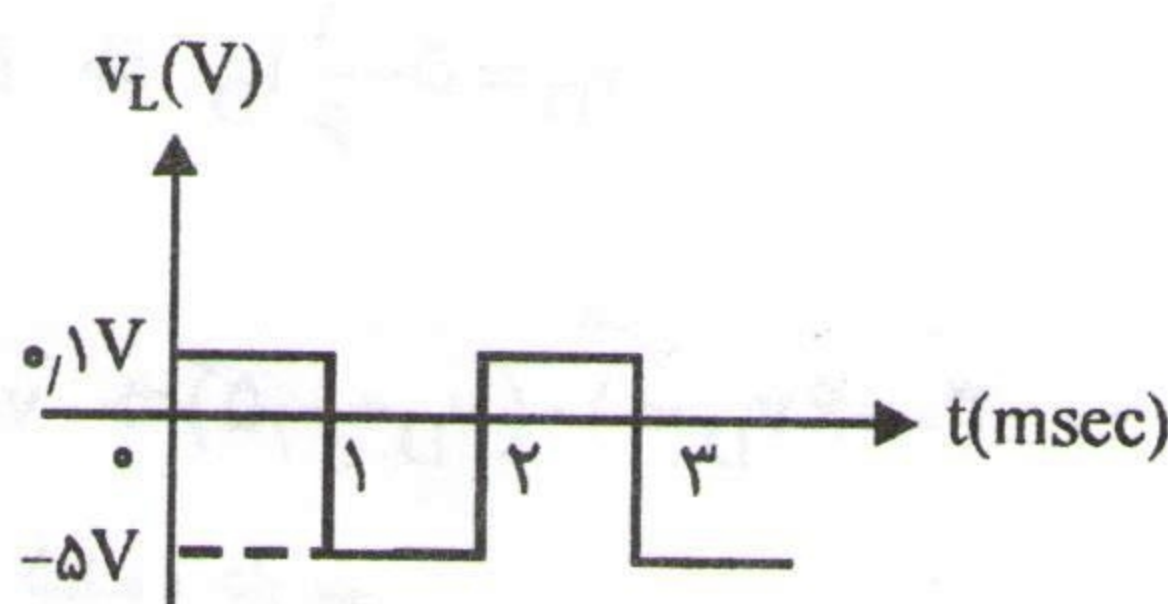
$$v_L = \left(\frac{v_I}{1 + 1} \right) \times 1 = -5 \text{ V}, \quad I_D = \frac{-v_I}{1 + 1} = 5 \text{ mA}$$

بنابراین شکل موج v_L به صورت شکل ۵۰-۲ خواهد بود.

(ب) به ازای ورودی مثلی نیز به همین ترتیب، در سیکل مثبت ورودی، دیود قطع و در سیکل منفی ورودی، دیود وصل و در نتیجه شکل موج v_L به صورت شکل ۵۱-۲ خواهد بود.

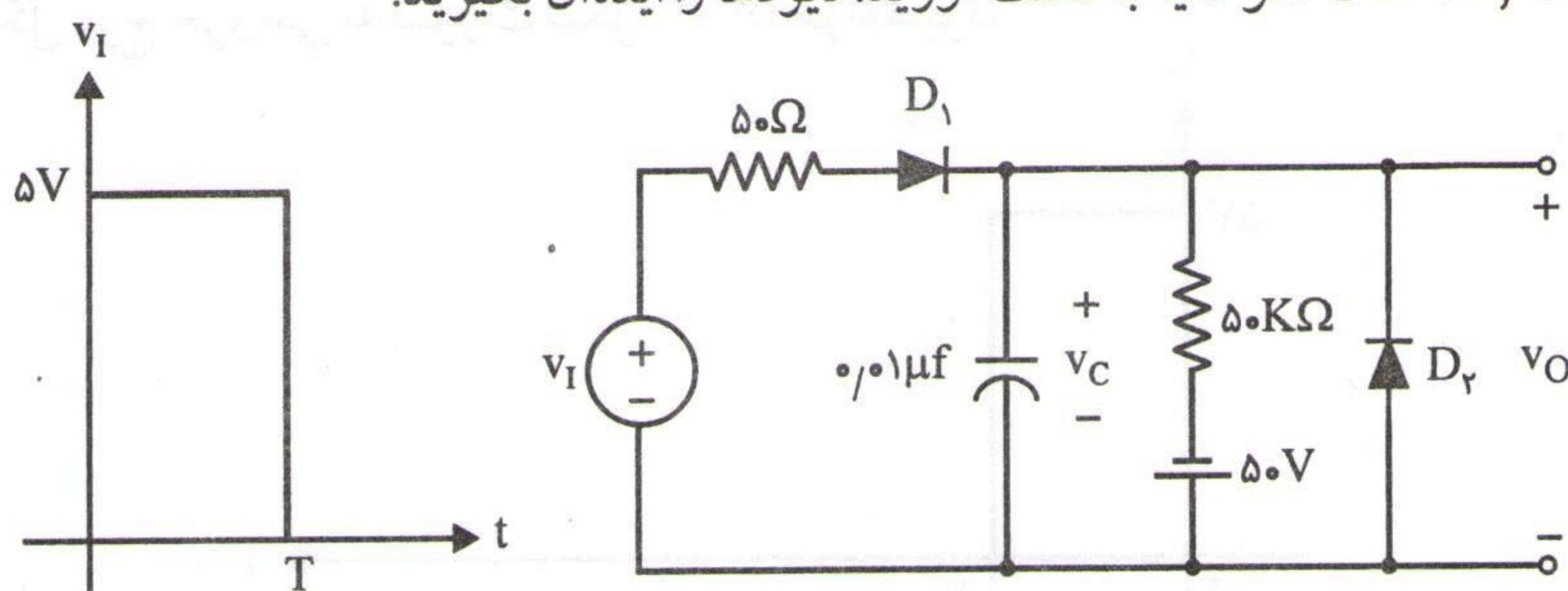


شکل ۵۱-۲



شکل ۵۰-۲

۳۹. در مدار شکل ۵۲-۲ خروجی را به ازای پالس ورودی نشان داده شده برای $t \geq 0$ و برای سه حالت $T = 10, 20, 30$ نانو ثانیه به دست آورید. دیودها را ایده آل بگیرید.



شکل ۵۲-۲

حل: برای $t < 0$ که ورودی صفر است دیود D_1 به صورت معکوس بایاس و در نتیجه قطع می باشد. ولی دیود D_2 توسط منبع 50 ولتی بایاس مستقیم شده و هدایت می کند. بنابراین ولتاژ دو سر خازن و ولتاژ خروجی صفر است.

$$v_O(t) = v_C(t) = 0, \quad t \leq 0$$

با آمدن پالس ورودی در $t = 0^+$ از آنجا که $v_C(0) = 0$ می باشد، دیود D_1 به صورت مستقیم بایاس شده و هدایت می کند که در این صورت دیود D_2 به صورت معکوس بایاس شده و قطع می گردد. بنابراین

$$v_O(t) = v_C(t) = v_C(\infty) + [v_C(0) - v_C(\infty)]e^{-t/\tau_1}, \quad 0 \leq t \leq T$$

$$v_C(0) = 0, \quad v_C(\infty) = V_{Th}, \quad \tau_1 = R_{Th} C$$

$$V_{Th} = \frac{5 - (-50)}{50 + 50000} \times 50000 - 50 = 4.95V, \quad R_{Th} = 50 \parallel 50000 \approx 50\Omega$$

$$\tau_1 = R_{Th} C = 500 \text{ nsec}$$

$$v_O(t) = 4.95(1 - e^{-t/500}) \quad 0 \leq t \leq T$$

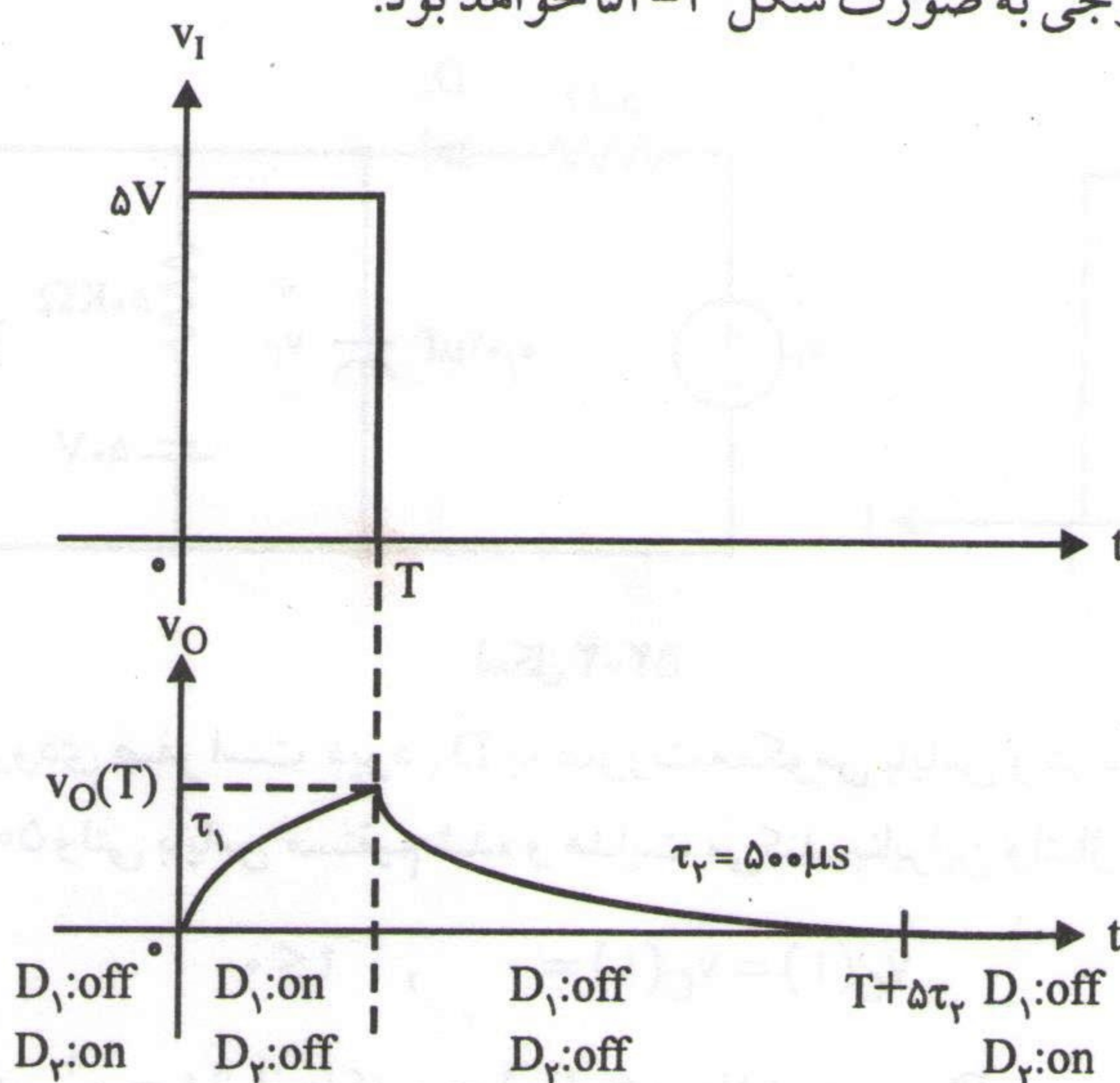
$$v_O(T) = 4.95(1 - e^{-T/500}) \Rightarrow v_O(T) = \begin{cases} 0.98 & T = 10 \\ 0.1941 & T = 20 \\ 0.2883 & T = 30 \end{cases}$$

برای $t \geq T$ با صفر شدن پالس ورودی، دیود D_1 به صورت معکوس بایاس و قطع می گردد و همچنین تا زمانی که $v_C > 0$ می باشد، دیود D_2 نیز قطع خواهد بود. بنابراین خازن در مقاومت $50K\Omega$ و منبع 50 ولتی تخلیه گردیده تا ولتاژ آن به صفر برسد. با صفر شدن v_C ، دیود D_2 هدایت کرده و ولتاژ خازن در صفر ثابت خواهد ماند.

$$v_O(t) = v_C(\infty) + [v_C(T) - v_C(\infty)]e^{-(t-T)/\tau_2}, \quad t \geq T$$

$$v_C(\infty) = -50V, \quad \tau_T = 50 \times 10^3 \times 0.1 \times 10^{-6} = 500 \mu\text{sec} \gg \tau_1$$

بنابراین شکل موج خروجی به صورت شکل ۵۳-۲ خواهد بود.



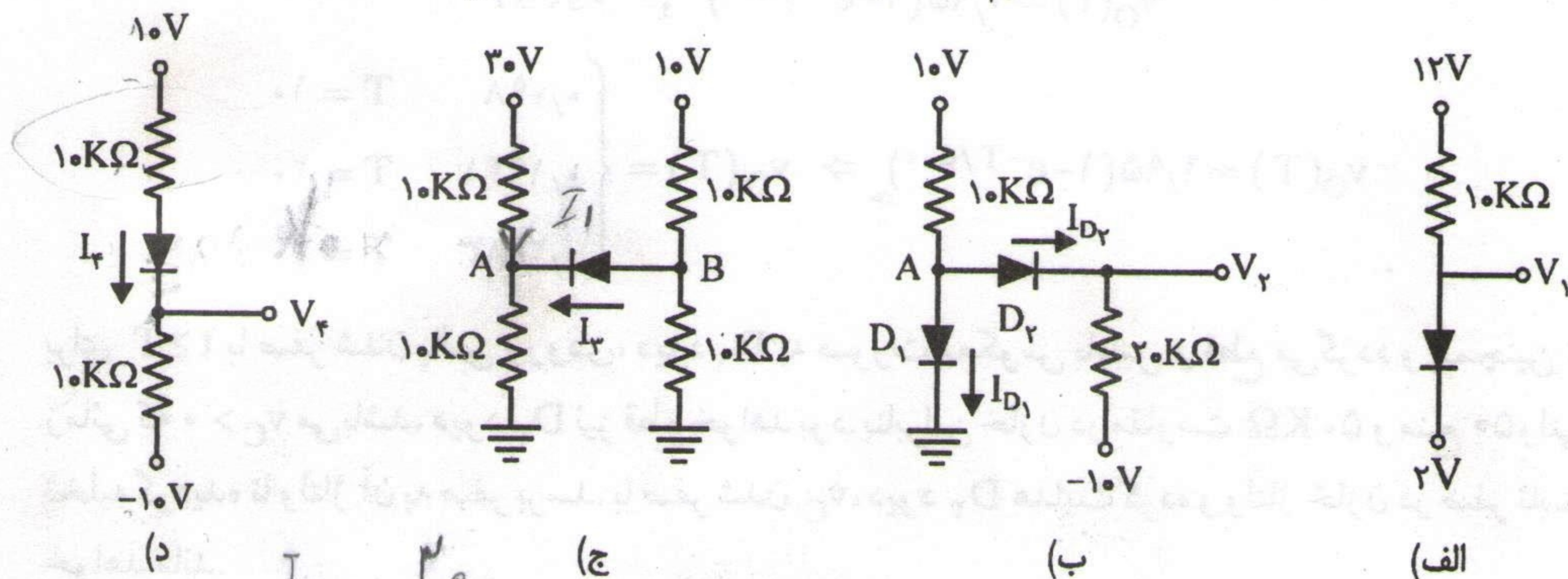
شکل ۵۳-۲

۴۰. در مدارهای دیودی شکل ۵۴-۲ ولتاژها و جریانهای نشان داده شده را محاسبه کنید. دیودها را ایده‌آل در نظر بگیرید.

حل: الف) ولتاژ آند بیشتر از ولتاژ کاتد است، بنابراین دیود هدایت نموده و $V_1 = 2V$ می‌گردد.
ب) با توجه به نحوه بایاس دیودها، هر دو دیود روشن خواهند بود و داریم

$$V_A = 0 \Rightarrow V_T = 0$$

$$I_{D_T} = \frac{V_T - (-10)}{20} = 0.5 \text{ mA} \quad I_{D_1} = \frac{10 - V_A}{10} - I_{D_T} = 0.5 \text{ mA}$$



شکل ۵۴-۲

$$I = \frac{20}{10k}$$

$$V_T = 10 - 10k \cdot \frac{20}{10k}$$

(ج) با فرض اینکه دیود قطع است داریم

$$V_B = \left(\frac{10}{10+10} \right) \times 10 = 5V, \quad V_A = \left(\frac{10}{10+10} \right) \times 30 = 15V$$

بنابراین ولتاژ کاتد دیود بیشتر است و فرض قطع دیود صحیح بوده و I_3 برابر صفر خواهد بود.
(د) با توجه به مدار، دیود هدایت می‌کند و داریم

$$I_4 = \frac{10 - (-10)}{10+10} = 1mA, \quad V_4 = 10 - 10 \times 1 = 0V$$

(ه) با توجه به نحوه تغذیه دیودها، به نظر می‌رسد تمام دیودها روشن هستند. در این صورت $V_5 = 0V$ می‌گردد. جریانهای مدار برابر است با

$$I_4 = I = \frac{10 - V_5}{10} = \frac{1}{1}mA > 0$$

$$I' = \frac{V_5 - (-10)}{40} = \frac{1}{4}mA$$

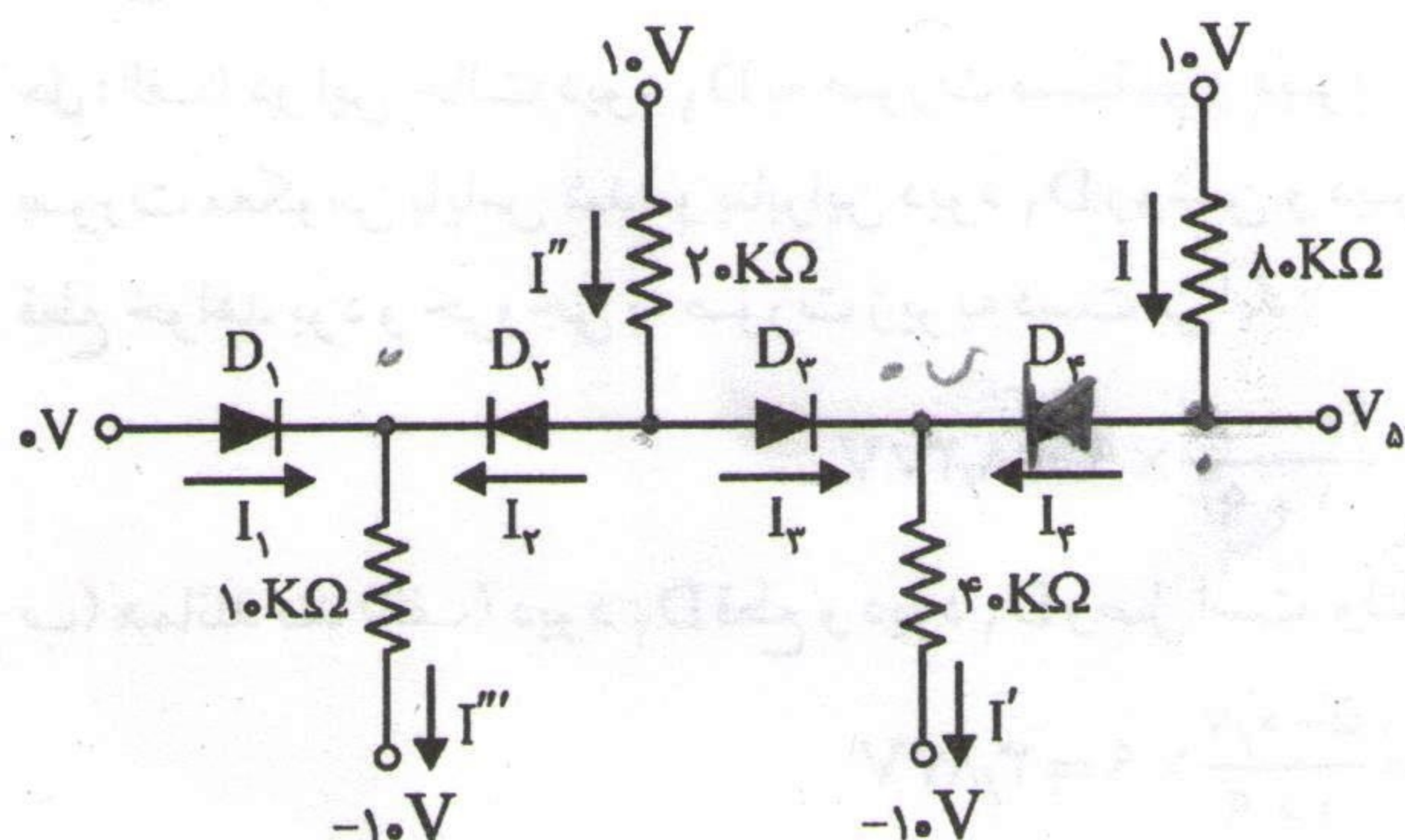
$$I_3 = I' - I_4 = \frac{1}{8}mA > 0$$

$$I'' = \frac{10 - V_5}{20} = \frac{1}{2}mA$$

$$I_2 = I'' - I_3 = \frac{3}{8}mA > 0$$

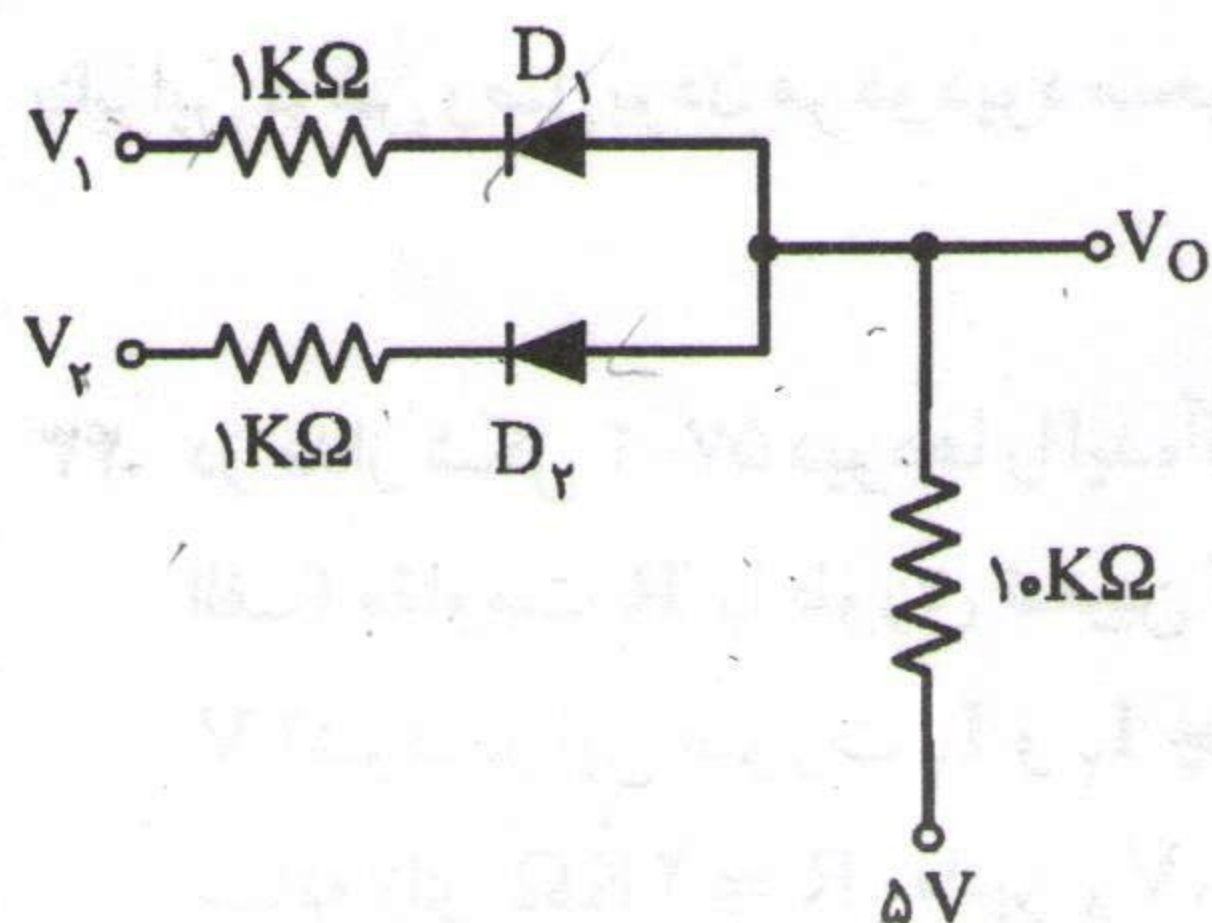
$$I''' = \frac{V_5 - (-10)}{10} = 1mA$$

$$I_1 = I''' - I_2 = \frac{5}{8}mA > 0$$



شکل ۲-۵۴

که مثبت بودن جریان دیودها، فرض وصل بودن آنها را تأیید می‌نماید.



شکل ۲-۵۵

۴۱. در مدار شکل ۲-۵۵ دیودها ایده‌آل هستند. مطلوب است

ولتاژ خروجی V_0 برای حالت‌های زیر:

(الف) $V_1 = V_2 = 5V$

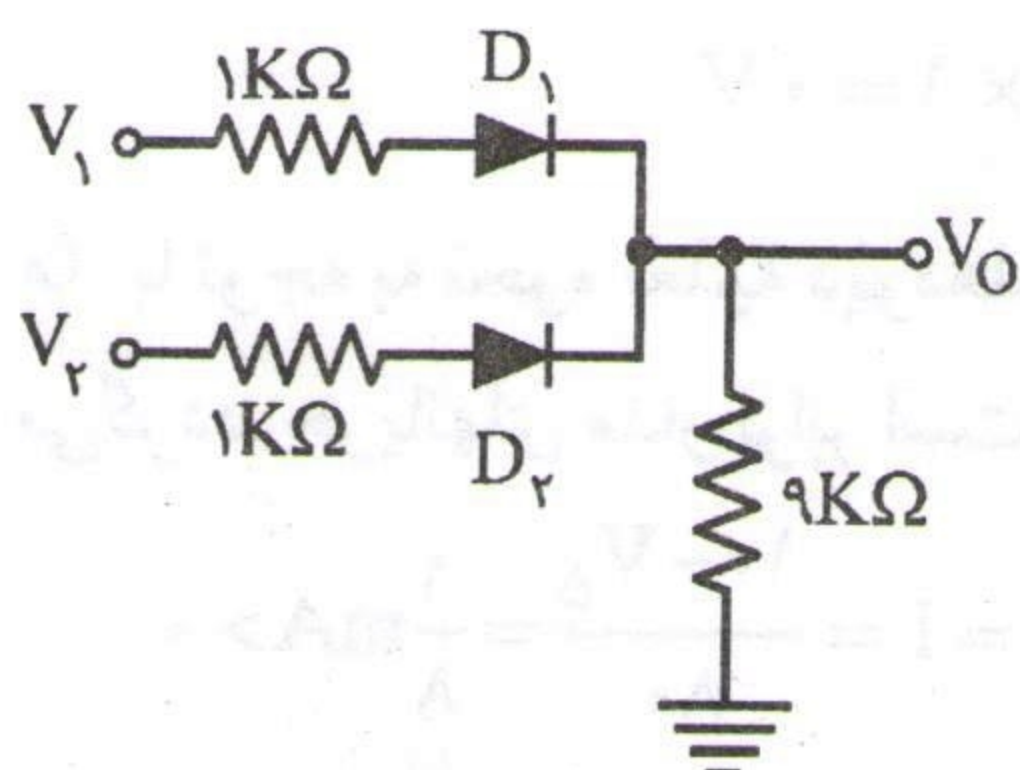
(ب) $V_1 = 5V, V_2 = 0V$

(ج) $V_1 = V_2 = 0V$

حل: الف) $V_1 = V_2 = 5V \Rightarrow D_1, D_2: \text{off} \Rightarrow V_O = 5V$

ب) $V_1 = 5V, V_2 = 0V \Rightarrow D_1: \text{off}, D_2: \text{on} \Rightarrow V_O = \left(\frac{1}{10+1} \right) \times 5 \approx 0.45V$

ج) $V_1 = V_2 = 0 \Rightarrow D_1, D_2: \text{on} \Rightarrow V_O = \left(\frac{1 \parallel 1}{10+1 \parallel 1} \right) \times 5 \approx 0.24V$



شکل ۲-۵۶

۴۲. در مدار شکل ۲-۵۶، برای دیودها $V_D(\text{on}) = 0.7V$ است.

ولتاژ خروجی را به ازای ولتاژهای ورودی داده‌شده به دست آورید و وضعیت قطع یا وصل هر یک از دیودها را مشخص کنید.

الف) $V_1 = 10V, V_2 = 0V$ ب) $V_1 = 5V, V_2 = 0V$

ج) $V_1 = 10V, V_2 = 5V$ د) $V_1 = 5V, V_2 = 5V$

حل: الف) در این حالت دیود D_1 به صورت مستقیم و دیود D_2 به صورت معکوس بایاس شده و بنابراین دیود D_1 روشن و دیود D_2 قطع خواهد بود و خروجی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$V_O = \frac{10 - 0.7}{1 + 9} \times 9 = 8.37V$$

ب) همانند بند الف) دیود D_2 قطع و دیود D_1 وصل است. ولتاژ خروجی برابر است با

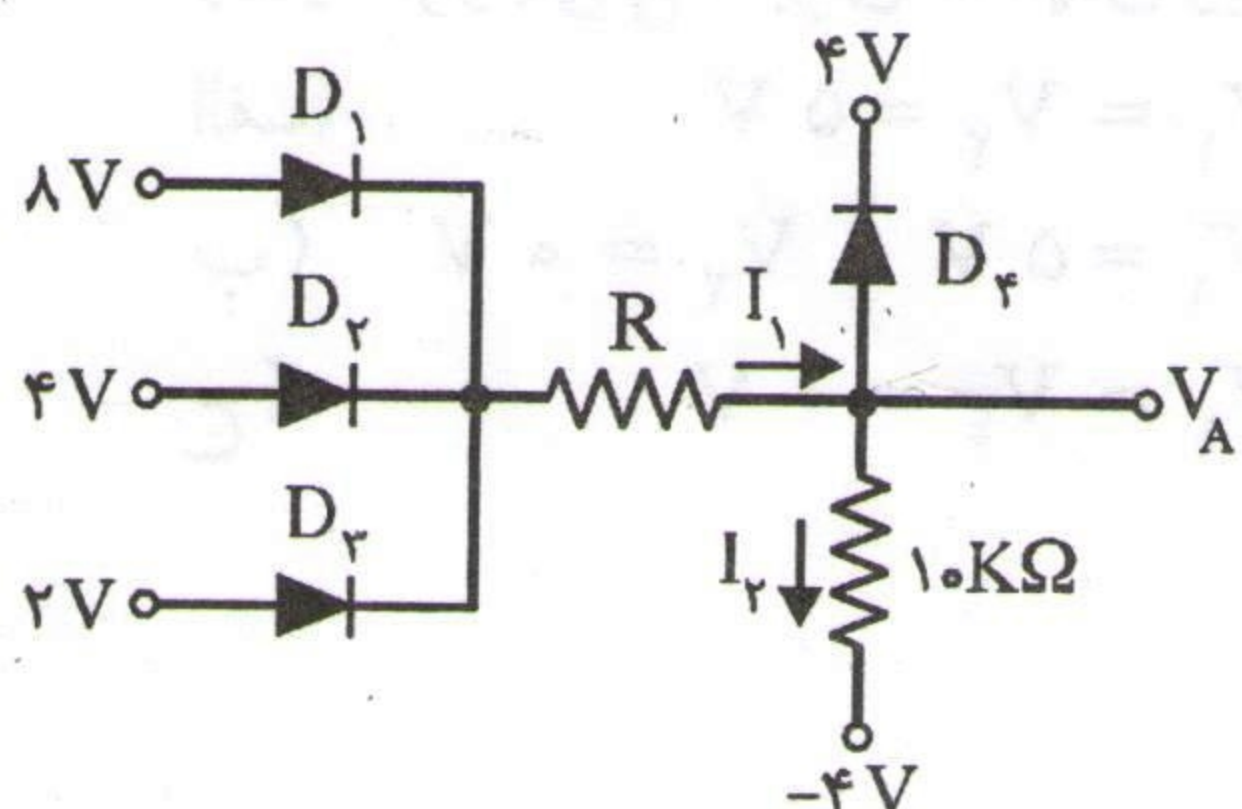
$$V_O = \frac{5 - 0.7}{1 + 9} \times 9 = 3.87V$$

ج) در این حالت اگر فرض کنیم دیود D_1 وصل و دیود D_2 قطع است، در نتیجه همانند بند الف) $V_O = 8.37V$ می‌گردد که در این صورت ولتاژ دو سر دیود D_2 برابر $3.37V$ - ولت خواهد بود و فرض اولیه صحیح می‌باشد.

د) فرض می‌کنیم هر دو دیود در حالت وصل قرار دارند، با نوشتن KCL داریم

$$\frac{V_1 - V_O - 0.7}{1} + \frac{V_2 - V_O - 0.7}{1} = \frac{V_O}{9} \Rightarrow V_O = 4.07V$$

بنابراین فرض وصل بودن هر دو دیود صحیح است. با فرض قطع بودن یکی از دیودها به تناقض خواهید رسید.



شکل ۲-۵۷

۴۳. در مدار شکل ۲-۵۷ دیودها را ایده‌آل فرض کنید.

الف) مقاومت R را طوری تعیین کنید که V_A برابر

$2V$ شود. در این صورت I_1 و I_2 چقدر خواهد بود؟

ب) به ازای $R = 2K\Omega$ مقادیر V_A, I_1 و I_2 را تعیین کنید.

حل: الف) به ازای $V_A = 2V$ ، دیود D_4 قطع بوده و داریم

$$I_1 = I_2 = \frac{V_A - (-4)}{10} = 0.6 \text{ mA}$$

از دیودهای D_1 ، D_2 و D_3 فقط یک دیود می تواند وصل باشد چرا که منابع ولتاژ مختلف نمی توانند موازی گردند. بنابراین دیود D_1 که دارای ولتاژ آند بزرگتری است وصل خواهد شد و در نتیجه ولتاژ کاتد این دیودها برابر $8V$ شده و دیودهای D_2 و D_3 قطع خواهند بود.

$$I_1 = \frac{8 - V_A}{R} = 0.6 \text{ mA} \Rightarrow R = 10 \text{ K}\Omega$$

ب) به ازای $R = 2 \text{ K}\Omega$ ، شرایط دیودهای D_1 ، D_2 و D_3 به همان حالت قبل است یعنی دیود D_1 وصل و دیودهای D_2 و D_3 قطع می باشند. اگر فرض کنیم دیود D_4 قطع است در این صورت داریم

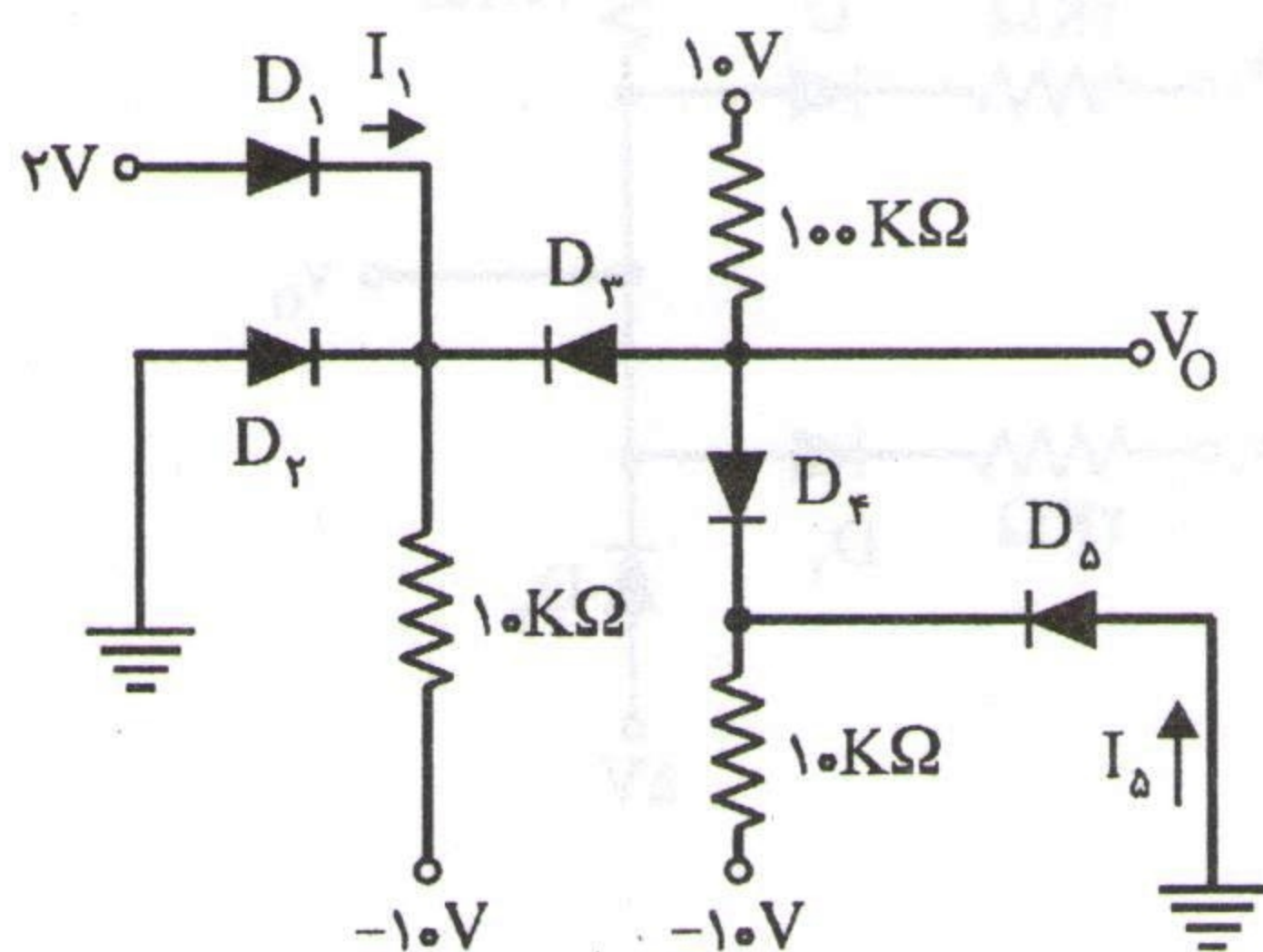
$$I_2 = I_1 = \frac{8 - (-4)}{R + 10} = 1 \text{ mA} \Rightarrow V_A = 10 I_2 - 4 = 6V > 4V$$

بنابراین چون ولتاژ آند دیود D_4 از ولتاژ کاتد آن بیشتر است فرض قطع بودن D_4 صحیح نبوده و این دیود روشن خواهد بود. در این صورت داریم

$$V_A = 4V, \quad I_1 = \frac{8 - V_A}{R} = 2 \text{ mA}$$

$$I_2 = \frac{V_A - (-4)}{10} = 0.8 \text{ mA} \Rightarrow I_{D_4} = I_1 - I_2 = 1.2 \text{ mA}$$

که وصل بودن دیود D_4 را تأیید می کند.



شکل ۲-۵۸

۴۴. در مدار شکل ۲-۵۸ با فرض ایده آل بودن دیودها، ولتاژ V_O و جریانهای I_1 و I_5 را تعیین کنید.

حل: از دیودهای D_1 و D_2 فقط دیود دارای ولتاژ آند بزرگتر وصل خواهد بود. بنابراین دیود D_2 قطع و دیود D_1 وصل خواهد بود و در نتیجه ولتاژ کاتد دیود D_3 برابر $2V$ می گردد. اگر دیود D_3 را قطع در نظر بگیریم، دیود D_4 حتماً وصل خواهد بود. حال اگر دیود D_5 را نیز وصل فرض کنیم، ولتاژ خروجی برابر صفر می شود. به این ترتیب شرایط وصل بودن دیودهای

D_4 و D_5 و قطع بودن دیود D_3 با توجه به ولتاژ دو سر آنها مهیا می باشد و فرضهای انجام شده صحیح است. توجه کنید اگر در این حالت D_5 را قطع فرض کنید، داریم

$$I_{D_4} = \frac{10 - (-10)}{100 + 10} = 0.182 \text{ mA} \Rightarrow V_O = 10 I_{D_4} - 10 = -8.18V$$

که با فرض قطع بودن دیود D_5 در تناقض می باشد چرا که ولتاژ آند آن صفر و ولتاژ کاتد آن برابر $18V$ است و باید روشن باشد. همچنین اگر دیود D_3 را وصل در نظر بگیرید در این صورت ولتاژ خروجی برابر $2V$ می شود و از دیودهای D_4 و D_5 فقط یکی می تواند وصل شود. اگر دیود D_5 وصل در نظر گرفته شود، دیود D_4 نیز وصل شده و ولتاژ خروجی صفر می گردد که در تناقض با وصل بودن دیود D_3 است. پس دیود D_5 قطع و دیود D_4 وصل خواهد بود و از KCL داریم

$$I_{D_3} = \frac{10 - V_O}{100} - \frac{V_O - (-10)}{10} = -1.12 \text{ mA} < 0$$

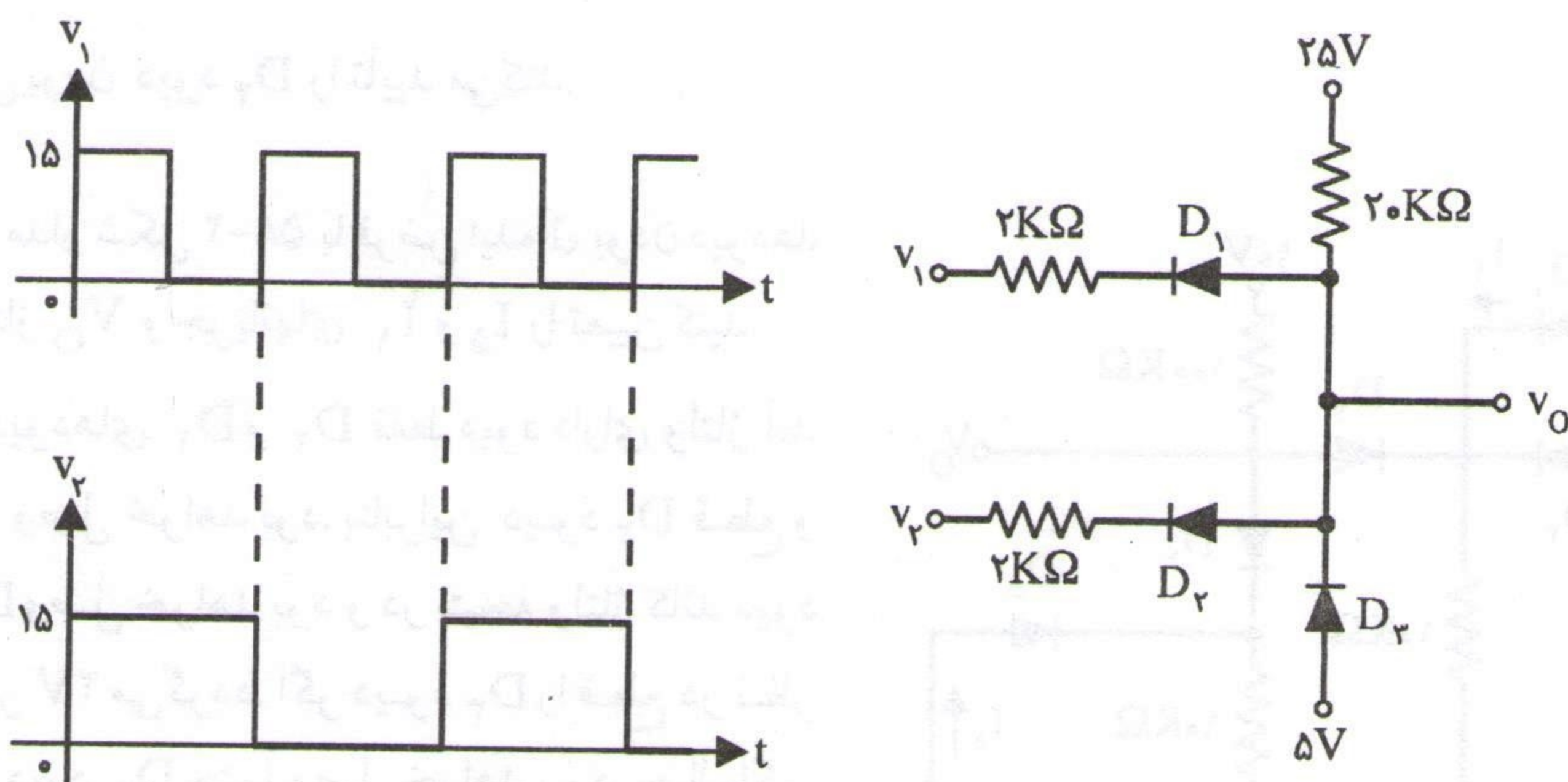
که این به معنای نقض فرض وصل بودن دیود D_3 است. به این ترتیب دیود D_3 قطع و دیودهای D_4 و D_5 وصل هستند و ولتاژ خروجی برابر صفر خواهد بود. در این صورت داریم

$$I_1 = \frac{2 - (-10)}{10} = 1.2 \text{ mA}, \quad I_5 = \frac{V_O - (-10)}{10} - \frac{10 - V_O}{100} = 0.9 \text{ mA}$$

۴۵. در مدار شکل ۵۹-۲ دیودها ایده آل هستند. با توجه به شکل موج ولتاژهای v_1 و v_2 ، شکل موج ولتاژ خروجی را رسم کنید.

حل: الف) به ازای $v_1 = v_2 = 15V$ ، دیودهای D_1 و D_2 وصل خواهند بود که در این صورت دیود D_3 قطع باید باشد؛ چرا که در غیر این صورت $v_O = 5V$ شده و دیودهای D_1 و D_2 باید قطع باشند. بنابراین از KCL در خروجی داریم

$$\frac{25 - v_O}{20} = \frac{v_O - v_1}{2} + \frac{v_O - v_2}{2} \Rightarrow v_O \approx 15.48V$$

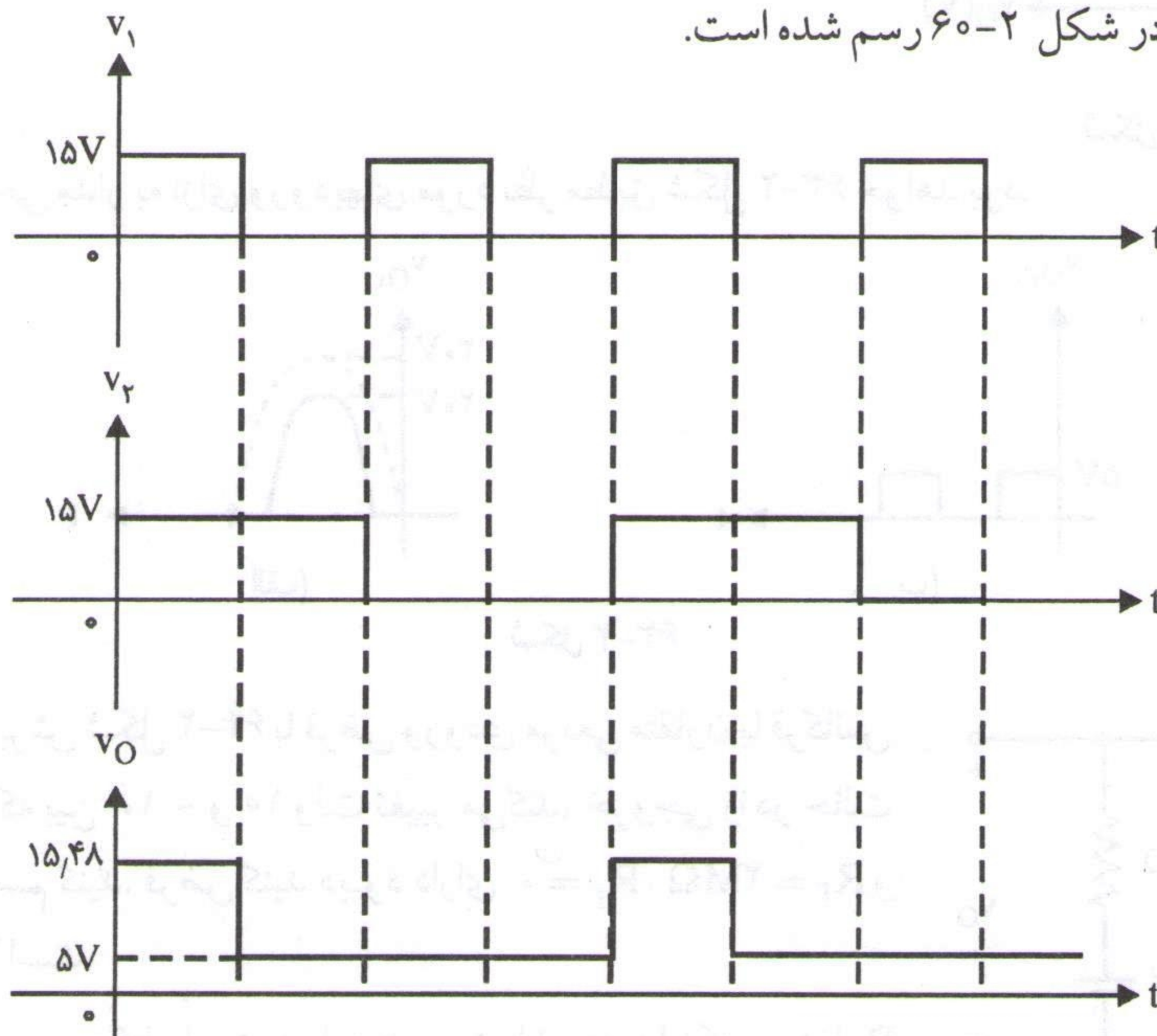


شکل ۵۹-۲

که نشان می دهد شرایط برای قطع بودن دیود D_3 و وصل بودن دیودهای D_1 و D_2 برقرار است. ب) به ازای $v_1 = 15V$ و $v_2 = 0V$ ، دیود D_2 وصل می باشد. اگر فرض شود که دیود D_3 وصل است در این صورت حتماً دیود D_1 قطع خواهد بود چرا که ولتاژ آند آن $5V$ و ولتاژ کاتد آن $15V$ است. بنابراین خروجی برابر $5V$ بوده و شرایط برای وصل بودن دیودهای D_2 و D_3 و قطع بودن دیود D_1 فراهم است.

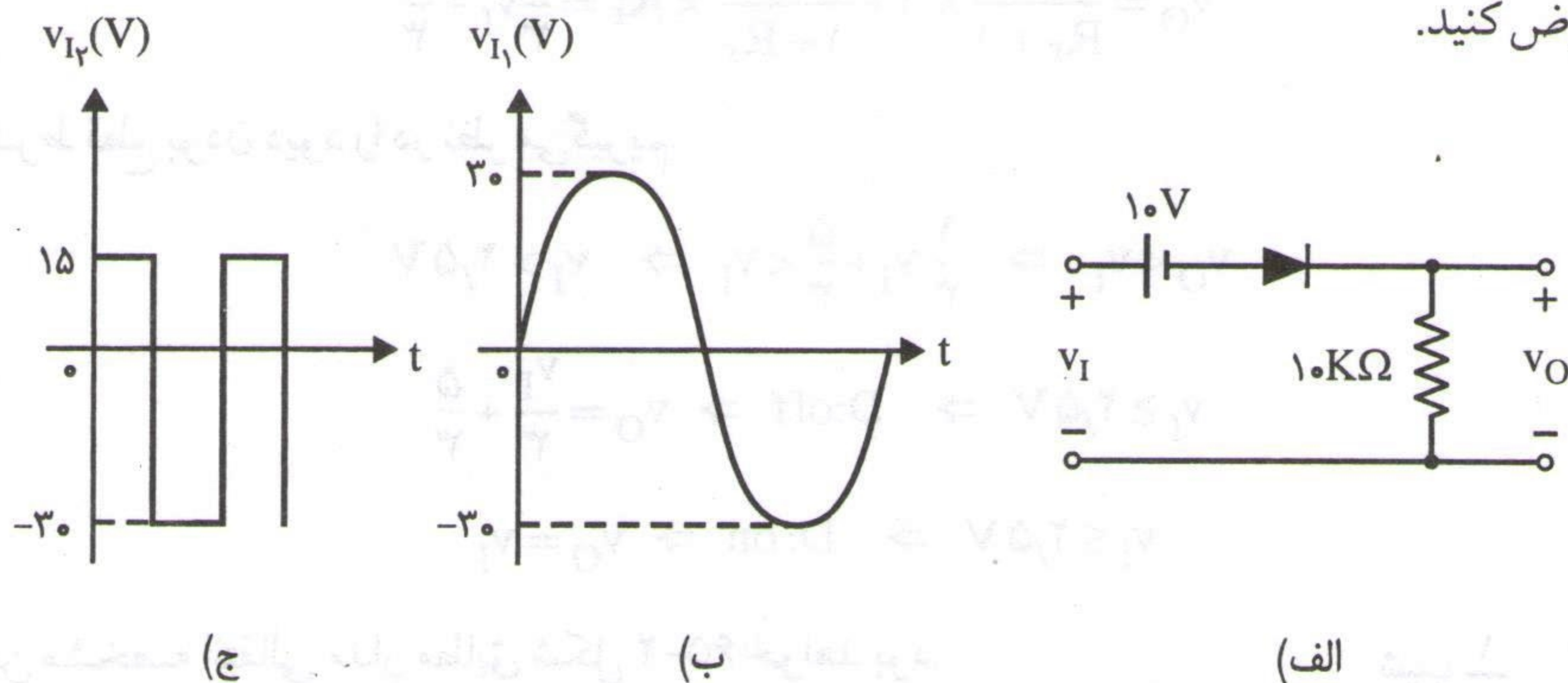
(ج) به ازای $v_1 = 0V$ و $v_2 = 15V$ ، مشابه حالت قبل، دیودهای D_1 و D_3 وصل و دیود D_2 قطع بوده و ولتاژ خروجی برابر $5V$ است.

(د) به ازای $v_1 = v_2 = 0V$ ، هر سه دیود وصل خواهند بود و ولتاژ خروجی برابر $5V$ می باشد. شکل موج ولتاژ خروجی در شکل ۶۰-۲ رسم شده است.



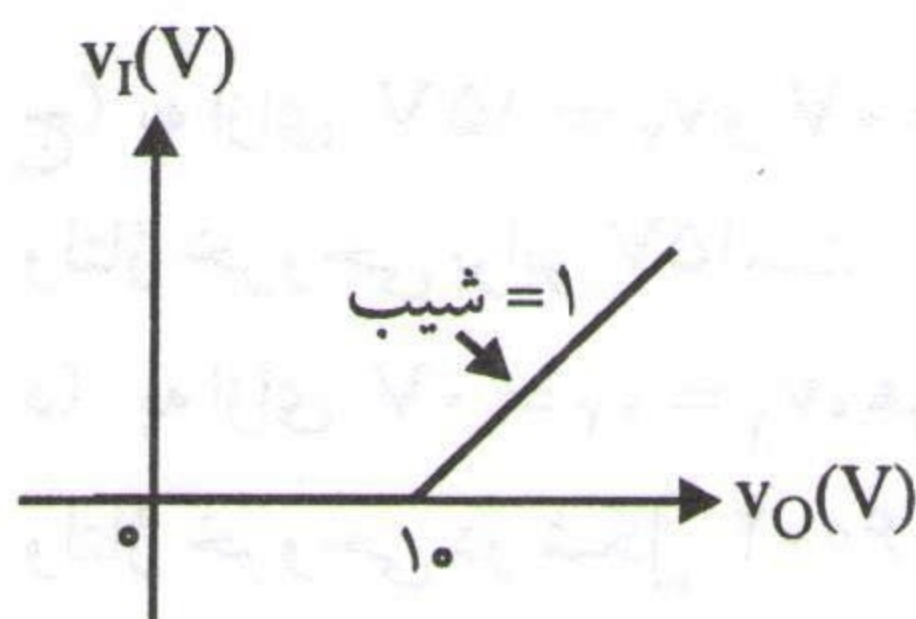
شکل ۶۰-۲

۴۶. خروجی مدار شکل ۶۱-۲ را برای ورودیهای نشان داده شده محاسبه و ترسیم نمایید. دیود را ایده آل فرض کنید.



شکل ۶۱-۲

حل: با توجه به مدار، دیود به ازای ورودیهای $v_I \geq 10V$ هدایت کرده و به ازای $v_I \leq 10V$ قطع می باشد. منحنی مشخصه مدار به صورت شکل ۶۲-۲ است.

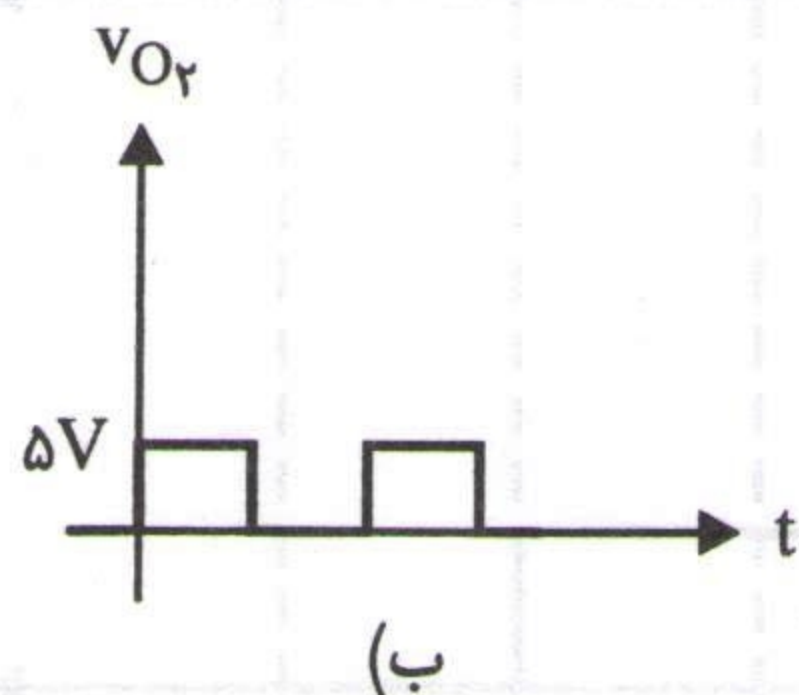


شکل ۲-۶۲

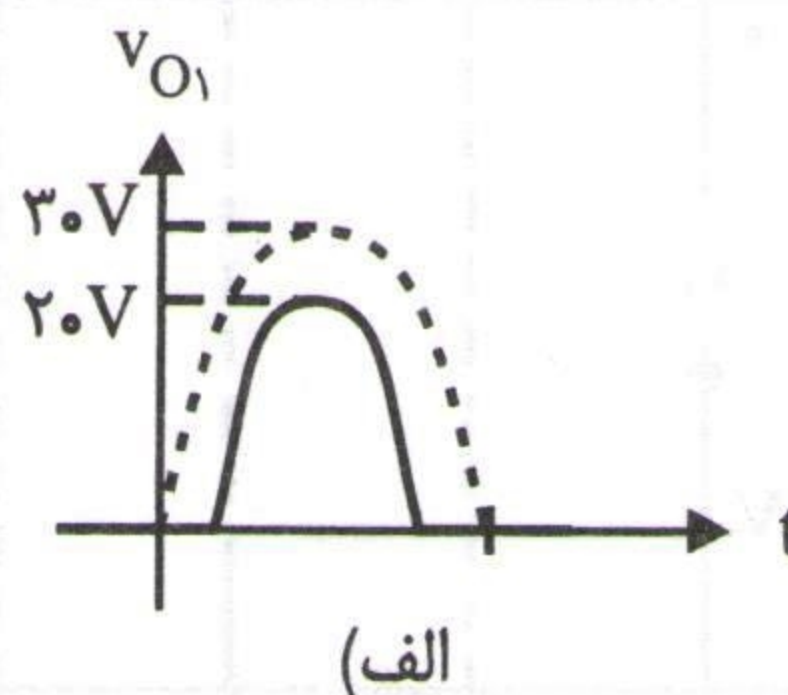
$$v_I \leq 1.0 \text{ V} \Rightarrow D:\text{off} \Rightarrow v_O = 0$$

$$v_I \geq 1.0 \text{ V} \Rightarrow D:\text{on} \Rightarrow v_O = v_I - 1.0$$

بنابراین خروجی مدار به ازای ورودیهای مورد نظر مطابق شکل ۲-۶۳ خواهد بود.

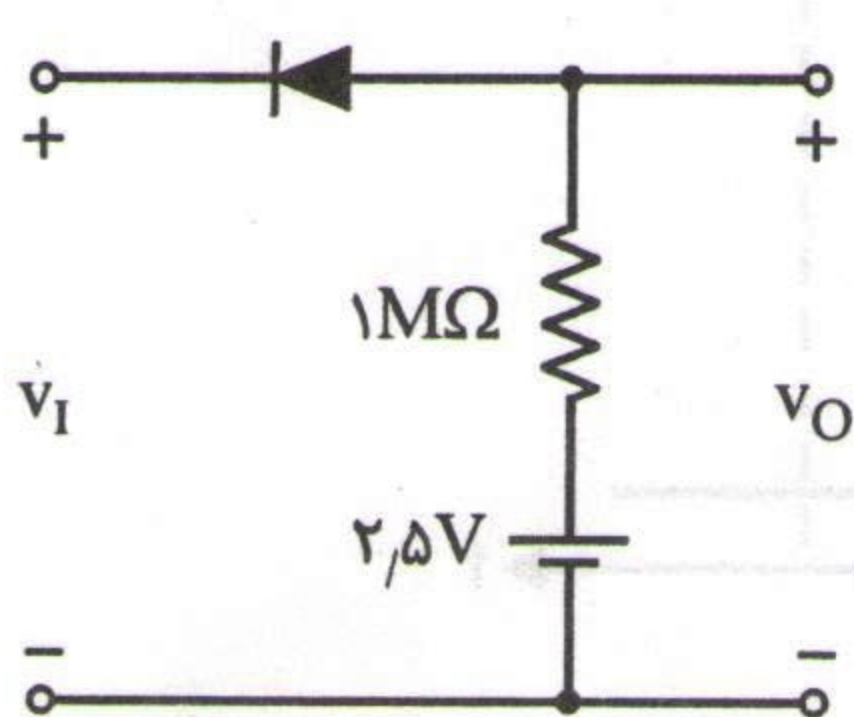


(ب)



(الف)

شکل ۲-۶۳



شکل ۲-۶۴

۴۷. در مدار برش شکل ۲-۶۴ با فرض ورودی مربعی متقارن با فرکانس ۵KHz که بین ۱۰- و ۱۰+ ولت تغییر می کند، خروجی را در حالت دائمی رسم کنید. فرض کنید دیود دارای $R_f = 0$ ، $R_r = 2M\Omega$ و $V_T = 0$ است.

حل: فرض کنید دیود قطع است. در این صورت با توجه به اینکه دیود با R_r مدل می شود، با استفاده از اصل جمع آثار، خروجی برابر است با

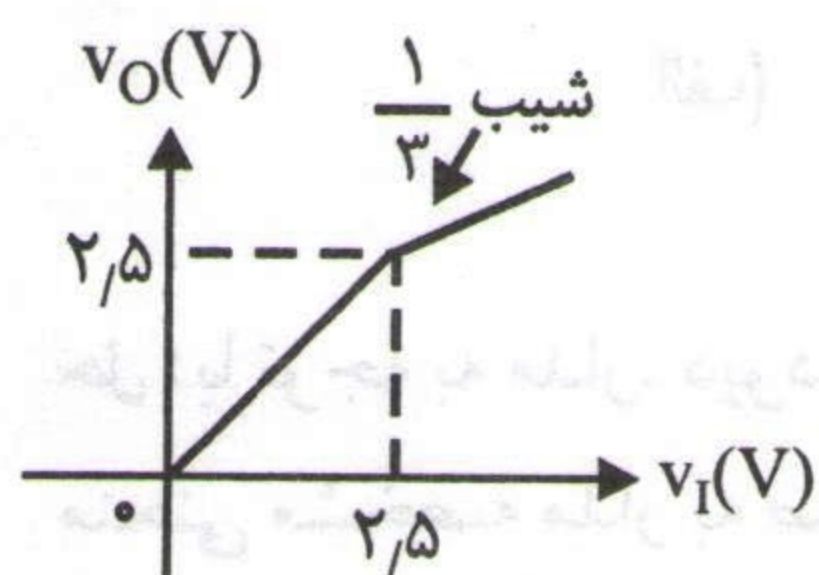
$$v_O = \frac{v_I}{R_r + 1} \times 1 + \frac{2.5}{1 + R_r} \times R_r = \frac{1}{3}v_I + \frac{5}{3}$$

حال شرط قطع بودن دیود را در نظر می گیریم.

$$v_O < v_I \Rightarrow \frac{1}{3}v_I + \frac{5}{3} < v_I \Rightarrow v_I > 2.5 \text{ V}$$

$$v_I \geq 2.5 \text{ V} \Rightarrow D:\text{off} \Rightarrow v_O = \frac{v_I}{3} + \frac{5}{3}$$

$$v_I \leq 2.5 \text{ V} \Rightarrow D:\text{on} \Rightarrow v_O = v_I$$



شکل ۲-۶۵

بنابراین مشخصه انتقالی مدار مطابق شکل ۲-۶۵ خواهد بود.

برای ورودی مربعی، خروجی به صورت زیر خواهد بود:

$$v_I = -1.0 \text{ V} \Rightarrow v_O = v_I = -1.0 \text{ V}$$

$$v_I = 1.0 \text{ V} \Rightarrow v_O = \frac{1}{3}v_I + \frac{5}{3} = 5 \text{ V}$$

۴۸. برای مشخصه انتقالی نشان داده شده در شکل ۲-۶۶، مداری با استفاده از دیودهای ایده‌آل، مقاومت و منابع تغذیه ثابت طرح نمایید.

حل: با توجه به مشخصه انتقالی، روابط ورودی - خروجی برابر است با

$$v_I \leq -2V \Rightarrow v_O = -2V$$

$$v_I \geq -2V \Rightarrow v_O = v_I$$

بدیهی است که مدار مورد نظر فقط شامل یک دیود می‌باشد. می‌توان از مدار شکل ۲-۶۷ استفاده کرد.

$$v_I \geq -2V \Rightarrow D: \text{on} \Rightarrow v_O = v_I$$

$$v_I \leq -2V \Rightarrow D: \text{off} \Rightarrow v_O = -2V$$

۴۹. منحنی مشخصه ولتاژ - جریان در شکل ۲-۶۸ را در نظر بگیرید.

الف) با استفاده از دیودهای ایده‌آل، منابع و مقاومت مداری طراحی کنید که دارای مشخصه ولتاژ - جریان مزبور باشد.

ب) طرح خود را به نحوی اصلاح کنید که دو شیب موجود در مشخصه متفاوت باشند.

حل: الف) برای مشخصه مورد نظر به ازای ولتاژهای متفاوت داریم

$$v \geq V_1 \Rightarrow v = Ri + V_1 \Rightarrow \text{شاخه با منبع ولتاژ و مقاومت}$$

$$-V_2 \leq v \leq V_1 \Rightarrow i = 0 \Rightarrow \text{مدار اتصال باز}$$

$$v \leq -V_2 \Rightarrow v = Ri - V_2 \Rightarrow \text{شاخه با منبع ولتاژ و مقاومت}$$

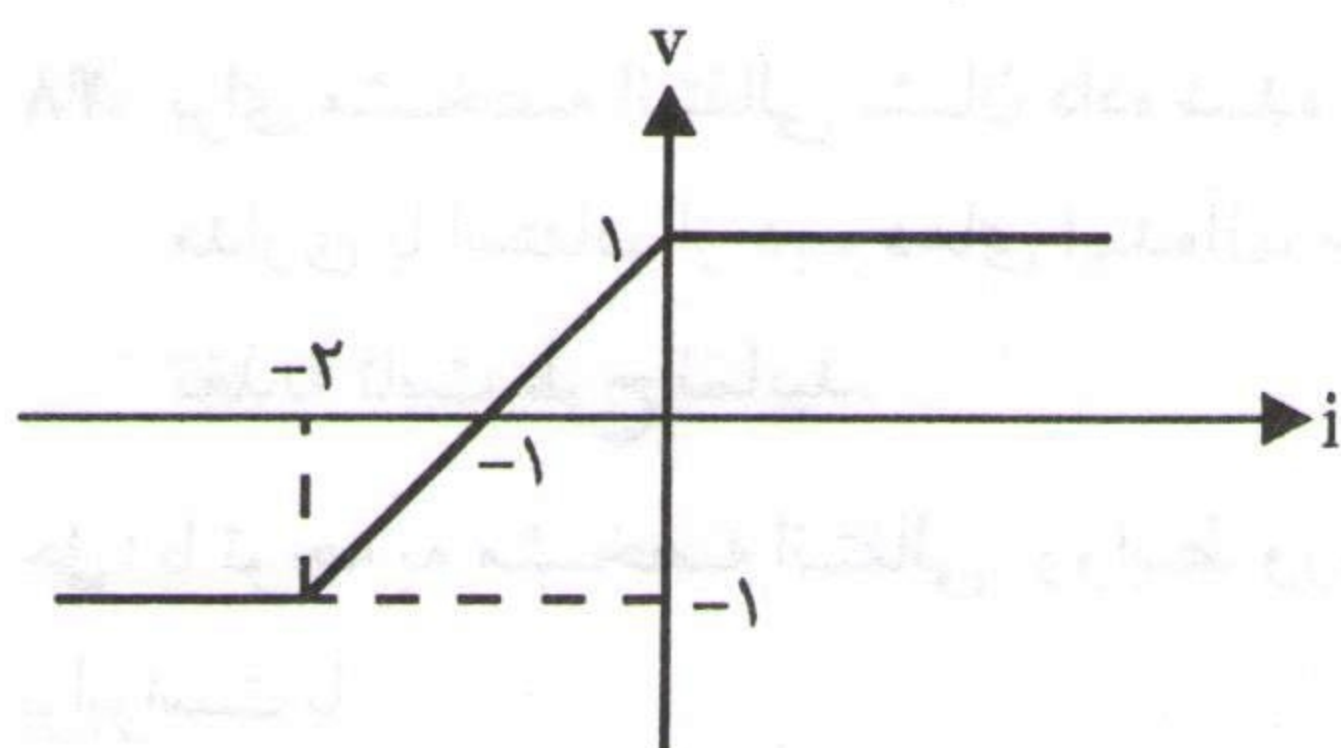
بنابراین مدار دارای دو شاخه موازی به صورت شکل ۲-۶۹ خواهد بود.

$$v \geq V_1 \Rightarrow D_1: \text{on}, D_2: \text{off} \Rightarrow v = Ri + V_1$$

$$-V_2 \leq v \leq V_1 \Rightarrow D_1: \text{off}, D_2: \text{off} \Rightarrow i = 0$$

$$v \leq -V_2 \Rightarrow D_1: \text{off}, D_2: \text{on} \Rightarrow v = Ri - V_2$$

ب) برای اینکه شیب مشخصه در دو ناحیه متفاوت باشد، باید مقاومت موجود در شاخه‌ها را متفاوت در نظر گرفت.



شکل ۷۰-۲

۵۰. با استفاده از کمترین تعداد مقاومت، منبع ولتاژ و دیود ایده‌آل مداری با مشخصه جریان-ولتاژ مطابق شکل ۷۰-۲ طراحی کنید.

حل: برای مشخصه مورد نظر به ازای جریانهای مختلف داریم

$$i \geq 0 \Rightarrow v = 1V \Rightarrow \text{شاخه با منبع ولتاژ ثابت}$$

$$-2 \leq i \leq 0 \Rightarrow v = i + 1 \Rightarrow \text{شاخه با منبع ولتاژ و مقاومت}$$

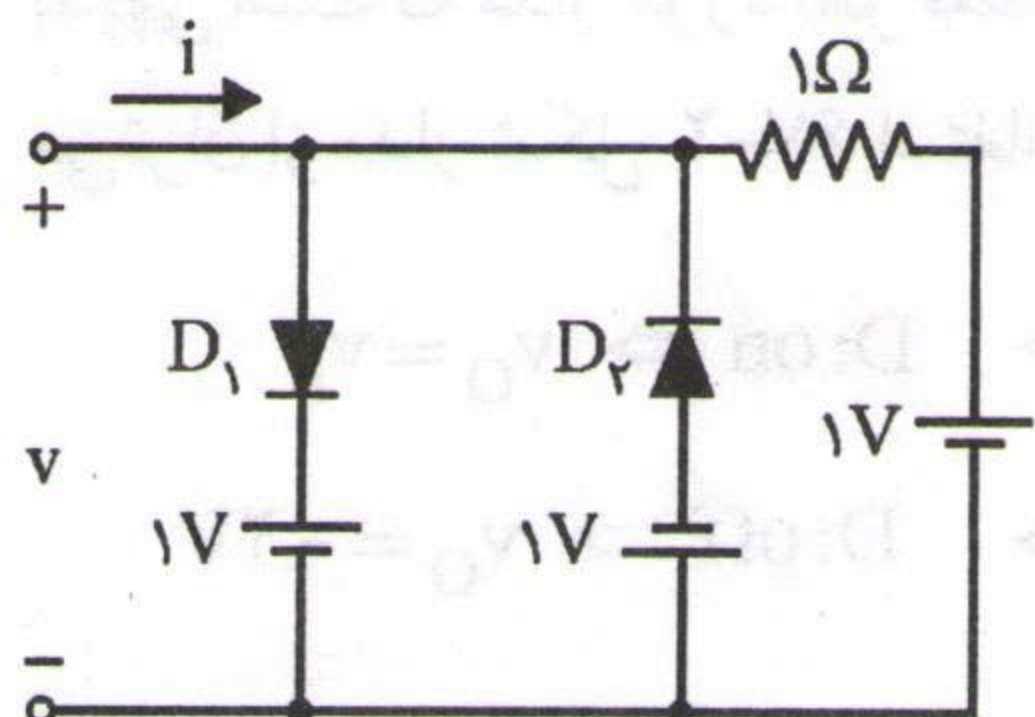
$$i \leq -2 \Rightarrow v = -1V \Rightarrow \text{شاخه با منبع ولتاژ ثابت}$$

بنابراین مدار به صورت شکل ۷۱-۲ دارای سه شاخه موازی است. در این مدار مشاهده می‌شود که

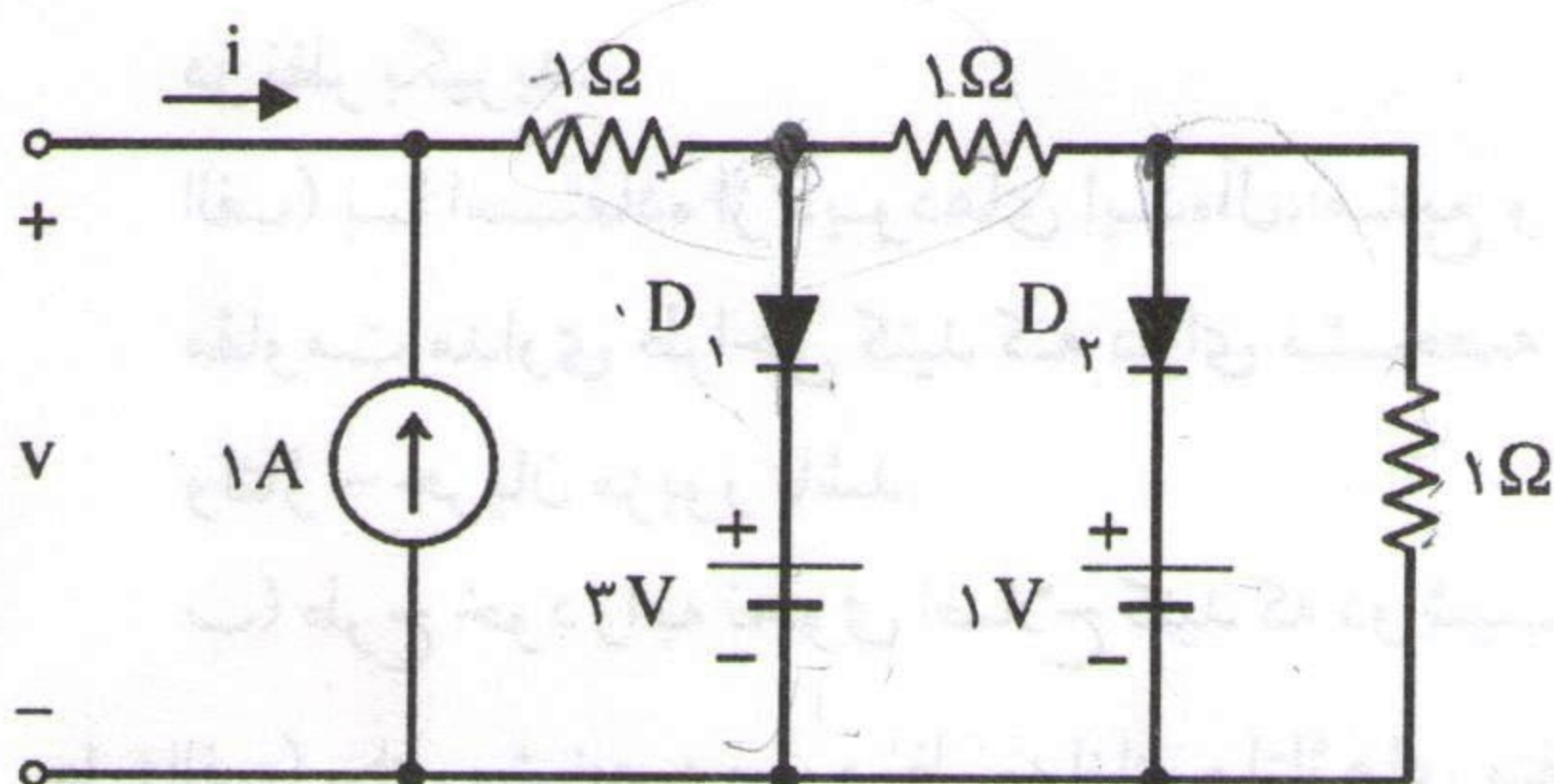
$$i \geq 0 \Rightarrow D_1: \text{on}, D_2: \text{off} \Rightarrow v = 1V$$

$$-2 \leq i \leq 0 \Rightarrow D_1: \text{off}, D_2: \text{off} \Rightarrow v = i + 1$$

$$i \leq -2 \Rightarrow D_1: \text{off}, D_2: \text{on} \Rightarrow v = -1V$$



شکل ۷۱-۲



شکل ۷۲-۲

۵۱. در مدار شکل ۷۲-۲ دیودها ایده‌آل هستند. مشخصه i بر حسب v را در این مدار به دست آورده و رسم کنید.

حل: با فرض اینکه دیودهای D_1 و D_2 قطع باشند برای ولتاژ آند دیودها داریم

$$v_{A1} = \frac{v}{1+1+1} (1+1) = \frac{2}{3}v, \quad v_{A2} = \frac{v}{1+1+1} (1) = \frac{v}{3}$$

برای اینکه دیود D_1 وصل شود باید داشته باشیم

$$v_{A1} \geq 3V \Rightarrow v \geq 4.5V$$

برای اینکه دیود D_2 وصل شود باید داشته باشیم

$$v_{A2} \geq 1V \Rightarrow v \geq 3V$$

به این ترتیب داریم

$$v \leq 3V \Rightarrow D_1: \text{off}, D_2: \text{off} \Rightarrow i = \frac{1}{3}v - 1$$

به ازای $v \geq 3V$ ، دیود D_2 وصل می‌شود و اگر دیود D_1 را قطع در نظر بگیریم، ولتاژ آند آن برابر است با

$$v_{A1} = \left(\frac{v-1}{1+1} \right) (1) + 1 = \frac{v}{2} + \frac{1}{2}$$

برای اینکه دیود D_1 همچنان قطع باشد باید داشته باشیم

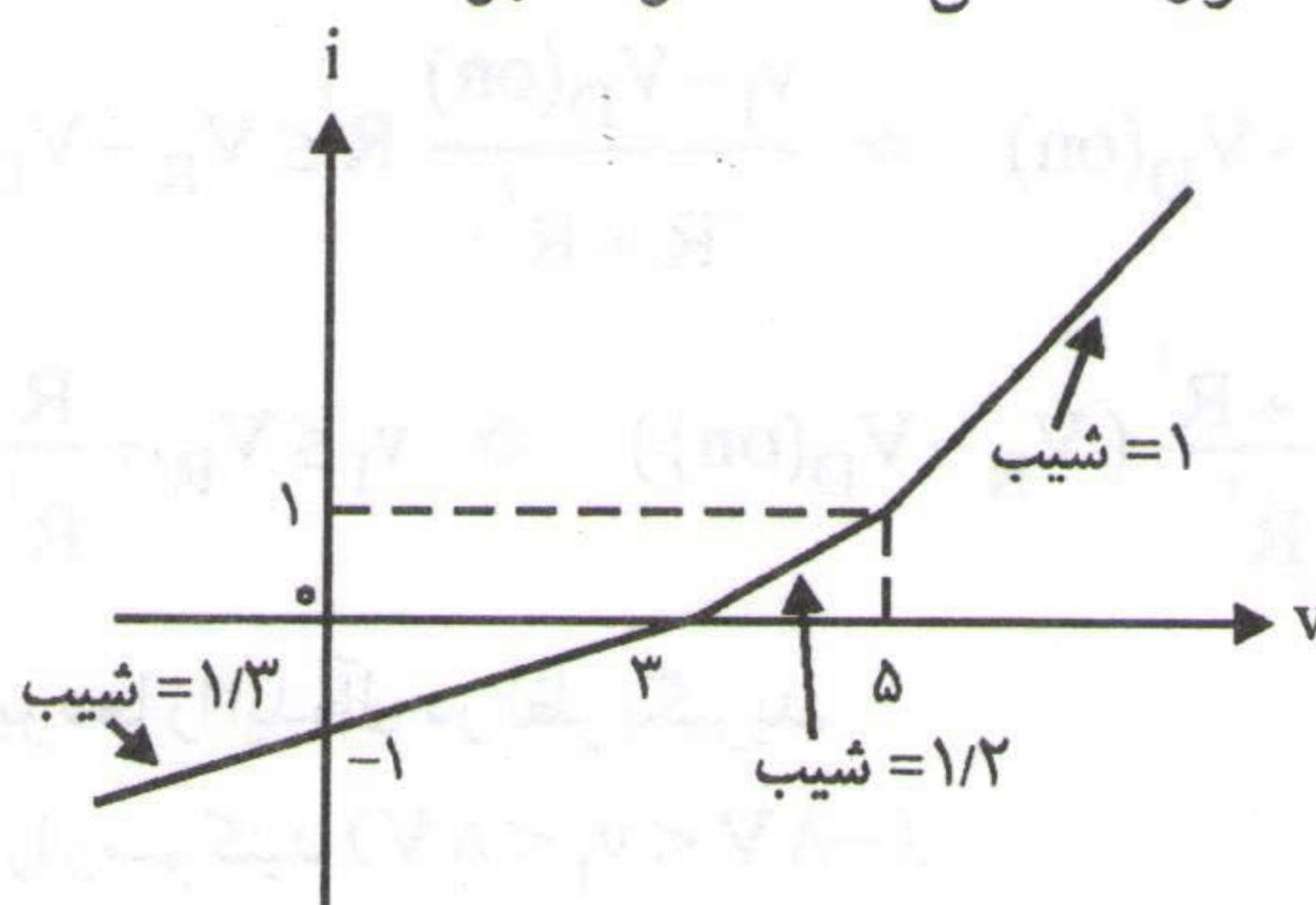
$$v_{A_1} = \frac{v}{2} + \frac{1}{2} \leq 3 \Rightarrow v \leq 5V$$

به این ترتیب داریم

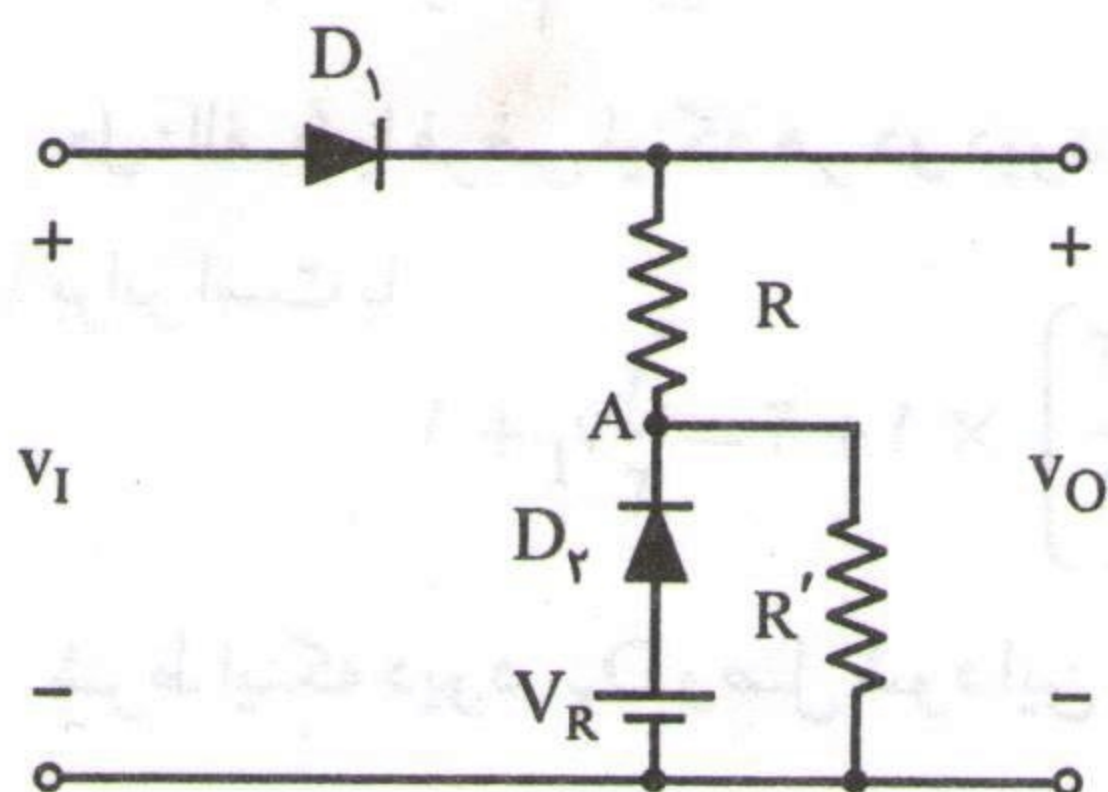
$$3V \leq v \leq 5V \Rightarrow D_1: \text{off}, D_2: \text{on}, i = \frac{v-1}{1+1} - 1 = \frac{v}{2} - \frac{3}{2}$$

$$v \geq 5V \Rightarrow D_1: \text{on}, D_2: \text{on}, i = \frac{v-3}{1} - 1 = v - 4$$

بنابراین مشخصه $v-i$ مدار به صورت شکل ۷۳-۲ خواهد بود.



شکل ۷۳-۲



شکل ۷۴-۲

۵۲. در مدار برش شکل ۷۴-۲ دیودها دارای ولتاژ هدایت

$V_D(\text{on})$ ، $R_f = 0$ و $R_r = \infty$ می‌باشند. دیود D_2 برای

حذف وابستگی دمایی نقطه شکست به کار رفته است.

(الف) مشخصه انتقالی مدار را به دست آورده و رسم کنید.

(ب) حداکثر مقدار ورودی که به ازای آن دیود D_2 در حالت

هدایت باقی می‌ماند را محاسبه کنید.

حل: (الف) با فرض اینکه دیود D_1 قطع است، دیود D_2 وصل خواهد بود. بنابراین

$$v_O = V_R - V_D(\text{on})$$

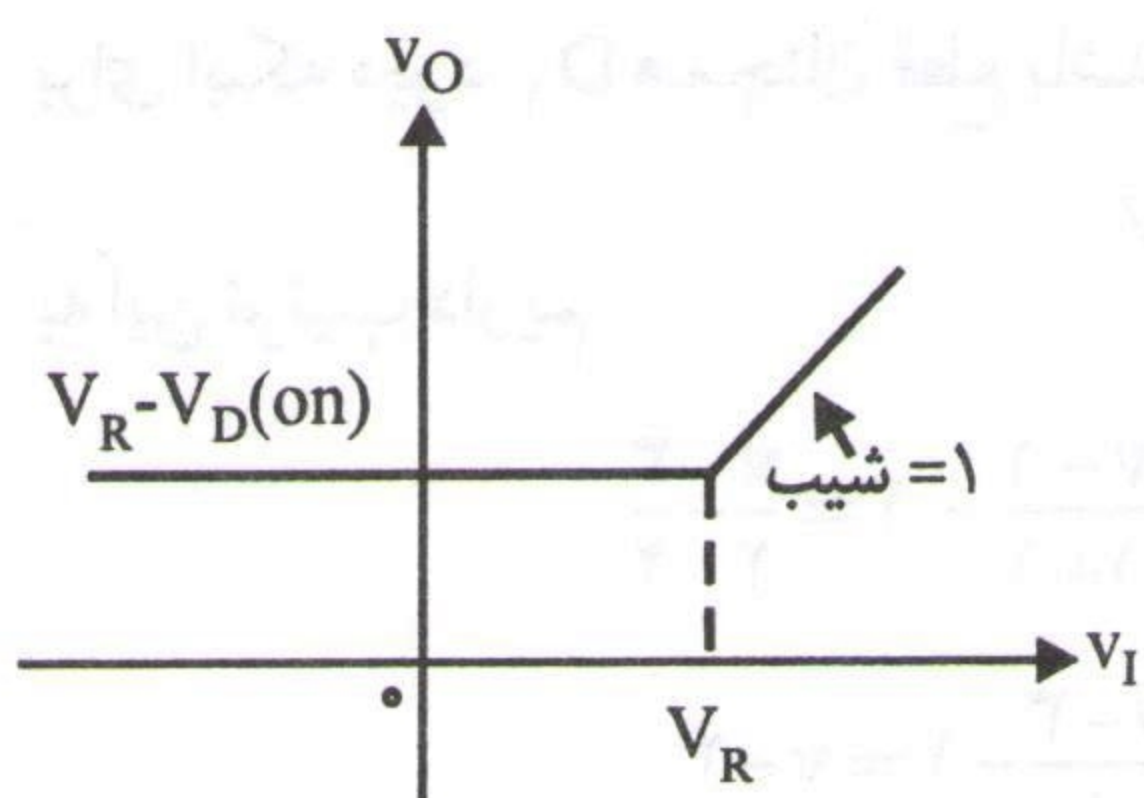
ولتاژ کاتد دیود D_1 نیز برابر $V_R - V_D(\text{on})$ خواهد بود. بنابراین شرط وصل D_1 عبارت است از

$$v_I \geq (V_R - V_D(\text{on})) + V_D(\text{on}) = V_R \Rightarrow D_1: \text{on} \Rightarrow v_O = v_I - V_D(\text{on})$$

منحنی مشخصه انتقالی در شکل ۷۵-۲ رسم شده است و به طور خلاصه داریم

$$v_I \leq V_R \Rightarrow D_1: \text{off}, D_2: \text{on} \Rightarrow v_O = V_R - V_D(\text{on})$$

$$v_I \geq V_R \Rightarrow D_1: \text{on} \Rightarrow v_O = v_I - V_D(\text{on})$$



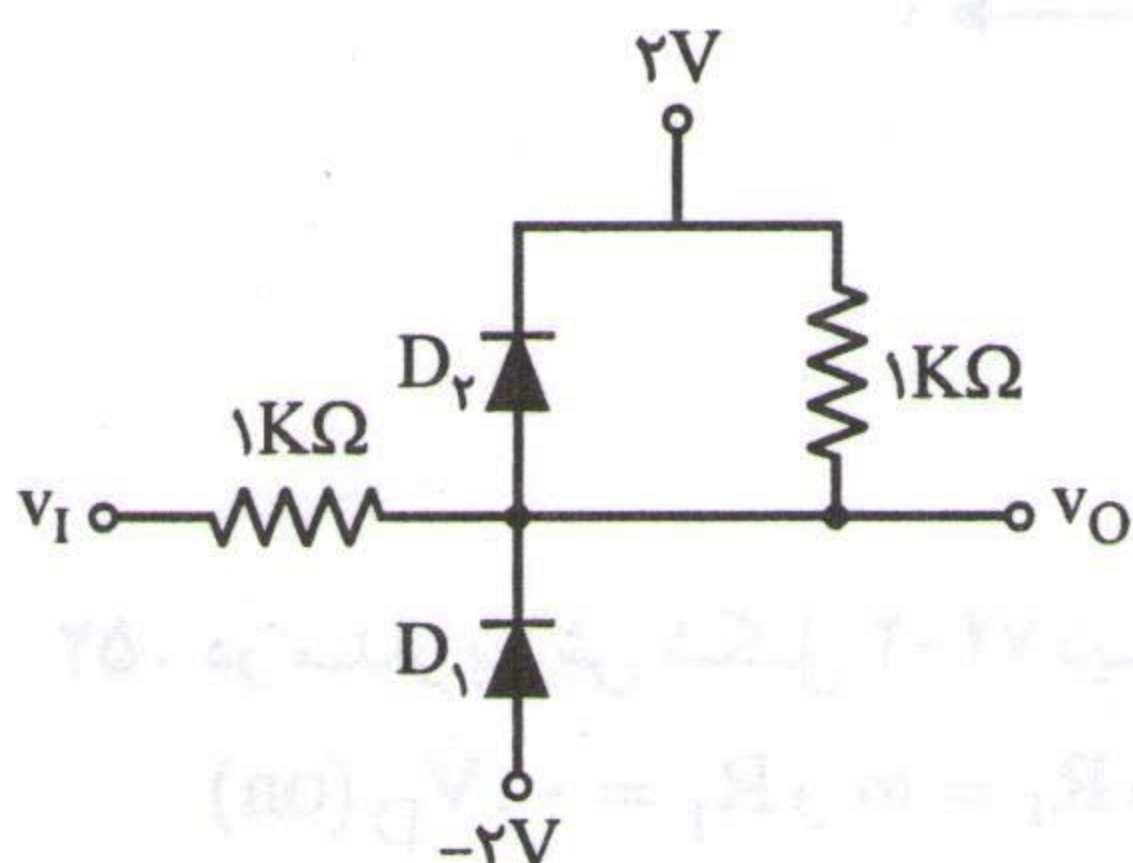
شکل ۲-۷۵

نقطه شکست در این مدار $V_R - V_{D_2(on)} + V_{D_1(on)}$ است. پس اگر دو دیود کاملاً مشابه باشند، تغییرات حرارتی $V_{D(on)}$ روی نقطه کار اثری نخواهد داشت. بدیهی است که بدون دیود D_2 این کار غیرممکن است.

ب) فرض کنید مدار در حالتی است که دیود D_1 وصل و بنابراین $v_O = v_I - V_{D(on)}$ باشد اما دیود D_2 قطع است. حال شرط اینکه دیود D_2 وصل شود این است که،

$$v_A \leq V_R - V_{D(on)} \Rightarrow \frac{v_I - V_{D(on)}}{R + R'} R' \leq V_R - V_{D(on)}$$

$$\Rightarrow v_I - V_{D(on)} \leq \frac{R + R'}{R'} (V_R - V_{D(on)}) \Rightarrow v_I \leq V_R + \frac{R}{R'} (V_R - V_{D(on)})$$



شکل ۲-۷۶

۵۳. در مدار شکل ۲-۷۶ دیودها را ایده‌آل در نظر بگیرید.

الف) مشخصه انتقالی را رسم کنید $(-8V < v_I < 8V)$.

ب) پس از حذف مقاومت موازی دیود D_2 مشخصه را مجدداً رسم نمایید.

حل: الف) با فرض اینکه هر دو دیود قطع هستند، ولتاژ خروجی برابر است با

$$v_O = \left(\frac{v_I - 2}{1 + 1} \right) \times 1 + 2 = \frac{1}{2} v_I + 1$$

شرط اینکه دیود D_2 وصل شود این است که

$$v_O \geq 2V \Rightarrow \frac{1}{2} v_I + 1 \geq 2 \Rightarrow v_I \geq 2V$$

در این صورت v_O ثابت و برابر $2V$ می‌باشد. شرط اینکه دیود D_1 وصل شود این است که

$$v_O \leq -2V \Rightarrow \frac{1}{2} v_I + 1 \leq -2 \Rightarrow v_I \leq -6V$$

در این صورت v_O برابر $-2V$ ثابت است. بنابراین به ازای ورودی داده شده داریم

$$v_I \leq -6V \Rightarrow D_1: \text{on}, D_2: \text{off} \Rightarrow v_O = -2V$$

$$-6V \leq v_I \leq 2V \Rightarrow D_1: \text{off}, D_2: \text{off} \Rightarrow v_O = \frac{v_I}{2} + 1$$

$$v_I \geq 2V \Rightarrow D_1: \text{off}, D_2: \text{on} \Rightarrow v_O = 2V$$

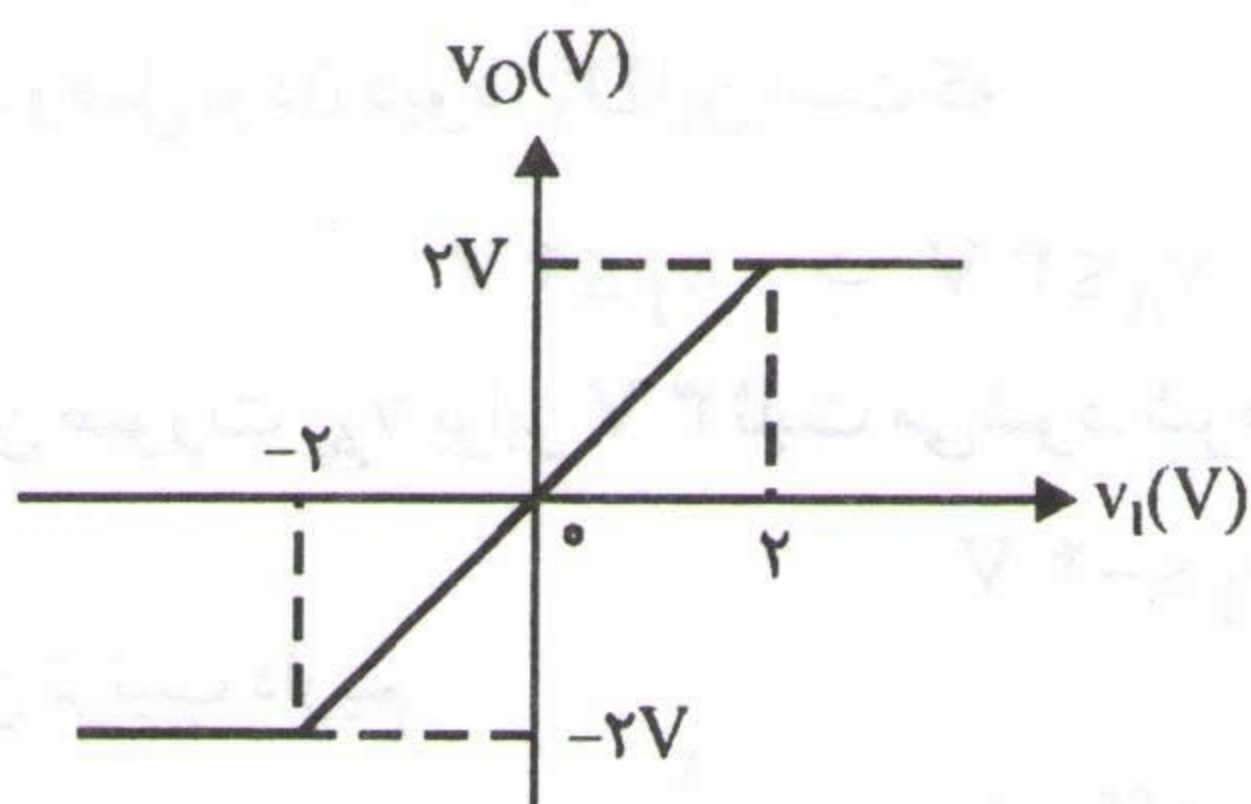
مشخصه انتقالی در شکل ۷۷-۲ رسم شده است.
 (ب) با حذف مقاومت موازی دیود D_2 و با فرض اینکه هر دو دیود قطع هستند $v_O = v_I$ است. بنابراین به ازای $v_O = v_I \geq 2V$ ، دیود D_2 وصل شده و خروجی برابر $2V$ است. به ازای $v_O = v_I \leq -2V$ ، دیود D_1 وصل شده و خروجی برابر $-2V$ می‌گردد. به این ترتیب داریم

$$v_I \leq -2V \Rightarrow D_1: \text{on}, D_2: \text{off} \Rightarrow v_O = -2V$$

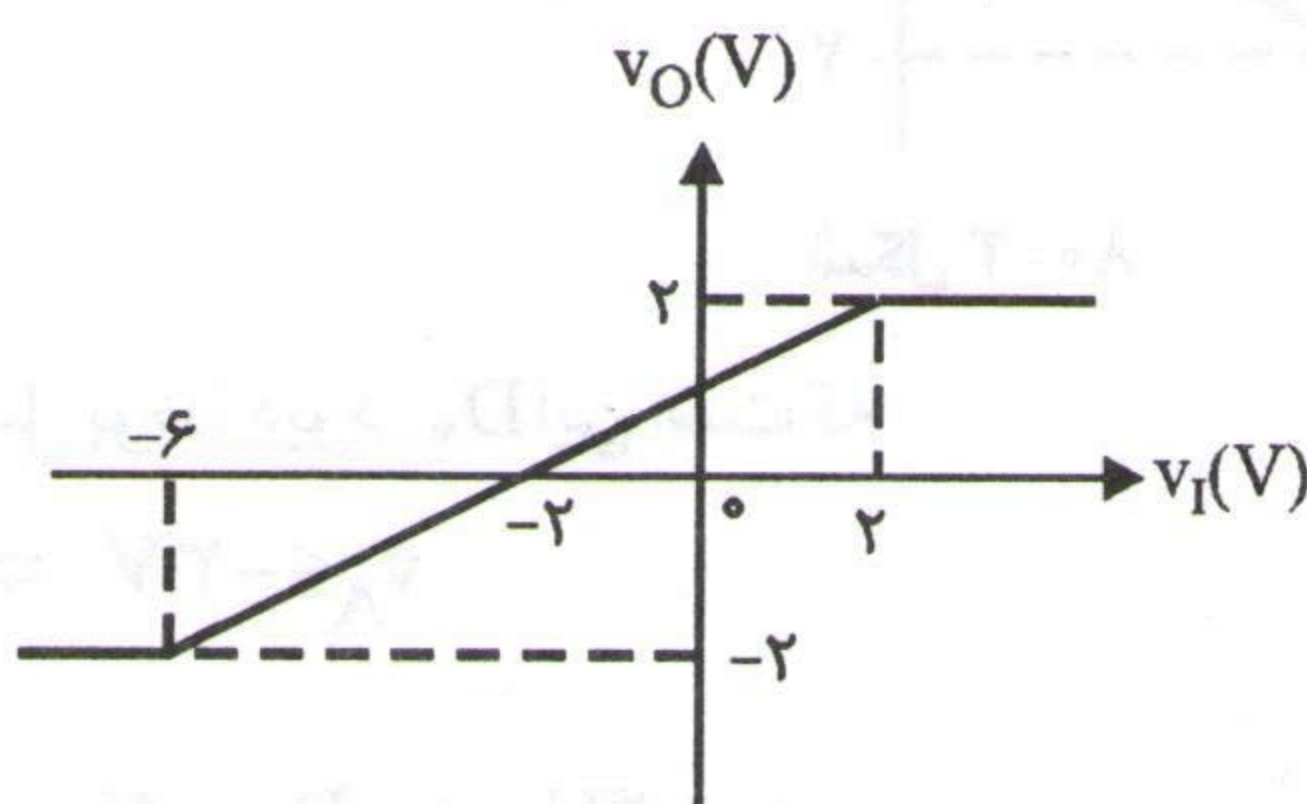
$$-2V \leq v_I \leq 2V \Rightarrow D_1: \text{off}, D_2: \text{off} \Rightarrow v_O = v_I$$

$$v_I \geq 2V \Rightarrow D_1: \text{off}, D_2: \text{on} \Rightarrow v_O = 2V$$

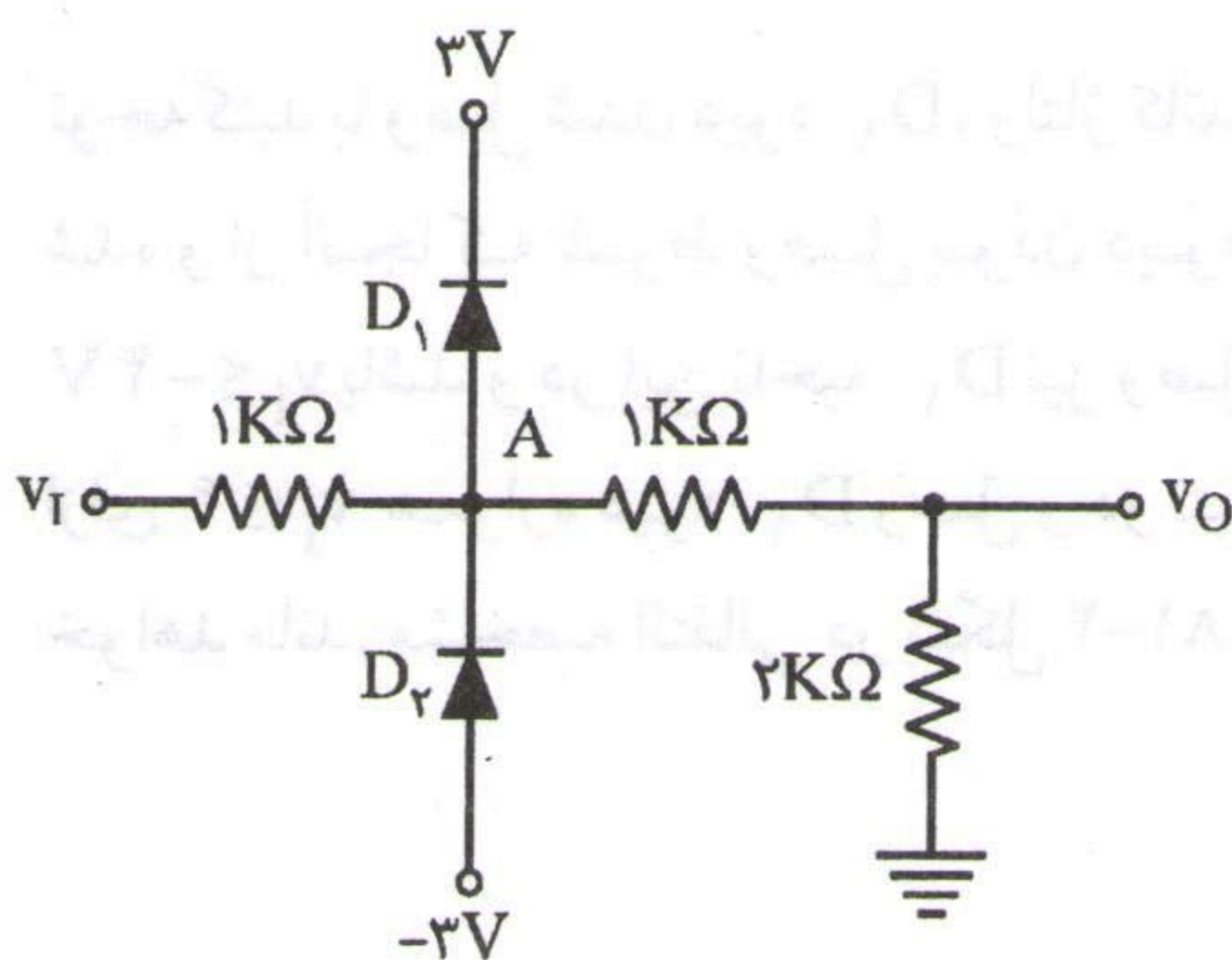
مشخصه انتقالی به صورت شکل ۷۸-۲ خواهد بود.



شکل ۷۸-۲



شکل ۷۷-۲



شکل ۷۹-۲

۵۴. در مدار شکل ۷۹-۲ دیودها را ایده‌آل فرض کنید.

(الف) مشخصه انتقالی را رسم کنید $(-7V \leq v_I \leq 7V)$.

(ب) اگر جهت دیود D_1 عوض شود مشخصه جدید را رسم نمایید.

حل: (الف) با فرض اینکه هر دو دیود قطع هستند، ولتاژ آند دیود D_1 (کاتد دیود D_2) برابر است با

$$v_A = \left(\frac{v_I}{1+1+2} \right) \times (1+2) = \frac{3}{4}v_I$$

شرط اینکه دیود D_1 وصل گردد این است که

$$v_A \geq 3V \Rightarrow v_I \geq 4V$$

در این صورت v_A برابر $3V$ ثابت می‌شود. شرط اینکه دیود D_2 وصل شود این است که

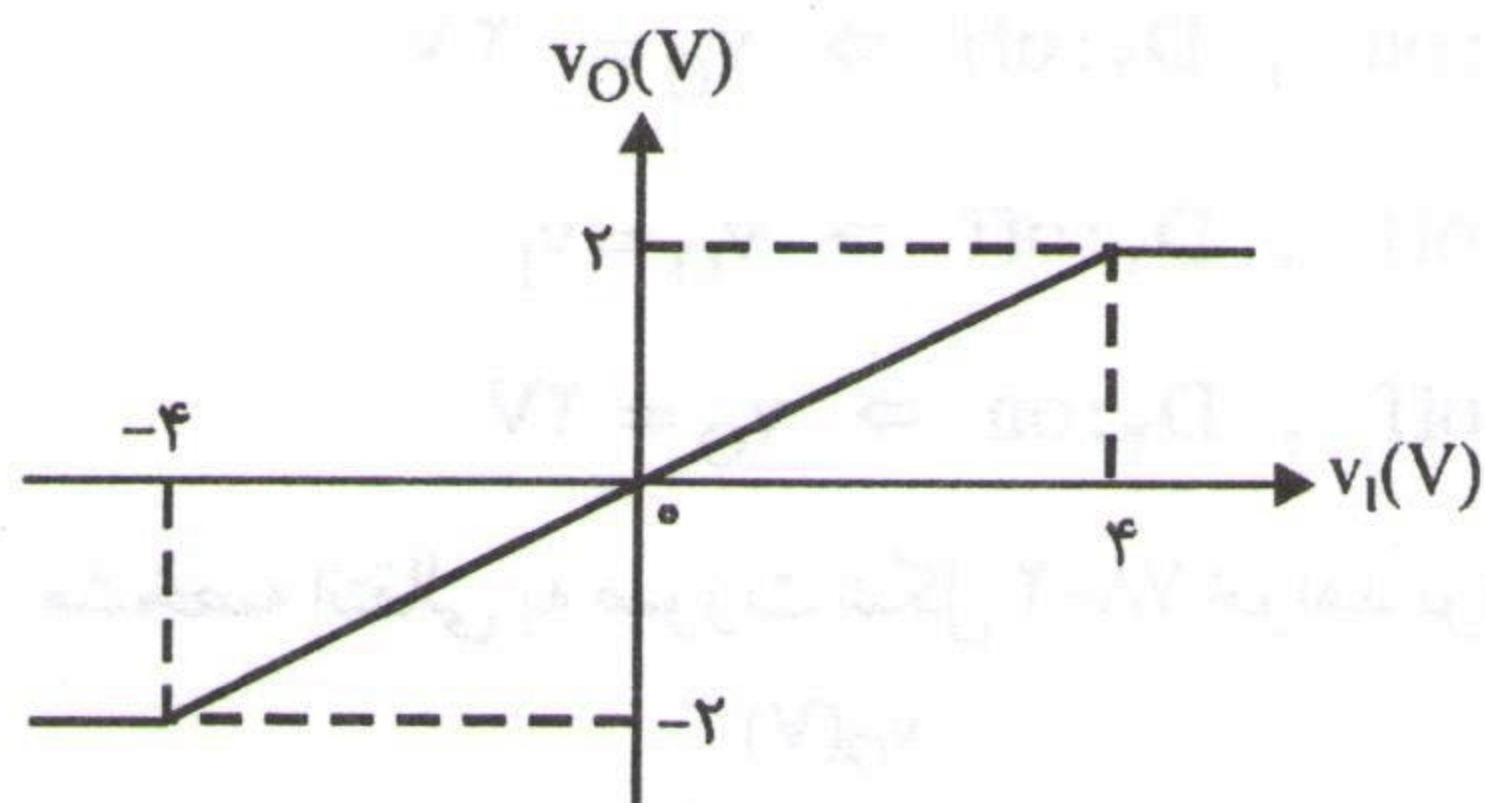
$$v_A \leq -3V \Rightarrow v_I \leq -4V$$

در این صورت v_A برابر $-3V$ ثابت می‌شود. به این ترتیب داریم

$$v_I \leq -4V \Rightarrow D_1: \text{off}, D_2: \text{on} \Rightarrow v_O = \left(\frac{v_A}{1+2} \right) \times 2 = \frac{2}{3} v_A = -2V$$

$$-4V \leq v_I \leq 4V \Rightarrow D_1: \text{off}, D_2: \text{off} \Rightarrow v_O = \frac{1}{2} v_I$$

$$v_I \geq 4V \Rightarrow D_1: \text{on}, D_2: \text{off} \Rightarrow v_O = \frac{2}{3} v_A = 2V$$



شکل ۸۰-۲

مشخصه انتقالی در شکل ۸۰-۲ رسم شده است.

ب) اگر جهت دیود D_1 عوض شود، با فرض اینکه هر دو دیود قطع هستند، داریم

$$v_A = \frac{3}{4} v_I$$

شرط وصل بودن دیود D_1 این است که

$$v_A \leq 3V \Rightarrow v_I \leq 4V$$

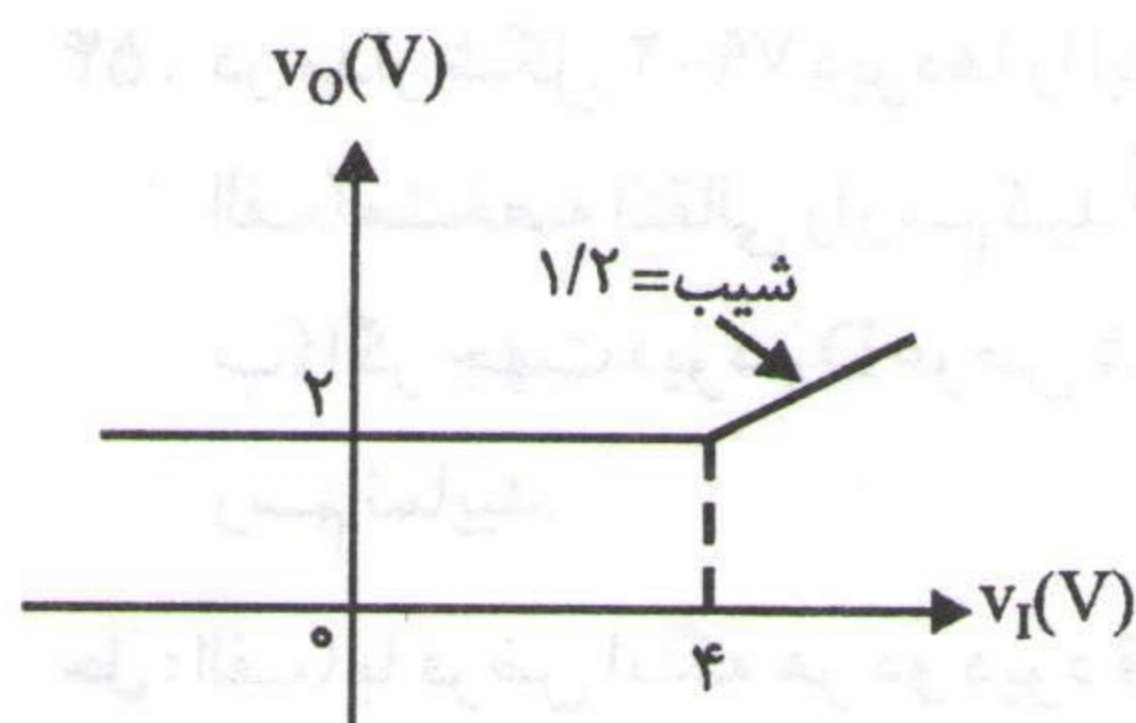
در این صورت v_A برابر $3V$ ثابت می شود. شرط وصل بودن دیود D_2 این است که

$$v_A \leq -3V \Rightarrow v_I \leq -4V$$

به این ترتیب داریم

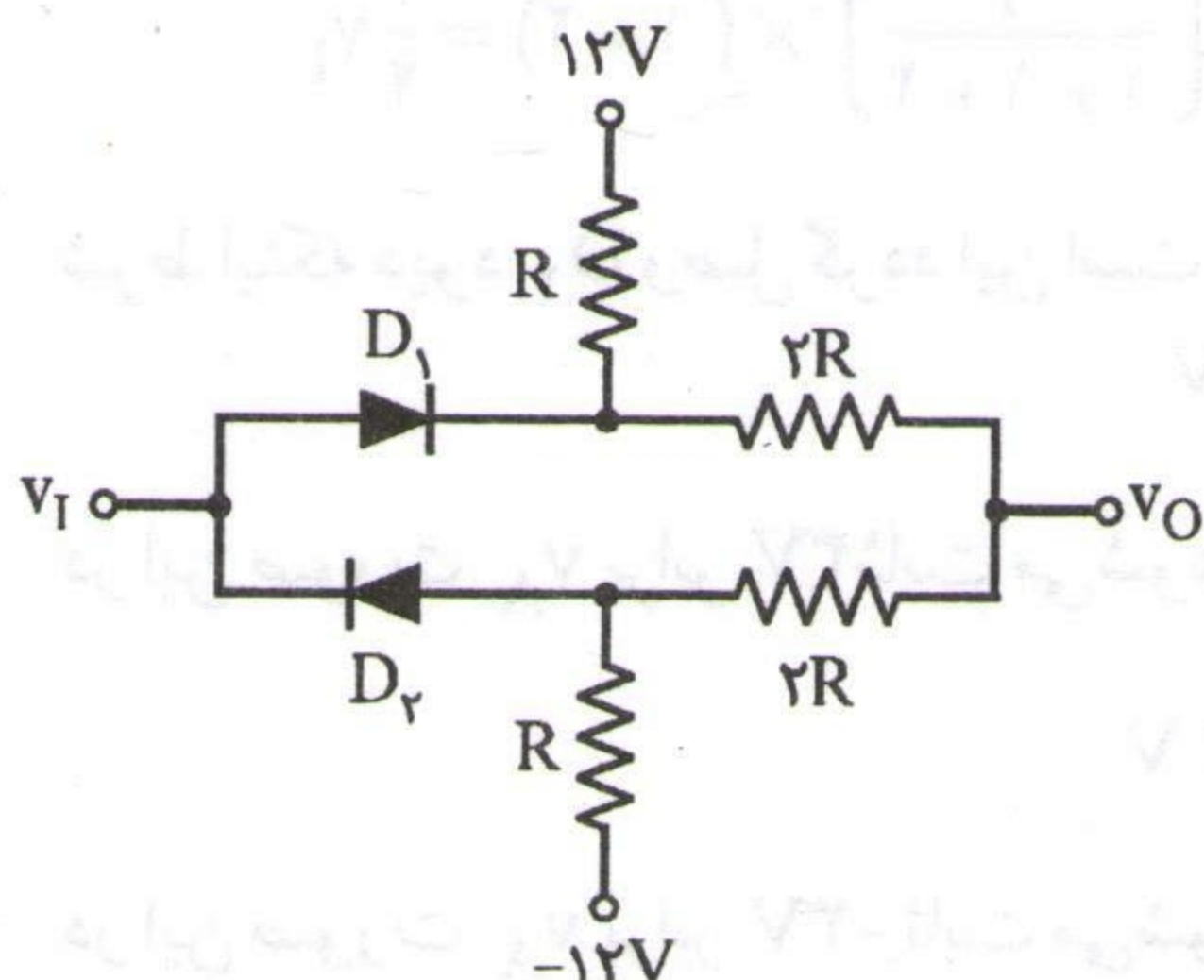
$$v_I \geq 4V \Rightarrow D_1: \text{off}, D_2: \text{off} \Rightarrow v_O = \frac{1}{2} v_I$$

$$v_I \leq 4V \Rightarrow D_1: \text{on}, D_2: \text{off} \Rightarrow v_O = 2V$$



شکل ۸۱-۲

توجه کنید با وصل شدن دیود D_1 ، ولتاژ کاتد دیود D_2 برابر $3V$ شده و از آنجا که شرط وصل بودن دیود D_2 این است که $v_I \leq -4V$ باشد و در این ناحیه D_1 نیز وصل است؛ بنابراین به ازای $v_I \leq 4V$ همواره دیود D_1 وصل و در نتیجه دیود D_2 قطع خواهد ماند. مشخصه انتقالی در شکل ۸۱-۲ رسم شده است.



شکل ۸۲-۲

۵۵. در مدار شکل ۸۲-۲ برای هر یک از دیودها داریم

$$R_r = \infty, R_f = 0, V_D(\text{on}) = 0.7V$$

مشخصه انتقالی مدار را به دست آورده و رسم کنید.

حل: ابتدا فرض می کنیم که هر دو دیود قطع هستند در این صورت، ولتاژهای خروجی، کاتد دیود D_1 و آنود دیود D_2 با استفاده از جمع آثار برابر است با

$$v_O = 0, v_{K_1} = 8V, v_{A_2} = -8V$$

شرط وصل بودن دیود D_1 این است که

$$v_I - v_{K_1} > 0.7 \Rightarrow v_I > 0.7V$$

شرط وصل بودن دیود D_2 این است که

$$v_{A_2} - v_I > 0.7 \Rightarrow v_I < -0.7V$$

به این ترتیب داریم

$$v_I < -0.7V \Rightarrow D_1: \text{off}, D_2: \text{on}$$

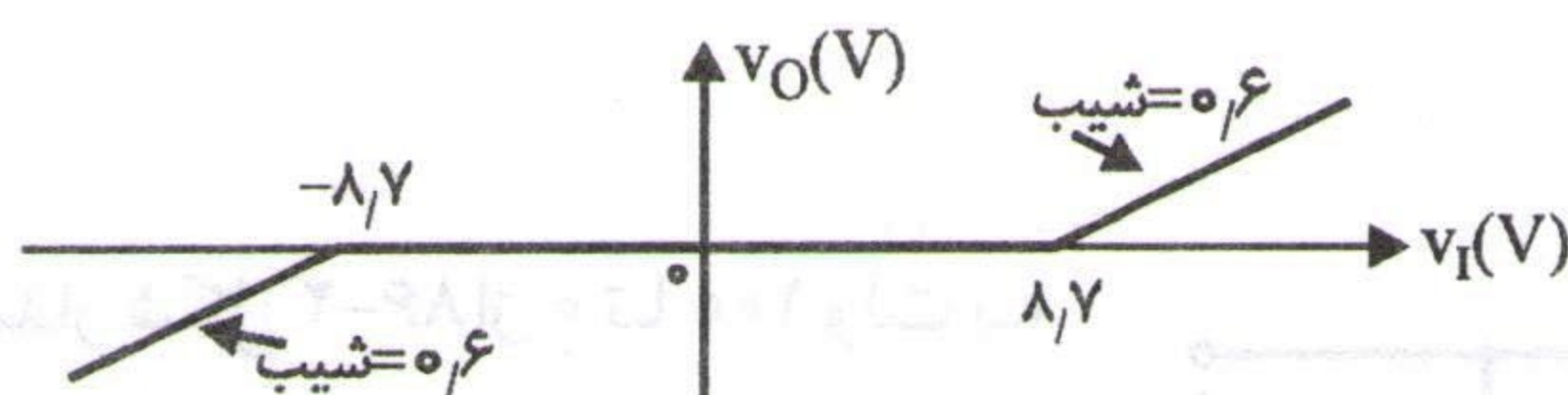
$$\Rightarrow v_O = \left(\frac{12}{2R + 2R + R} \right) \times 2R + \left(\frac{2R + R}{2R + 2R + R} \right) (v_I + 0.7) = 0.6v_I + 5.22$$

$$-0.7V \leq v_I \leq 0.7V \Rightarrow D_1: \text{off}, D_2: \text{off} \Rightarrow v_O = 0$$

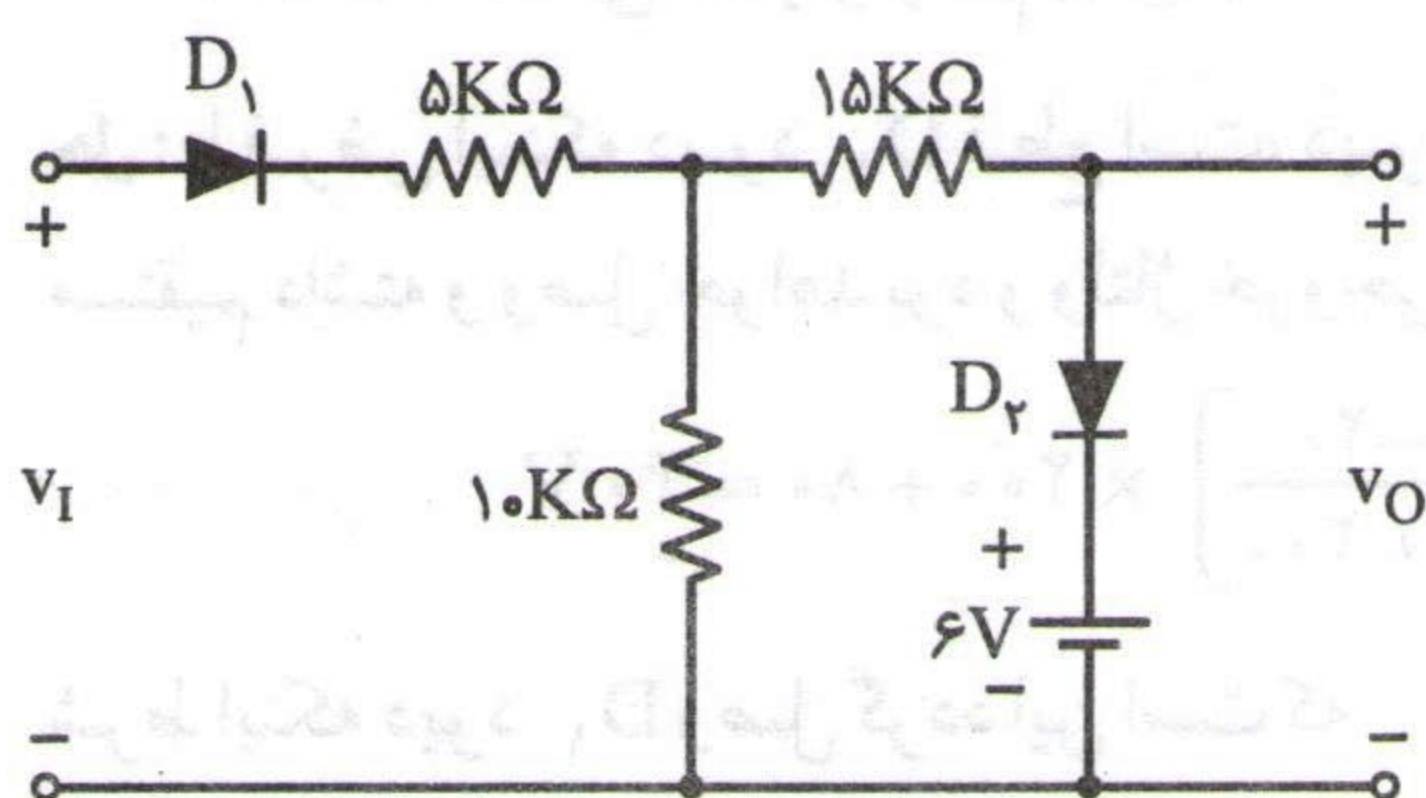
$$v_I \geq 0.7V \Rightarrow D_1: \text{on}, D_2: \text{off}$$

$$\Rightarrow v_O = \left(\frac{v_I - 0.7}{2R + 2R + R} \right) \times (2R + R) + \left(\frac{-12}{2R + 2R + R} \right) \times 2R = 0.6v_I - 5.22$$

مشخصه انتقالی مدار به صورت شکل ۲-۸۳ خواهد بود.



شکل ۲-۸۳



شکل ۲-۸۴

۵۶. در مدار برش شکل ۲-۸۴ دیودها را ایده‌آل فرض نمایید و منحنی مشخصه انتقالی مدار را محاسبه و ترسیم کنید.

حل: فرض می‌کنیم دیود D_1 قطع است در این صورت چون کاتد D_2 به ۶ ولت وصل است، دیود D_2 نیز حتماً قطع خواهد بود.

$$D_1: \text{off} \Rightarrow D_2: \text{off} \Rightarrow v_O = 0$$

در این شرایط کاتد دیود D_1 دارای ولتاژ صفر است. پس با افزایش v_I از مقدار صفر دیود D_1 هدایت خواهد کرد.

$$v_I \leq 0 \Rightarrow D_1: \text{off}, D_2: \text{off} \Rightarrow v_O = 0$$

$$0 \leq v_I \leq V_1 \Rightarrow D_1: \text{on}, D_2: \text{off} \Rightarrow v_O = \frac{v_I}{5 + 10} \times 10 = \frac{2}{3} v_I$$

V_1 مرز هدایت دیود D_2 است که به ازای آن v_O برابر ۶ ولت شده و دیود D_2 هدایت می کند. پس V_1 از رابطه زیر به دست می آید:

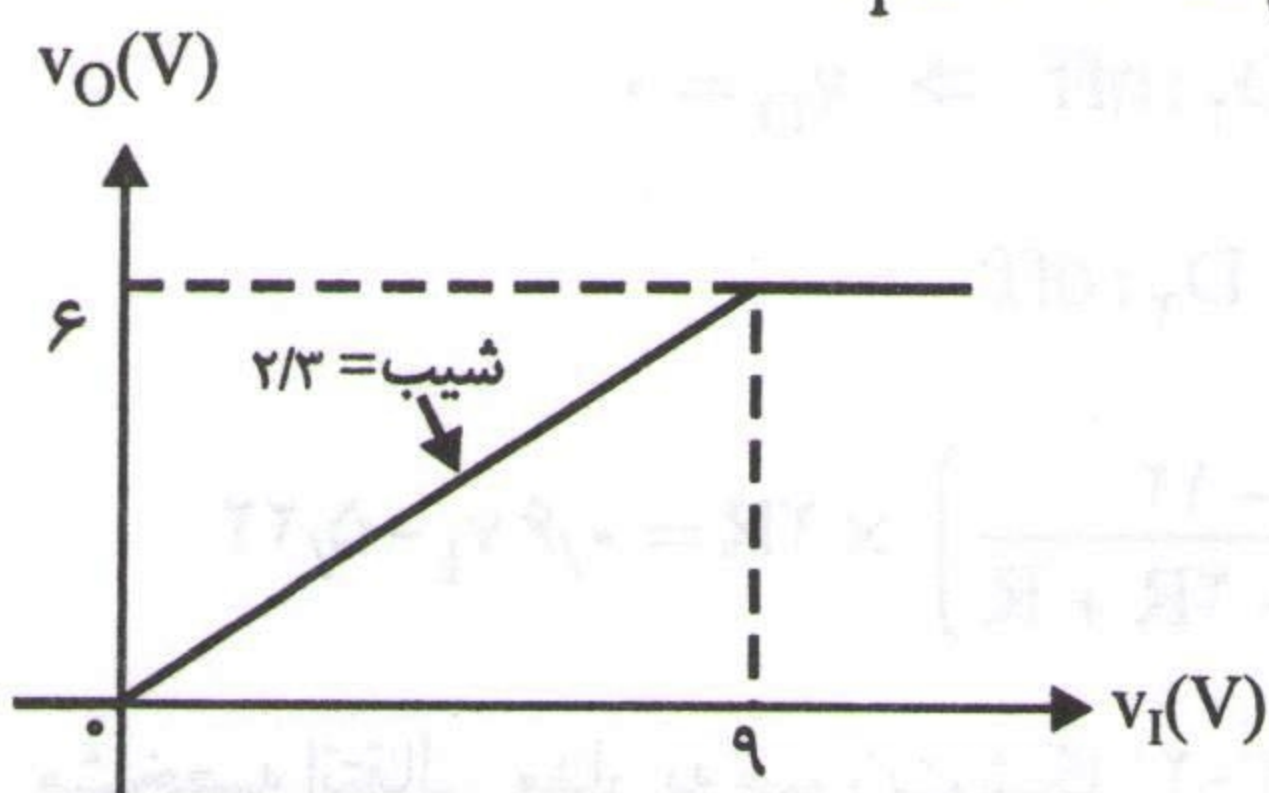
$$v_O = \frac{2}{3}v_I = 6 \Rightarrow V_1 = v_I = 9V$$

رفتار مدار را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:

$$v_I \leq 0 \Rightarrow D_1: \text{off}, D_2: \text{off} \Rightarrow v_O = 0$$

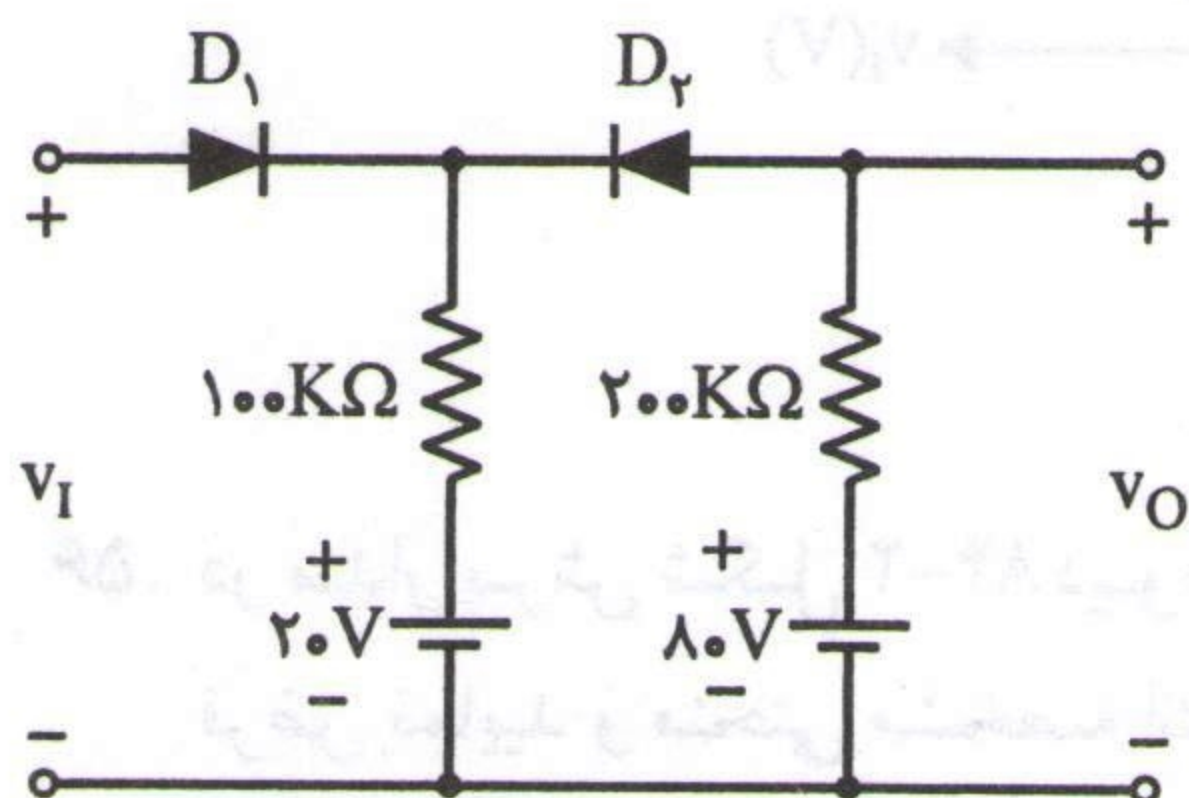
$$0 \leq v_I \leq 9 \Rightarrow D_1: \text{on}, D_2: \text{off} \Rightarrow v_O = \frac{2}{3}v_I$$

$$v_I \geq 9 \Rightarrow D_1: \text{on}, D_2: \text{on} \Rightarrow v_O = 6V$$



شکل ۸۵-۲

مشخصه انتقالی در شکل ۸۵-۲ رسم شده است. پیوستگی منحنی در نقاط شکستگی را می توان به راحتی با استفاده از روابط فوق بررسی کرد.



شکل ۸۶-۲

۵۷. ولتاژ ورودی v_I مدار شکل ۸۶-۲ از ۰ تا ۱۰۰ ولت به صورت خطی تغییر می کند. با فرض ایده آل بودن دیودها مشخصه انتقالی مدار را رسم نمایید.

حل: با فرض اینکه دیود D_1 قطع است، دیود D_2 بایاس مستقیم داشته و وصل خواهد بود و ولتاژ خروجی برابر است با

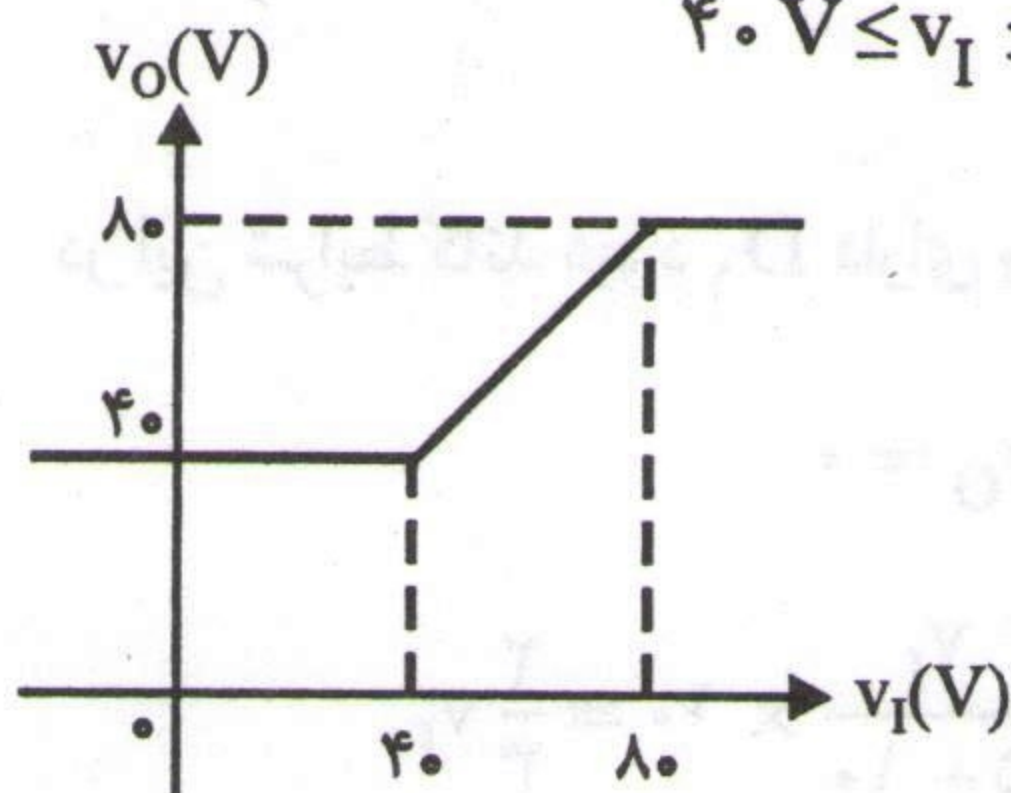
$$v_O = - \left(\frac{80 - 20}{100 + 200} \right) \times 200 + 80 = 40V$$

شرط اینکه دیود D_1 وصل گردد این است که

$$v_{A1} \geq v_{K1} \Rightarrow v_I \geq 40V$$

بنابراین

$$40V \leq v_I \leq V_1 \Rightarrow D_1: \text{on}, D_2: \text{on} \Rightarrow v_O = v_I$$



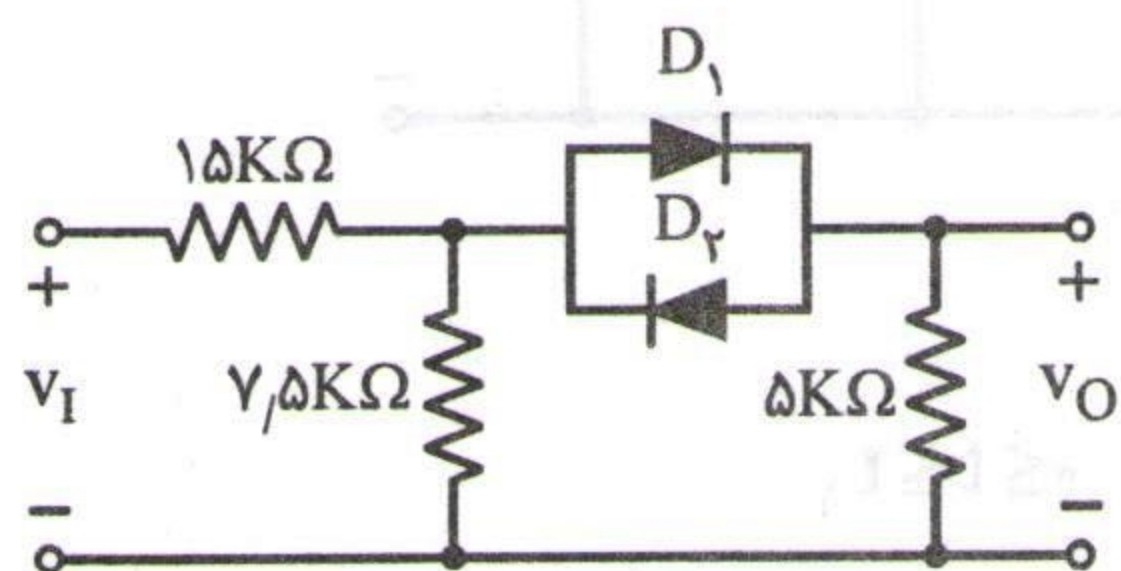
شکل ۸۷-۲

V_1 مرز قطع شدن D_2 است. وقتی دیود D_2 قطع گردد $v_{A2} = v_O = 80V$. بنابراین V_1 برابر ۸۰V خواهد بود. رفتار مدار به طور خلاصه در زیر آمده است. مشخصه انتقالی در شکل ۸۷-۲ رسم شده است.

$$v_I \leq 4.0 \text{ V} \Rightarrow D_1: \text{off}, D_2: \text{on} \Rightarrow v_O = 4.0 \text{ V}$$

$$4.0 \text{ V} \leq v_I \leq 8.0 \text{ V} \Rightarrow D_1: \text{on}, D_2: \text{on} \Rightarrow v_O = v_I$$

$$v_I \geq 8.0 \text{ V} \Rightarrow D_1: \text{on}, D_2: \text{off} \Rightarrow v_O = 8.0 \text{ V}$$



شکل ۸۸-۲

۵۸. مشخصه انتقالی مدار برش شکل ۸۸-۲ را به ازای $V_D(\text{on}) = 0$ و $V_D(\text{on}) = 0.6 \text{ V}$ به دست آورید.

دیودها مشابه و دارای $R_f = 0$ می باشند.

حل: جهت ساده تر شدن تحلیل، مدار معادل تونن سمت چپ مدار را به دست می آوریم.

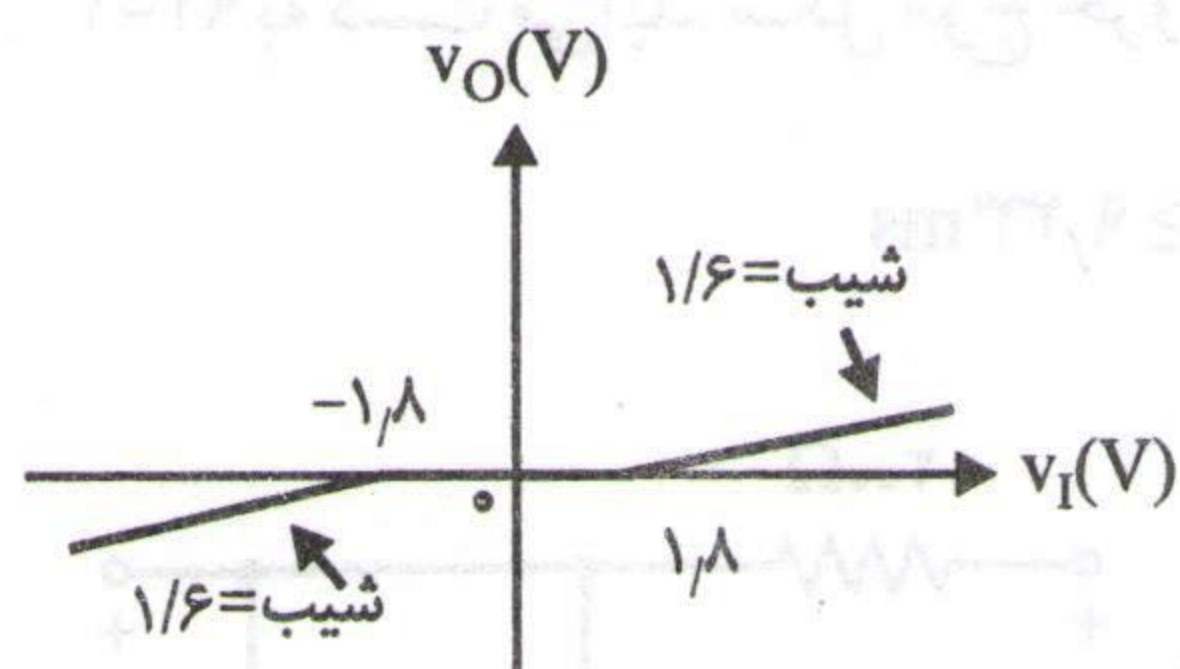
$$R_{Th} = 15 \parallel 7.5 = 5 \text{ K}\Omega, \quad v_{Th} = \frac{v_I}{15 + 7.5} \times 7.5 = \frac{1}{3} v_I$$

با فرض اینکه دیودهای D_1 و D_2 قطع باشند، خروجی صفر خواهد بود. بنابراین چنانچه $v_I/3 \geq 0.6 \text{ V}$ گردد، دیود D_1 هدایت کرده و داریم

$$v_I \geq 1.8 \Rightarrow v_O = \frac{v_I/3 - 0.6}{5 + 5} \times 5 = v_I/6 - 0.3$$

و چنانچه $v_I/3 \leq -0.6 \text{ V}$ شود دیود D_2 هدایت کرده و داریم

$$v_I \leq -1.8 \Rightarrow v_O = \frac{v_I/3 + 0.6}{5 + 5} \times 5 = v_I/6 + 0.3$$



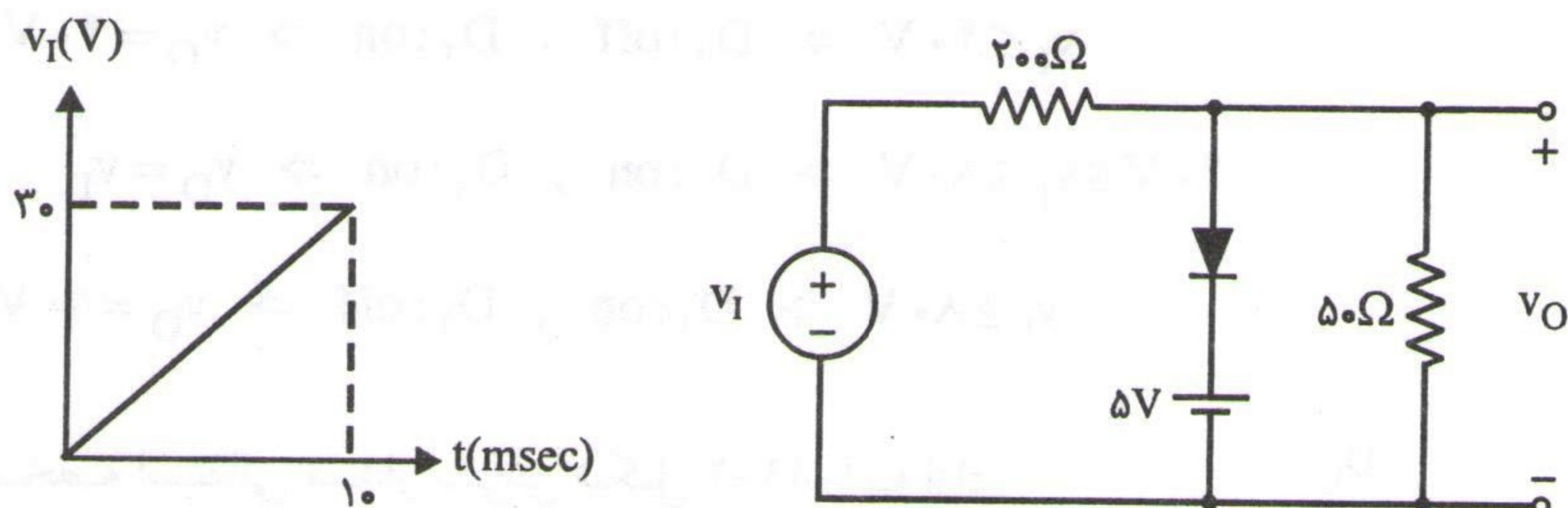
شکل ۸۹-۲

پس برای مقادیر $-1.8 \leq v_I \leq 1.8$ ولت، دیودهای D_1 و D_2 قطع بوده و خروجی برابر صفر است. مشخصه انتقالی مدار در شکل ۸۹-۲ رسم شده است. چنانچه $V_D(\text{on}) = 0$ باشد، محدوده حذف سیگنال ورودی را نخواهیم داشت و همواره $v_O = v_I/6$ است.

۵۹. در مدار شکل ۹۰-۲ شکل موج خروجی را در دو حالت زیر به دست آورید:
الف) دیود ایده آل فرض شود.

ب) دیود با مشخصات $V_D(\text{on}) = 0.6 \text{ V}$ و $R_f = 20 \Omega$ فرض شود.

حل: الف) با افزایش ورودی، خروجی نیز شروع به افزایش می کند و زمانی که v_O به ۵ ولت رسید، دیود هدایت کرده و خروجی در ۵ ولت ثابت می شود. بنابراین برای $0 \leq t \leq t_1$ که هنوز دیود روشن نشده است، خروجی برابر است با



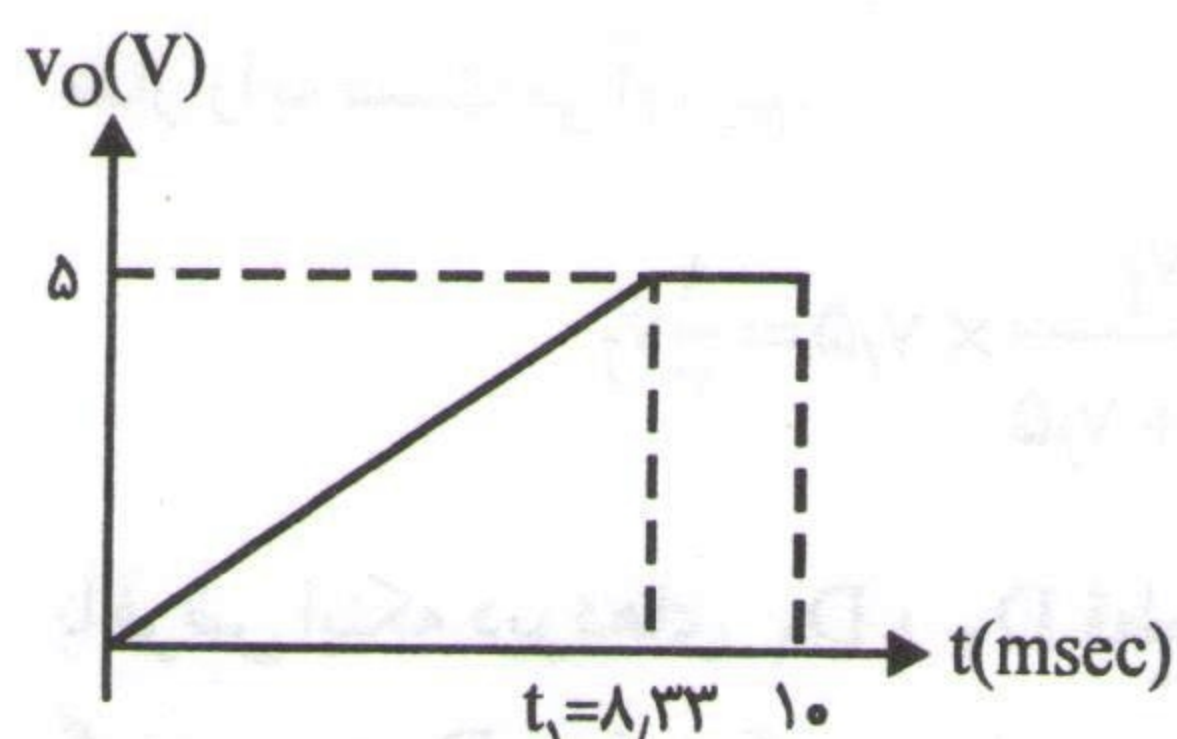
شکل ۹۰-۲

$$v_O = \frac{v_I}{200 + 50} \times 50 = \frac{v_I}{5} = \frac{3}{5}t, \quad 0 \leq t \leq t_1$$

t_1 به صورت زیر محاسبه می شود:

$$v_O(t_1) = 5V \Rightarrow \frac{3}{5}t_1 = 5 \Rightarrow t_1 = 8.33 \text{ msec}$$

شکل موج خروجی در شکل ۹۱-۲ رسم شده است.



شکل ۹۱-۲

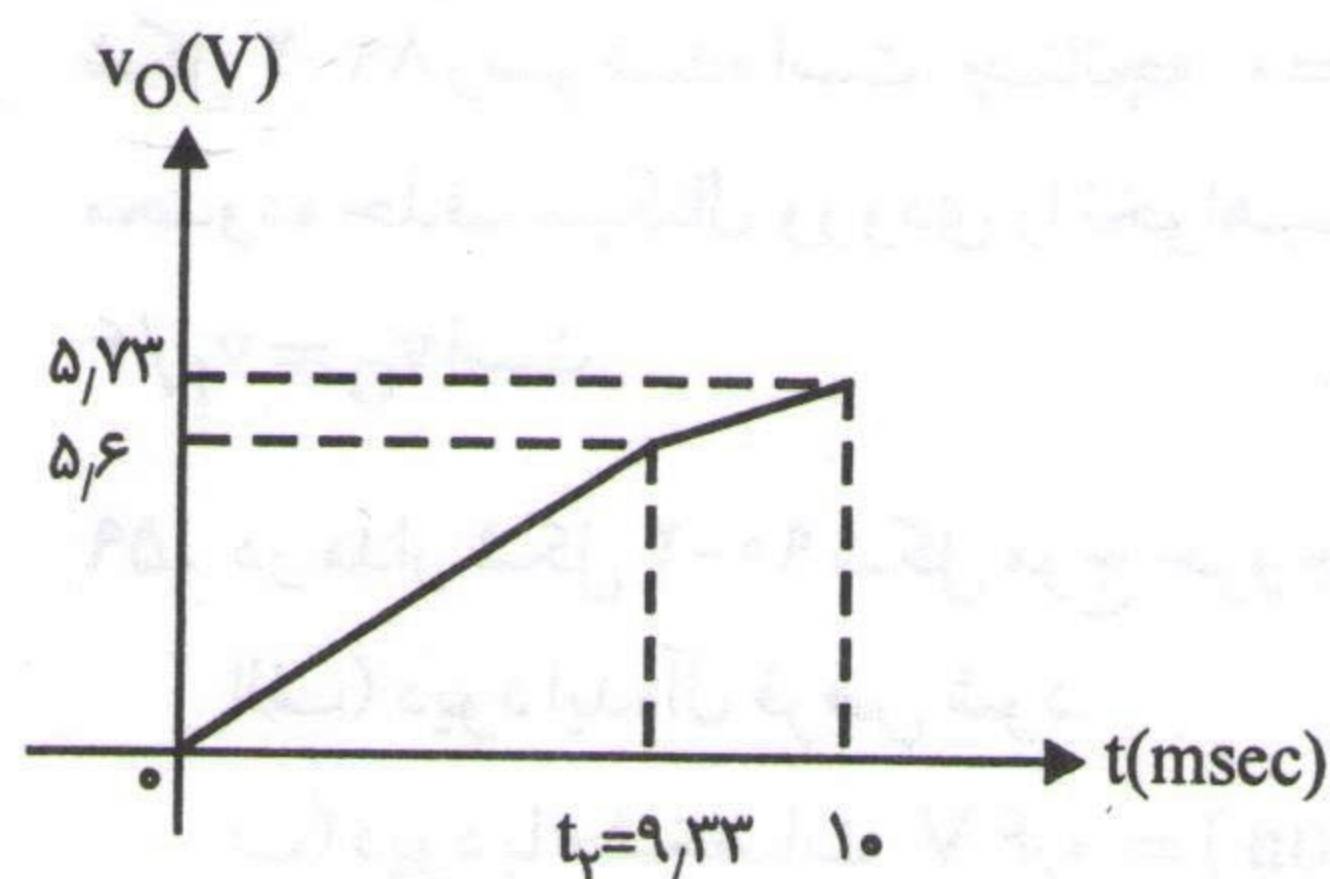
(ب) در این حالت تا زمانی که خروجی به مقدار ۵/۶ ولت نرسیده دیود قطع و خروجی از رابطه زیر به دست می آید:

$$v_O = \frac{v_I}{200 + 50} \times 50 = \frac{3}{5}t, \quad v_O \leq 5.6V$$

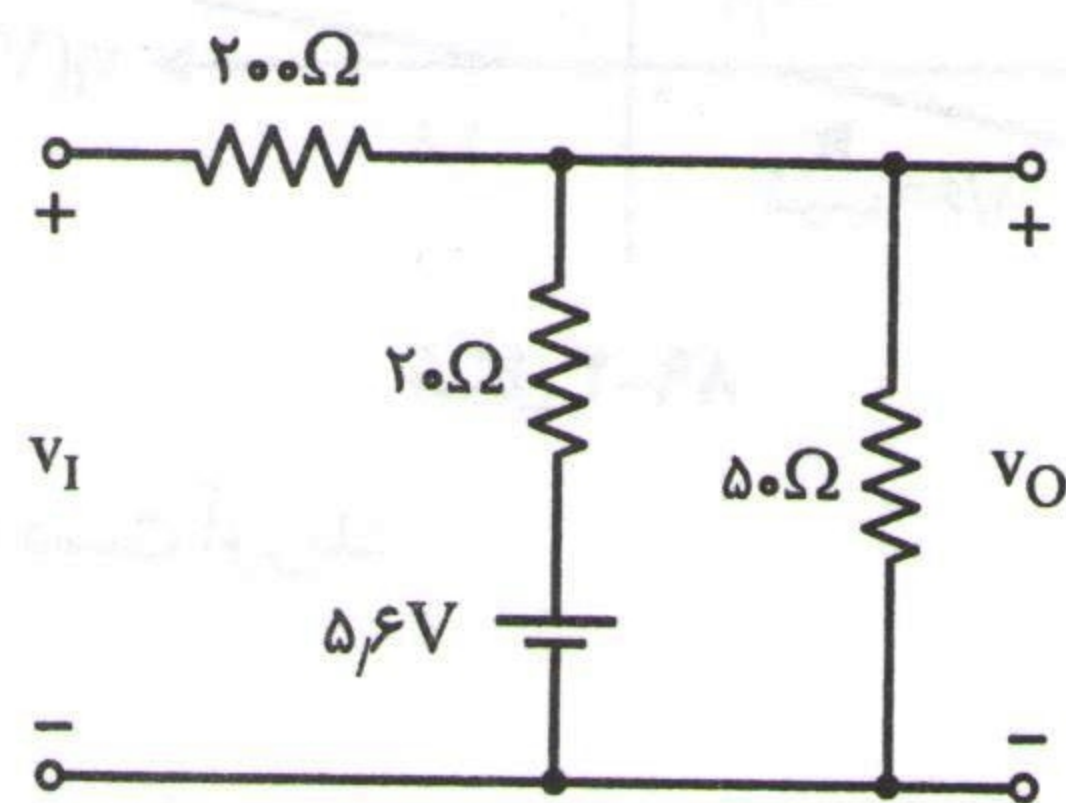
$$v_O(t_2) = 5.6V \Rightarrow \frac{3}{5}t_2 = 5.6 \Rightarrow t_2 = 9.33 \text{ msec}$$

وقتی که خروجی در لحظه $t = t_2$ به ۵/۶ ولت رسید، دیود هدایت کرده و خروجی با استفاده از مدار شکل ۹۲-۲ به دست می آید. شکل موج خروجی در شکل ۹۳-۲ رسم شده است.

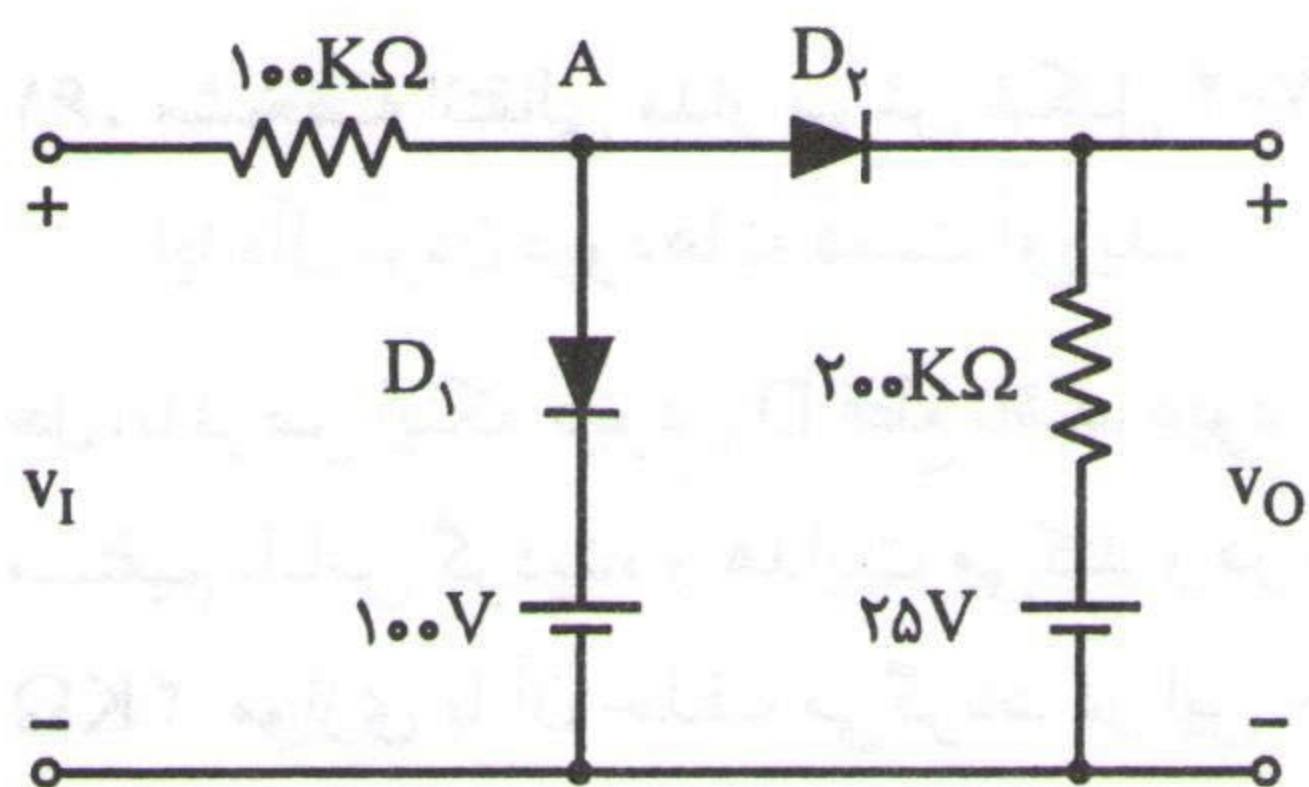
$$v_O = \frac{1}{15}v_I + \frac{5.6}{15} = 0.2t + 3.73, \quad t \geq 9.33 \text{ ms}$$



شکل ۹۳-۲



شکل ۹۲-۲



شکل ۲-۹۴

۶۰. در مدار برش دو سطحی شکل ۲-۹۴ دیودها ایده آل فرض می شوند. مشخصه انتقالی مدار را محاسبه و ترسیم کنید.

حل: ابتدا برای سادگی فرض کنید دیودهای D_1 و D_2 قطع باشند. در این صورت $v_O = 25V$ و $v_A = v_I$ خواهد بود. با افزایش v_I تا مرز ۲۵ ولت دیود D_2 قطع و از آن پس وصل خواهد شد.

$$v_I \leq 25V \Rightarrow v_A \leq 25V \Rightarrow D_1: \text{off}, D_2: \text{off} \Rightarrow v_O = 25V$$

$$25 \leq v_I \leq V_1 \Rightarrow D_1: \text{off}, D_2: \text{on}$$

ولتاژ V_1 مرز هدایت D_1 می باشد و زمانی است که v_A برابر ۱۰۰ ولت شود. برای حالت فوق، مدار به صورت شکل ۲-۹۵ است و v_O برابر است با

$$v_O = v_A = 200i + 25 = 200 \left(\frac{v_I - 25}{100 + 200} \right) + 25 = \frac{2}{3}v_I + \frac{25}{3}$$

مقدار ولتاژ V_1 به صورت زیر به دست می آید:

$$v_A = \frac{2}{3}v_I + \frac{25}{3} = 100 \Rightarrow V_1 = v_I = 137.5V$$

به این ترتیب

$$v_I \geq 137.5V \Rightarrow D_1: \text{on}, D_2: \text{on} \Rightarrow v_O = 100V$$

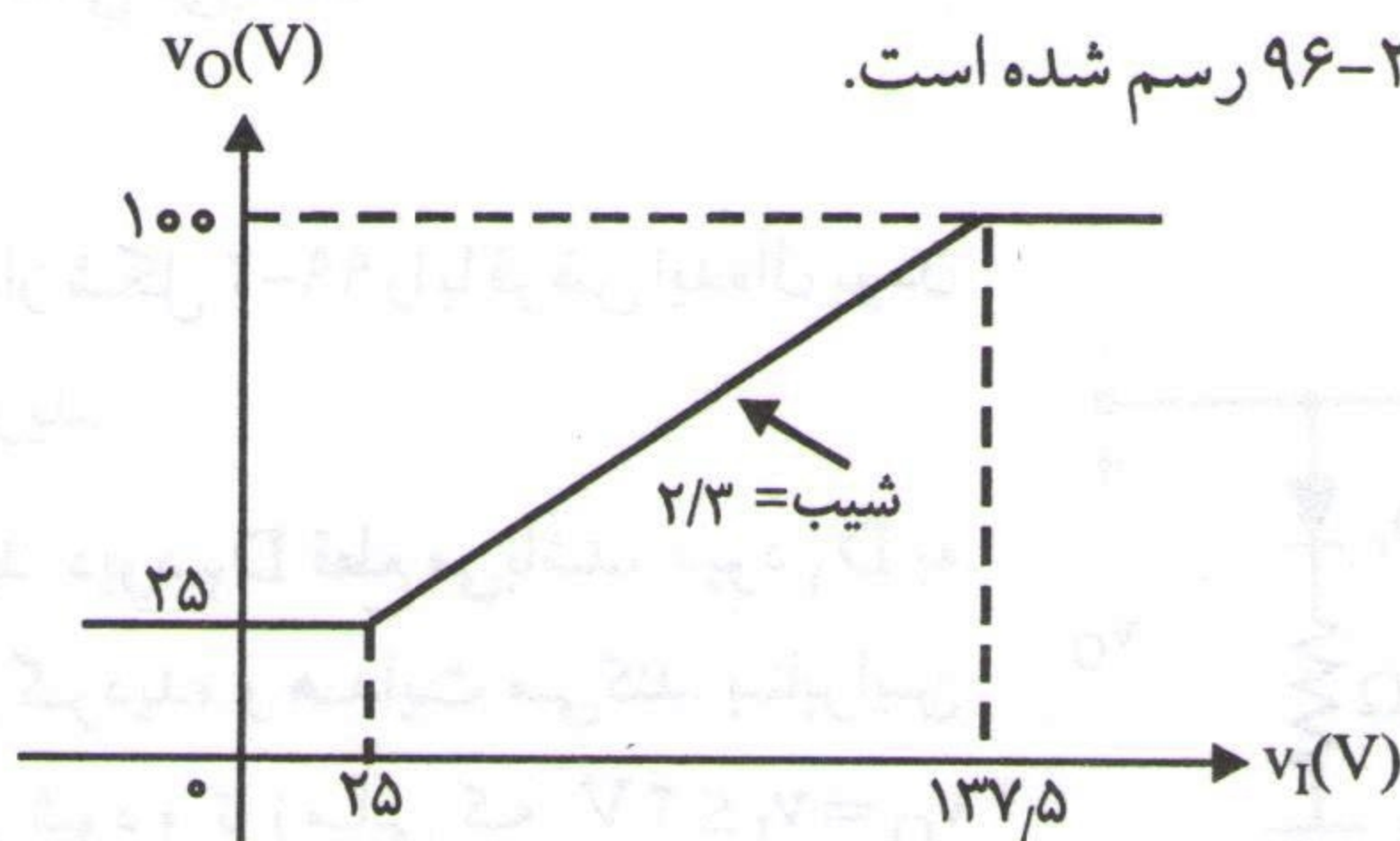
چرا که منبع ولتاژ ۱۰۰ ولت با خروجی موازی می گردد. روابط فوق را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:

$$v_I \leq 25V \Rightarrow D_1: \text{off}, D_2: \text{off} \Rightarrow v_O = 25V$$

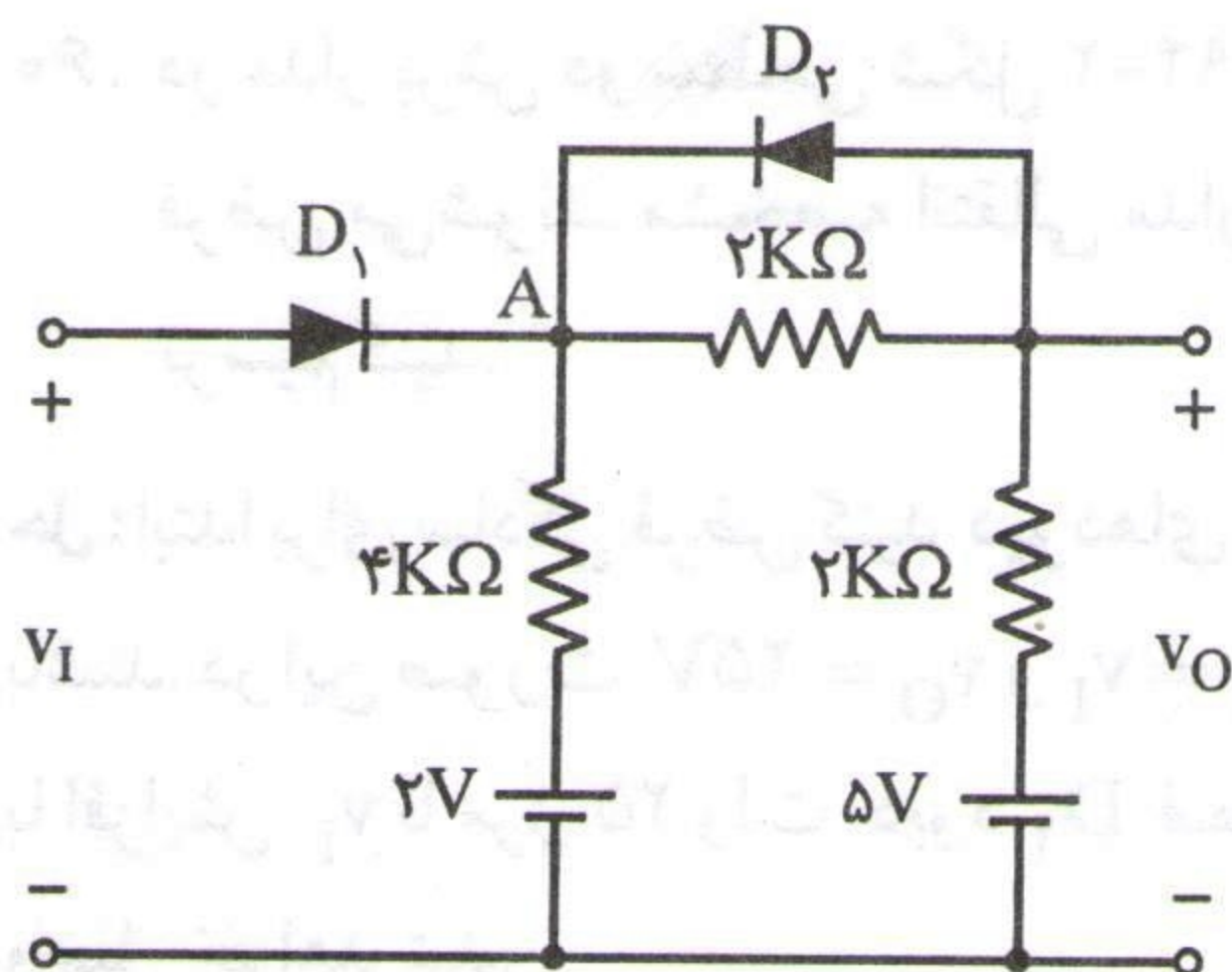
$$25 \leq v_I \leq 137.5V \Rightarrow D_1: \text{off}, D_2: \text{on} \Rightarrow v_O = \frac{2}{3}v_I + \frac{25}{3}V$$

$$v_I \geq 137.5V \Rightarrow D_1: \text{on}, D_2: \text{on} \Rightarrow v_O = 100V$$

مشخصه انتقالی در شکل ۲-۹۶ رسم شده است.



شکل ۲-۹۶



شکل ۹۷-۲

۶۱. مشخصه انتقالی مدار برش شکل ۹۷-۲ را با فرض ایده‌آل بودن دیودها به دست آورید.

حل: با فرض اینکه دیود D_1 قطع باشد، دیود D_2 به صورت مستقیم بایاس گردیده و هدایت می‌کند و در نتیجه مقاومت $2k\Omega$ موازی با آن حذف می‌گردد. در این حالت خروجی برابر است با

$$v_O = v_A = \frac{5-2}{2+4} \times 4 + 2 = 4V$$

پس تا زمانی که ولتاژ ورودی به ولتاژ نقطه A یعنی ۴ ولت نرسیده است، دیود D_1 قطع بوده و خروجی در مقدار ۴ ولت ثابت می‌ماند. برای $v_I \geq 4$ داریم

$$4 \leq v_I \leq V_1 \Rightarrow D_1: \text{on}, D_2: \text{on} \Rightarrow v_O = v_A = v_I$$

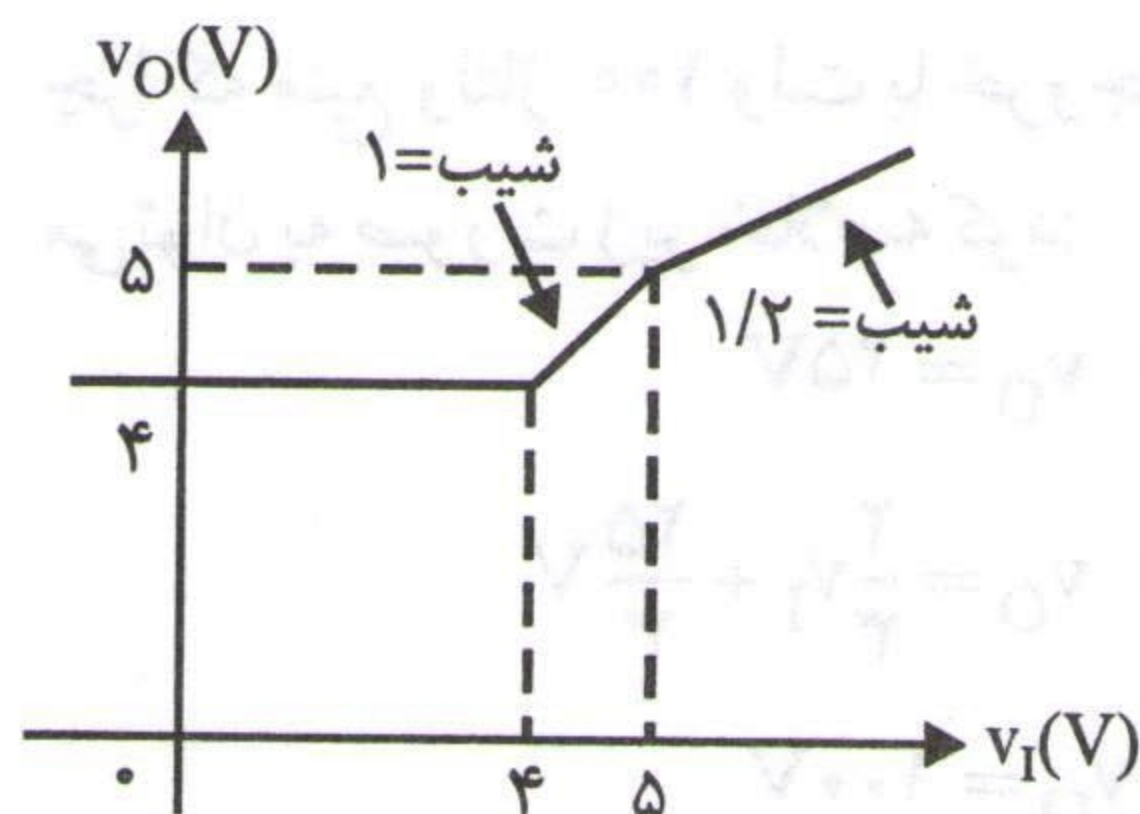
که V_1 مرز قطع دیود D_2 می‌باشد. برای یافتن مقدار V_1 فرض نمایید که $v_I \geq V_1$ است، در این صورت دیود D_1 روشن و دیود D_2 قطع خواهد بود و در نتیجه خروجی برابر است با

$$v_O = \frac{v_I - 5}{2+2} \times 2 + 5 = \frac{1}{2}v_I + 2.5V$$

حال V_1 را می‌توان مرز هدایت دیود D_2 در نظر گرفت یعنی جایی که خروجی v_O با ولتاژ نقطه A یا v_I برابر می‌گردد. بنابراین داریم

$$v_O = \frac{1}{2}v_I + 2.5 = v_I \Rightarrow V_1 = v_I = 5V$$

به این ترتیب می‌توان رفتار مدار را به صورت زیر خلاصه کرد:



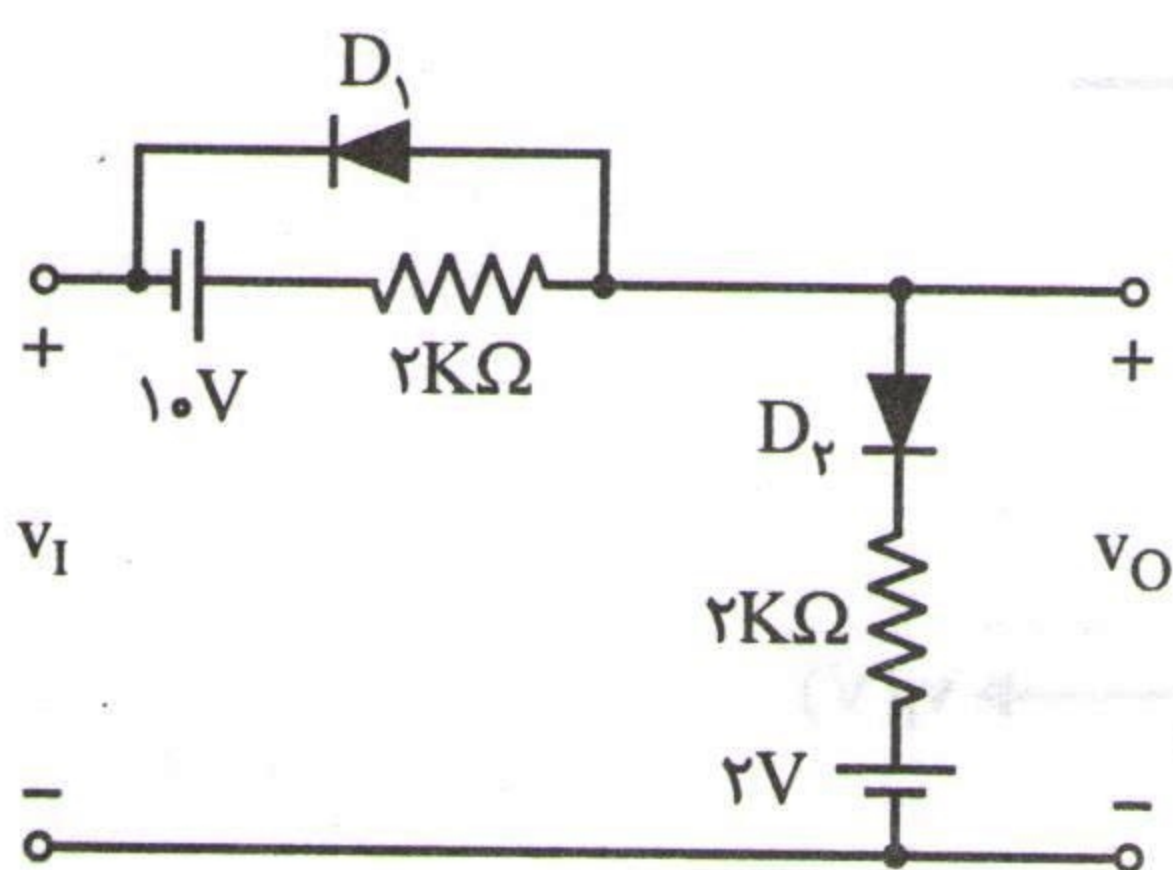
شکل ۹۸-۲

$$v_I \leq 4V \Rightarrow D_1: \text{off}, D_2: \text{on} \Rightarrow v_O = 4V$$

$$4V \leq v_I \leq 5V \Rightarrow D_1: \text{on}, D_2: \text{on} \Rightarrow v_O = v_I$$

$$v_I \geq 5V \Rightarrow D_1: \text{on}, D_2: \text{off} \Rightarrow v_O = \frac{1}{2}v_I + 2.5$$

منحنی مشخصه انتقالی در شکل ۹۸-۲ رسم شده است و در نقاط شکست دارای پیوستگی می‌باشد.



شکل ۹۹-۲

۶۲. مشخصه انتقالی مدار شکل ۹۹-۲ را با فرض ایده‌آل بودن دیودها به دست آورید.

حل: چنانچه فرض نمایید دیود D_2 قطع می‌باشد، دیود D_1 به صورت مستقیم بایاس گردیده و هدایت می‌کند. بنابراین خروجی برابر ورودی می‌شود و تا زمانی که $v_O = v_I \leq 2V$ باشد مدار در همین وضعیت باقی می‌ماند. برای $v_I \geq 2V$ داریم

$$2V \leq v_I \leq V_1 \Rightarrow D_1: \text{on}, D_2: \text{on} \Rightarrow v_O = v_I$$

V_1 مرز قطع دیود D_1 می باشد.

$$v_I \geq V_1 \Rightarrow D_1: \text{off}, D_2: \text{on} \Rightarrow v_O = \frac{v_I + 10 - 2}{2 + 2} \times 2 + 2 = \frac{v_I}{2} + 6$$

به ازای $v_I = V_1$ ولتاژ خروجی با ورودی برابر گردیده و دیود D_1 وصل می گردد. بنابراین

$$v_O = \frac{v_I}{2} + 6 = v_I \Rightarrow V_1 = v_I = 12V$$

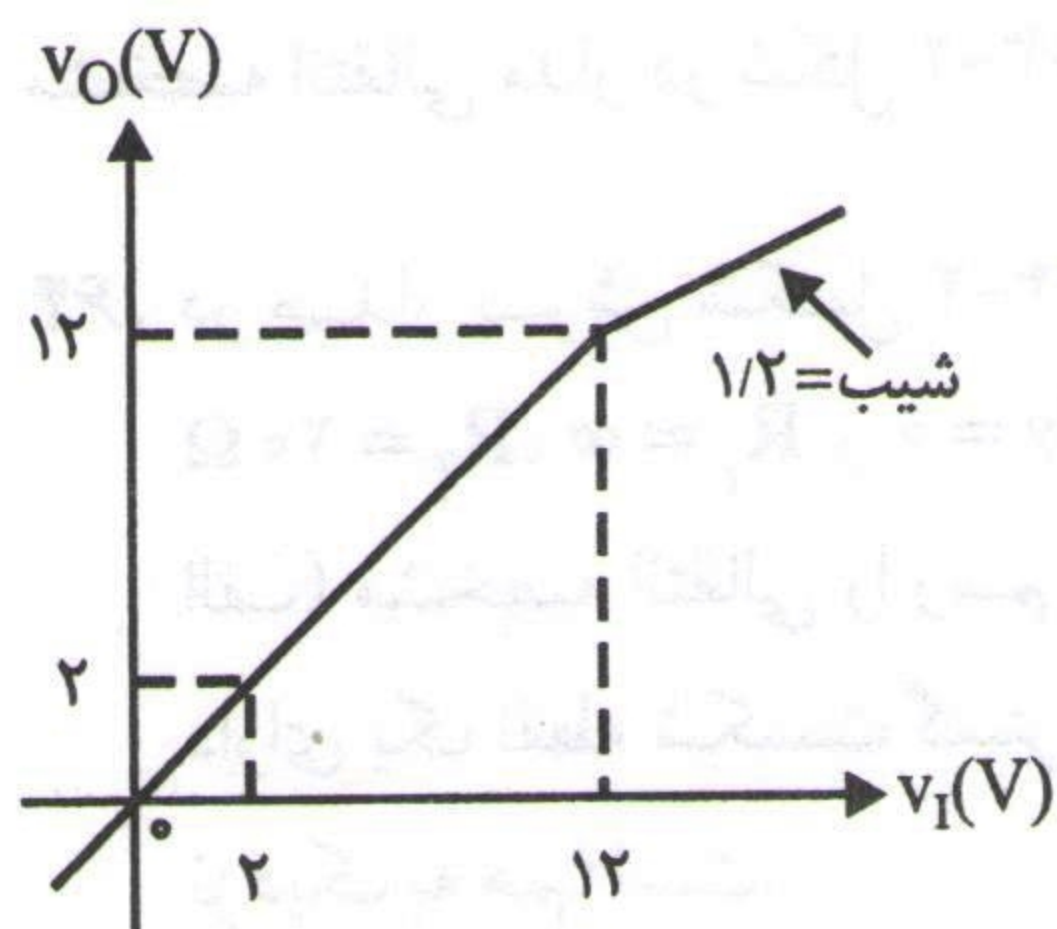
به این ترتیب می توان رفتار مدار را به صورت زیر خلاصه کرد:

$$v_I \leq 2V \Rightarrow D_1: \text{on}, D_2: \text{off} \Rightarrow v_O = v_I$$

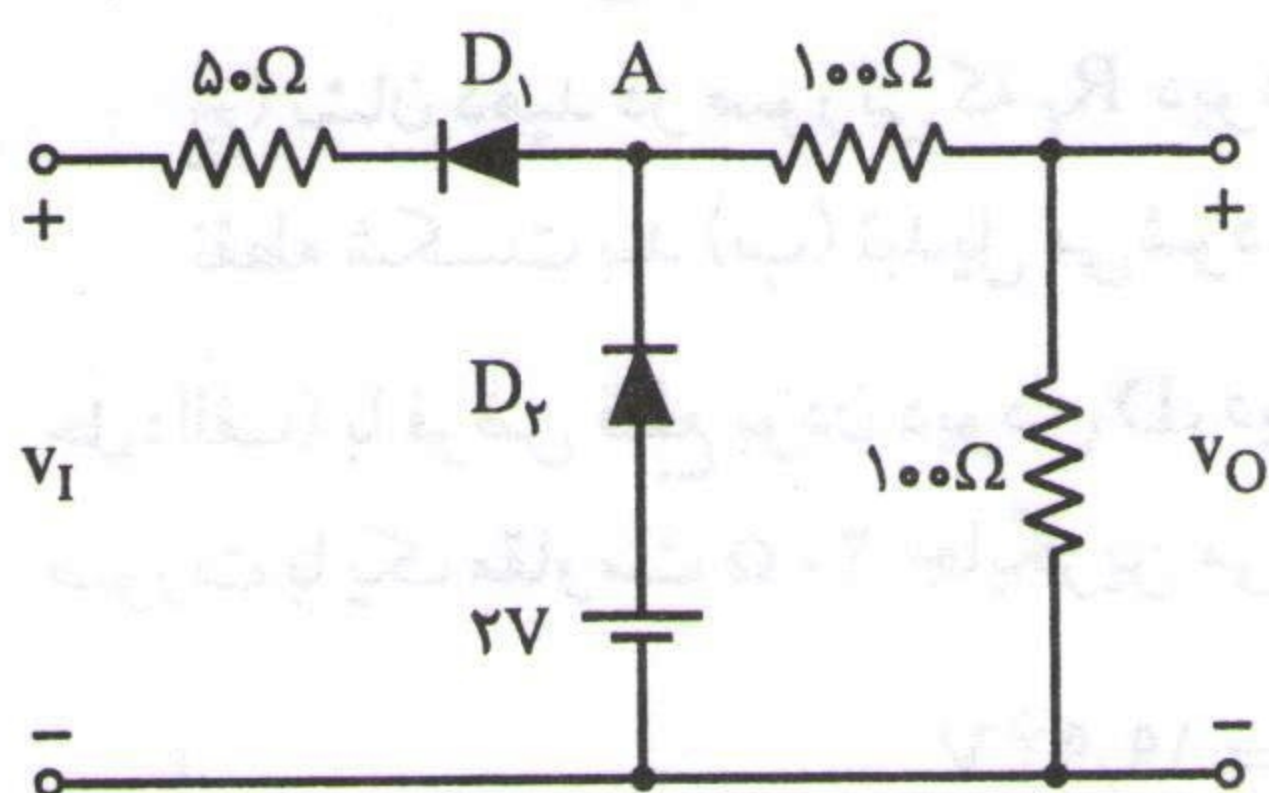
$$2V \leq v_I \leq 12V \Rightarrow D_1, D_2: \text{on} \Rightarrow v_O = v_I$$

$$v_I \geq 12V \Rightarrow D_1: \text{off}, D_2: \text{on} \Rightarrow v_O = \frac{v_I}{2} + 6$$

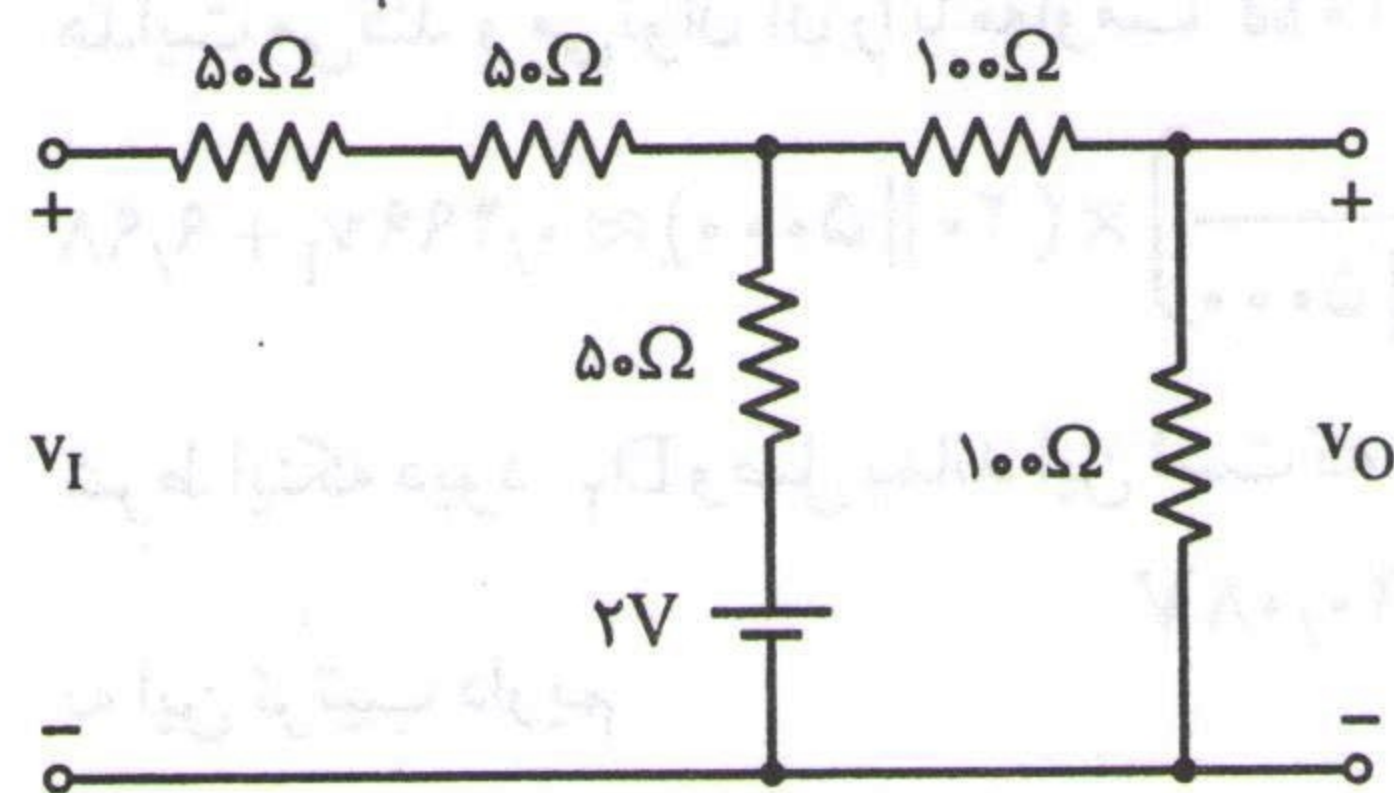
منحنی مشخصه انتقالی مدار به صورت شکل ۱۰۰-۲ می باشد.



شکل ۱۰۰-۲



شکل ۱۰۱-۲



شکل ۱۰۲-۲

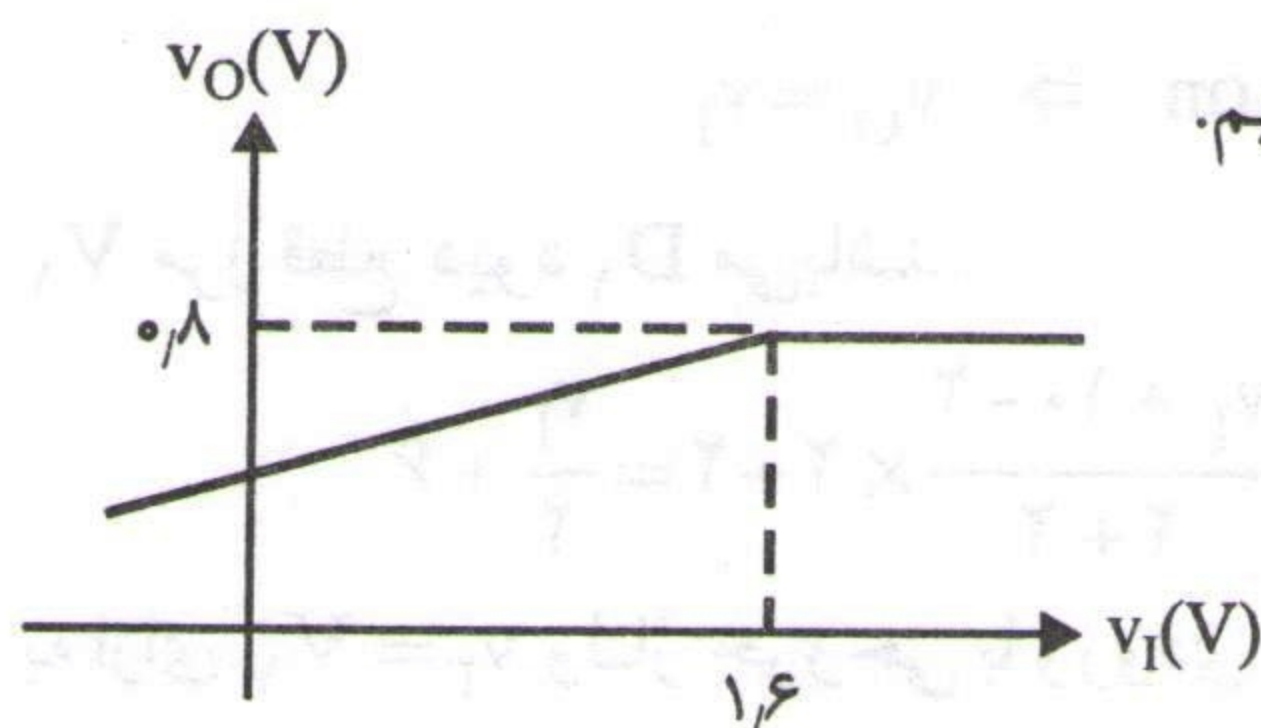
۶۳. مشخصه انتقالی مدار برش شکل ۱۰۱-۲ را به دست آورید. دیودها دارای $R_f = 50\Omega$ و $V_{\gamma} = 0$ هستند.

حل: با فرض اینکه دیود D_1 قطع است دیود D_2 هدایت کرده و خروجی برابر است با

$$v_O = \frac{2}{50 + 100 + 100} \times 100 = 0.8V$$

$$v_A = \frac{2}{50 + 100 + 100} \times 200 = 1.6V$$

بنابراین برای $v_I > 1.6V$ دیود D_1 قطع و برای $v_I \leq 1.6V$ وصل می باشد. واضح است برای اینکه دیود D_2 قطع گردد باید ولتاژ نقطه A بزرگتر از ۲ ولت شود و از آنجا که برای $v_I > 1.6V$ دیود D_1 قطع است، v_A هیچگاه به ۲ ولت نخواهد رسید. بنابراین دیود D_2 همواره هدایت می کند. پس برای $v_I \leq 1.6V$ هر دو دیود هدایت کرده و مدار معادل به صورت شکل ۱۰۲-۲ خواهد بود.



شکل ۲-۱۰۳

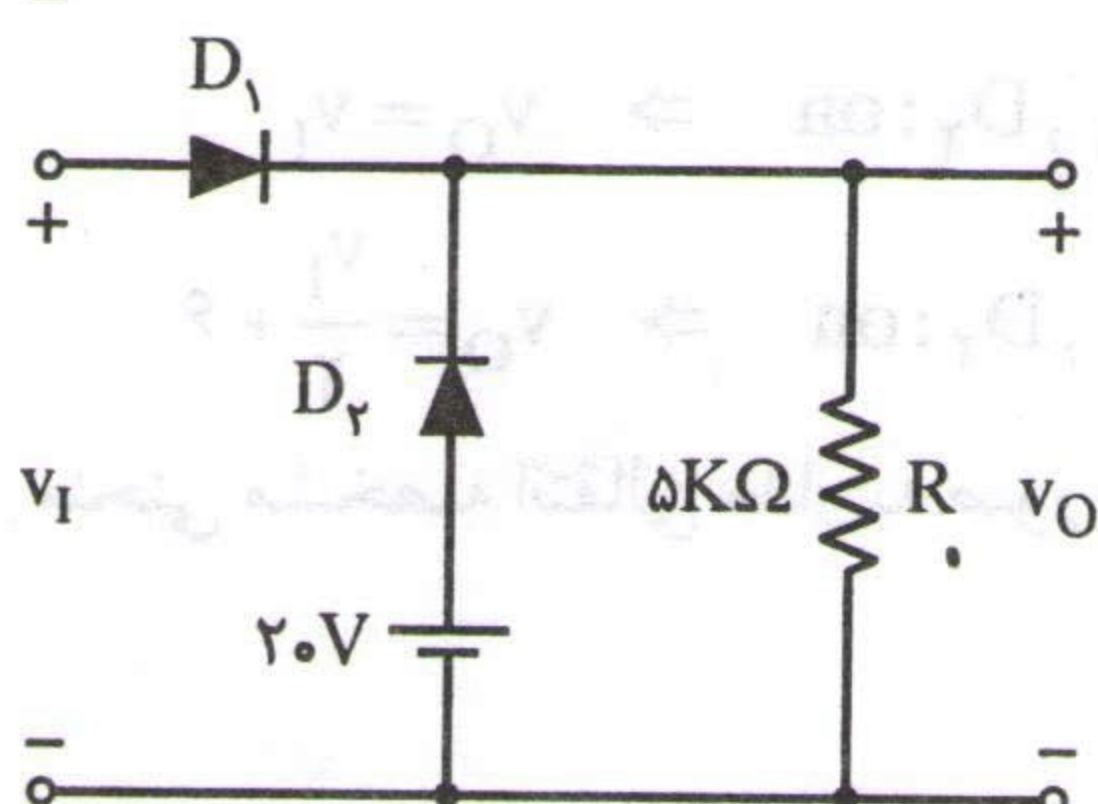
v_O را با قرار دادن معادل تونن سمت چپ مدار به دست می‌آوریم.

$$v_{Th} = \frac{v_I - 2}{50 + 50 + 50} \times 50 + 2 = \frac{1}{3} v_I + 1.33$$

$$R_{Th} = 100 \parallel 50 + 100 = 133.33 \Omega$$

$$v_O = \frac{v_{Th}}{R_{Th} + 100} \times 100 = 0.143 v_I + 0.57 V$$

برای $v_I \geq 1.6 V$ ، دیود D_1 قطع و دیود D_2 وصل می‌باشد؛ بنابراین $v_O = 0.8 V$ خواهد بود. منحنی مشخصه انتقالی مدار در شکل ۲-۱۰۳ رسم شده است.



شکل ۲-۱۰۴

۶۴. در مدار برش شکل ۲-۱۰۴، برای دیودهای مدار $R_f = 20 \Omega$ ، $R_T = \infty$ و $V_\gamma = 0$ است.

(الف) مشخصه انتقالی را رسم نمایید. نشان دهید که مدار دارای یک نقطه شکست گسترش یافته (دو نقطه شکست نزدیک به هم) است.

(ب) با فرض تعویض دیود D_2 با یک مقاومت $5 K\Omega$ ، مشخصه انتقالی را به دست آورید.

(ج) نشان دهید در صورتی که R_f دیود خیلی کوچک‌تر از R باشد، دو نقطه شکست بند (الف) به یک نقطه شکست بند (ب) تبدیل می‌شود.

حل: (الف) با فرض قطع بودن دیود D_1 ، دیود D_2 به صورت مستقیم بایاس شده و هدایت می‌کند. در این صورت با یک مقاومت 20Ω جایگزین می‌گردد و داریم

$$v_O = \left(\frac{20}{20 + 5000} \right) \times 5000 = 19.92 V$$

به این ترتیب تا v_I به مرز 19.92 ولت نرسد، دیود D_1 قطع خواهد بود. به ازای $v_I \geq 19.92 V$ ، دیود D_1 نیز هدایت می‌کند و می‌توان آن را با مقاومت 20Ω جایگزین نمود. در این صورت ولتاژ خروجی برابر است با

$$v_O = \left(\frac{v_I}{20 + 20 \parallel 5000} \right) \times (20 \parallel 5000) + \left(\frac{20}{20 + 20 \parallel 5000} \right) \times (20 \parallel 5000) \approx 0.499 v_I + 9.98$$

شرط اینکه دیود D_2 وصل بماند این است که

$$v_O \leq 2.0 V \Rightarrow v_I \leq 20.08 V$$

به این ترتیب داریم

$$v_I \leq 19.92 V \Rightarrow D_1: \text{off}, D_2: \text{on} \Rightarrow v_O = 19.92 V$$

$$19.92 V \leq v_I \leq 20.08 V \Rightarrow D_1: \text{on}, D_2: \text{on} \Rightarrow v_O = 0.499 v_I + 9.98$$

$$v_I \geq 20.08 V \Rightarrow D_1: \text{on}, D_2: \text{off} \Rightarrow v_O = 0.996 v_I$$

مشاهده می شود که دو نقطه شکست مشخصه انتقالی مدار بسیار به هم نزدیک هستند که در صورت ناچیز بودن R_f در مقابل R ، نقاط شکستگی به هم منطبق می شوند.

ب) اگر به جای دیود D_2 یک مقاومت $5K\Omega$ قرار گیرد، با فرض قطع بودن دیود D_1 ، ولتاژ خروجی برابر است با

$$v_O = \left(\frac{20}{5+5} \right) \times 5 = 10V$$

بنابراین به ازای $v_I \geq 10V$ ، دیود D_1 وصل شده و در نتیجه با مقاومت 20Ω جایگزین می گردد و ولتاژ خروجی برابر است با

$$v_O = \left(\frac{v_I}{20 + 5000 \parallel 5000} \right) \times (5000 \parallel 5000) + \left(\frac{20}{5000 + 20 \parallel 5000} \right) \times (20 \parallel 5000) \\ = 0.992v_I + 0.08$$

به این ترتیب داریم

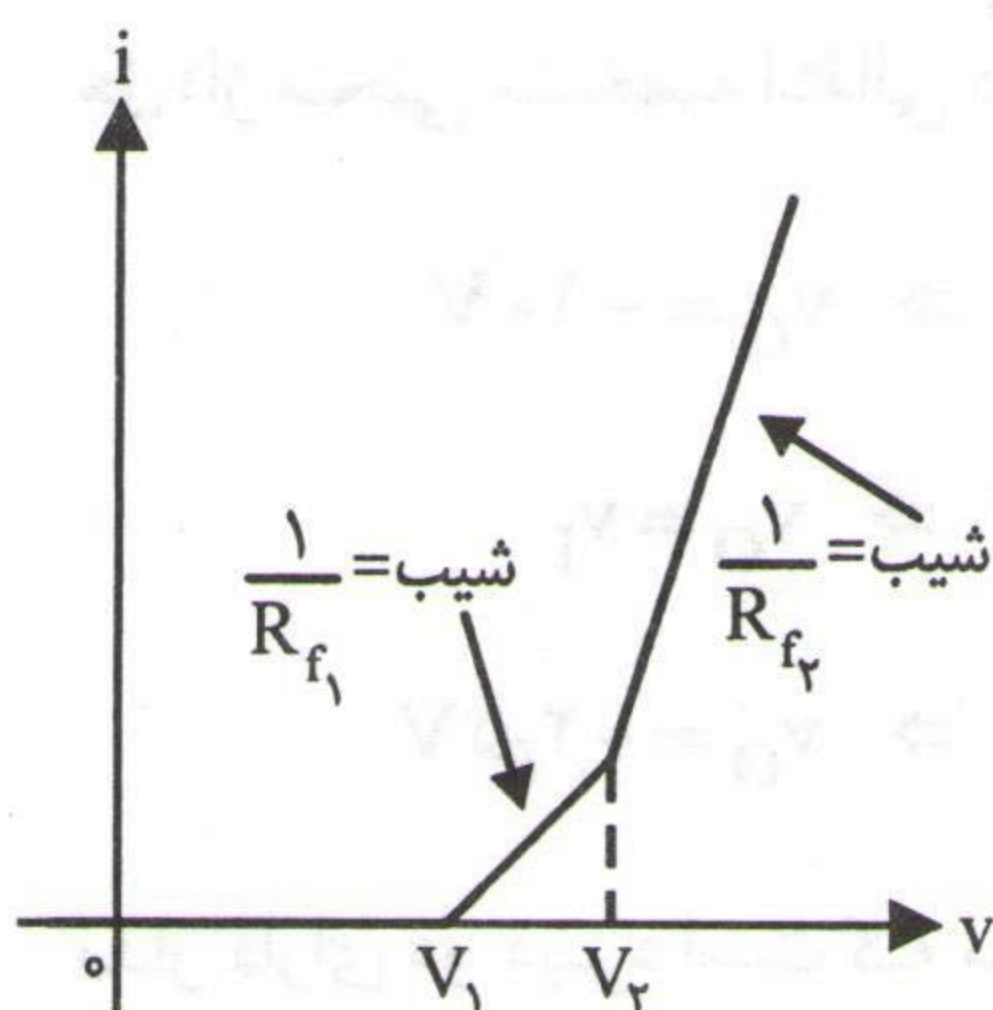
$$v_I \leq 10V \Rightarrow v_O = 10V$$

$$v_I \geq 10V \Rightarrow v_O = 0.992v_I + 0.08$$

ج) اگر در بند (الف) از مقدار R_f صرف نظر نماییم، با فرض قطع بودن دیود D_1 ، دیود D_2 وصل بوده و $v_O = 20V$ می شود. بنابراین فقط یک نقطه شکست در $v_I = 20V$ خواهیم داشت.

$$v_I \leq 20V \Rightarrow D_1: \text{off}, D_2: \text{on} \Rightarrow v_O = 20V$$

$$v_I \geq 20V \Rightarrow D_1: \text{on}, D_2: \text{off} \Rightarrow v_O = v_I$$



شکل ۱۰۵-۲

۶۵. منحنی مشخصه یک دیود را مطابق شکل ۱۰۵-۲ مدلسازی کنید. مدار معادل این مدل را با استفاده از دیودهای ایده آل، مقاومتها و منابع طرح کنید. مقادیر قطعه های به کار رفته در مدار را برحسب پارامترهای مدل به دست آورید.

حل: برای مشخصه مورد نظر به ازای مقادیر مختلف ولتاژ داریم

$$v \leq V_1 \Rightarrow i = 0 \Rightarrow$$

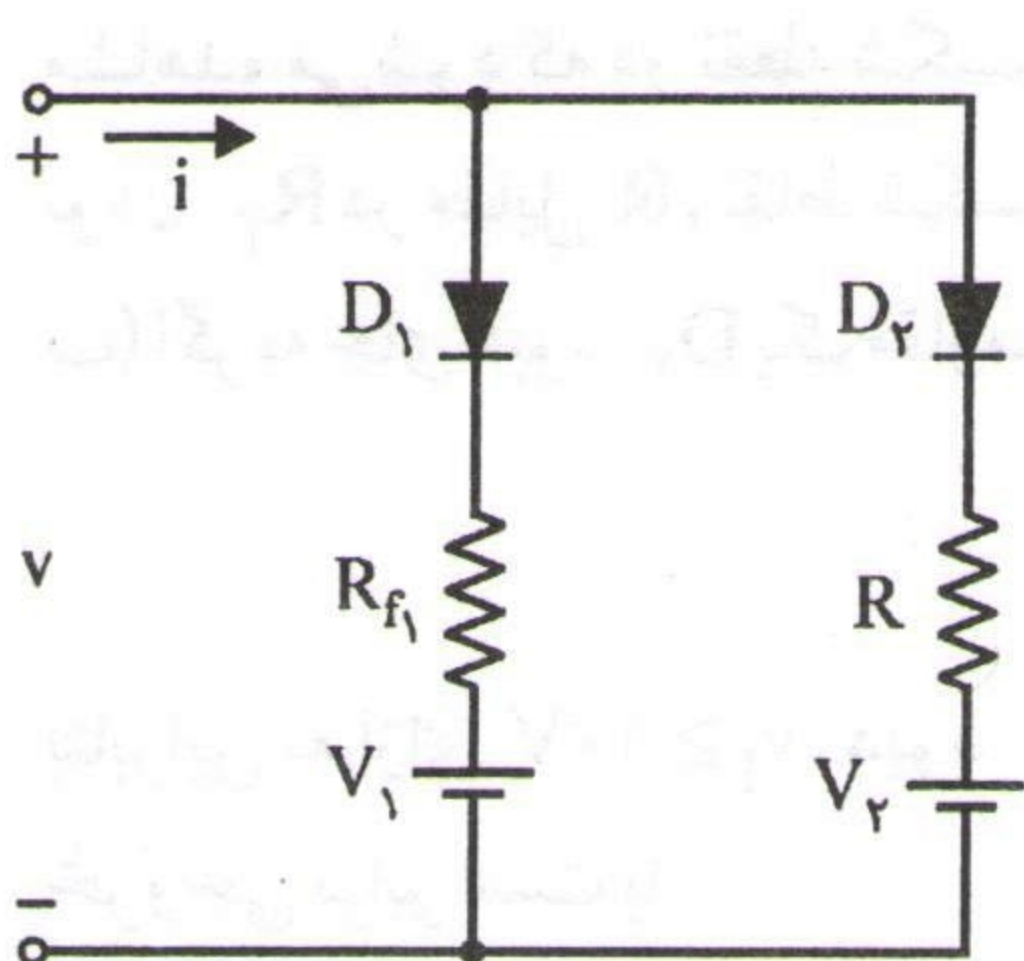
مدار اتصال باز

$$V_1 \leq v \leq V_2 \Rightarrow i = \frac{1}{R_{f1}}(v - V_1) \Rightarrow$$

شاخه با منبع ولتاژ و مقاومت

$$v \geq V_2 \Rightarrow i = \frac{1}{R_{f2}}(v - V_2) + \frac{1}{R_{f1}}(V_2 - V_1) \Rightarrow$$

شاخه با منبع ولتاژ و مقاومت



شکل ۱۰۶-۲

بنابراین مدار دارای دو شاخه به صورت شکل ۱۰۶-۲ خواهد بود.
در این مدار داریم

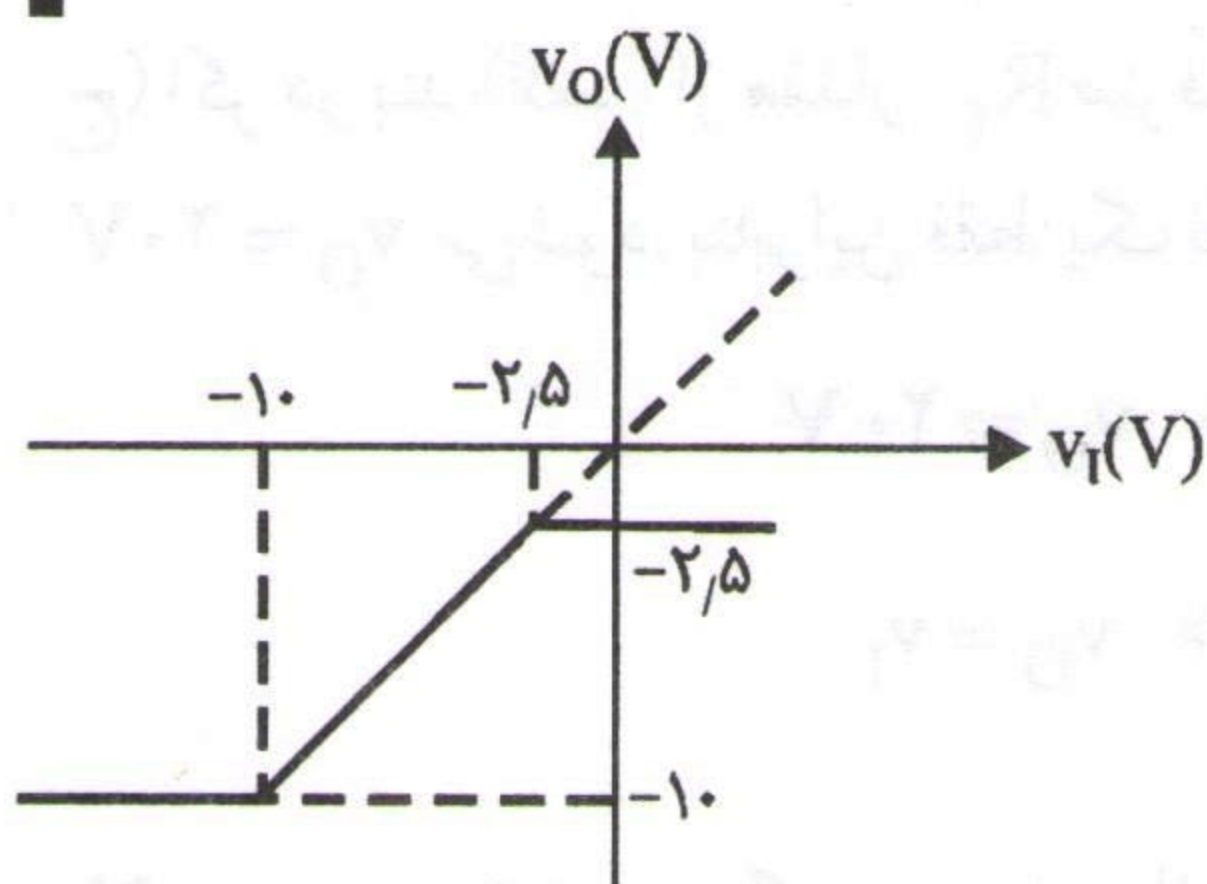
$$v \leq V_1 \leq V_2 \Rightarrow D_1: \text{off}, D_2: \text{off} \Rightarrow i = 0$$

$$V_1 \leq v \leq V_2 \Rightarrow D_1: \text{on}, D_2: \text{off} \Rightarrow i = \frac{1}{R_{f1}}(v - V_1)$$

حال برای $v \leq V_2$ که هر دو دیود روشن می‌شوند R را چنان انتخاب می‌کنیم که معادله $v-i$ در این حالت با مشخصه داده شده انطباق یابد.

$$v \geq V_2 \Rightarrow D_1: \text{on}, D_2: \text{on} \Rightarrow i = \frac{v - V_1}{R_{f1}} + \frac{v - V_2}{R}$$

$$\Rightarrow i = \left(\frac{R + R_{f1}}{R_{f1}R} \right) v - \left(\frac{V_1}{R_{f1}} + \frac{V_2}{R} \right) \Rightarrow \frac{R + R_{f1}}{R_{f1}R} = \frac{1}{R_{f2}} \Rightarrow R = \frac{R_{f1}R_{f2}}{R_{f1} - R_{f2}}$$



شکل ۱۰۷-۲

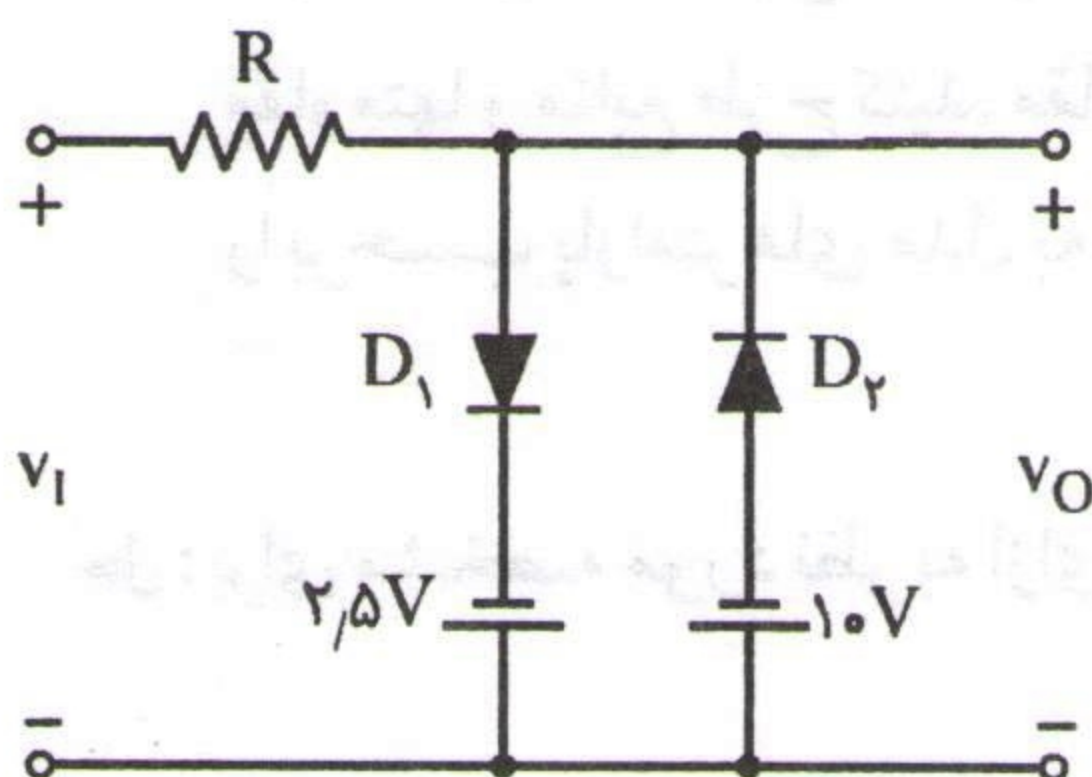
۶۶. مشخصه انتقالی شکل ۱۰۷-۲ را در نظر بگیرید. یک مدار برای مشخصه مذکور طراحی نموده و مقادیر قطعه‌های به کار رفته را مشخص نمایید. از دیودهای ایده‌آل، مقاومت و منابع استفاده کنید.

حل: از منحنی مشخصه انتقالی داریم

$$v_I \leq -10V \Rightarrow v_O = -10V$$

$$-10 \leq v_I \leq -2.5V \Rightarrow v_O = v_I$$

$$v_I \geq -2.5V \Rightarrow v_O = -2.5V$$

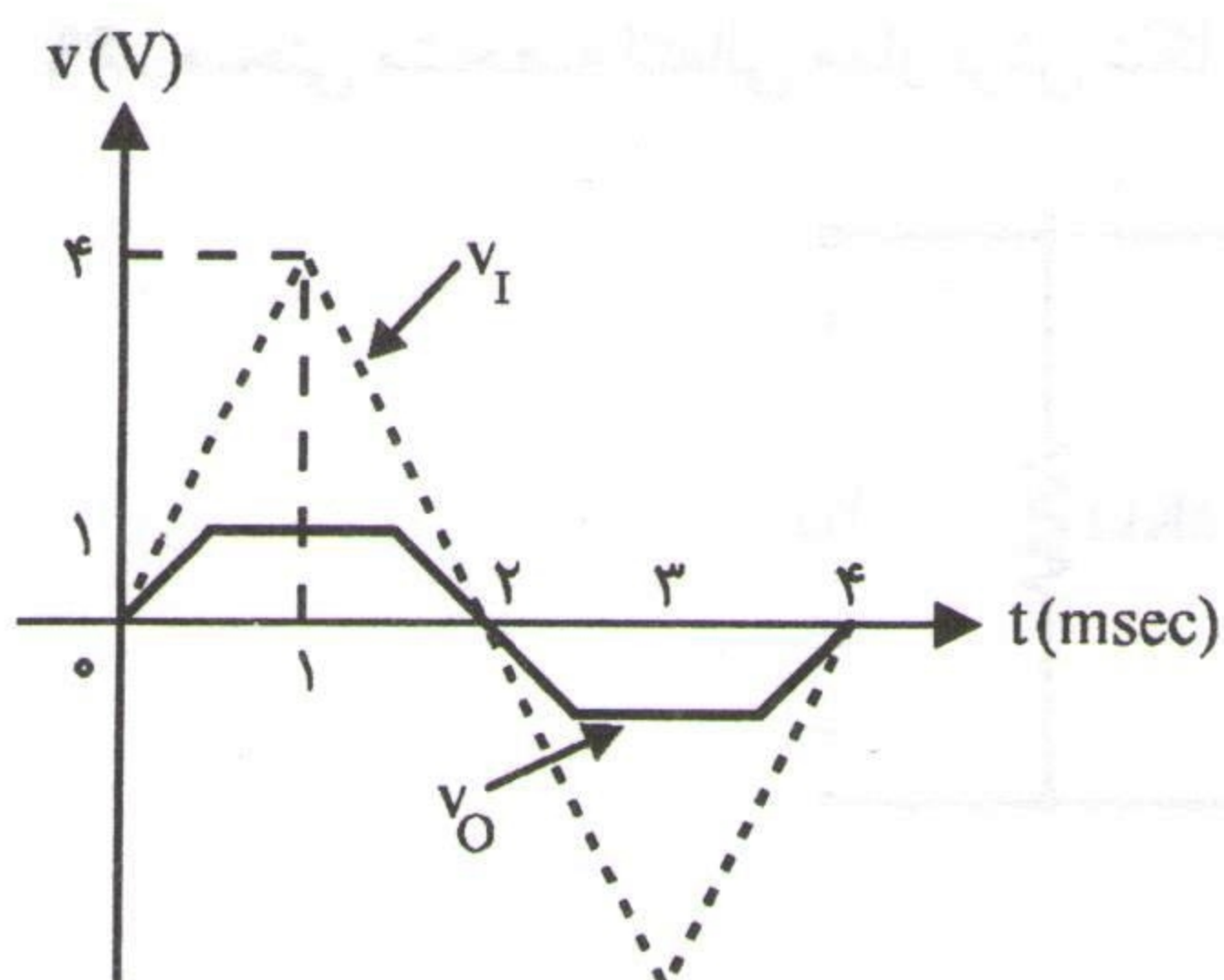


شکل ۱۰۸-۲

مدار دارای دو دیود است که می‌توان آن را به صورت شکل ۱۰۸-۲ در نظر گرفت.

۶۷. مداری طراحی کنید که از شکل موج مثلی ورودی نشان داده شده در شکل ۱۰۹-۲، شکل موج دوزنقه‌ای نشان داده شده را ایجاد نماید. از دیودهای ایده‌آل، مقاومت و منابع استفاده کنید.

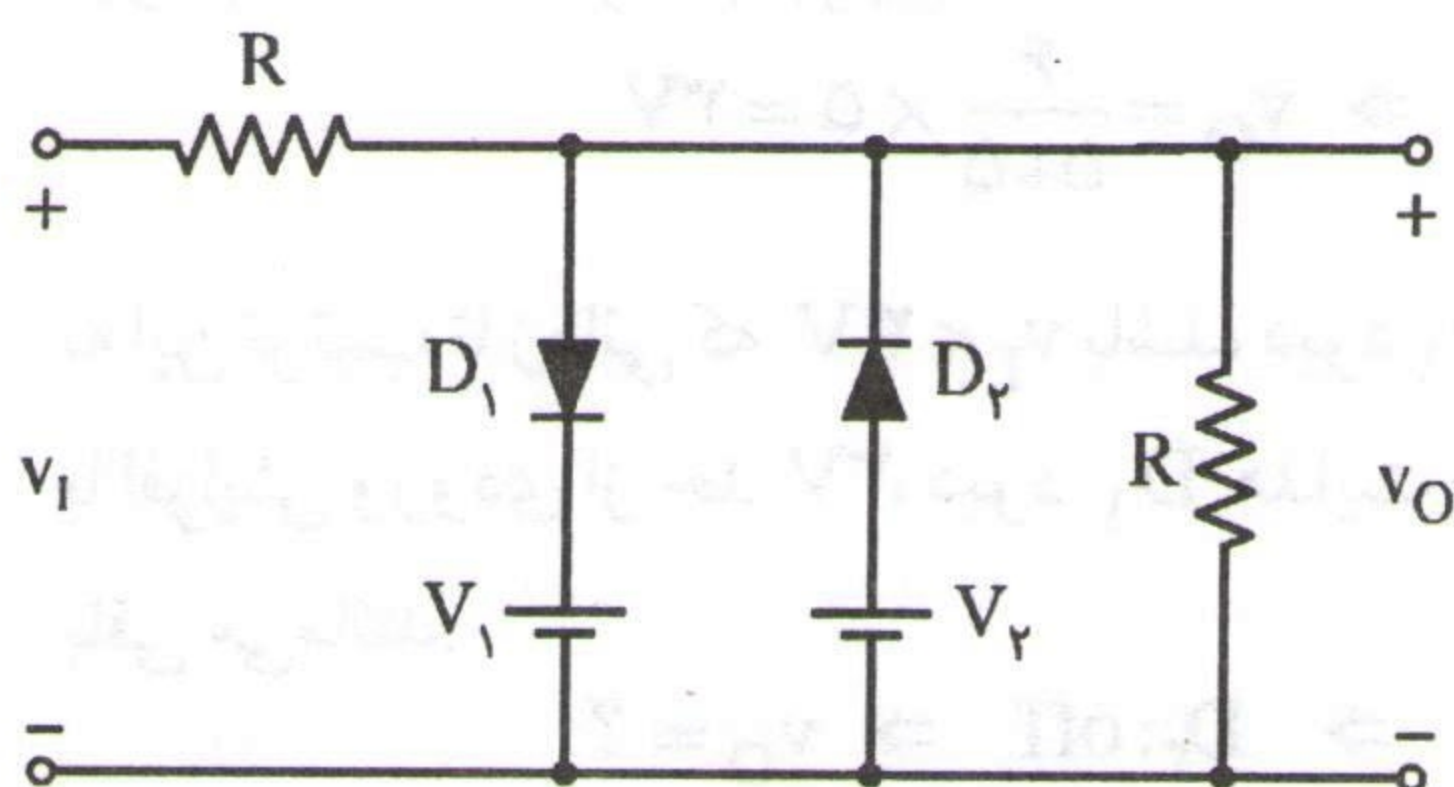
حل: با توجه به شکل موج ورودی و خروجی، مشخصه انتقالی مدار مورد نظر چنین است.



شکل ۲-۱۰۹

$$v_O = \begin{cases} -1 & v_I \leq -2V \\ \frac{1}{2}v_I & -2V \leq v_I \leq 2V \\ 1 & v_I \geq 2V \end{cases}$$

در دو بخش اول و سوم، خروجی ولتاژ ثابتی است. بنابراین در این دو بخش به ترتیب یک منبع ثابت $1V$ و $-1V$ موازی خروجی قرار می‌گیرد. در بخش میانی مشخصه، یک ترکیب مقاومتی داریم. بنابراین مدار را می‌توان به صورت شکل ۲-۱۱۰ در نظر گرفت. اگر هر دو دیود قطع باشند، در این صورت داریم



شکل ۲-۱۱۰

$$v_O = \left(\frac{v_I}{R+R} \right) \times R = \frac{1}{2}v_I$$

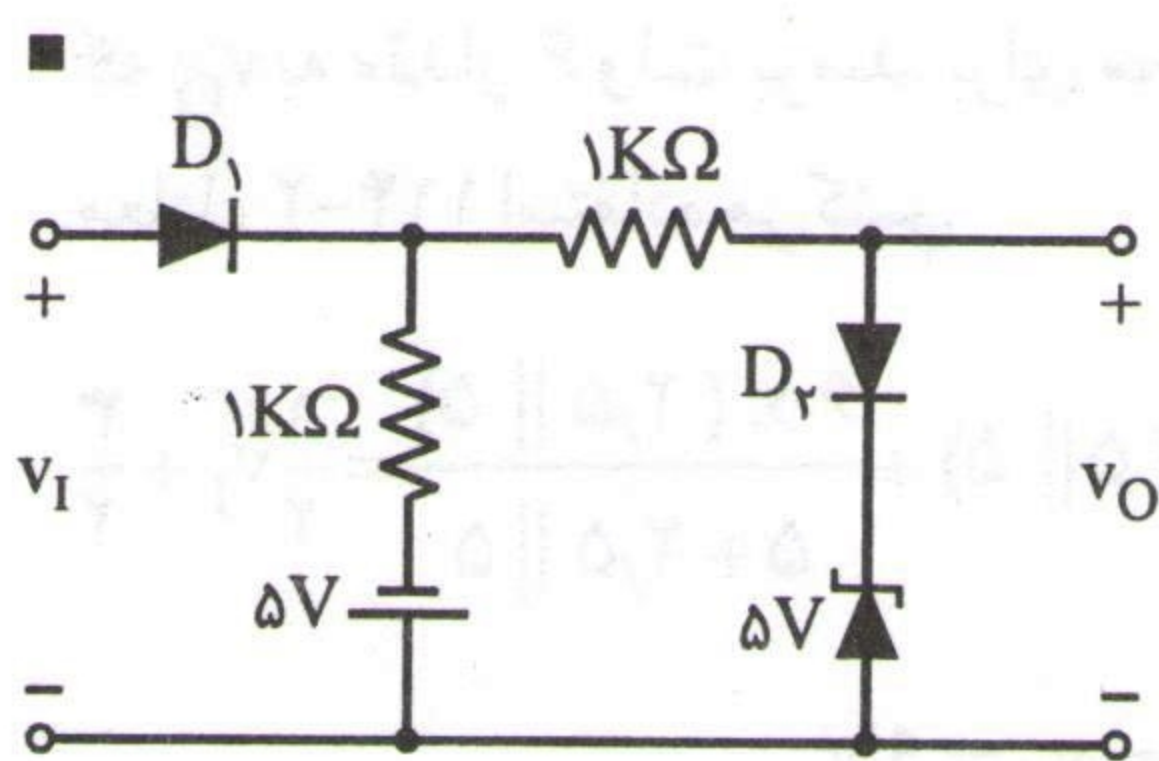
شرط اینکه دیود D_1 وصل گردد این است که

$$\frac{1}{2}v_I \geq V_1 \Rightarrow v_I \geq 2V_1 \Rightarrow v_O = V_1$$

بنابراین $V_1 = 1V$ است. شرط اینکه دیود D_2 وصل شود این است که

$$\frac{1}{2}v_I \leq V_2 \Rightarrow v_I \leq 2V_2 \Rightarrow v_O = V_2$$

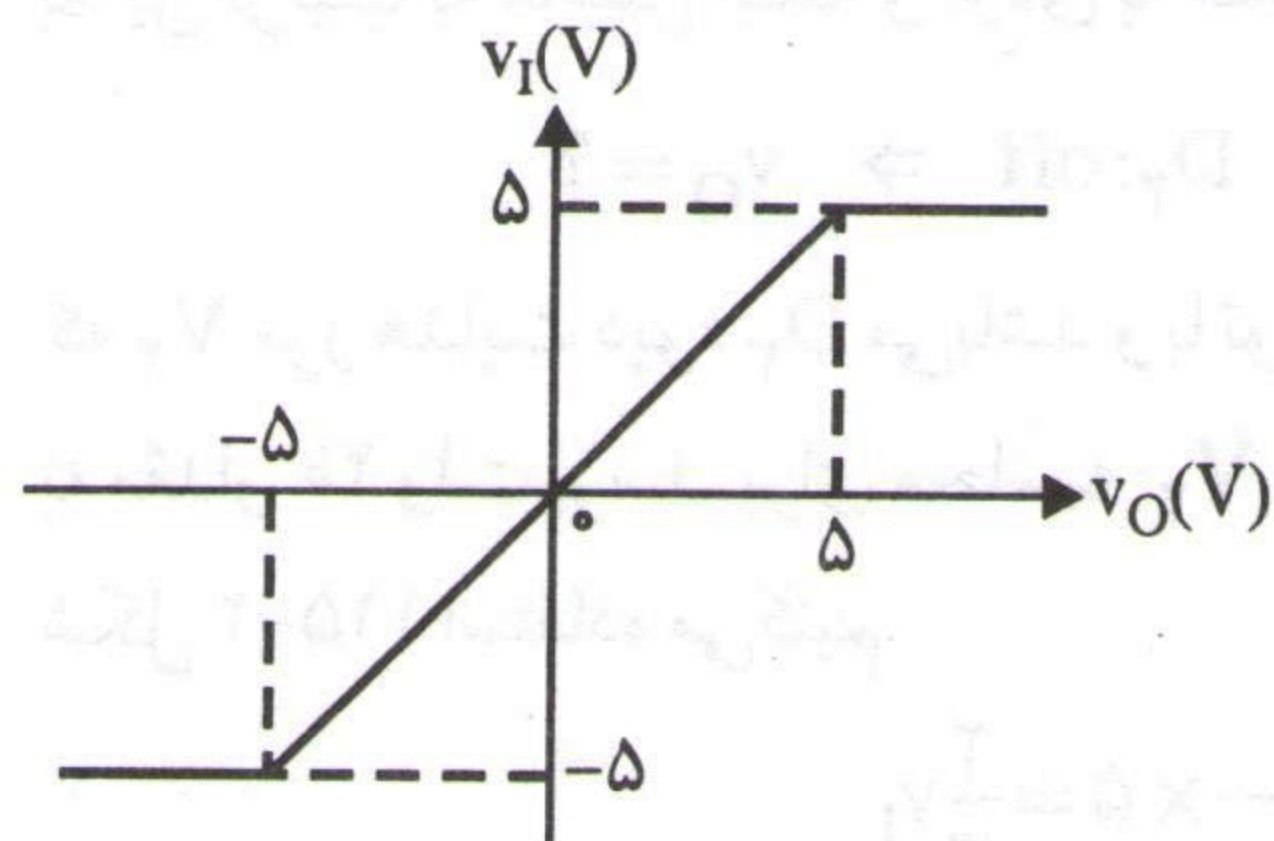
بنابراین $V_2 = -1V$ است.



شکل ۲-۱۱۱

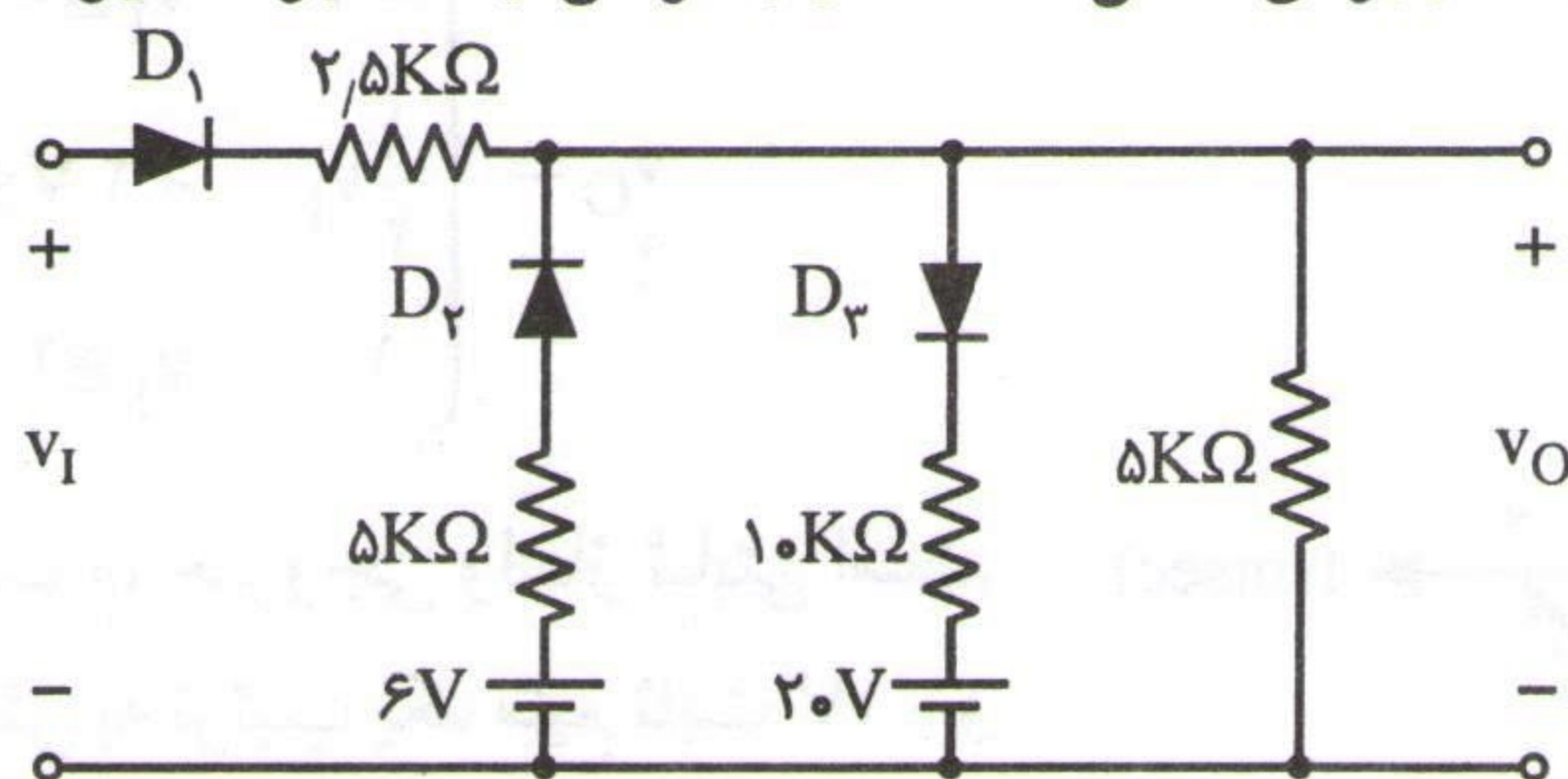
۶۸. در مدار برش شکل ۲-۱۱۱ مشخصه انتقالی را محاسبه و ترسیم نمایید. دیودها را ایده‌آل فرض کنید.

حل: با فرض خاموش بودن دیود D_1 ، دیود D_2 نیز قطع خواهد بود و ولتاژ خروجی و ولتاژ کاتد دیود D_1 برابر $-5V$ است. بنابراین تا زمانی که $v_I \leq -5V$ است مدار در حالت اخیر قرار دارد. با افزایش ورودی از $-5V$ ولت، دیود D_1 هدایت نموده و $v_O = v_I$ می‌گردد. (چرا؟) مدار در این حالت باقی می‌ماند تا خروجی به مقدار $5V$ ولت برسد. در این صورت دیود زنر وارد ناحیه شکست شده و خروجی در $5V$ ولت ثابت می‌گردد. منحنی مشخصه انتقالی مدار در شکل ۲-۱۱۲ رسم شده است.



شکل ۲-۱۱۲

۶۹. منحنی مشخصه انتقالی مدار برش شکل ۱۱۳-۲ را با فرض ایده‌آل بودن دیودها به دست آورید.



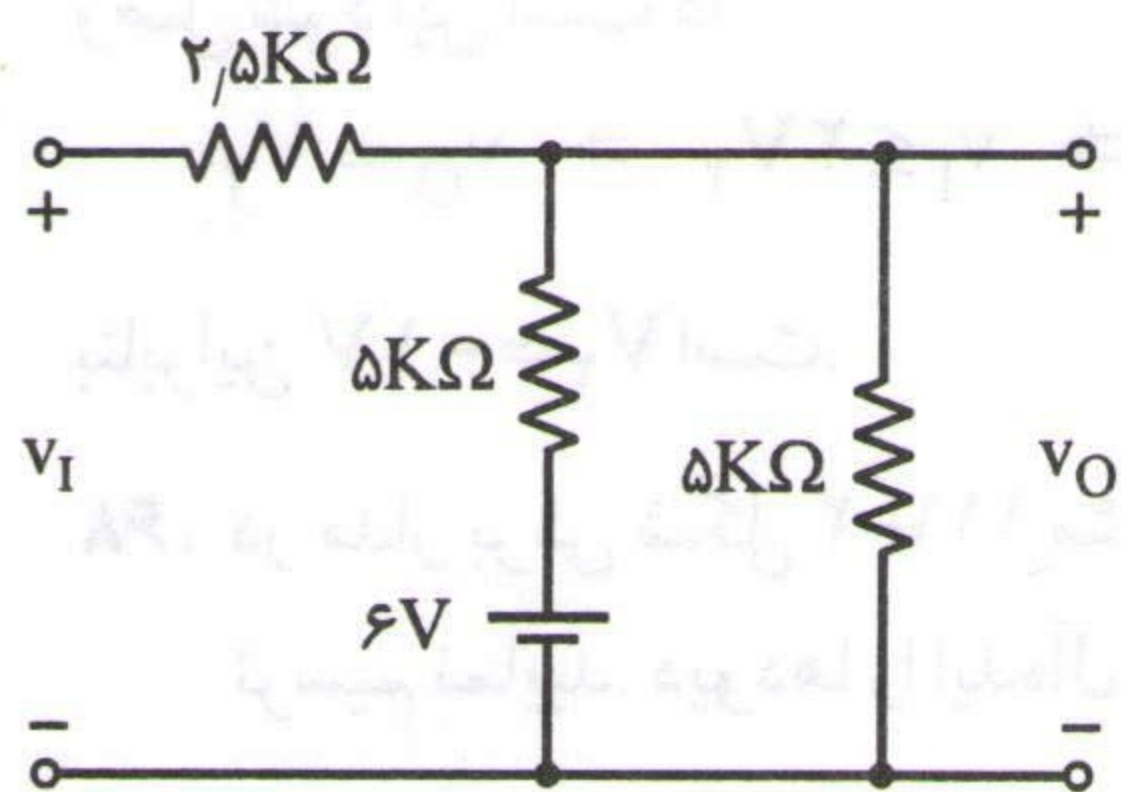
شکل ۱۱۳-۲

حل: با فرض اینکه دیود D_1 قطع است، ورودی حذف و تحلیل مدار ساده‌تر خواهد شد. در این صورت با فرض اینکه دیودهای D_2 و D_3 نیز قطع هستند خروجی برابر صفر می‌گردد که این خلاف فرض قطع بودن دیود D_2 است. (چرا؟) بنابراین

$$D_1: \text{off} \Rightarrow D_2: \text{on}, D_3: \text{off} \Rightarrow v_O = \frac{6}{5+5} \times 5 = 3V$$

به این ترتیب تا زمانی که $v_I < 3V$ باشد، دیود D_1 قطع بوده و مدار در حالت فوق قرار خواهد داشت. حال با افزایش ورودی از حد $3V$ ، دیود D_1 هدایت خواهد نمود و دیودهای D_2 و D_3 در وضع سابق خود باقی می‌مانند.

$$3 \leq v_I < V_1 \Rightarrow D_1: \text{on}, D_2: \text{on} \Rightarrow D_3: \text{off} \Rightarrow v_O = ?$$



شکل ۱۱۴-۲

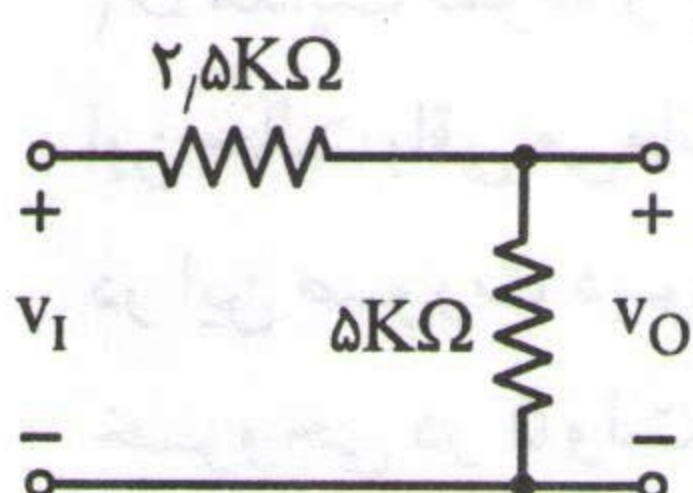
V_1 مرز قطع دیود D_2 است. اگر دیود D_2 را قطع بگیریم ولتاژ آن ۶ ولت می‌باشد پس مرز قطع و وصل دیود D_2 زمانی است که v_O به مقدار ۶ ولت برسد. برای محاسبه V_1 و v_O از مدار معادل ۱۱۴-۲ استفاده می‌کنیم.

$$v_O = \frac{v_I}{2.5 + 5 \parallel 5} (5 \parallel 5) + \frac{6 \times (2.5 \parallel 5)}{5 + 2.5 \parallel 5} = \frac{1}{2} v_I + \frac{3}{2}$$

$$v_O = 6 \Rightarrow V_1 = v_I = 9V$$

به این ترتیب به محض اینکه ورودی به مقدار ۹ ولت رسید، دیود D_2 قطع خواهد شد. بنابراین

$$9V \leq v_I \leq V_2 \Rightarrow D_1: \text{on}, D_2: \text{off}, D_3: \text{off} \Rightarrow v_O = ?$$



شکل ۱۱۵-۲

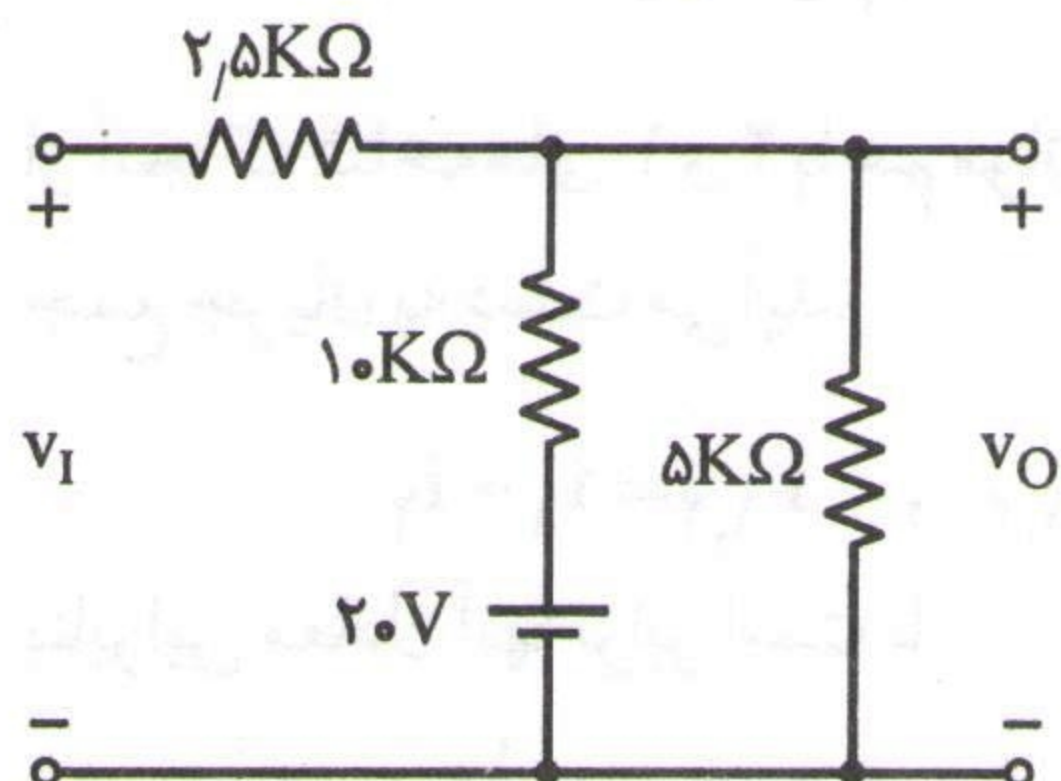
که V_2 مرز هدایت دیود D_3 می‌باشد و با توجه به شکل مدار، زمانی است که v_O به مقدار ۲۰ ولت برسد. برای محاسبه V_2 و v_O در حالت فوق از مدار معادل شکل ۱۱۵-۲ استفاده می‌کنیم.

$$v_O = \frac{v_I}{2.5 + 5} \times 5 = \frac{2}{3} v_I$$

$$v_O = 20 \Rightarrow V_T = v_I = 30V$$

بنابراین برای $v_I \geq 30$ دیود D_3 در حالت وصل قرار می‌گیرد.

$$v_I \geq 30V \Rightarrow D_1: \text{on}, D_2: \text{off}, D_3: \text{on} \Rightarrow v_O = ?$$



شکل ۲-۱۱۶

با توجه به مدار معادل شکل ۲-۱۱۶، خروجی برابر است با

$$v_O = \frac{v_I (10 \parallel 5)}{2.5 + 10 \parallel 5} + \frac{20 (5 \parallel 2.5)}{10 + 5 \parallel 2.5} = 0.571 v_I + 2.857$$

کلیه حالت‌های ورودی - خروجی را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

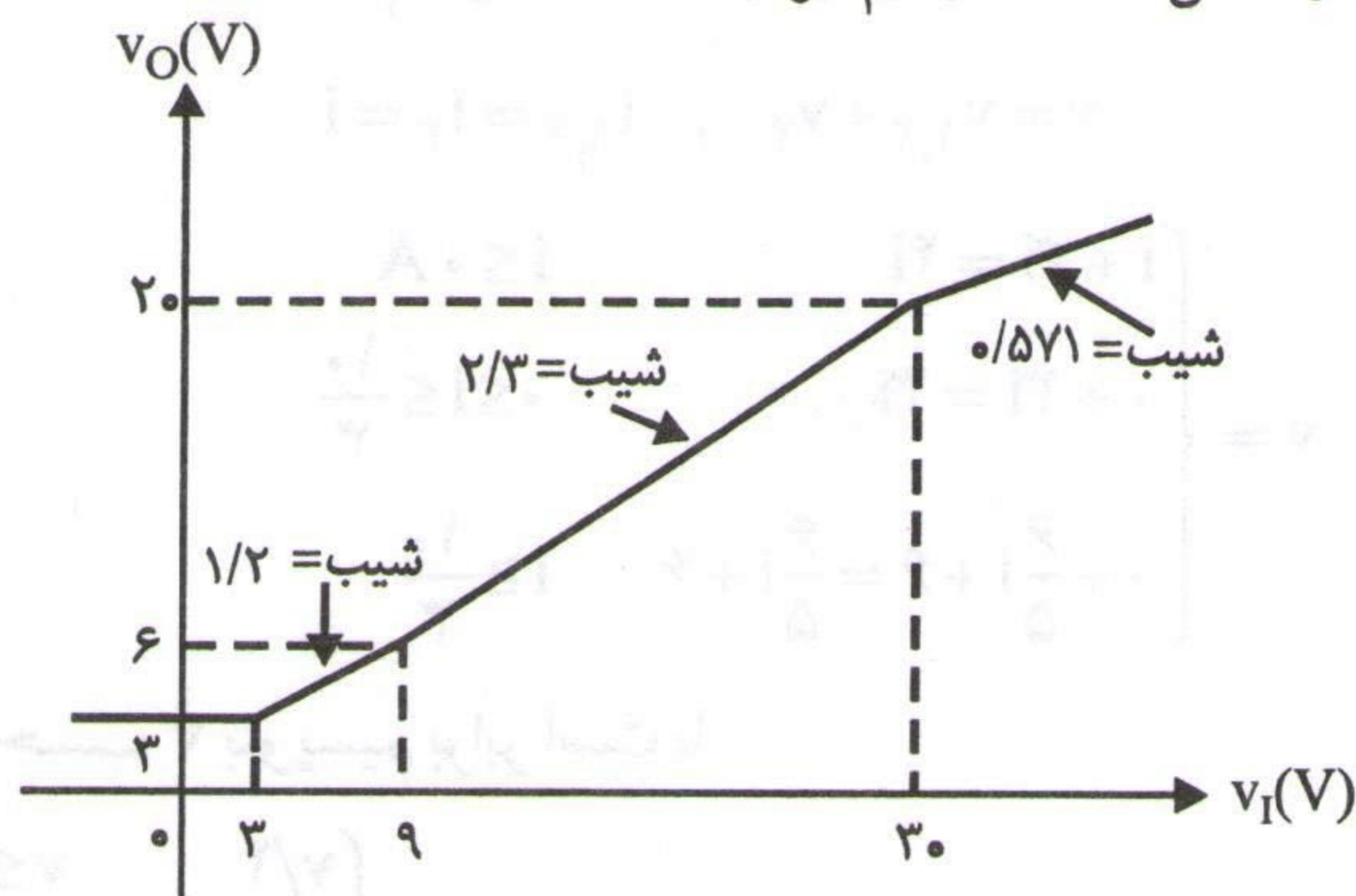
$$v_I \leq 3V \Rightarrow D_1: \text{off}, D_2: \text{on}, D_3: \text{off} \Rightarrow v_O = 3V$$

$$3V \leq v_I \leq 9V \Rightarrow D_1: \text{on}, D_2: \text{on}, D_3: \text{off} \Rightarrow v_O = \frac{1}{2} v_I + \frac{3}{2}$$

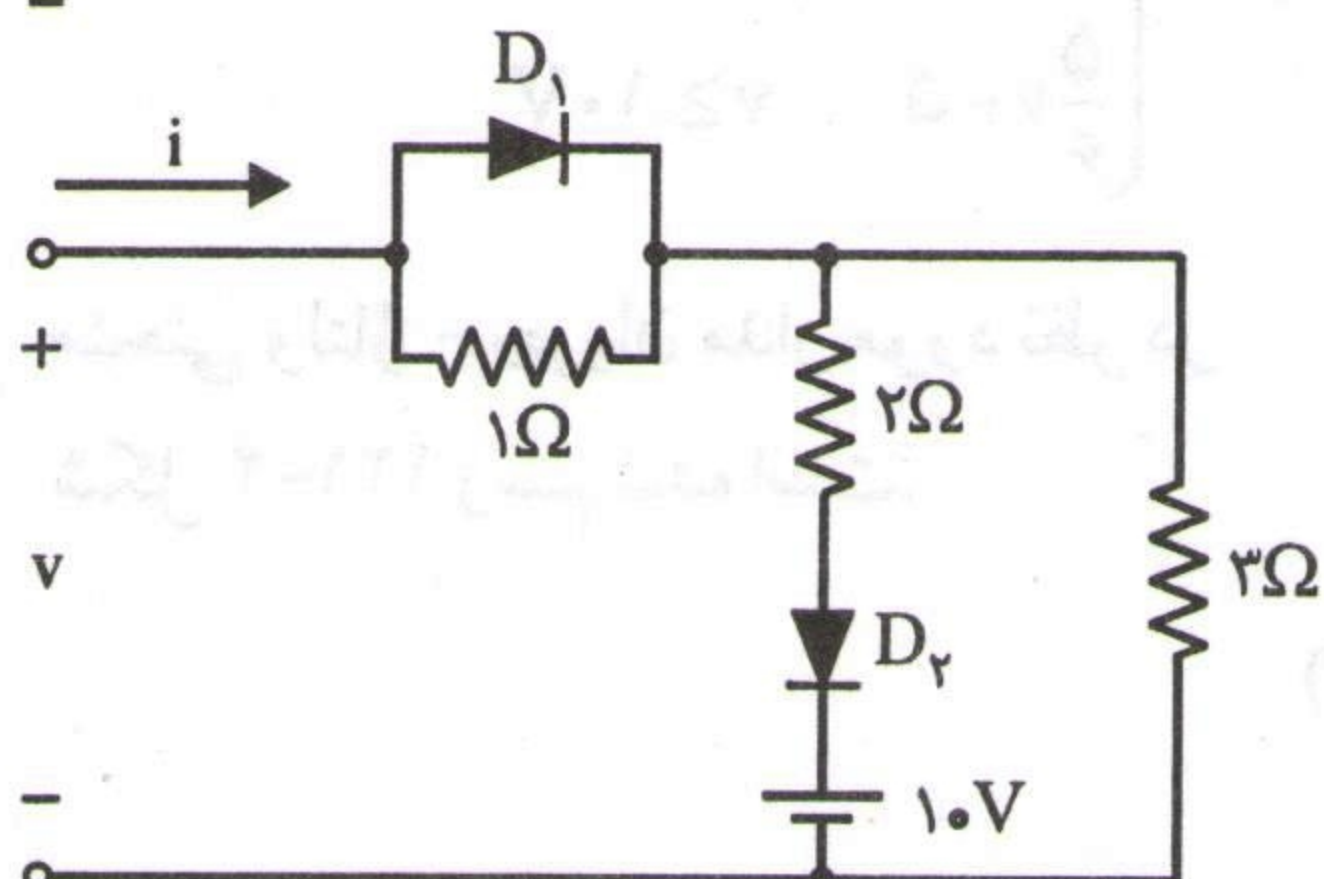
$$9V \leq v_I \leq 30V \Rightarrow D_1: \text{on}, D_2: \text{off}, D_3: \text{off} \Rightarrow v_O = \frac{2}{3} v_I$$

$$v_I \geq 30V \Rightarrow D_1: \text{on}, D_2: \text{off}, D_3: \text{on} \Rightarrow v_O = 0.571 v_I + 2.857$$

منحنی مشخصه انتقالی در شکل ۲-۱۱۷ رسم گردیده است:



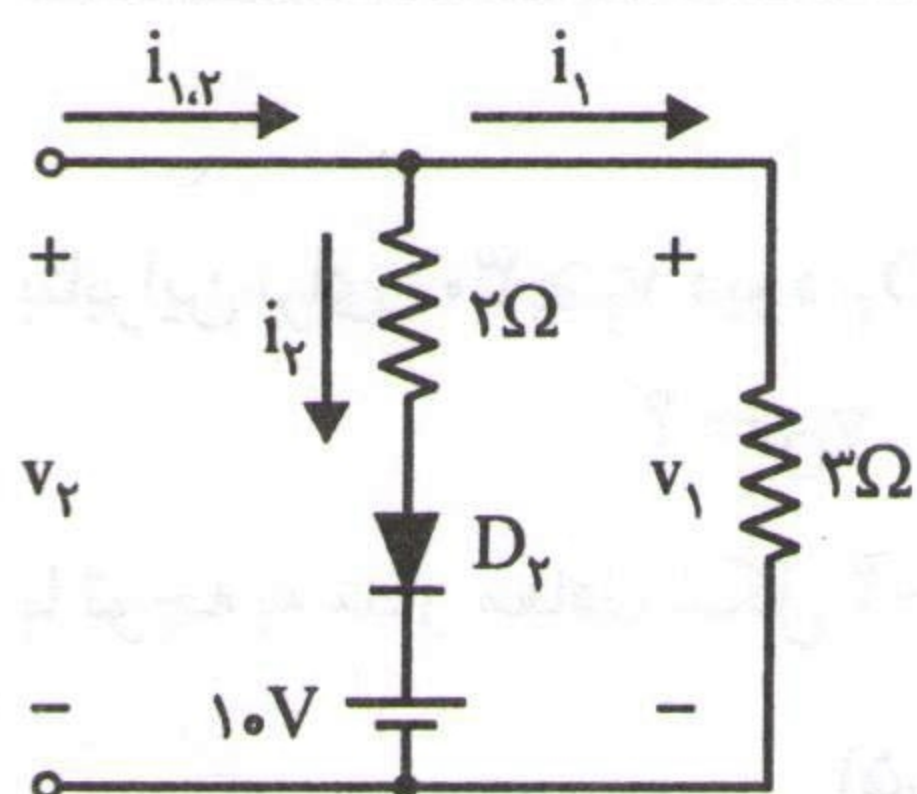
شکل ۲-۱۱۷



شکل ۲-۱۱۸

۷۰. مشخصه $v-i$ مدار شکل ۲-۱۱۸ را محاسبه و رسم نمایید. دیودها را ایده‌آل فرض کنید.

حل: مدار را به صورت سه شاخه ۱ و ۲ و ۳ شماره گذاری می‌کنیم. مشخصه جریان - ولتاژ شاخه‌های ۱ و ۲ با توجه به مدار شکل ۲-۱۱۹ برابر است با



شکل ۲-۱۱۹

$$i_1 = \frac{1}{3} v_1$$

$$i_2 = \begin{cases} (v_2 - 10)/2 & v_2 \geq 10V \\ 0 & v_2 \leq 10V \end{cases}$$

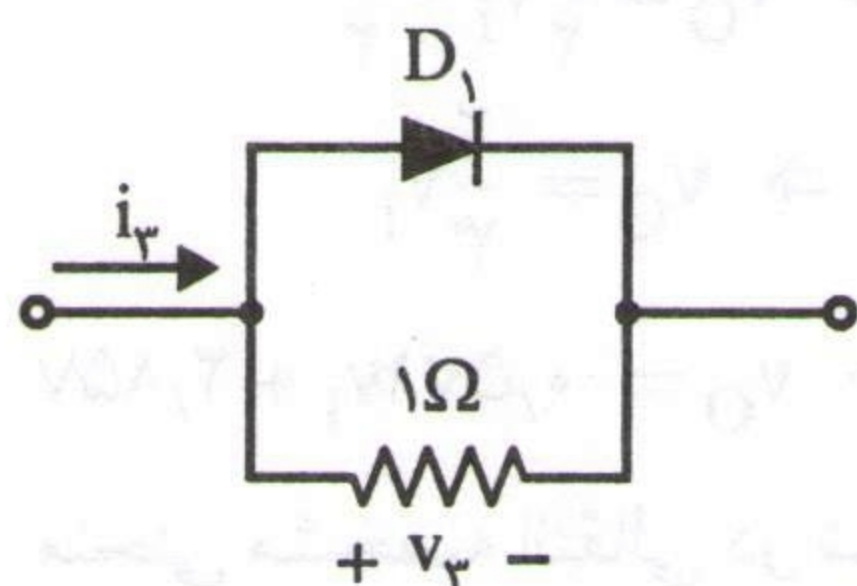
از آنجا که شاخه‌های ۱ و ۲ با هم موازی هستند، مدار معادل آنها از طریق جمع جریان به دست می‌آید.

$$v_1 = v_2 = v_{1,2}, \quad i_{1,2} = i_1 + i_2$$

بنابراین معادل آنها برابر است با

$$i_{1,2} = \begin{cases} \frac{v_2 - 10}{2} + \frac{1}{3} v_2 & v_2 \geq 10V \\ \frac{1}{3} v_2 & v_2 \leq 10V \end{cases} \Rightarrow v_{1,2} = \begin{cases} \frac{6}{5} i_{1,2} + 6 & i_{1,2} \geq \frac{10}{3} A \\ 3 i_{1,2} & i_{1,2} \leq \frac{10}{3} A \end{cases}$$

مشخصه $v-i$ شاخه سوم (شکل ۲-۱۲۰) نیز به صورت زیر به دست می‌آید



شکل ۲-۱۲۰

$$v_3 = \begin{cases} 0 & i_3 \geq 0 \\ i_3 & i_3 \leq 0 \end{cases}$$

شاخه ۳ و معادل شاخه‌های ۱ و ۲ با هم سری هستند. بنابراین معادل آنها برابر است با

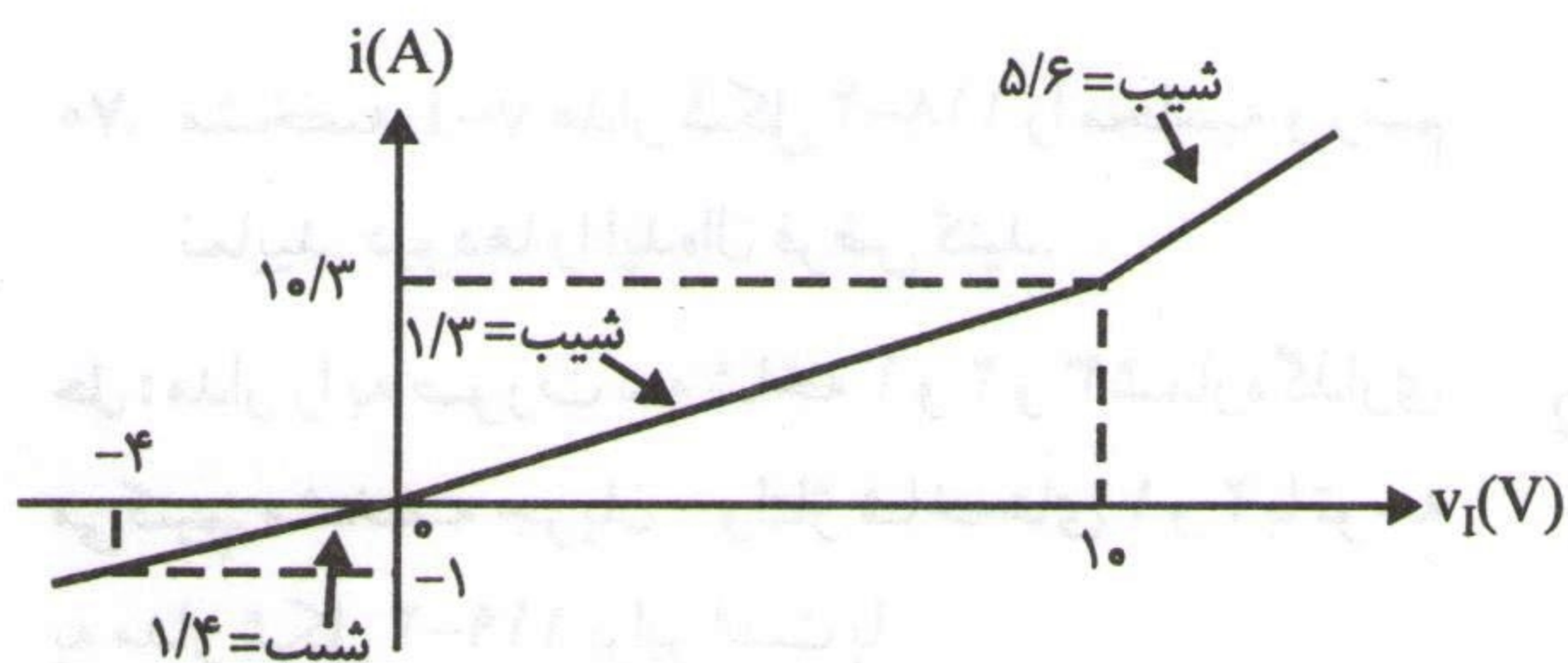
$$v = v_{1,2} + v_3, \quad i_{1,2} = i_3 = i$$

$$\Rightarrow v = \begin{cases} i + 3i = 4i & i \leq 0 A \\ 0 + 3i = 3i & 0 \leq i \leq \frac{10}{3} \\ 0 + \frac{6}{5}i + 6 = \frac{6}{5}i + 6 & i \geq \frac{10}{3} \end{cases}$$

که اگر بخواهیم i را بر حسب v بنویسیم برابر است با

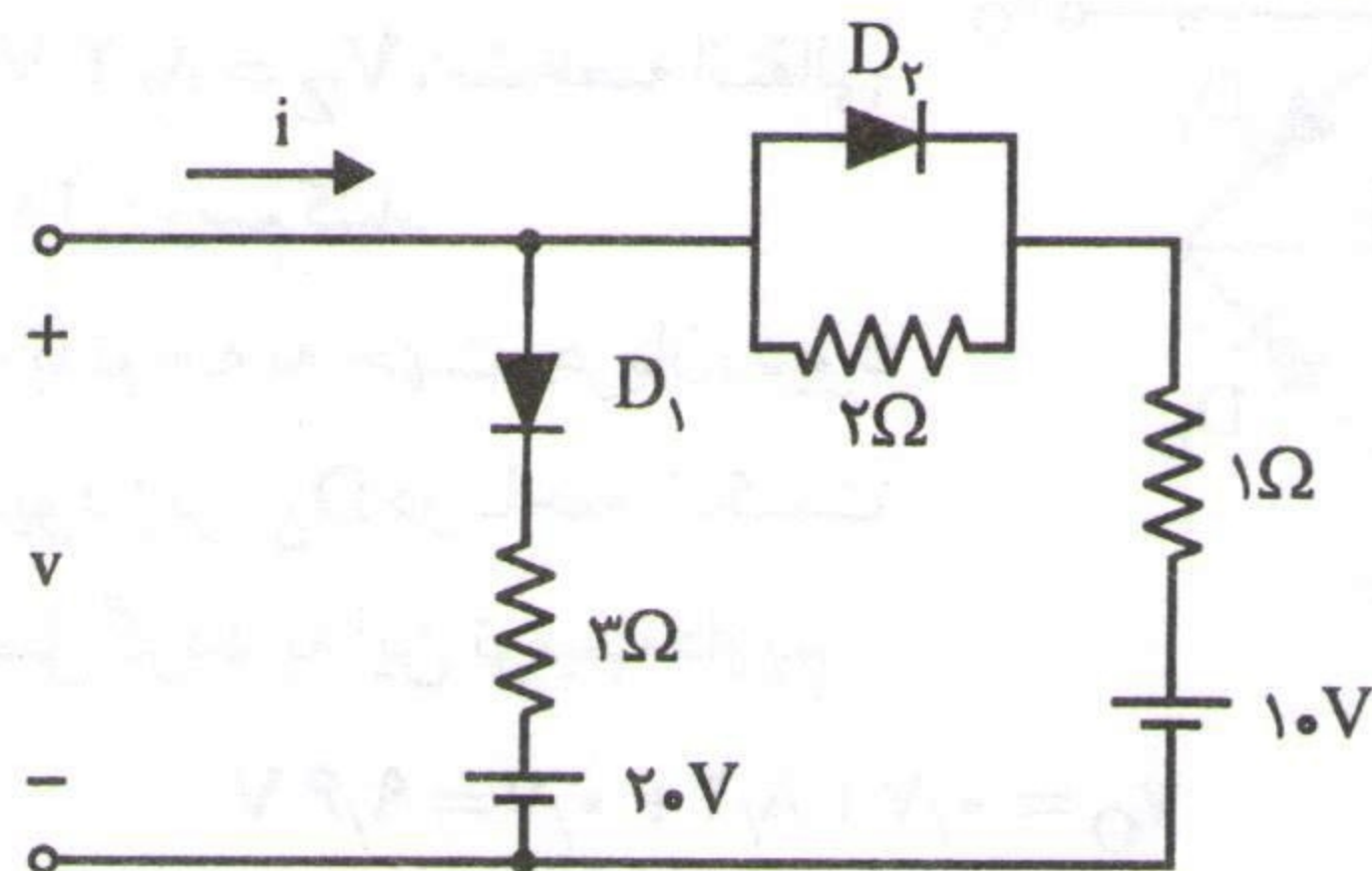
$$i = \begin{cases} v/4 & v \leq 0V \\ v/3 & 0 \leq v \leq 10V \\ \frac{5}{6}v - 5 & v \geq 10V \end{cases}$$

منحنی ولتاژ - جریان مدار مورد نظر در شکل ۲-۱۲۱ رسم شده است.



شکل ۲-۱۲۱

۷۱. مشخصه $v-i$ مدار شکل ۱۲۲-۲ را محاسبه و رسم نمایید. دیودها را ایده‌ال در نظر بگیرید.



شکل ۱۲۲-۲

حل: بدیهی است که دیود D_1 به ازای $v > 2.0V$ روشن و به ازای $v < 2.0V$ قطع می‌باشد. برای تشخیص ناحیه کار دیود D_2 ، ابتدا فرض نمایید D_2 قطع است؛ بنابراین مدار معادل به صورت شکل ۱۲۳-۲ خواهد بود و داریم

$$i_1 = \frac{v - 1.0}{2 + 1}$$

شرط وصل دیود D_2 این است که ولتاژ دو سر D_2 مثبت گردد.

$$v_{D_2} = 2i_1 > 0 \Rightarrow 2 \times \frac{v - 1.0}{3} > 0 \Rightarrow v > 1.0V$$

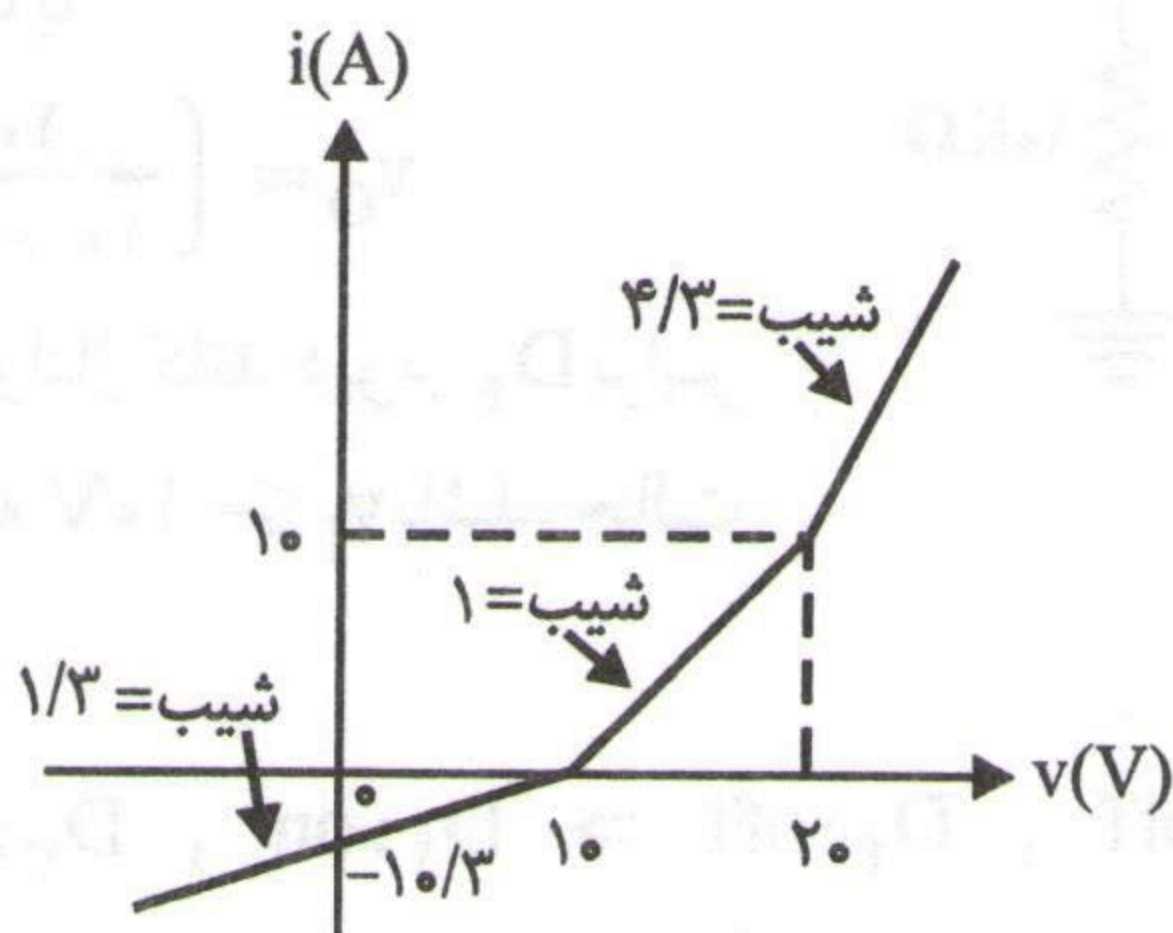
به این ترتیب داریم

$$v \leq 1.0V \Rightarrow D_1: \text{off}, D_2: \text{off} \Rightarrow i = \frac{v - 1.0}{2 + 1} = \frac{1}{3}v - \frac{1.0}{3}$$

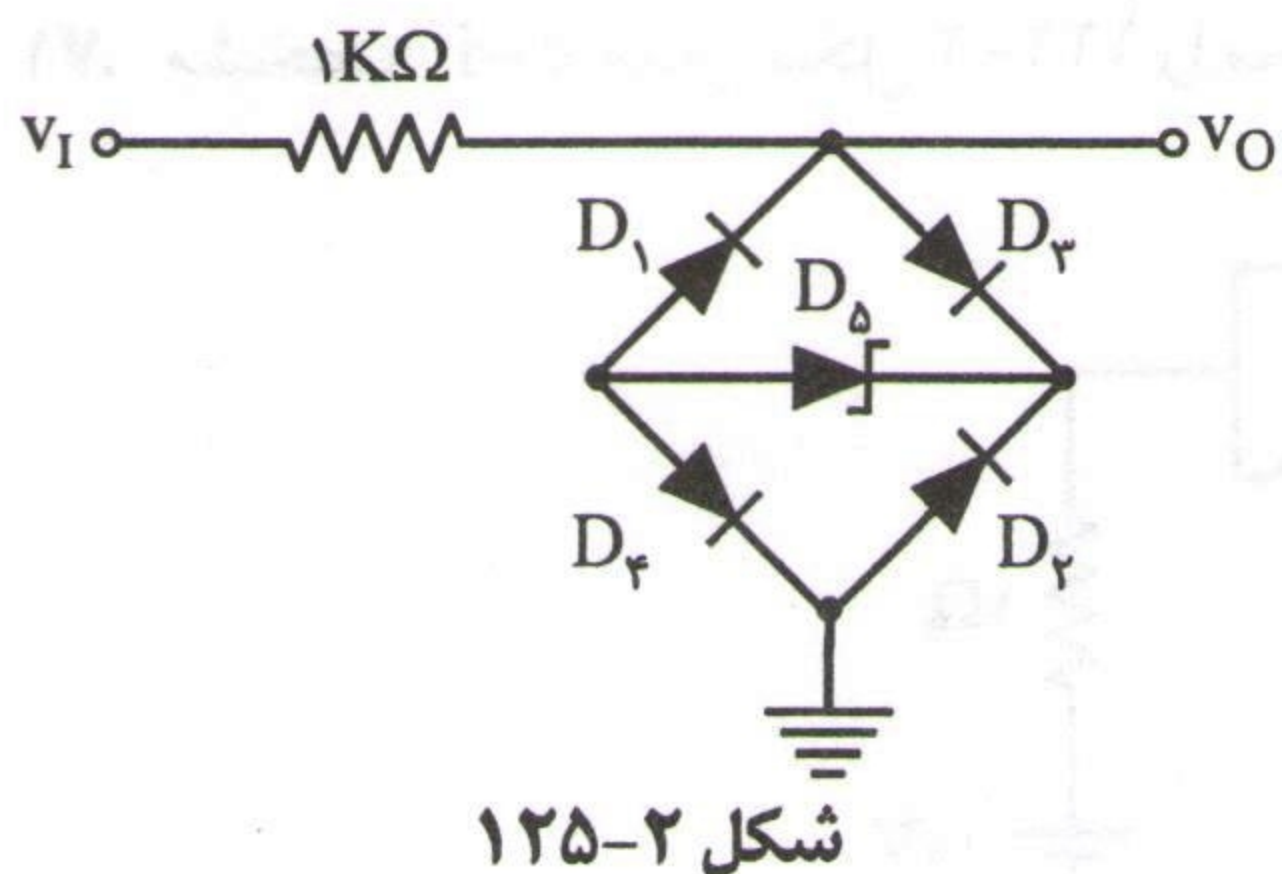
$$1.0V \leq v \leq 2.0V \Rightarrow D_1: \text{off}, D_2: \text{on} \Rightarrow i = \frac{v - 1.0}{1} = v - 1.0$$

$$v \geq 2.0V \Rightarrow D_1: \text{on}, D_2: \text{on} \Rightarrow i = \frac{v - 2.0}{3} + \frac{v - 1.0}{1} = \frac{4}{3}v - \frac{5.0}{3}$$

بنابراین مشخصه $v-i$ به صورت شکل ۱۲۴-۲ خواهد بود.



شکل ۱۲۴-۲



۷۲. در مدار شکل ۱۲۵-۲ با فرض $V_D(\text{on}) = 0.7\text{V}$ ، $R_f = 0$ ، $R_r = \infty$ و $V_Z = 8.2\text{V}$ ، مشخصه انتقالی را برای $20\text{V} \leq v_I \leq -20\text{V}$ رسم کنید.

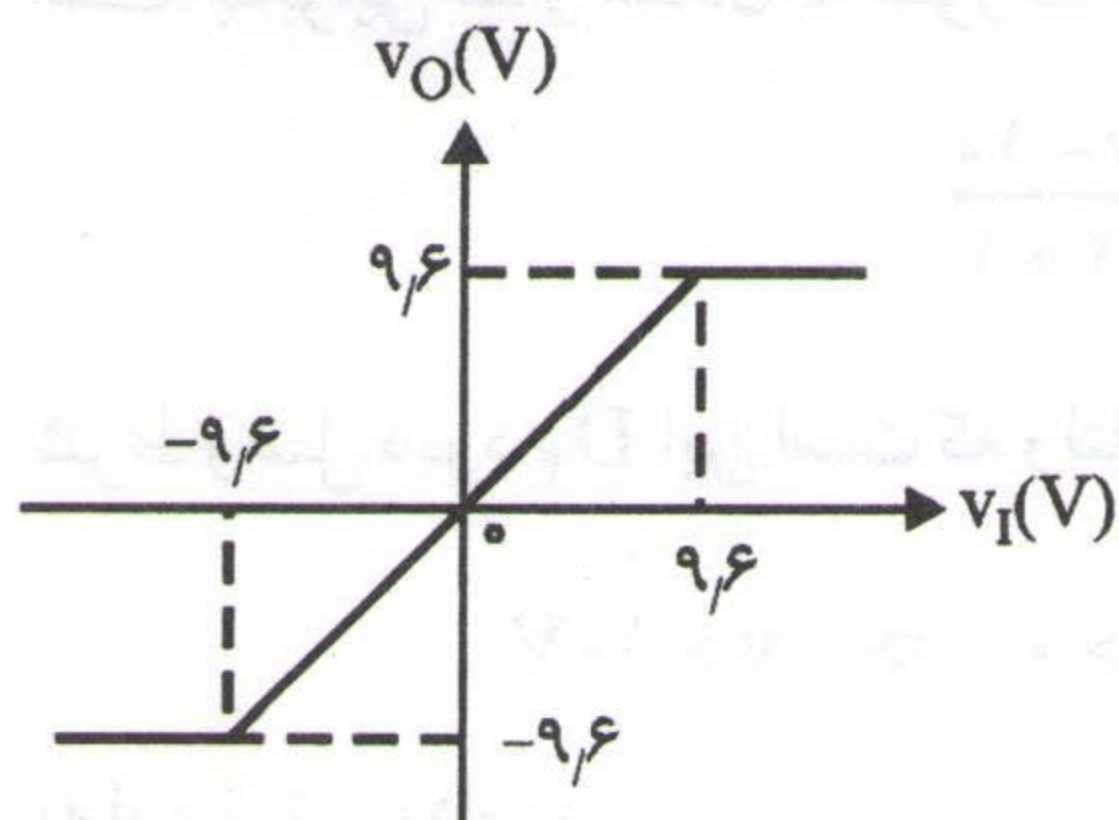
حل: وقتی که v_I مثبت است، با توجه به جهت جریان، دیود D_3 می‌تواند وصل باشد و دیود زener D_5 در ناحیه شکست قرار گرفته و دیود D_4 نیز وصل گردد. به این ترتیب داریم

$$v_O = 0.7 + 8.2 + 0.7 = 9.6\text{V}$$

$$i_{D_3} = \frac{v_I - v_O}{1} > 0 \Rightarrow v_I \geq 9.6\text{V} \Rightarrow D_3, D_4: \text{on} \Rightarrow v_O = 9.6\text{V}$$

برای v_I منفی، با توجه به جهت جریان، دیودهای D_1 و D_2 می‌توانند وصل باشند و دیود زener D_5 نیز مجدداً در ناحیه شکست قرار می‌گیرد. به این ترتیب داریم

$$v_O = -0.7 - 8.2 - 0.7 = -9.6\text{V}$$



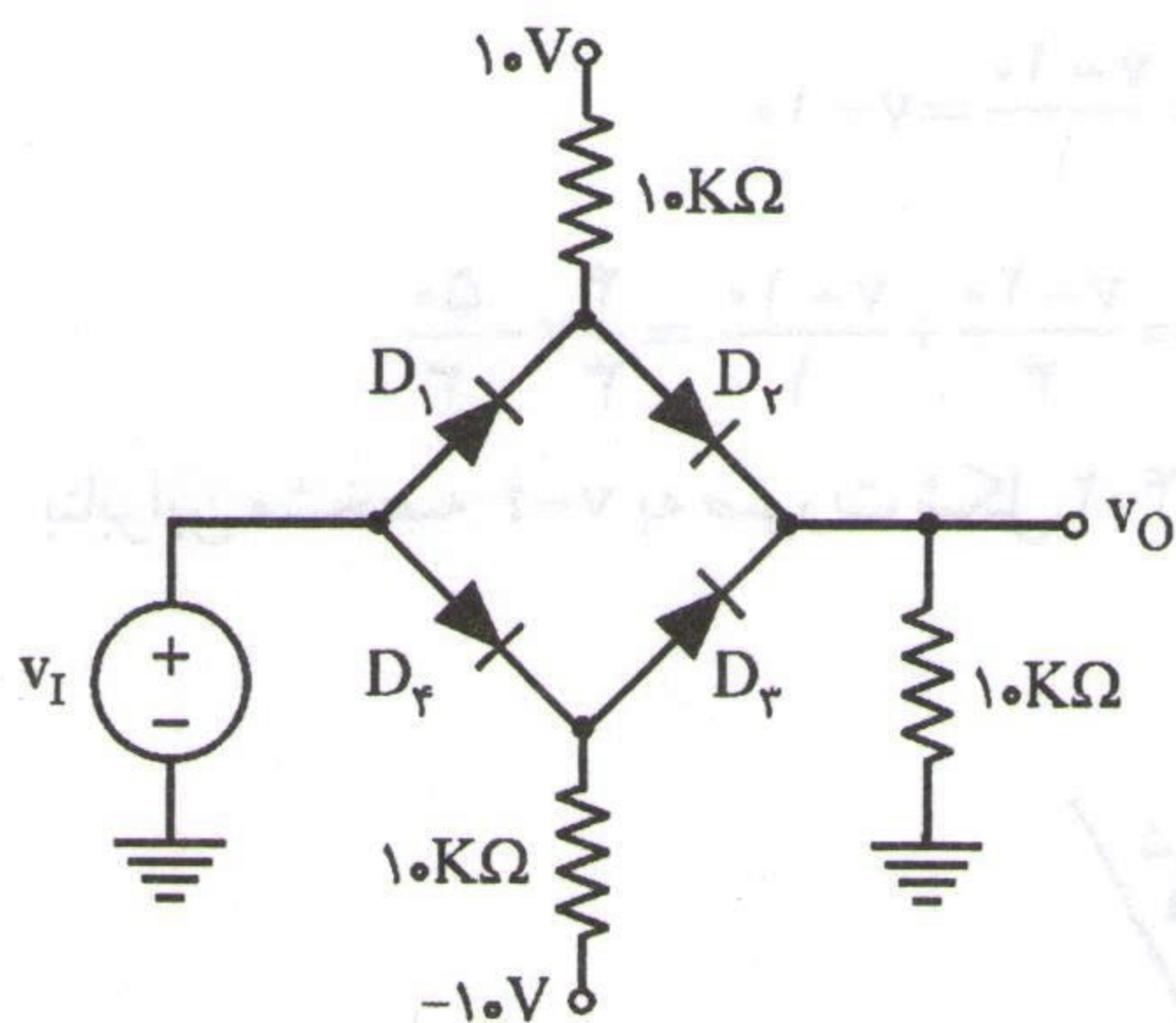
$$i_{D_1} = \frac{v_O - v_I}{1} > 0 \Rightarrow v_I \leq -9.6\text{V}$$

بنابراین

$$v_I \leq -9.6\text{V} \Rightarrow D_1, D_2: \text{on} \Rightarrow v_O = -9.6\text{V}$$

$$-9.6\text{V} \leq v_I \leq 9.6\text{V} \Rightarrow D_1, D_2, D_3, D_4: \text{off} \Rightarrow v_O = v_I$$

مشخصه انتقالی به صورت شکل ۱۲۶-۲ خواهد بود.



۷۳. در مدار شکل ۱۲۷-۲ با فرض ایده‌آل بودن دیودها، مشخصه انتقالی مدار را به دست آورید.

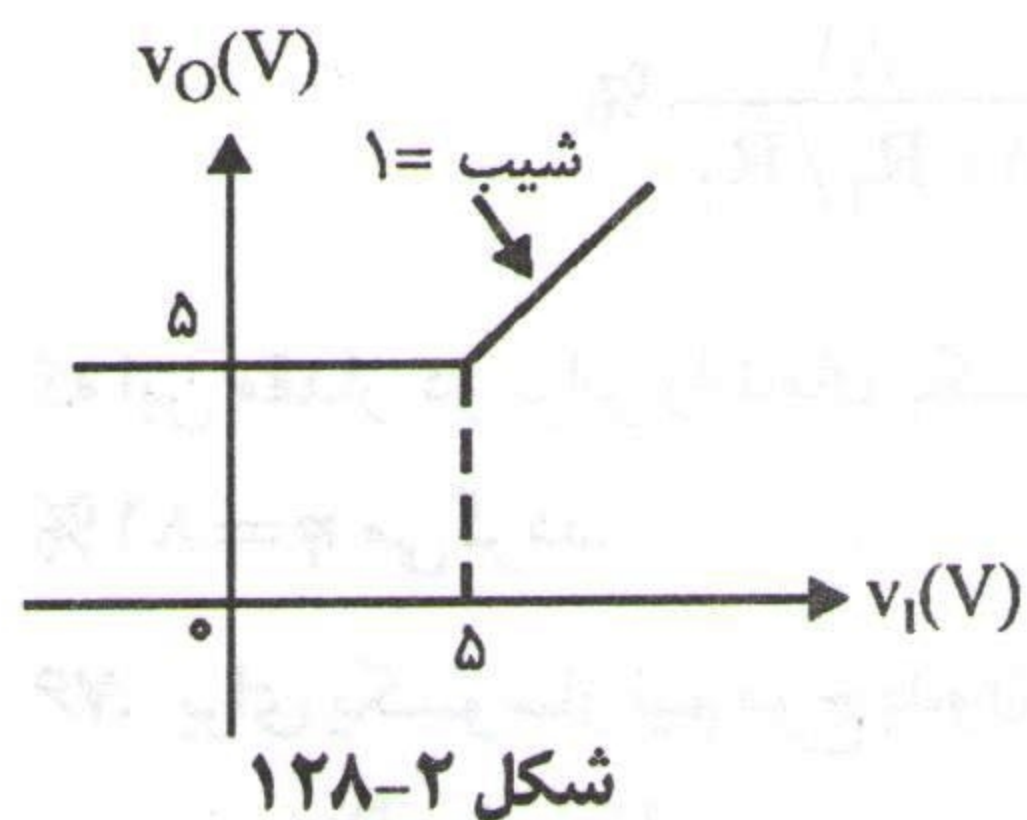
حل: با فرض اینکه دیودهای D_1 و D_4 قطع باشند، دیود D_2 وصل بوده و در نتیجه دیود D_3 قطع خواهد بود. در این صورت خروجی برابر است با

$$v_O = \left(\frac{10}{10 + 10} \right) \times 10 = 5\text{V}$$

در این حالت با توجه به اینکه ولتاژ کاتد دیود D_4 برابر 10V است بنابراین تا زمانی که $v_I \leq -10\text{V}$ باشد، حالت فوق برقرار است.

$$v_I \leq -10\text{V} \Rightarrow D_1: \text{off}, D_4: \text{off} \Rightarrow D_2: \text{on}, D_3: \text{off} \Rightarrow v_O = 5\text{V}$$

اگر v_I بزرگ‌تر از 10V - گردد، D_4 وصل می‌شود اما چون ولتاژ کاتد D_3 برابر 5V است پس به ازای $v_I \leq 5\text{V}$ ، دیود D_3 قطع می‌ماند. به طور مشابه دیود D_1 نیز به ازای $v_I \leq 5\text{V}$ قطع خواهد بود.



$$-10V \leq v_I \leq 5V \Rightarrow D_1: \text{off}, D_2: \text{on}$$

$$\Rightarrow D_2: \text{on}, D_3: \text{off} \Rightarrow v_O = 5V$$

به ازای $v_I \geq 5V$ تمام دیودها وصل شده و $v_O = v_I$ می گردد. بنابراین مشخصه انتقالی مدار به صورت شکل ۲-۱۲۸ خواهد بود.

۷۵. راندمان یکسوسازی (η) به صورت نسبت توان DC خروجی ($P_o = V_{dc} I_{dc}$) به توان ورودی $\left[P_i = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_I \cdot i d\alpha \right]$ تعریف می شود. با فرض اینکه R_f مقاومت مستقیم دیود باشد، نشان دهید:

الف) در یک مدار یکسوکننده نیم موج $\eta = \frac{40.5}{1 + R_f/R_L} \%$ است.

ب) در یکسوکننده تمام موج، η دو برابر مقدار مربوط به بند الف می باشد.

حل: الف)
$$P_i = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v \cdot i d\alpha = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} (V_m \sin \alpha) (I_m \sin \alpha) d\alpha$$

$$= \frac{V_m I_m}{2\pi} \int_0^{\pi} \sin^2 \alpha d\alpha = \frac{V_m I_m}{2\pi} \int_0^{\pi} \left(\frac{1 - \cos 2\alpha}{2} \right) d\alpha = \frac{1}{4} V_m I_m$$

$$P_o = V_{dc} I_{dc} = \frac{V_m R_L}{\pi (R_f + R_L)} \times \frac{I_m}{\pi} = \frac{V_m I_m R_L}{\pi^2 (R_f + R_L)}$$

$$\Rightarrow \eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{4 V_m I_m R_L}{\pi^2 (R_f + R_L) V_m I_m} \times 100 = \frac{40.5}{1 + R_f/R_L} \%$$

که اگر $R_f \ll R_L$ باشد در این صورت $\eta = 40.5\%$ می باشد.
ب) برای یکسوکننده تمام موج داریم

$$V_{dc} = R_L I_{dc}, \quad I_{dc} = \frac{2I_m}{\pi} = \frac{2V_m}{\pi(R_f + R_L)}$$

$$\Rightarrow P_o = V_{dc} I_{dc} = \frac{2R_L V_m}{\pi(R_f + R_L)} \times \frac{2I_m}{\pi} = \frac{4R_L V_m I_m}{\pi^2 (R_f + R_L)}$$

$$P_i = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v \cdot i d\alpha = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (V_m \sin \alpha) (I_m \sin \alpha) d\alpha = \frac{V_m I_m}{2}$$

$$\Rightarrow \eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{\Delta V_m I_m R_L}{\pi^2 (R_f + R_L) V_m I_m} \times 100 = \frac{81}{1 + R_f/R_L} \%$$

که این مقدار دو برابر راندمان یکسوکننده نیم موج می‌باشد. اگر $R_f \ll R_L$ باشد در این صورت $\eta = 81\%$ می‌گردد.

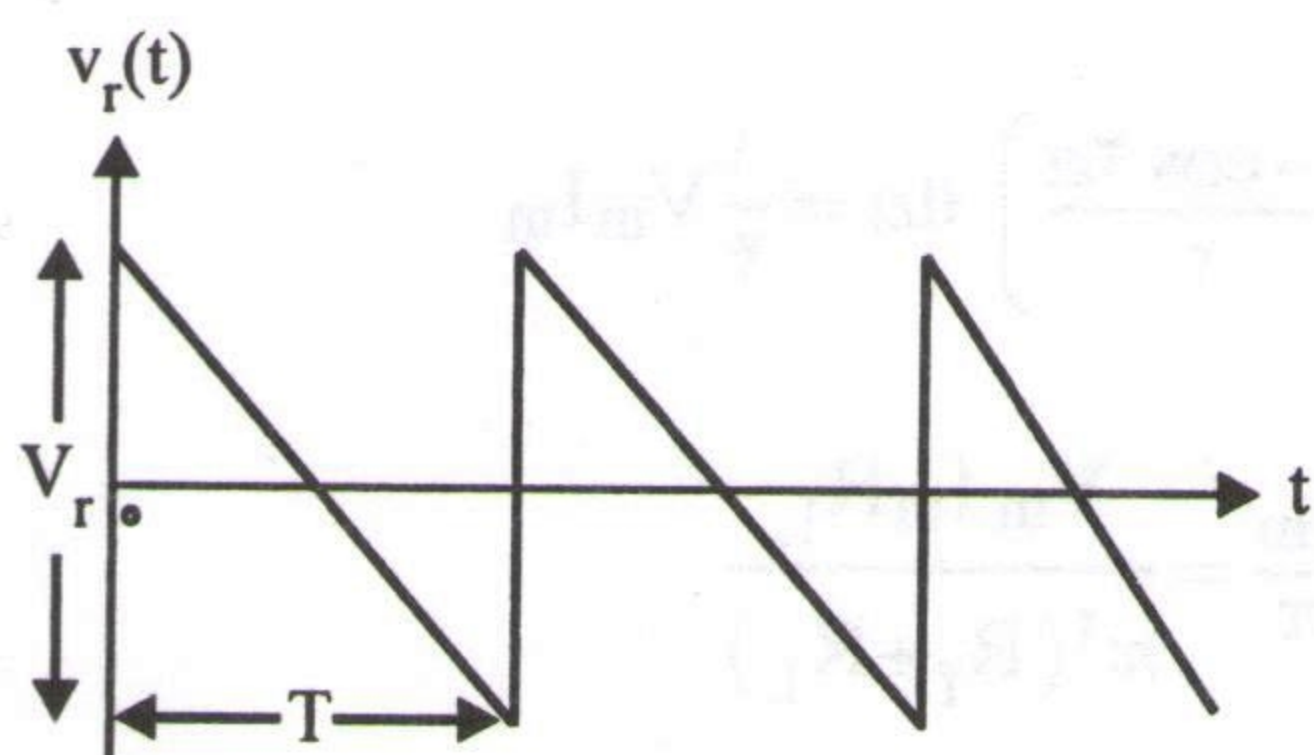
۷۶. برای یکسوساز نیم موج بدون صافی خازنی نشان دهید که حداکثر توان DC خروجی به ازای مقاومت بار R_L برابر مقاومت دیود R_f می‌باشد.

حل: برای یکسوساز نیم موج، مقدار DC جریان برابر است با

$$I_{dc} = \frac{I_m}{\pi} = \frac{V_m}{\pi(R_f + R_L)} \Rightarrow P_L = R_L I_{dc}^2 = \frac{R_L V_m^2}{\pi^2 (R_f + R_L)^2}$$

$$\frac{dP_L}{dR_L} = 0 \Rightarrow \frac{V_m^2}{\pi^2} \left[\frac{(R_f + R_L)^2 - 2(R_f + R_L)R_L}{(R_f + R_L)^4} \right] = 0$$

$$\Rightarrow (R_f + R_L)^2 = 2(R_f + R_L)R_L \Rightarrow R_f = R_L$$



شکل ۲-۱۲۹

۷۷. ریپل خروجی یک فیلتر ساده را می‌توان با منحنی شکل ۲-۱۲۹ تقریب زد. مقدار مؤثر ولتاژ ریپل $v_r(rms)$ را بر حسب V_r به دست آورید.

حل: با توجه به تعریف مقدار مؤثر داریم

$$v_r(rms) = \left[\frac{1}{T} \int_0^T v_r^2(t) dt \right]^{1/2}$$

با توجه به شکل، معادله $v_r(t)$ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$v_r(t) = -\frac{V_r}{T}t + \frac{V_r}{2}, \quad 0 \leq t \leq T$$

بنابراین

$$v_r^2(rms) = \frac{1}{T} \int_0^T \left[-\frac{V_r}{T}t + \frac{V_r}{2} \right]^2 dt = \frac{V_r^2}{T} \int_0^T \left(\frac{1}{4} + \frac{t^2}{T^2} - \frac{t}{T} \right) dt$$

$$= \frac{V_r^2}{T} \left[\frac{T}{4} + \frac{T^3}{3T^2} - \frac{T^2}{2T} \right] = \frac{V_r^2}{12} \Rightarrow v_r(rms) = \frac{V_r}{\sqrt{12}} = \frac{V_r}{2\sqrt{3}}$$

از رابطه تقریبی فوق بین مقادیر مؤثر و ولتاژ ریپل در مسائل بعدی استفاده خواهیم کرد.

۷۸. ضریب تنظیم بار را برای هر یک از مدارهای یکسوکننده زیر محاسبه نمایید:
- (الف) یکسوکننده نیم موج بدون خازن (ب) یکسوکننده نیم موج با صافی خازنی
- (ج) یکسوکننده تمام موج بدون خازن (د) یکسوکننده تمام موج با صافی خازنی

حل: طبق تعریف ضریب تنظیم بار برابر است با

$$\% V.R = \frac{V(NL) - V(FL)}{V(FL)} \times 100$$

که در آن $V(NL)$ ولتاژ حالت بی باری و $V(FL)$ ولتاژ در حالت بار کامل است.

(الف) برای یکسوکننده نیم موج، ولتاژ بدون بار و در بار کامل برابر است با

$$V(NL) = \frac{V_m}{\pi}, \quad V(FL) = \frac{R_L V_m}{\pi(R_f + R_L)} \Rightarrow \% V.R = \frac{R_f}{R_L} \times 100\%$$

(ب) برای یکسوکننده نیم موج با فیلتر خازنی، ولتاژ بدون بار و در بار کامل برابر است با

$$V(NL) = V_m, \quad V(FL) = V_{dc} = R_L I_{dc}, \quad V_r = \frac{I_{dc}}{fC}$$

$$\% V.R = \frac{V_m - V_{dc}}{V_{dc}} \times 100 \approx \frac{V_r / 2}{V_{dc}} \times 100 = \frac{1}{2fCR_L} \times 100$$

(ج) برای یکسوکننده تمام موج بدون خازن، ولتاژ بدون بار و در بار کامل برابر است با

$$V(NL) = \frac{2V_m}{\pi}, \quad V(FL) = \frac{2V_m R_L}{\pi(R_L + R_f)} \Rightarrow \% V.R = \frac{R_f}{R_L} \times 100$$

(د) برای یکسوکننده تمام موج با صافی خازنی، ولتاژ بدون بار و در بار کامل برابر است با

$$V(NL) = V_m, \quad V(FL) = V_{dc} = R_L I_{dc}, \quad V_r = \frac{I_{dc}}{2fC}$$

$$\Rightarrow \% V.R = \frac{V_m - V_{dc}}{V_{dc}} \times 100 \approx \frac{V_r / 2}{V_{dc}} \times 100 = \frac{1}{4fCR_L} \times 100$$

۷۹. یک مدار یکسوکننده تمام موج دارای دامنه ولتاژ ورودی حداکثر برابر ۱۰۰ ولت می باشد. به این مدار

یک خازن صافی اضافه می کنیم. در صورتی که $R_L = 1K\Omega$ و فرکانس برق شهر $50Hz$ باشد در هر

یک از حالات زیر ضریب رپیل (r.f.) و حداکثر جریان دیود را محاسبه نموده و مقایسه کنید:

(الف) $C = 10\mu F$ (ب) $C = 1000\mu F$

حل: با فرض اینکه دیودها ایده آل باشند رابطه ولتاژ DC خروجی به صورت زیر است:

$$V_{dc} = V_m - \frac{V_r}{2} = V_m - \frac{I_{dc}}{2fC} = V_m - \frac{V_{dc}}{2fCR_L} \Rightarrow V_{dc} \left(1 + \frac{1}{2fCR_L} \right) = V_m$$

$$C = 10\mu F \Rightarrow V_{dc} = 66.67V$$

(الف)

$$V_r = \frac{V_{dc}}{\sqrt{fCR_L}} = 66.67 V \Rightarrow v_r(rms) = \frac{V_r}{\sqrt{2}} = 47.17 V$$

$$\%r.f. = \frac{v_r(rms)}{V_{dc}} \times 100 = 28.86\%$$

و برای حداکثر جریان دیود داریم

$$I_m = V_m \left[\frac{1}{R_L^2} + (C\omega)^2 \right]^{1/2} = 329.7 mA$$

$$C = 1000 \mu F \Rightarrow V_{dc} = 99.5 V$$

(ب)

$$V_r = \frac{V_{dc}}{\sqrt{fCR_L}} = 0.995 V \Rightarrow v_r(rms) = \frac{V_r}{\sqrt{2}} \approx 0.70 V$$

$$\%r.f. = \frac{v_r(rms)}{V_{dc}} \times 100 = 0.70\%$$

$$I_m = V_m \left[\frac{1}{R_L^2} + (C\omega)^2 \right]^{1/2} = 31.4 A$$

هر چه ضریب رپل به صفر نزدیک تر باشد، رپل خروجی کمتر و درصد بیشتری از توان خروجی به صورت توان DC خواهد بود. شایان توجه است که با افزایش مقدار خازن صافی، ضریب رپل کاهش اما حداکثر جریان دیود افزایش می یابد.

۸۰. یک مدار یکسوکننده تمام موج غیر پل با صافی خازنی و $C = 40 \mu F$ و $R_L = 5 K\Omega$ را در نظر بگیرید. در صورتی که ولتاژ بین هر یک از سرهای ثانویه و زمین به صورت $v_i = V_m \sin 2\pi 50 t$ با $V_m = 100 V$ باشد.

(الف) $V_{L,dc}$ و ولتاژ رپل V_r خروجی را محاسبه کنید.

(ب) با فرض $V_D(on) = 0.6 V$ ، آیا مقادیر فوق به نحو قابل ملاحظه ای تغییر خواهند کرد؟

(ج) دیودهای به کار رفته در این مدار چه جریان حداکثر و چه ولتاژ معکوس حداکثری را باید بتوانند تحمل کنند؟

(حل: الف)

$$V_{dc} = V_m - \frac{I_{dc}}{fC} = V_m - \frac{V_{dc}}{fC R_L} \Rightarrow V_{dc} = 97.56 V$$

$$V_r = \frac{I_{dc}}{fC} = \frac{V_{dc}}{fC R_L} = 4.88 V$$

(ب) در این حالت داریم

$$V_{dc} = (V_m - V_D(on)) - \frac{I_{dc}}{fC} = (V_m - 0.6) - \frac{V_{dc}}{fC R_L} \Rightarrow V_{dc} = 96.98 V$$

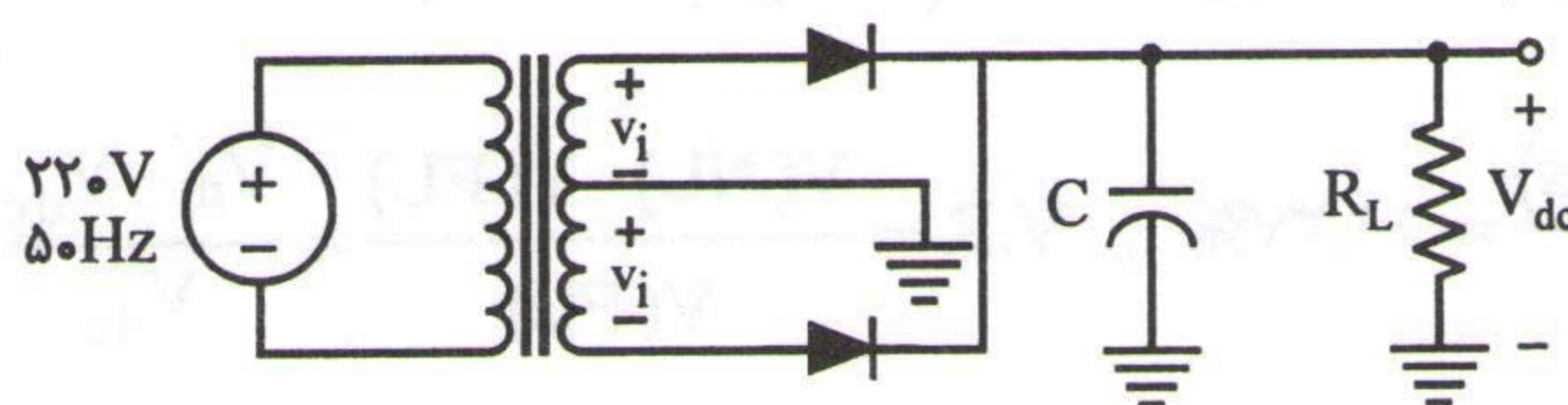
$$V_r = \frac{I_{dc}}{fC} = \frac{V_{dc}}{fC R_L} = 4.85 V$$

$$I_m = V_m \left[\frac{1}{R_L^2} + (C\omega)^2 \right]^{1/2} = 1,26 A \quad (ج)$$

$$PIV = 2V_m = 200V$$

■

۸۱. مصرف کننده‌ای با مقاومت ورودی R_L ، با ولتاژ ثابت ۳۰ ولت و جریان مستقیم ۳۰۰ میلی آمپر کار می‌کند. مقدار قابل تحمل برای ولتاژ مؤثر ریپل $v_r(rms)$ برابر یک ولت در نظر گرفته می‌شود. منبع تغذیه را با استفاده از یک ترانس سر وسط و دیود را از جنس سیلیکن با ولتاژ هدایت ۰٫۷ ولت به صورت مدار شکل ۱۳۰-۲ طرح کنید.



شکل ۱۳۰-۲

$$v_{i,max} = V_m = V_{dc} + V_D(on) + \frac{V_r}{2} \quad \text{حل:}$$

$$v_r(rms) = 1V \Rightarrow V_r = 2\sqrt{2}v_r(rms) = 2,83V$$

$$\Rightarrow V_m = 32,43V \Rightarrow v_{i,rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = 22,93V$$

بنابراین نسبت ترانس برابر است با

$$n = \frac{n_1}{n_2} = \frac{220}{22,93} \approx 10$$

برای محاسبه خازن داریم

$$V_r = \frac{I_{dc}}{2fC} = 2,83V \Rightarrow C = 867\mu F$$

و برای مشخصات دیودها یعنی حداکثر ولتاژ معکوس (PIV) و حداکثر جریان داریم

$$PIV = 2V_m \approx 65V$$

$$I_m = V_m \left[\left(\frac{I_{dc}}{V_{dc}} \right)^2 + C^2\omega^2 \right]^{1/2} = 1,84A$$

■

جریان ماکزیمم فوق در لحظات بسیار کوتاهی از دیود می‌گذرد.

۸۲. در یک مدار یکسوکننده تمام موج با ترانس سر وسط، نسبت ترانس برابر ۱۰ است. ضریب تنظیم بار و ضریب ریپل را در حالت‌های زیر به دست آورید. دیودها را از جنس سیلیکن با ولتاژ هدایت ۰٫۷ ولت و فرکانس ورودی را ۵۰HZ در نظر بگیرید.

الف) $I_{dc} = 50 \text{ mA}$, $C = 50 \mu\text{F}$

ب) $I_{dc} = 50 \text{ mA}$, $C = 500 \mu\text{F}$

ج) $I_{dc} = 100 \text{ mA}$, $C = 500 \mu\text{F}$

$$V_m = \frac{220\sqrt{2}}{10} = 31.1 \text{ V}$$

حل: الف)

$$V_r = \frac{I_{dc}}{2fC} = 10 \text{ V} \Rightarrow v_r(\text{rms}) = \frac{V_r}{\sqrt{2}} = 7.07 \text{ V}$$

$$V_{dc} = V_m - \frac{V_r}{2} - V_D(\text{on}) = 25.4 \text{ V}$$

$$\text{r.f.} = \frac{v_r(\text{rms})}{V_{dc}} = 11.37\% , \text{ V.R} = \frac{V(\text{NL}) - V(\text{FL})}{V(\text{FL})} = \frac{V_m - V_{dc}}{V_{dc}} = 22.5\%$$

$$V_r = \frac{I_{dc}}{2fC} = 1 \text{ V} \Rightarrow v_r(\text{rms}) = \frac{V_r}{\sqrt{2}} = 0.707 \text{ V}$$

ب)

$$V_{dc} = V_m - \frac{V_r}{2} - V_D(\text{on}) = 29.9 \text{ V}$$

$$\text{r.f.} = \frac{v_r(\text{rms})}{V_{dc}} = 0.97\% , \text{ V.R} = \frac{V_m - V_{dc}}{V_{dc}} = 4\%$$

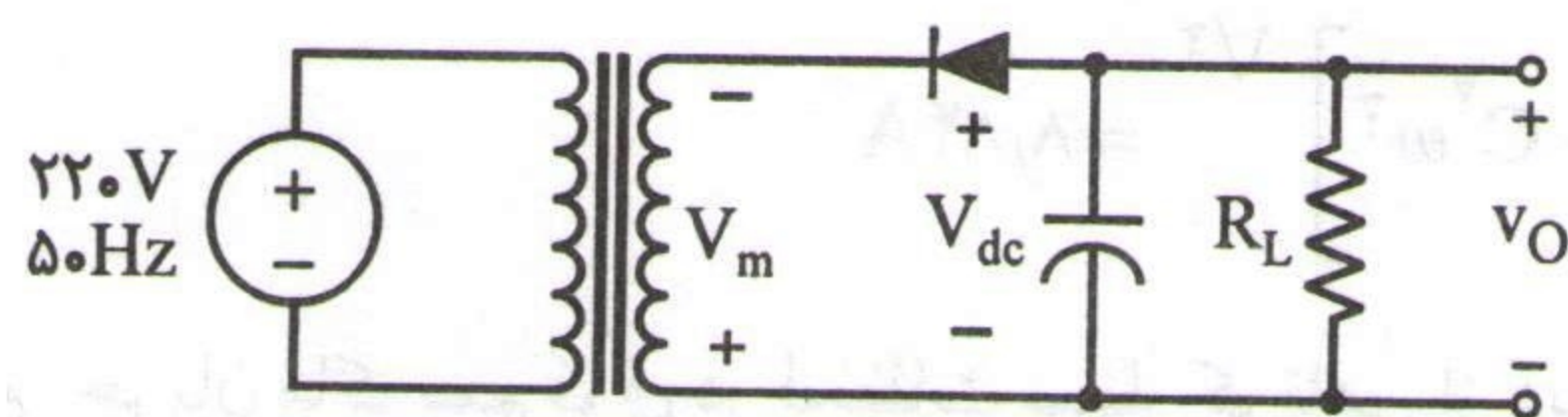
$$V_r = \frac{I_{dc}}{2fC} = 2 \text{ V} \Rightarrow v_r(\text{rms}) = \frac{V_r}{\sqrt{2}} = 1.414 \text{ V}$$

ج)

$$V_{dc} = V_m - \frac{V_r}{2} - V_D(\text{on}) = 29.4 \text{ V}$$

$$\text{r.f.} = \frac{v_r(\text{rms})}{V_{dc}} = 1.96\% , \text{ V.R} = \frac{V_m - V_{dc}}{V_{dc}} = 5.78\%$$

۸۳. با استفاده از مدار شکل ۲-۱۳۱ یک منبع ۹-ولت DC طرح کنید که جریان ۳۰mA را به بار تحویل دهد. دیود را از جنس سیلیکن با ولتاژ هدایت ۰.۷ ولت در نظر بگیرید.



شکل ۲-۱۳۱

الف) نسبت ترانس و خازن را برای ریپل حداکثر ۰.۵V محاسبه کنید.

ب) ضریب ریپل مدار را محاسبه نمایید.

ج) جریان ماکزیمم دیود را به دست آورید.

حل: الف) $|V_{dc}| = V_m - V_D(\text{on}) - \frac{V_r}{2} \Rightarrow V_m = |V_{dc}| + 0.7 + 0.25 = 9.95 \text{ V}$

$$n = \frac{n_1}{n_2} = \frac{220\sqrt{2}}{9.95} \approx 32$$

$$V_r = \frac{I_{dc}}{fC} \Rightarrow C = 1200 \mu F$$

$$r.f. = \frac{v_r(rms)}{V_{dc}} = \frac{V_r / \sqrt{2}}{V_{dc}} = 1.6\% \quad (ب)$$

$$R_L = \frac{V_{dc}}{I_{dc}} = 0.3 K\Omega, \quad I_m = V_m \left[\frac{1}{R_L^2} + (C\omega)^2 \right]^{1/2} = 3.75 A \quad (ج)$$

۸۴. یک منبع تغذیه ۳۰ ولتی DC طرح کنید که یک مدار الکترونیکی با مقاومت ورودی 300Ω را تغذیه نماید. دیود از جنس سیلیکن بوده و از خازن $1000 \mu F$ برای صافی استفاده کنید. ولتاژ رپل و مشخصات الکترونیکی دیود را محاسبه کنید.

$$\text{حل:} \quad R_L = 300 \Omega, \quad V_O = V_{dc} = 30 V \Rightarrow I_{dc} = \frac{30}{300} = 100 mA$$

معمولاً برای جریانهای کمتر از ۱۰۰ mA از طرح یکسوساز نیم موج استفاده می شود.

$$V_r = \frac{I_{dc}}{fC} = 2 V \Rightarrow v_r(rms) = \frac{V_r}{\sqrt{2}} = 0.58 V$$

$$v_{i,max} = V_m = V_{dc} + V_D(on) + \frac{V_r}{2} = 31.7 V \Rightarrow v_i(rms) = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = 22.42 V$$

بنابراین نسبت ترانس برابر است با

$$n = \frac{n_1}{n_2} = \frac{220}{22.42} \approx 10 \Rightarrow n = 10$$

مشخصات دیود برابر است با

$$PIV = 2V_m = 63.4 V$$

$$I_m = V_m \left[\frac{1}{R_L^2} + C^2 \omega^2 \right]^{1/2} = 9.96 A$$

این جریان در لحظه کوتاهی که دیود روشن است از آن عبور می کند بنابراین لازم نیست که دیود ۱۰ A انتخاب گردد. دیود ۷۵ ولت و یک آمپر کافی است.

۸۵. یک یکسوساز نیم موج توسط برق متناوب ۱۲۰ ولت و ۶۰ هرتز تغذیه می گردد.

(الف) نسبت دور ترانس و PIV دیود را برای خروجی ۱۲ ولت و ۴۰ میلی آمپر DC محاسبه کنید.

(ب) برای اینکه ولتاژ رپل از ۱۰ درصد مقدار DC بیشتر نگردد، مقدار خازن صافی را به دست آورید.

حل: (الف) برای یکسوساز نیم موج بدون صافی خازنی داریم

$$V_{dc} = \frac{R_L V_m}{\pi (R_L + R_f)}$$

که با فرض R_f ناچیز خواهیم داشت

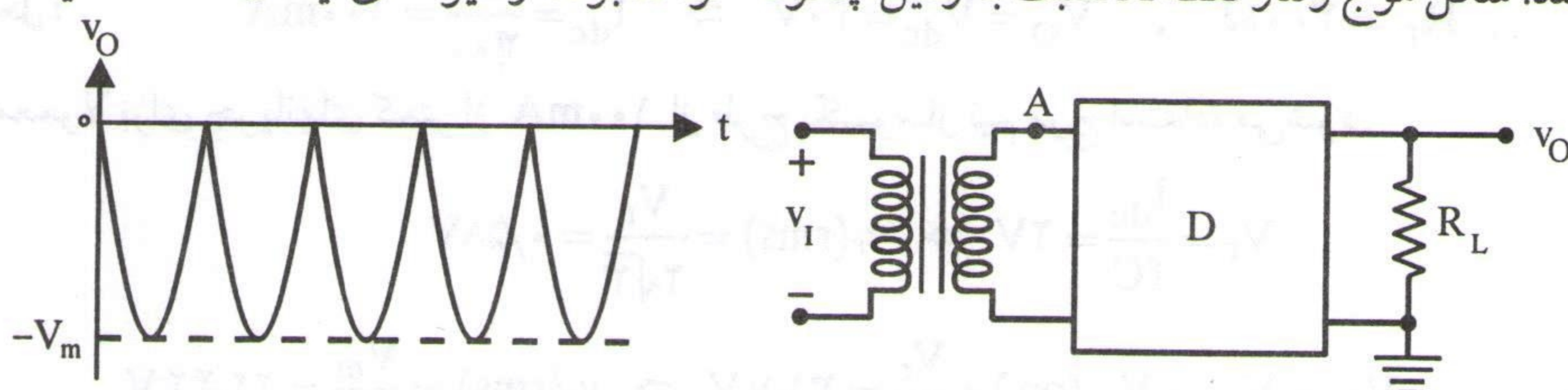
$$V_{dc} \approx \frac{V_m}{\pi} \Rightarrow V_m = \pi V_{dc} = 37.7V$$

نسبت دور ترانس و PIV برابر است با

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{120\sqrt{2}}{37.7} = 4.5, \quad PIV = V_m = 37.7V$$

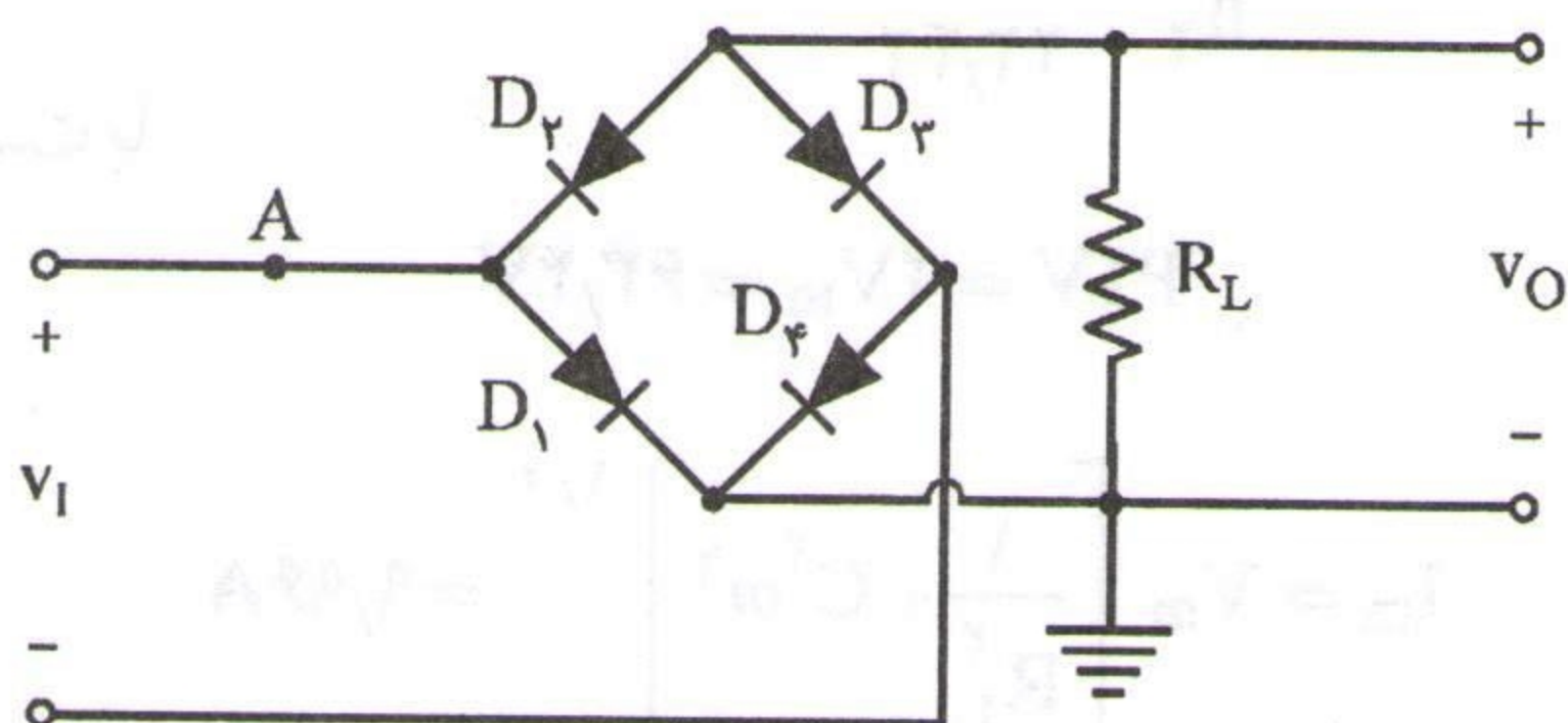
$$V_r = \frac{I_{dc}}{fC} = 1.2 \Rightarrow C = \frac{I_{dc}}{1.2 \times f} = 55.5 \mu F \quad (ب)$$

۸۶. در مدار شکل ۱۳۲-۲ در محل جعبه D یک مدار پل دیودی مناسب طوری جایگزین کنید که به ازای یک شکل موج سینوسی ورودی با دامنه V_m ، ولتاژ خروجی v_O دارای شکل موج نشان داده شده باشد. شکل موج ولتاژ نقطه A نسبت به زمین چگونه خواهد بود؟ از دیودهای ایده‌ال استفاده کنید.



شکل ۱۳۲-۲

حل: مدار پل دیودی مورد نظر به صورت شکل ۱۳۳-۲ می‌تواند باشد.



شکل ۱۳۳-۲

در نیم سیکل‌های منفی، دیودهای D_2 و D_4 هدایت نموده و $v_O = v_I$ است. در نیم سیکل‌های مثبت، D_1 و D_3 هدایت نموده و $v_O = -v_I$ می‌باشد. بنابراین خروجی دارای شکل موج مورد نظر است. ولتاژ نقطه A نسبت به زمین برابر ولتاژ دوسر دیود D_1 است، یعنی

$$v_A = v_{D_1}$$

$$v_I < 0 \Rightarrow D_1: \text{off} \Rightarrow v_A = v_I$$

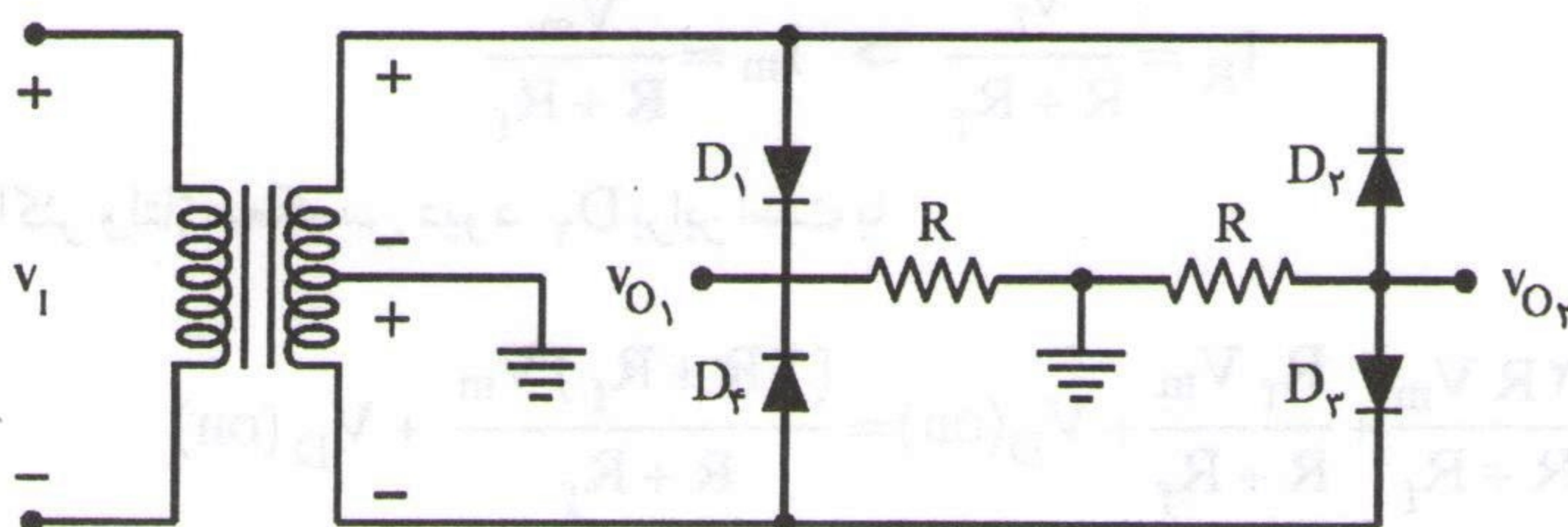
$$v_I > 0 \Rightarrow D_1: \text{on} \Rightarrow v_A = V_D(\text{on})$$

۸۷. در مدار شکل ۲-۱۳۴ ولتاژ آستانه هدایت دیودها را صفر و مقاومت مستقیم آنها را R_f در نظر بگیرید. اگر v_I یک ولتاژ سینوسی باشد.

الف) شکل موج ولتاژ خروجی v_{O1} و v_{O2} را رسم کنید.

ب) مقادیر متوسط و مؤثر ولتاژهای v_{O1} و v_{O2} را محاسبه کنید.

ج) حداکثر ولتاژ معکوسی که روی هر یک از دیودها قرار می گیرد، دقیقاً چقدر است؟



شکل ۲-۱۳۴

حل: الف) در نیم سیکلهای مثبت، دیودهای D_1 و D_3 روشن و دیودهای D_2 و D_4 خاموش هستند. بنابراین

$$v_I > 0 \Rightarrow v_{O1} = v_I, \quad v_{O2} = -v_I$$

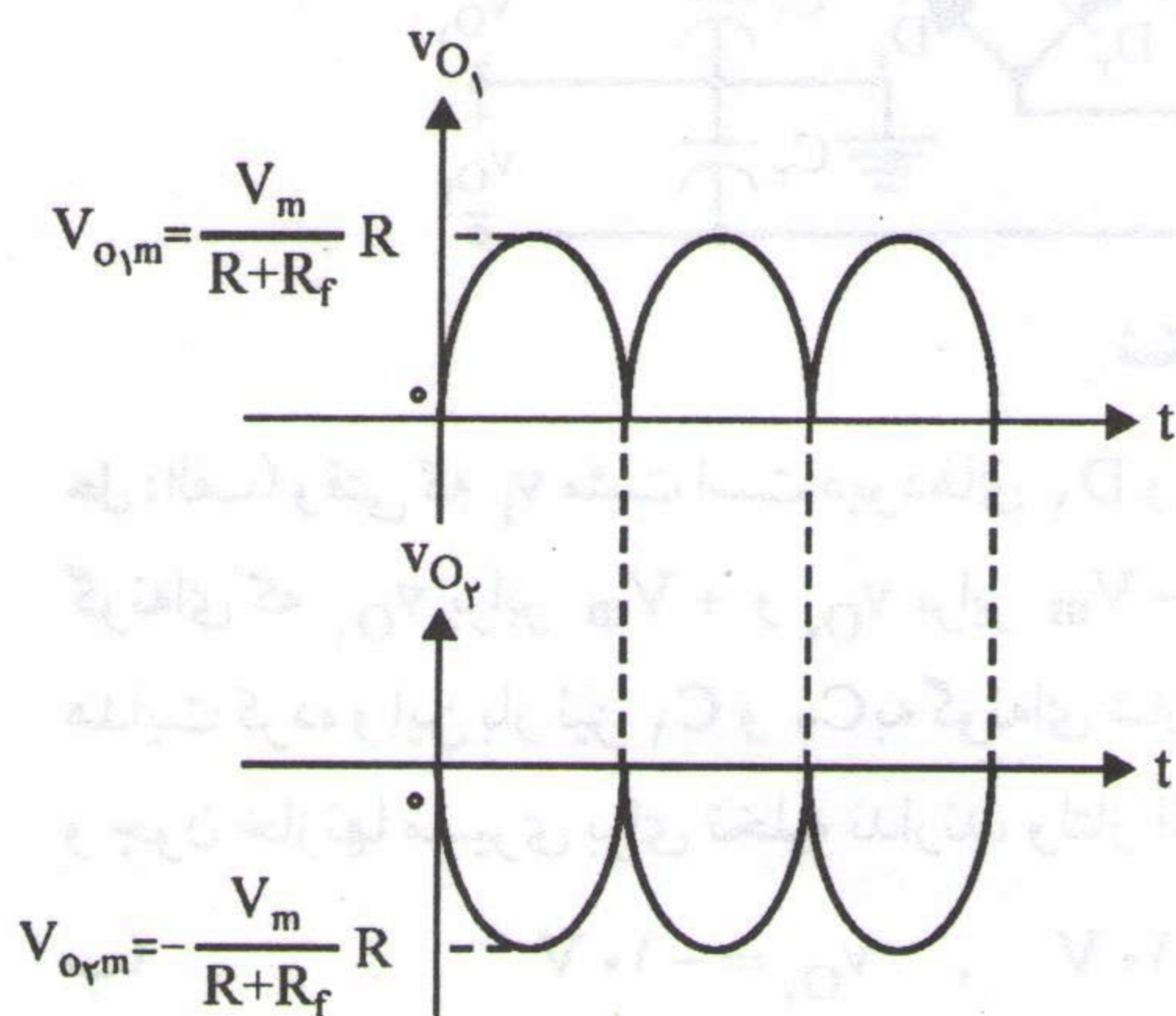
در نیم سیکلهای منفی، دیودهای D_2 و D_4 روشن و دیودهای D_1 و D_3 خاموش هستند. بنابراین

$$v_I < 0 \Rightarrow v_{O1} = -v_I, \quad v_{O2} = v_I$$

به این ترتیب، v_{O1} یکسو شده تمام موج (مثبت) و

v_{O2} یکسو شده تمام موج (منفی) هستند (شکل

۲-۱۳۵). دامنه این ولتاژ برابر است با



$$V_{O1m} = -V_{O2m} = \left(\frac{V_m}{R + R_f} \right) \times R$$

$$V_{O1dc} = \frac{2 V_{O1m}}{\pi} = \frac{2 R V_m}{\pi (R + R_f)} \quad \text{ب)}$$

$$V_{O2dc} = \frac{2 V_{O2m}}{\pi} = \frac{-2 R V_m}{\pi (R + R_f)}$$

شکل ۲-۱۳۵

مقدار مؤثر برابر است با

$$v_{O1}(rms) = \left[\frac{2}{T} \int_0^{T/2} v_{O1}^2(t) dt \right]^{1/2} = \left[\frac{2}{T} \int_0^{T/2} V_{O1m}^2 \sin^2 \omega t dt \right]^{1/2}$$

$$= \left[\frac{2}{T} V_{O1m}^2 \left(t - \frac{1}{2\omega} \sin 2\omega t \right) \right]^{1/2} = \frac{V_{O1m}}{\sqrt{2}} = \frac{V_m R}{(R + R_f) \sqrt{2}}$$

به همین ترتیب

$$v_{O_2}(\text{rms}) = v_{O_1}(\text{rms})$$

ج) در نیم سیکل‌های مثبت که دیود D_1 روشن و دیود D_2 خاموش است، ولتاژ دوسر دیود D_2 عبارت است از

$$v_{D_2} = -(v_{D_1} + V_R + V_R) = -(V_D(\text{on}) + R_f I_R + 2R I_R)$$

$$I_R = \frac{v_I}{R + R_f} \Rightarrow I_m = \frac{V_m}{R + R_f}$$

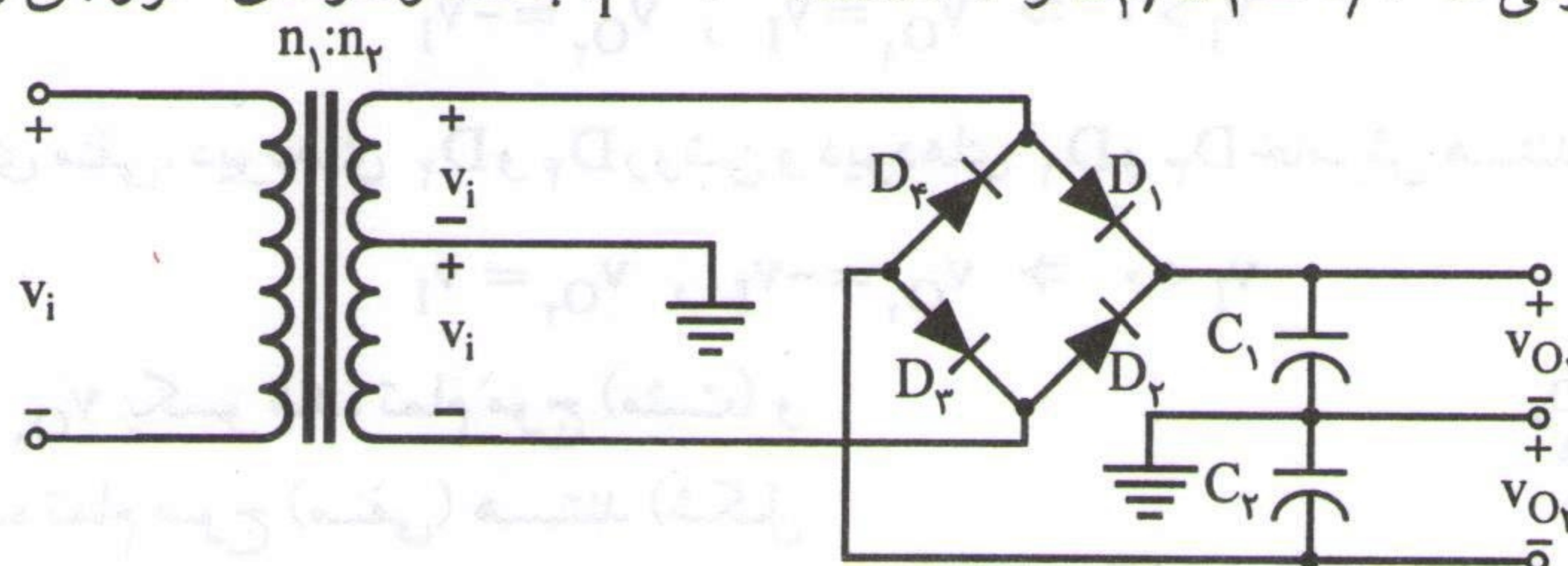
بنابراین حداکثر ولتاژ معکوس دیود D_2 برابر است با

$$\frac{2R V_m}{R + R_f} + \frac{R_f V_m}{R + R_f} + V_D(\text{on}) = \frac{(2R + R_f) V_m}{R + R_f} + V_D(\text{on})$$

۸۸. مدار شکل ۱۳۶-۲ یک مدار پل با سر وسط است.

الف) طرز کار آن را توضیح دهید.

ب) در صورتی که $n_2/n_1 = 0.1$ و $v_i = 100 \sin \omega t$ V باشد، ولتاژهای خروجی را تعیین نمایید.



شکل ۱۳۶-۲

حل: الف) وقتی که v_i مثبت است دیودهای D_1 و D_3 هدایت کرده و خازنهای C_1 و C_2 شارژ می‌شوند به گونه‌ای که v_{O_1} برابر $+V_m$ و v_{O_2} برابر $-V_m$ می‌گردند. برای نیم سیکل منفی v_i ، دیودهای D_2 و D_4 هدایت کرده و این بار نیز C_1 و C_2 به گونه‌ای شارژ می‌شوند که v_{O_1} برابر $+V_m$ و v_{O_2} برابر $-V_m$ گردد. و چون خازن‌ها مسیری برای تخلیه ندارند، ولتاژ آنها در همین مقادیر ثابت باقی خواهد ماند.

$$V_m = \frac{100}{10} = 10 \text{ V} \Rightarrow v_{O_1} = 10 \text{ V}, \quad v_{O_2} = -10 \text{ V} \quad \text{ب)}$$

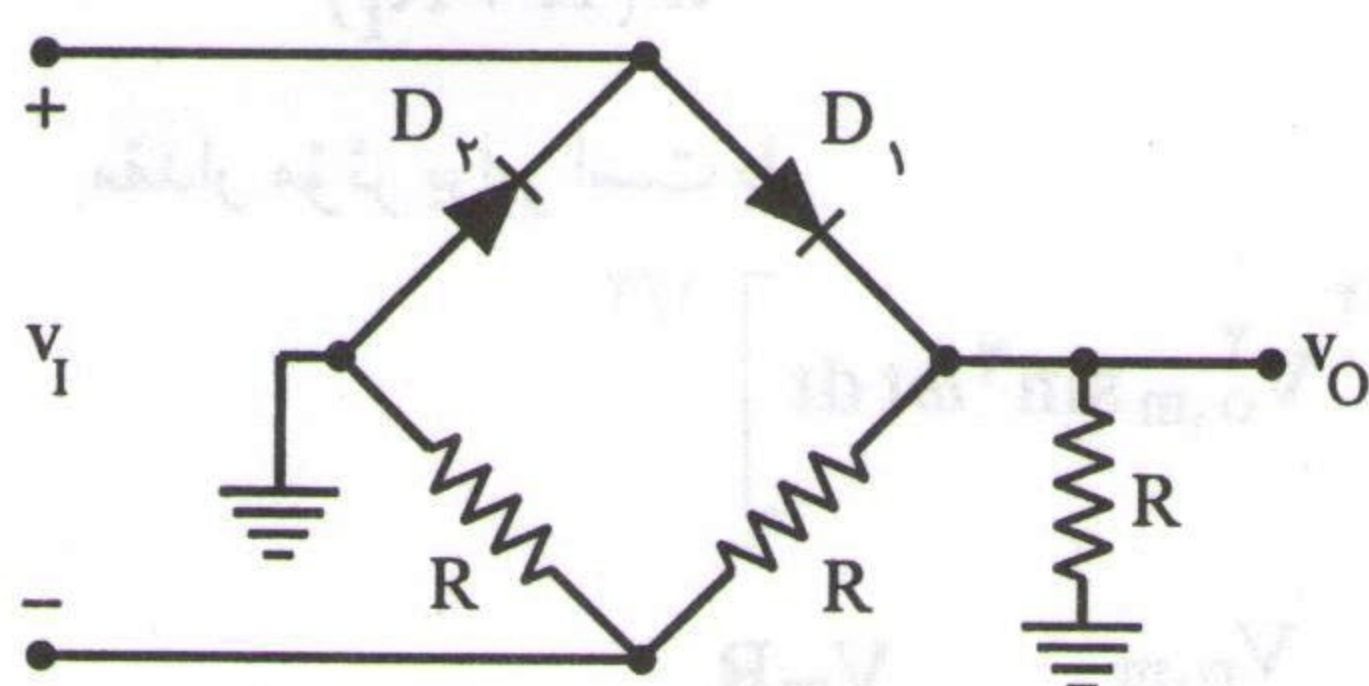
۸۹. در شکل ۱۳۷-۲ دیودهای ایده‌آل و $v_I = V_m \sin \omega t$ است.

الف) شکل موج ولتاژ خروجی v_O را به دست آورده

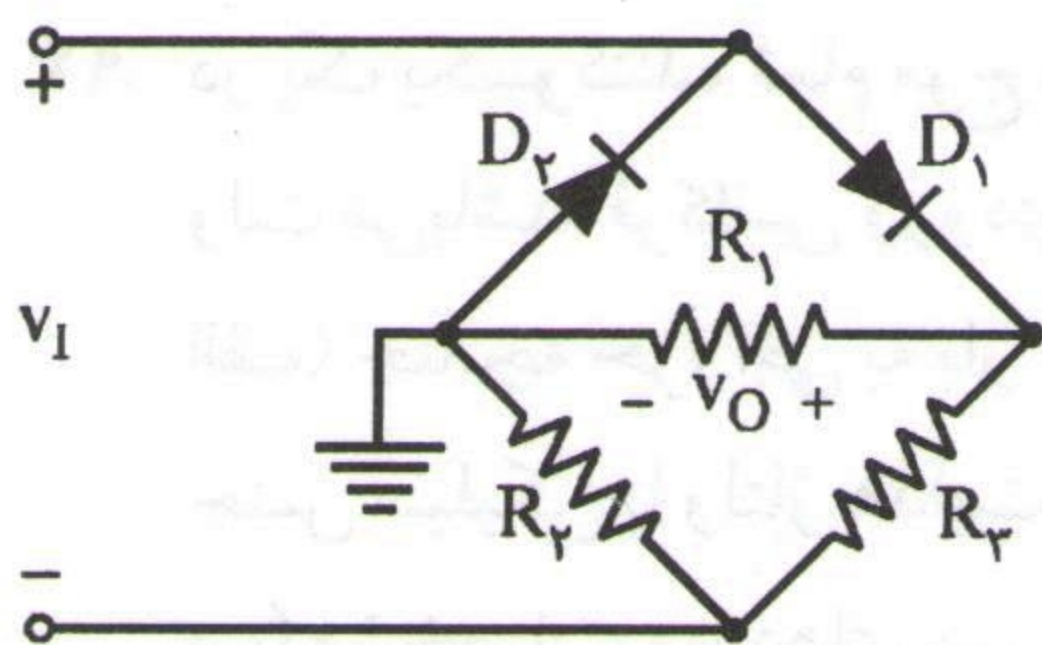
و رسم کنید.

ب) مقدار DC ولتاژ خروجی را محاسبه کنید.

ج) مشخصه انتقالی مدار را رسم کنید.



شکل ۱۳۷-۲



شکل ۲-۱۳۸

حل: برای درک بهتر، مدار را به صورت شکل ۲-۱۳۸ رسم می‌کنیم.

الف) در نیم سیکل‌های مثبت، دیود D_1 روشن و دیود D_2 قطع خواهد بود. بنابراین

$$v_O = \left(\frac{v_I}{R_1 + R_2} \right) \times R_1 = \frac{v_I}{2}$$

در نیم سیکل‌های منفی، دیود D_2 روشن و دیود D_1 قطع خواهد بود. بنابراین

$$v_O = \left(\frac{-v_I}{R_1 + R_2} \right) \times R_1 = -\frac{v_I}{2}$$

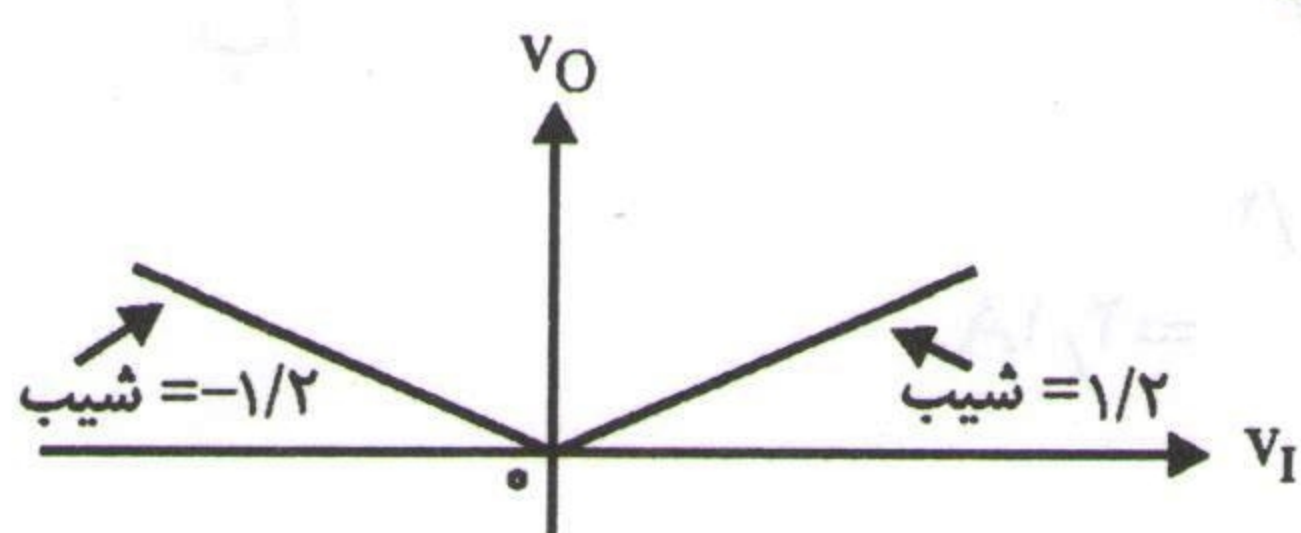
به این ترتیب، خروجی یک ولتاژ یکسو شده تمام موج با دامنه $V_m/2$ می‌باشد.

ب) مقدار DC ولتاژ خروجی عبارت است از

$$V_{dc} = \frac{2 V_{om}}{\pi} = \frac{V_m}{\pi}$$

ج) مشخصه انتقالی مدار با توجه به بند (الف) به صورت

شکل ۲-۱۳۹ است.



شکل ۲-۱۳۹

$$v_O = \begin{cases} v_I/2 & v_I > 0 \\ -v_I/2 & v_I < 0 \end{cases}$$

۹۰. با استفاده از یکسوساز تمام موج پل یک منبع تغذیه ۶ ولت DC با حداکثر تغییرات مجاز ولتاژ خروجی $0.4V$ و حداکثر جریان بار برابر $200mA$ طرح نمایید. دیودهای مورد استفاده را سلیکونی با ولتاژ هدایت $0.7V$ و فرکانس ورودی نیز $50Hz$ است.

حل:

$$V_{dc} = V_m - \frac{V_r}{2} - 2V_{D(on)} \Rightarrow V_m = V_{dc} + \frac{V_r}{2} + 2V_{D(on)} = 7.6V$$

نسبت ترانس برابر است با

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{220\sqrt{2}}{7.6} = 41$$

برای محاسبه خازن داریم

$$V_r = \frac{I_{dc}}{2fC} \Rightarrow C = \frac{I_{dc}}{2fV_r} = 5000\mu F$$

مشخصات دیودها برابر است با

$$PIV \geq V_m = 7.6V, R_L = \frac{V_{dc}}{I_{dc}} = 30\Omega$$

$$I_m = V_m \left[\frac{1}{R_L^2} + (C\omega)^2 \right]^{1/2} = 11.9A$$

۹۱. در یک یکسوکننده تمام موج پل مقدار خازن صافی برابر $220\mu F$ و دامنه ولتاژ ثانویه ترانس برابر 30 ولت می باشد. فرکانس ورودی 50Hz است.

الف) چنانچه خروجی به بار 500Ω وصل گردد، ولتاژ DC خروجی چقدر خواهد بود. دیودها را از جنس سیلیکن با ولتاژ هدایت 0.7 ولت در نظر بگیرید.
ب) مشخصات دیودهای مورد استفاده را به دست آورید.

حل: الف) برای ولتاژ DC خروجی داریم

$$V_{dc} = V_m - \frac{V_r}{2} - 2V_{D(on)} \quad , \quad V_r = \frac{I_{dc}}{2fC} = \frac{V_{dc}}{2R_L fC}$$

$$\Rightarrow V_{dc} = 30 - \frac{V_{dc}}{2 \times 500 \times 220 \times 10^{-6}} - 1.4 \Rightarrow V_{dc} \left(1 + \frac{1}{2 \times 500 \times 220 \times 10^{-6}} \right) = 28.6$$

$$\Rightarrow V_{dc} = 27.4V \quad , \quad V_r = 2.5V$$

$$PIV \geq V_m = 30V \quad \text{ب)}$$

$$I_m = V_m \left[\frac{1}{R_L^2} + (C\omega)^2 \right]^{1/2} = 2.1A$$

۹۲. با استفاده از یک ترانسفورمر که از برق شهر تغذیه می کند و یک یکسوکننده تمام موج با فیلتر خازنی، یک منبع ولتاژ DC با جریان $5mA$ و ولتاژ $15V$ طراحی کنید که در آن $V_r \leq V_m/10$ باشد. V_m دامنه ولتاژ ثانویه ترانسفورمر است. نسبت دور ترانسفورمر و اندازه خازن را محاسبه نمایید و دیودها را ایده آل فرض کنید. ضریب تنظیم بار و ضریب رپیل این یکسوکننده چقدر است؟

$$V_m = V_{dc} + 2V_{D(on)} + V_r/2 \approx 15 + 0.5V_m \Rightarrow V_m = 15.79V \quad \text{حل:}$$

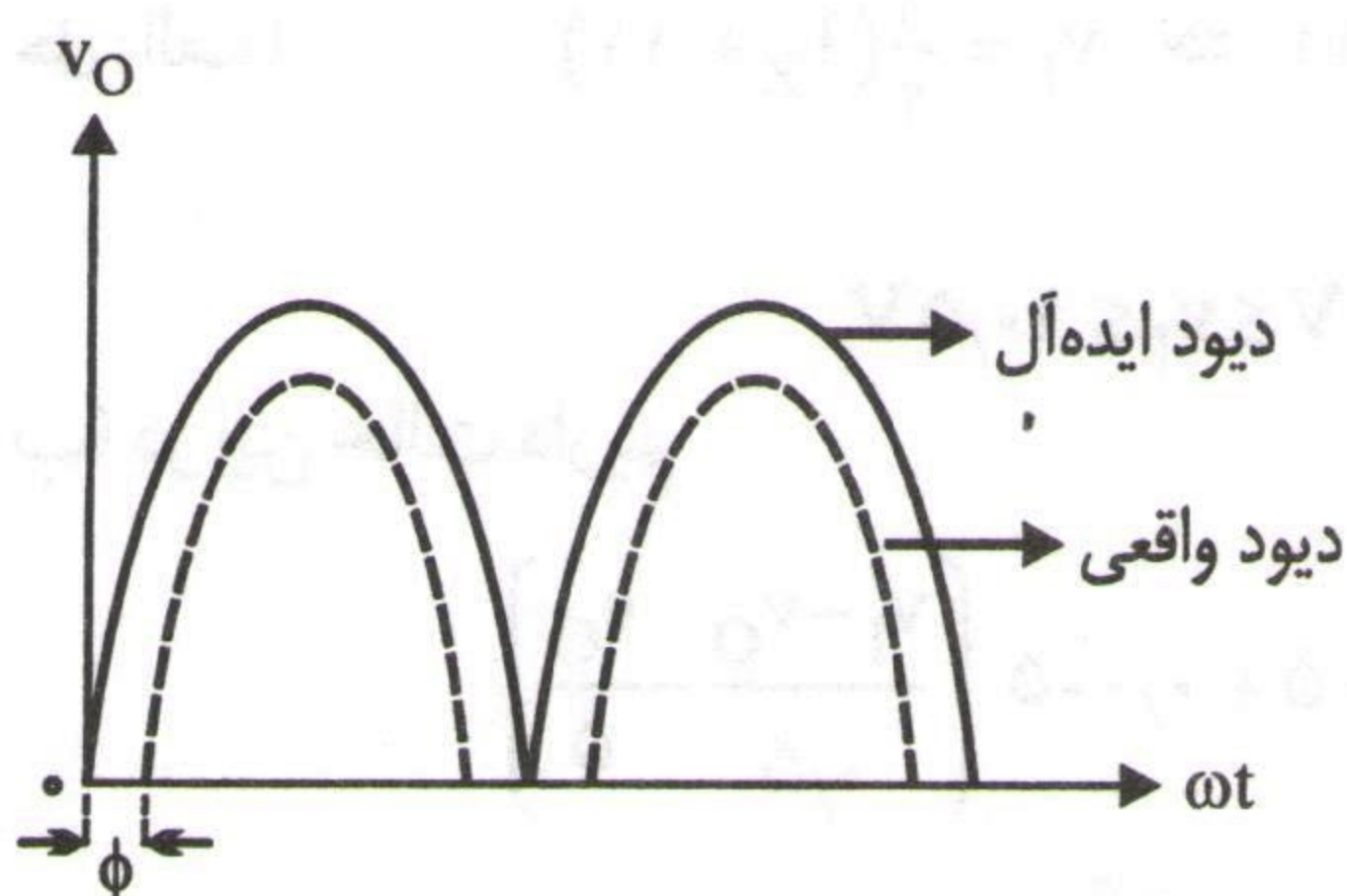
نسبت ترانس برابر است با

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{220\sqrt{2}}{15.79} \approx 20$$

$$V_r = \frac{I_{dc}}{2fC} = \frac{V_m}{10} \Rightarrow C = \frac{10I_{dc}}{2fV_m} = 32\mu F$$

$$V.R \% = \frac{V(NL) - V(FL)}{V(FL)} \times 100 = \frac{V_m - V_{dc}}{V_{dc}} \times 100 = 5.3\%$$

$$\%r.f. = \frac{v_r(rms)}{V_{dc}} \times 100 = \frac{V_r}{2\sqrt{3}V_{dc}} \times 100 = \frac{0.1V_m}{2\sqrt{3} \times 15} \times 100 = 3.04\%$$



شکل ۱۴۰-۲

۹۳. در شکل ۱۴۰-۲ خروجی یکسوکننده تمام موج برای دو حالت دیود ایده‌آل و واقعی رسم شده است. مقدار تأخیر ϕ را بر حسب دامنه ورودی سینوسی V_m و ولتاژ شروع هدایت $V_D(on)$ دیود به دست آورید. آیا برای یکسوکننده‌های پل با یکسوکننده‌های تمام موج معمولی یکسان است؟ چرا؟

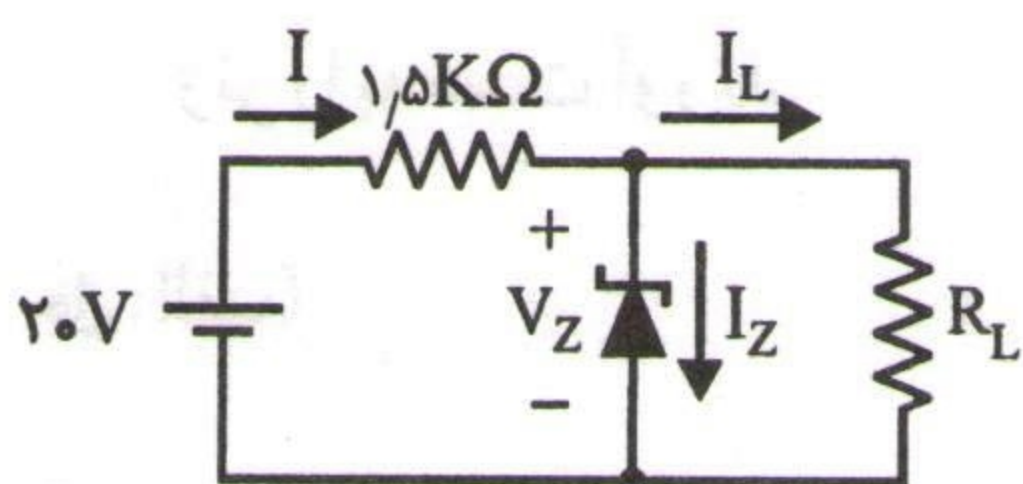
حل: تأخیر ϕ به دلیل ایده‌آل نبودن دیود و افت ولتاژ دوسر آن به وجود می‌آید.

$$v_i = V_m \sin \omega t, \quad v_O(t) = \begin{cases} |v_i| - V_\gamma & |v_i| \geq V_\gamma \\ 0 & |v_i| < V_\gamma \end{cases}$$

به عبارت دیگر تازمانی که ورودی به ولتاژ آستانه هدایت دیود نرسیده، دیود قطع و خروجی صفر است. بنابراین

$$v_i = V_\gamma \Rightarrow V_m \sin \omega t = V_m \sin \phi = V_\gamma \Rightarrow \phi = \sin^{-1} \left(\frac{V_\gamma}{V_m} \right)$$

برای یکسوکننده‌های تمام موج معمولی $V_\gamma = 0.7$ ولت و برای یکسوکننده تمام موج پل $V_\gamma = 1.4$ ولت خواهد بود.



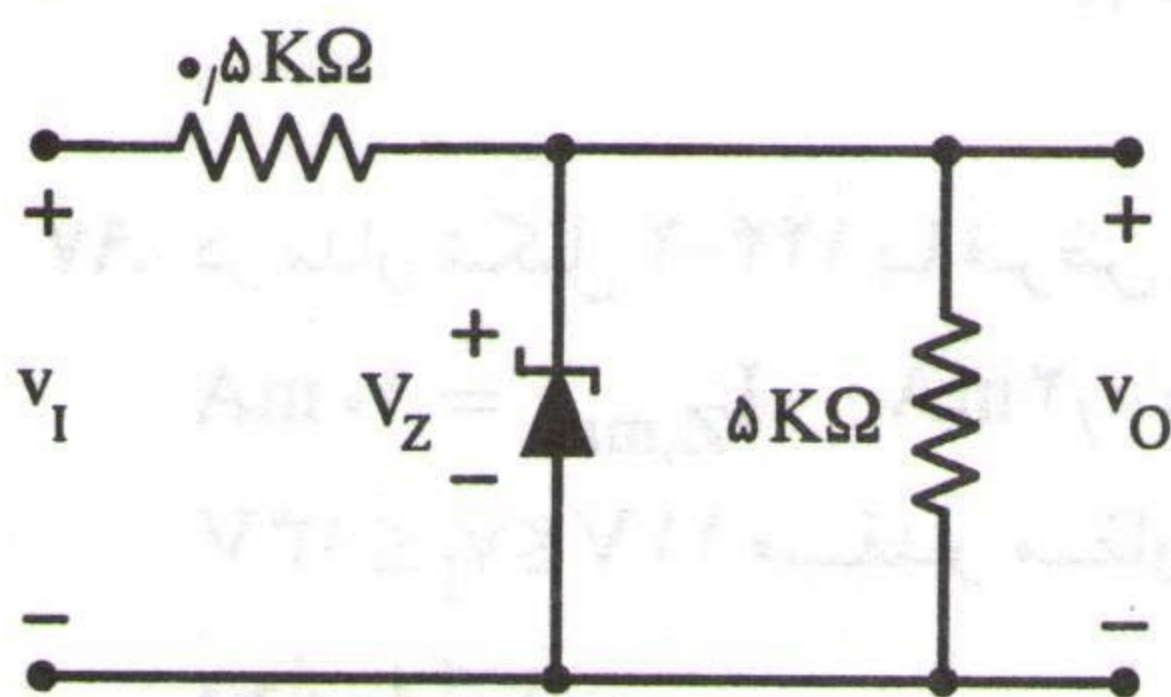
شکل ۱۴۱-۲

۹۴. در مدار تنظیم کننده ولتاژ شکل ۱۴۱-۲ دیود زنر دارای $I_{Z,max} = 10\text{mA}$ و $I_K = 1\text{mA}$ ، $V_Z = 11\text{V}$ می‌باشد. حداقل مقاومت R_L که می‌توان به مدار متصل کرد چقدر است؟ مقاومت داخلی دیود زنر را صفر فرض کنید.

حل: حداقل جریان لازم برای ورود به ناحیه شکست دیود زنر 1mA می‌باشد. بنابراین

$$I_Z = I - I_L \Rightarrow I_K = I - I_{L,max} = \frac{20 - 11}{1.5} - \frac{11}{R_{L,min}} = 6 - \frac{11}{R_{L,min}}$$

$$I_K = 1\text{mA} \Rightarrow R_{L,min} = 2.2\text{K}\Omega$$



شکل ۱۴۲-۲

۹۵. در مدار تنظیم کننده شکل ۱۴۲-۲ دیود زنر دارای $I_{Z,max} = 10\text{mA}$ ، $I_K = 0.2\text{mA}$ و $V_Z = 5\text{V}$ است. (الف) با فرض $r_Z = 0$ ، حداقل و حداکثر مجاز v_I را تعیین نمایید.

(ب) در صورتی که $r_Z = 5\Omega$ باشد، Δv_O را به ازای $\Delta v_I = 2\text{V}$ محاسبه کنید.

$$I_Z = \left(\frac{v_I - V_Z}{0.5} \right) - \left(\frac{V_Z}{5} \right) = 2v_I - 11 \Rightarrow v_I = \frac{1}{2}(I_Z + 11) \quad \text{حل: الف)}$$

$$0.2 \leq I_Z \leq 10 \text{ mA} \Rightarrow 5.6 \text{ V} \leq v_I \leq 10.5 \text{ V}$$

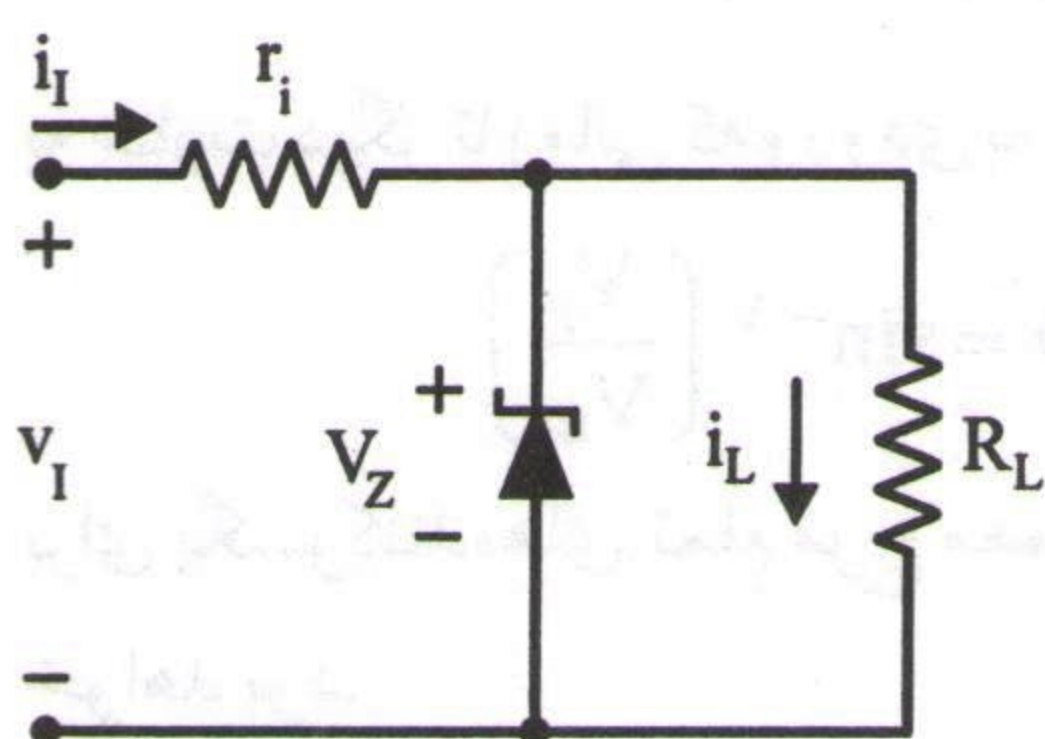
ب) در این حالت داریم

$$v_O = V_Z = 5 + r_Z I_Z = 5 + 0.005 I_Z = 5 + 0.005 \left(\frac{v_I - v_O}{0.5} - \frac{v_O}{5} \right)$$

$$\Rightarrow v_O \approx 4.95 + (9.89 \times 10^{-3}) v_I$$

$$\Rightarrow \Delta v_O = (9.89 \times 10^{-3}) \Delta v_I = 19.78 \text{ mV}$$

■



شکل ۲-۱۴۳

۹۶. در مدار تنظیم کننده ولتاژ شکل ۲-۱۴۳، دیود زنر ۱۰ ولتی و $I_K = 15 \text{ mA}$ است. ولتاژ ورودی v_I بین ۱۳ تا ۱۶ ولت و جریان i_L بین 10 mA تا 85 mA تغییر می‌کند.
الف) حداکثر مقدار r_i را به دست آورید.

ب) با استفاده از r_i فوق حداکثر توان تلف شده توسط دیود زنر را به دست آورید.

$$i_Z = i_I - i_L \Rightarrow i_Z = \frac{v_I - V_Z}{r_i} - i_L \quad \text{حل: الف)}$$

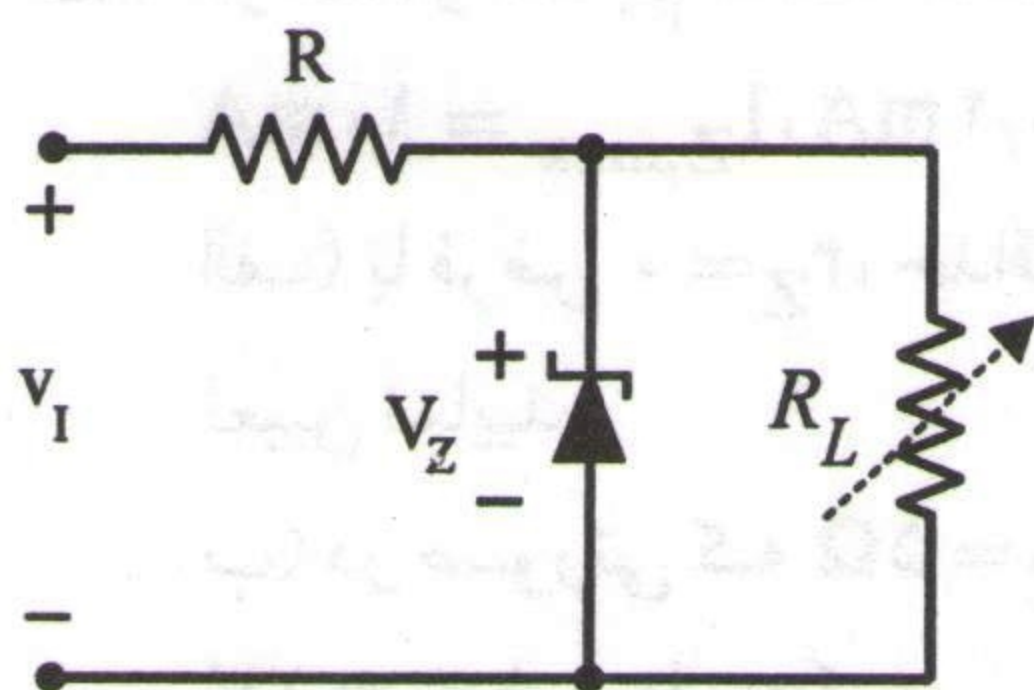
با توجه به رابطه فوق، برای اینکه I_K در بدترین شرایط تأمین گردد، باید به ازای i_L حداکثر، v_I حداقل و r_i حداکثر، داشته باشیم

$$I_K = \frac{v_{I,\min} - V_Z}{r_{i,\max}} - i_{L,\max} \Rightarrow r_{i,\max} = 30 \Omega$$

$$I_{Z,\max} = \frac{v_{I,\max} - V_Z}{r_i} - i_{L,\min} = 190 \text{ mA} \quad \text{ب)}$$

$$P_{Z,\max} = V_Z I_{Z,\max} = 1.9 \text{ W}$$

■



شکل ۲-۱۴۴

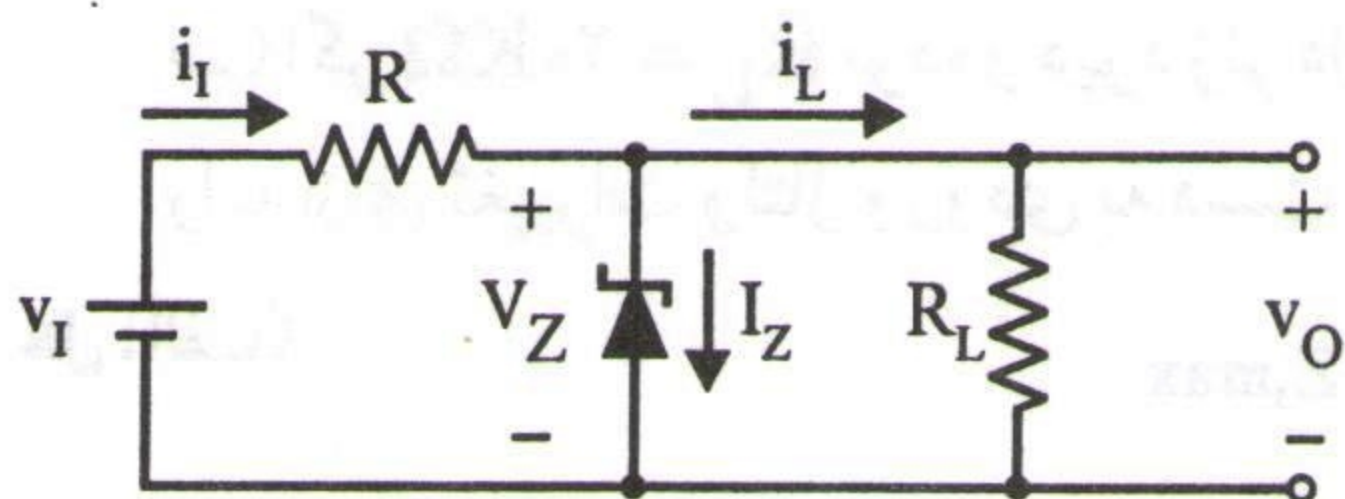
۹۷. در مدار شکل ۲-۱۴۴ با فرض مقادیر $R_{L,\min} = 1 \text{ k}\Omega$ ، $V_Z = 6.8 \text{ V}$ ، $I_K = 0.2 \text{ mA}$ ، $I_{Z,\max} = 10 \text{ mA}$ و $11 \text{ V} \leq v_I \leq 13 \text{ V}$ مقدار مقاومت R و نیز $R_{L,\max}$ را محاسبه کنید.

حل:

$$I_Z = \frac{V_I - V_Z}{R} - \frac{V_Z}{R_L}$$

$$I_{Z,\min} = \frac{V_{I,\min} - V_Z}{R} - \frac{V_Z}{R_{L,\min}} \geq I_K \Rightarrow R \leq 600 \Omega$$

$$I_{Z,\max} = \frac{V_{I,\max} - V_Z}{R} - \frac{V_Z}{R_{L,\max}} = 10 \Rightarrow R_{L,\max} = 20.4 K\Omega$$



شکل ۲-۱۴۵

۹۸. در مدار تنظیم کننده ولتاژ شکل ۲-۱۴۵ دیود زنر دارای ولتاژ شکست ۵۰ ولت، حداقل جریان لازم ۵ میلی آمپر و حداکثر جریان قابل تحمل ۴۰ میلی آمپر است. ولتاژ تغذیه برابر ۲۰۰ ولت است. جریان بار از صفر تا $i_{L,\max}$ تغییر می کند.

(الف) مقدار مقاومت R را تعیین کنید.

(ب) $i_{L,\max}$ را به دست آورید.

(ج) با مقدار R به دست آمده در بند (الف) و به ازای $i_L = 25 \text{ mA}$ ، محدوده ولتاژ ورودی را به گونه ای که تنظیم ولتاژ بهم نخورد به دست آورید.

حل: (الف) R را به گونه ای تعیین می کنیم که جریان زنر از حداکثر قابل تحمل آن فراتر نرود.

$$i_{I,\max} = i_{Z,\max} + i_{L,\min} \Rightarrow \frac{V_{I,\max} - V_Z}{R_{\min}} = 40 + 0$$

$$\Rightarrow \frac{200 - 50}{R_{\min}} = 40 \Rightarrow R_{\min} = 3.75 K\Omega$$

(ب) $i_{I,\max}$ برابر است با

$$i_{I,\max} = \frac{200 - 50}{3.75} = 40 \text{ mA}$$

حال $i_{L,\max}$ باید به گونه ای باشد که حداقل جریان دیود زنر تأمین گردد. اگر برای R همان $R_{\min}$ انتخاب گردد در این صورت داریم

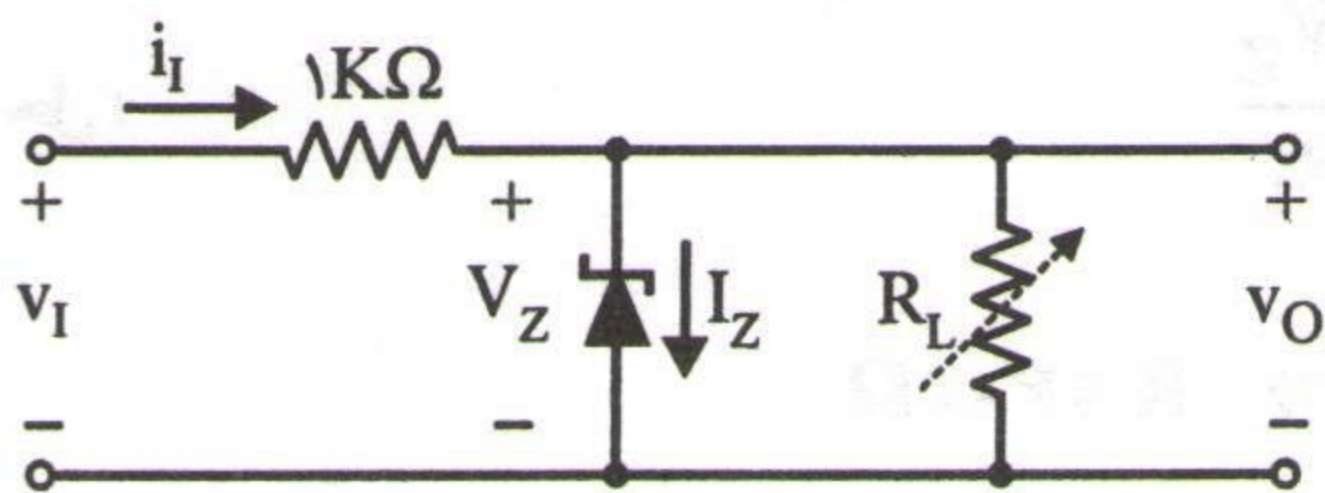
$$i_{L,\max} = i_{I,\max} - I_K = 40 - 5 = 35 \text{ mA}$$

(ج) $V_{I,\max}$ باید به گونه ای باشد که جریان زنر از ۴۰ میلی آمپر بیشتر نگردد.

$$\frac{V_I - 50}{3.75} - 25 < 40 \Rightarrow V_I < 293.75 \text{ V}$$

و $V_{I,\min}$ باید به گونه ای باشد که جریان دیود زنر از ۵ میلی آمپر کمتر نگردد.

$$\frac{V_I - 50}{3.75} - 25 > 5 \Rightarrow V_I < 162.5 \text{ V}$$



شکل ۲-۱۴۶

۹۹. مدار تنظیم‌کننده ولتاژ شکل ۲-۱۴۶ را در نظر بگیرید ($I_K = 0.2 \text{ mA}$, $I_{Z, \max} = 3.6 \text{ mA}$). الف) مقادیر حداقل و حداکثر مقاومت R_L را به گونه‌ای تعیین نمایید که تنظیم ولتاژ به خوبی صورت پذیرد. ولتاژ ورودی بین ۸ تا ۱۰ ولت تغییر می‌کند و $V_Z = 6.2 \text{ V}$ می‌باشد.

ب) اگر $R_L = 20 \text{ K}\Omega$ بوده و دیود زنر دارای مقاومت داخلی 5Ω باشد درصد تغییرات ولتاژ خروجی را به ازای تغییرات ولتاژ ورودی به دست آورید.

حل: الف)

$$i_{I, \max} = i_{L, \min} + I_{Z, \max}$$

$$\Rightarrow \frac{v_{I, \max} - V_Z}{1} = \frac{V_Z}{R_{L, \max}} + 3.6 \text{ mA} \Rightarrow R_{L, \max} = 31 \text{ K}\Omega$$

$$i_{I, \min} = i_{L, \max} + I_K$$

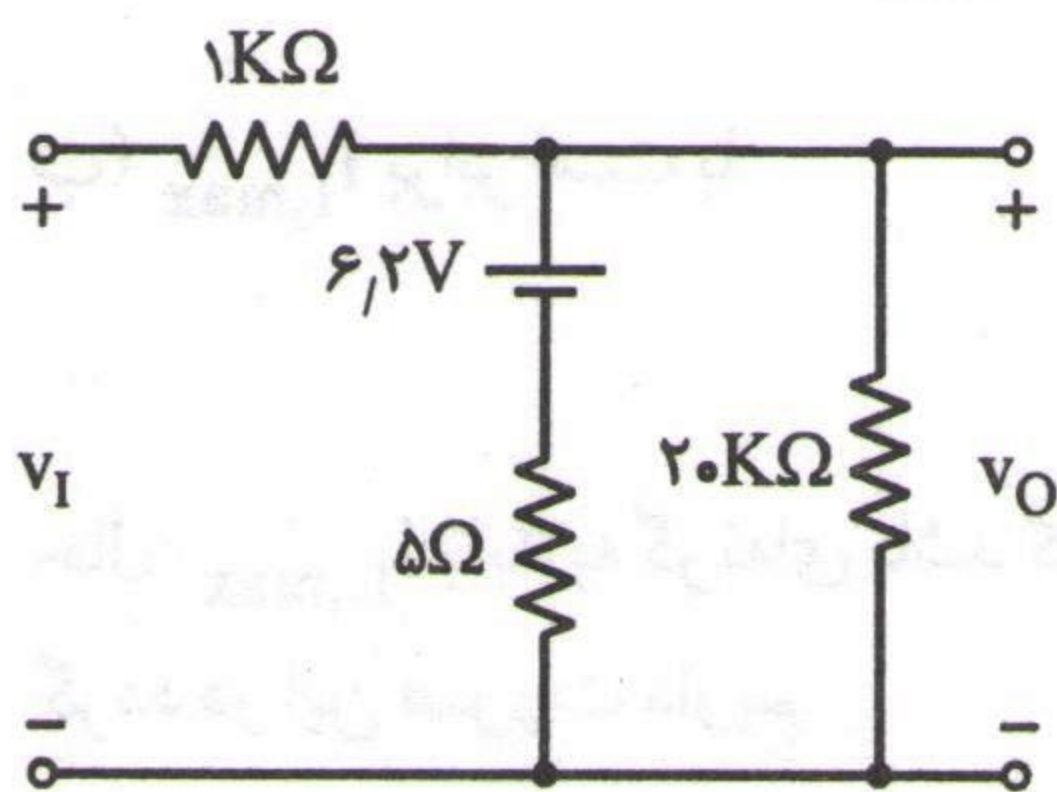
$$\Rightarrow \frac{v_{I, \min} - V_Z}{1} = \frac{V_Z}{R_{L, \min}} + I_K \Rightarrow R_{L, \min} \approx 3.88 \text{ K}\Omega$$

ب) مدار معادل شکل ۲-۱۴۷ را در نظر می‌گیریم. خروجی در این مدار برابر است با

$$v_O = \frac{v_I}{1000 + 5 \parallel 20000} (5 \parallel 20000) + \frac{6.2}{5 + 1000 \parallel 20000} \times (1000 \parallel 20000)$$

$$= 4.98 \times 10^{-3} v_I + 6.168 \text{ V}$$

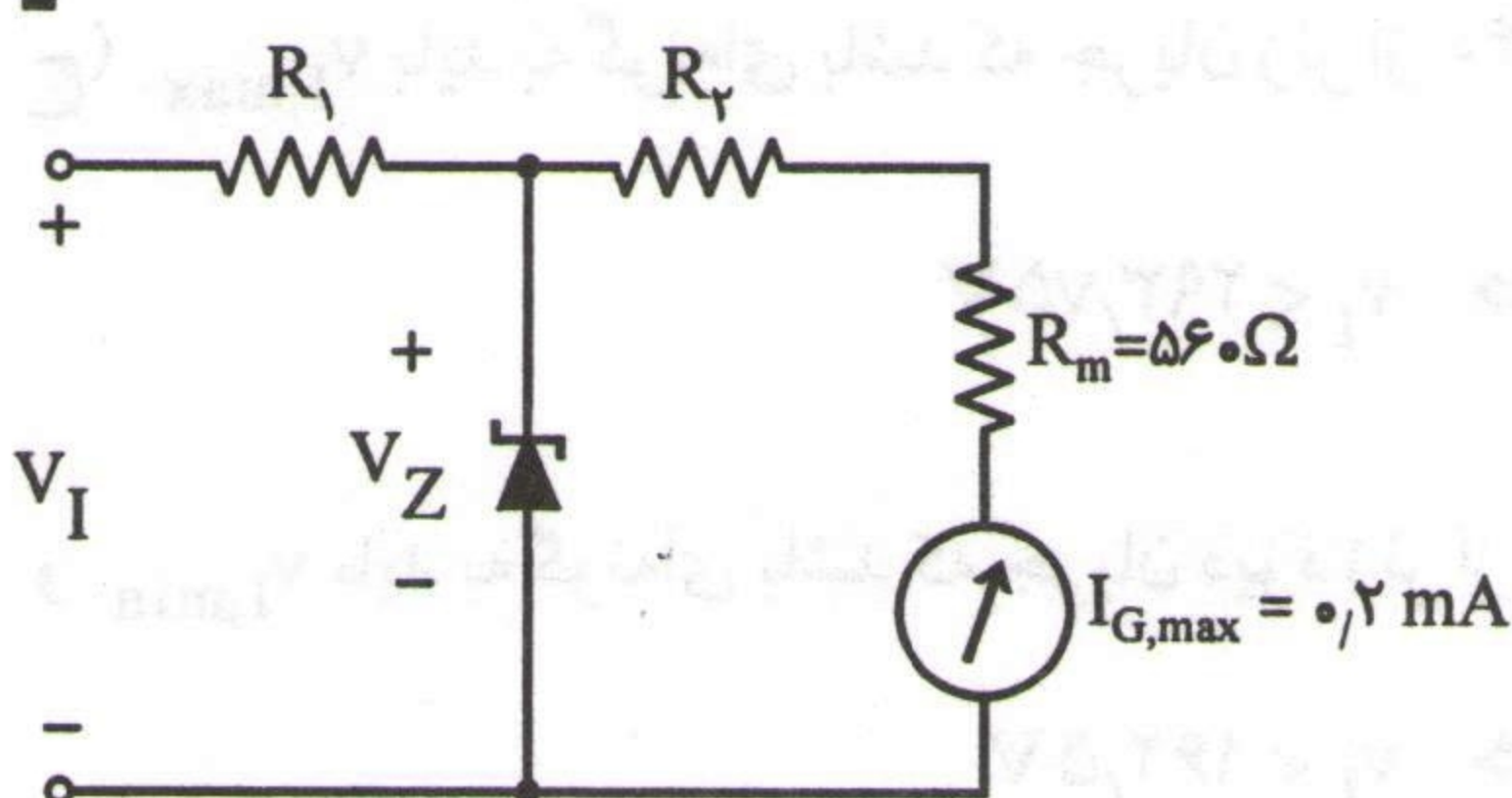
بنابراین



شکل ۲-۱۴۷

$$v_{O, \max} = 6.218 \text{ V}, \quad v_{O, \min} = 6.21 \text{ V}$$

$$\Rightarrow \Delta v_O = 0.008 \text{ V} \Rightarrow \frac{\Delta v_O}{\Delta v_I} \times 100 = 0.4 \%$$



شکل ۲-۱۴۸

۱۰۰. مدار شکل ۲-۱۴۸ یک ولت متر DC را نشان می‌دهد که در محدوده ۰ تا ۲۵ ولت کار می‌کند. مقاومت داخلی آن ۵۶۰ اهم بوده و حداکثر جریان عبوری گالوانومتر ۲۰۰ میکرو آمپر است. دیود زنر برای حفاظت

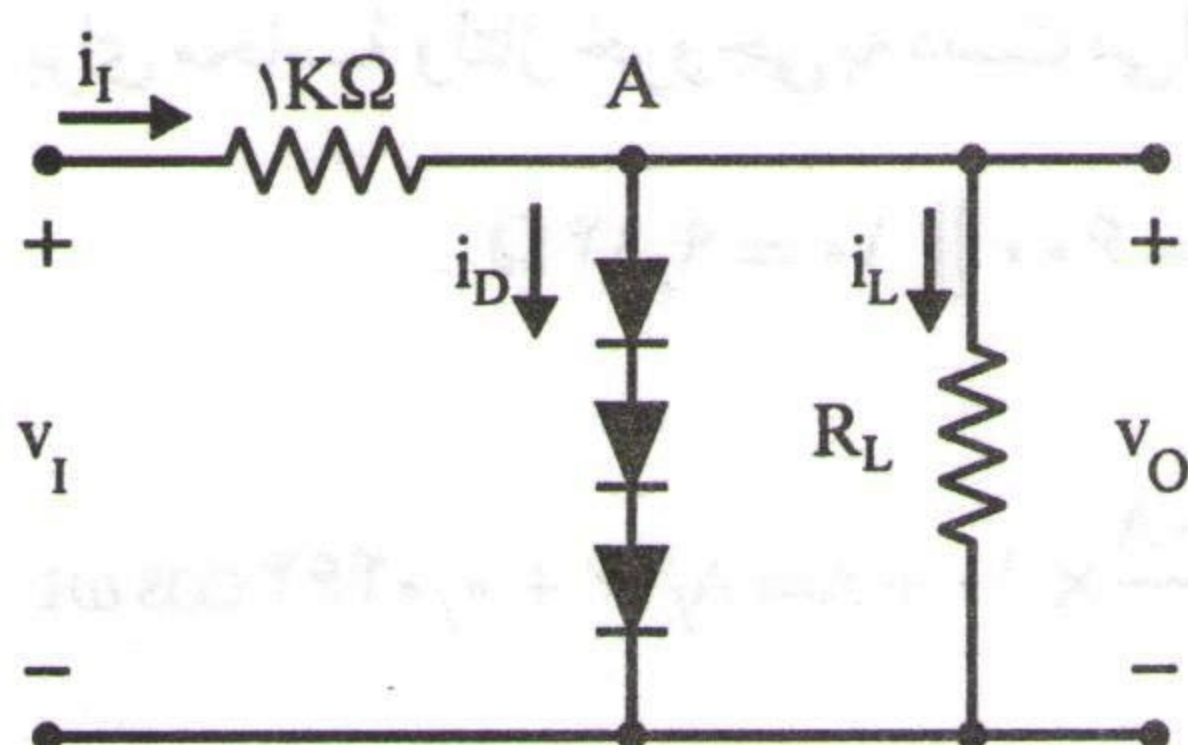
ولت متر به کار رفته تا در صورتی که V_I بیشتر از ۲۵ ولت گردد، هدایت کرده و جریان اضافی را عبور دهد. چنانچه ولتاژ شکست زنر ۲۰ ولت باشد، مقدار مقاومت‌های R_1 و R_2 را محاسبه نمایید.

حل: حداکثر جریان عبوری از گالوانومتر ($I_{G,max}$) به ازای حداکثر ولتاژ محدوده مورد نظر حاصل می‌شود، یعنی

$$I_{G,max} = \frac{V_{I,max}}{R_1 + R_2 + R_m} \Rightarrow 0.2 = \frac{25}{R_1 + R_2 + 0.56} \Rightarrow R_1 + R_2 = 124.44 K\Omega$$

به ازای ولتاژ ورودی بزرگ‌تر از ۲۵ ولت، دیود زنر باید هدایت کند تا به ولت متر آسیب نرسد. در این صورت داریم

$$V_Z = R_2 I_{G,max} + R_m I_{G,max} \Rightarrow R_2 = 99.44 K\Omega \Rightarrow R_1 = 25 K\Omega$$



۱۰۱. در مدار تنظیم کننده ولتاژ شکل ۲-۱۴۹ از دیودهای معمولی مشابه با $V_D(on) = 0.7V$ استفاده شده است. در صورتی که ولتاژ ۴ ولتی ورودی به اندازه $\pm 0.5V$ تغییرات داشته باشد، تغییرات ولتاژ خروجی چه مقدار خواهد بود؟ $R_L \gg 3r_d$ ، لازم است r_d محاسبه شود. ($V_T = 26mV$ و $\eta = 2$)

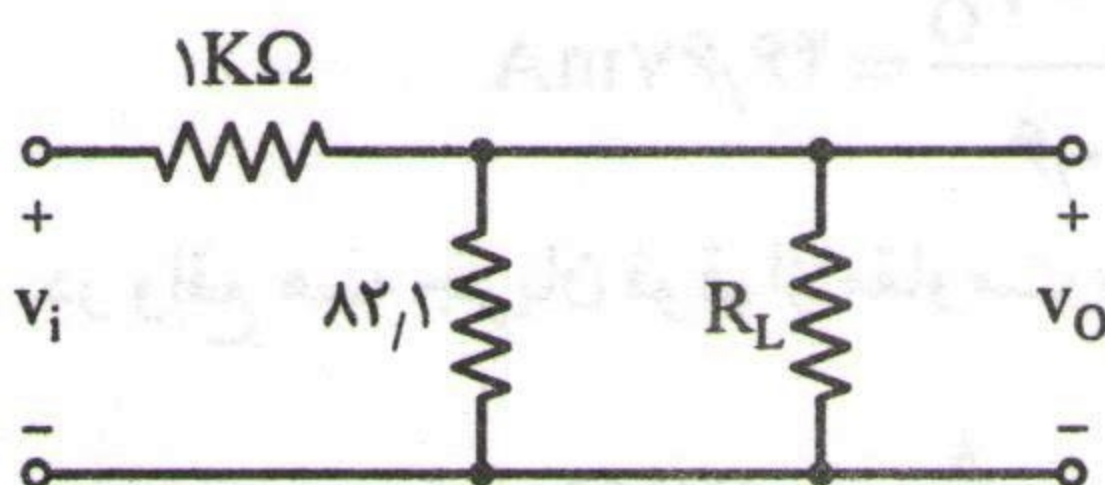
شکل ۲-۱۴۹

حل: ابتدا با محاسبه جریان DC دیودها، مقاومت دینامیکی هر دیود را به دست می‌آوریم.

$$V_A = 3 \times 0.7 = 2.1V$$

$$KCL: I = I_D + I_L \Rightarrow \frac{4 - 2.1}{1} = I_D + \frac{2.1}{R_L} \approx I_D$$

$$\Rightarrow I_D = 1.9mA \Rightarrow r_d = \frac{\eta V_T}{I_D} = 27.37\Omega$$



شکل ۲-۱۵۰

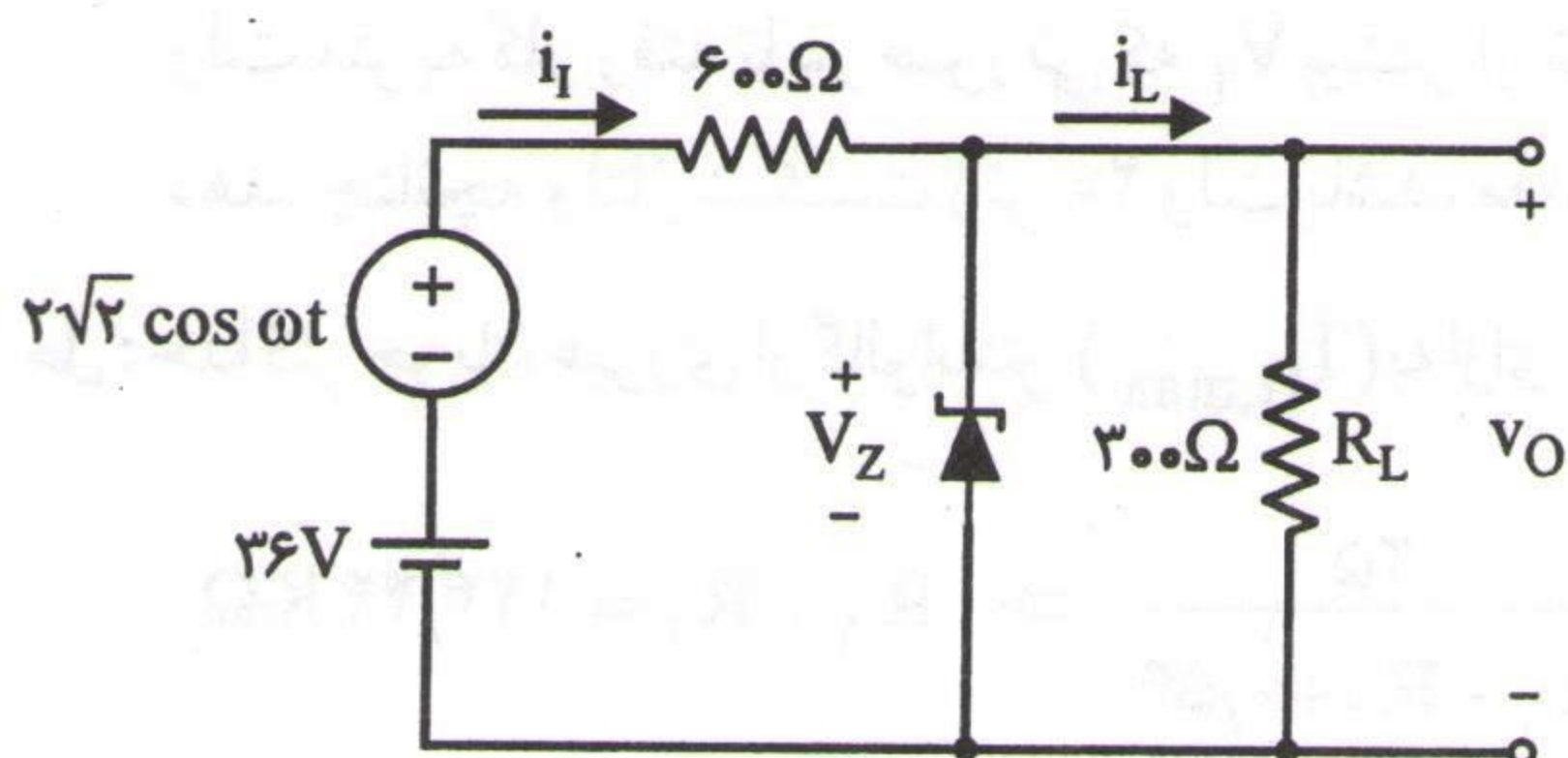
مدار معادل ac به صورت شکل ۲-۱۵۰ خواهد بود.

$$v_o \approx \frac{v_i}{1000 + 82.1} \times 82.1 = 0.0758 v_i$$

پس تغییرات خروجی برابر است با

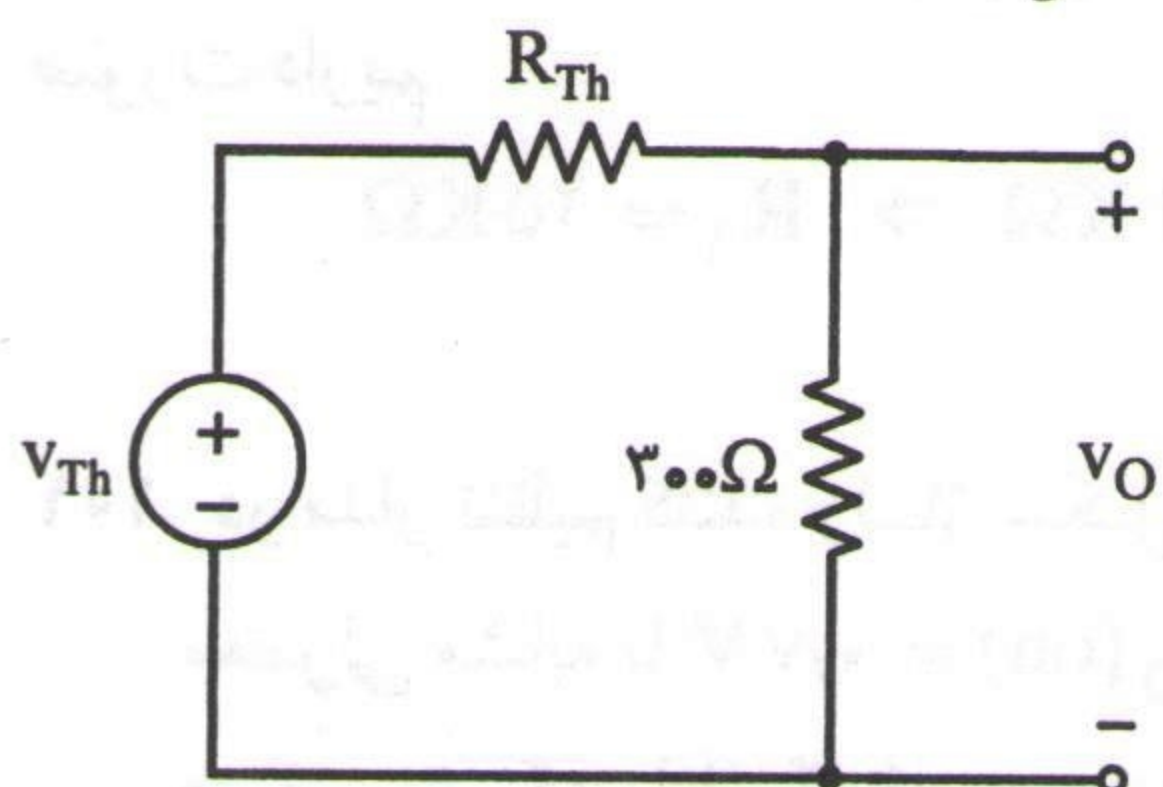
$$\Delta v_o = 0.0758 \times (\pm 0.5) = \pm 38mV$$

۱۰۲. در مدار تنظیم ولتاژ شکل ۲-۱۵۱ ولتاژ ورودی شامل ولتاژ ۳۶ ولت مستقیم و ریبیل با دامنه $2\sqrt{2}$ ولت می‌باشد. دیود زنر دارای $r_Z = 10\Omega$ ، $V_Z = 8V$ و $I_K = 0$ می‌باشد.



شکل ۲-۱۵۱

- (الف) ولتاژ مستقیم و رپل خروجی را بیابید.
 (ب) مقاومت خروجی تنظیم کننده ولتاژ و توان تلفاتی دیود زنر را تعیین کنید.
 (ج) حداکثر جریان DC خروجی را محاسبه کنید.
 (د) تحت چه شرایطی دیود زنر حداکثر توان را تلف می کند.



شکل ۲-۱۵۲

حل: (الف) با توجه به اینکه دیود زنر معادل یک منبع ۸ ولتی سری با مقاومت ۱۰ اهم می باشد، مدار معادل تونن از دید بار را برای محاسبه ولتاژ خروجی به دست می آوریم (شکل ۲-۱۵۲).

$$R_{Th} = 600 \parallel 10 = 9,84 \Omega$$

$$V_{Th} = \frac{36 + 2\sqrt{2}\cos\omega t - 8}{600 + 10} \times 10 + 8 = 8,46 + 0,0464\cos\omega t$$

$$v_O = \frac{V_{Th}}{9,84 + 300} \times 300 = 0,45\cos\omega t + 8,19 \text{ V}$$

بنابراین ولتاژ مستقیم و رپل خروجی برابر است با

$$V_{O,dc} = 8,19 \text{ V} , \quad V_r = 90 \text{ mV}$$

$$R_o = 10 \parallel 600 = 9,84 \Omega$$

(ب)

$$I_Z = \frac{V_O - V_Z}{r_Z} = 19 \text{ mA} , \quad P_Z = r_Z I_Z^2 + V_Z I_Z \Rightarrow P_Z = 155,6 \text{ mW}$$

(ج) حداکثر جریان خروجی وقتی است که جریان دیود زنر حداقل مقدار خود یعنی صفر را اختیار کند، یعنی

$$I_K = 0 \Rightarrow V_O = V_Z = 8 \text{ V} \Rightarrow I_{L,max} = \frac{36 - V_O}{0,6} = 46,67 \text{ mA}$$

در واقع همه جریان فوق از مقاومت بار می گذرد و در نتیجه حداکثر جریان بار برابر ۴۶,۶۷mA است.

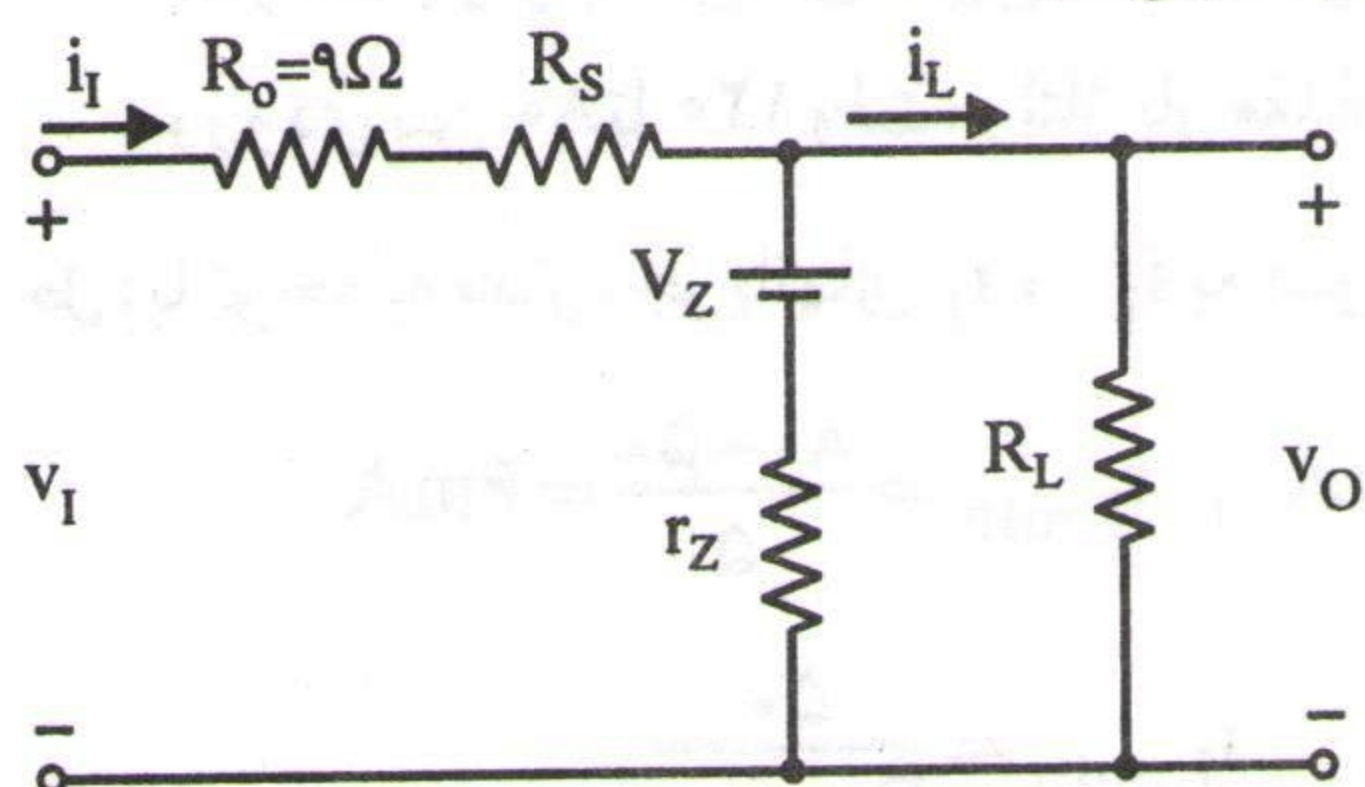
$$I_{L,max} = 46,67 \text{ mA} , \quad R_{L,min} = \frac{V_O}{I_{L,max}} = \frac{8}{46,67} = 171 \Omega$$

(د) چنانچه مقاومت بار را بی نهایت فرض کنیم حداکثر جریان از دیود زنر عبور خواهد کرد و داریم

$$P_{Z,max} = V_Z I_{Z,max} + r_Z I_{Z,max}^2 , \quad I_L = 0 , \quad I_{Z,max} = \frac{36 - V_Z}{0,6 + r_Z} = 45,9 \text{ mA}$$

$$\Rightarrow P_{Z,max} = 388,3 \text{ mW}$$

۱۰۳. یک منبع DC تثبیت نشده با مقاومت داخلی 9Ω ، ولتاژ خروجی از $20V$ تا $30V$ را تولید می‌کند. مداری طرح کنید که به کمک این منبع، به ازای جریان بار از صفر تا $100mA$ ، ولتاژ خروجی بین $8V$ تا $8.4V$ باقی بماند. عناصر مدار و مشخصات دیود زنر را تعیین کنید.



حل: فرض کنید دیود زنر دارای مقاومت داخلی r_Z ، ولتاژ شکست V_Z و $I_K = 5mA$ باشد. در این صورت با توجه به مدار شکل ۲-۱۵۳ داریم

$$v_O = r_Z I_Z + V_Z$$

شکل ۲-۱۵۳

جهت محاسبه R_s در بدترین شرایط باید داشته باشیم

$$i_{I,min} = i_{L,max} + I_K = 100 + 5 = 105, \quad v_{O,min} = r_Z I_K + V_Z = 8V$$

$$\Rightarrow i_{I,min} = \frac{v_{I,min} - 8}{R_o + R_s} = 105 \Rightarrow \frac{20 - 8}{9 + R_s} = 105 \Rightarrow R_s = 105\Omega$$

برای محاسبه حداکثر جریان دیود داریم

$$i_{I,max} = i_{L,min} + I_{Z,max}, \quad v_{O,max} = r_Z I_{Z,max} + V_Z = 8.4V$$

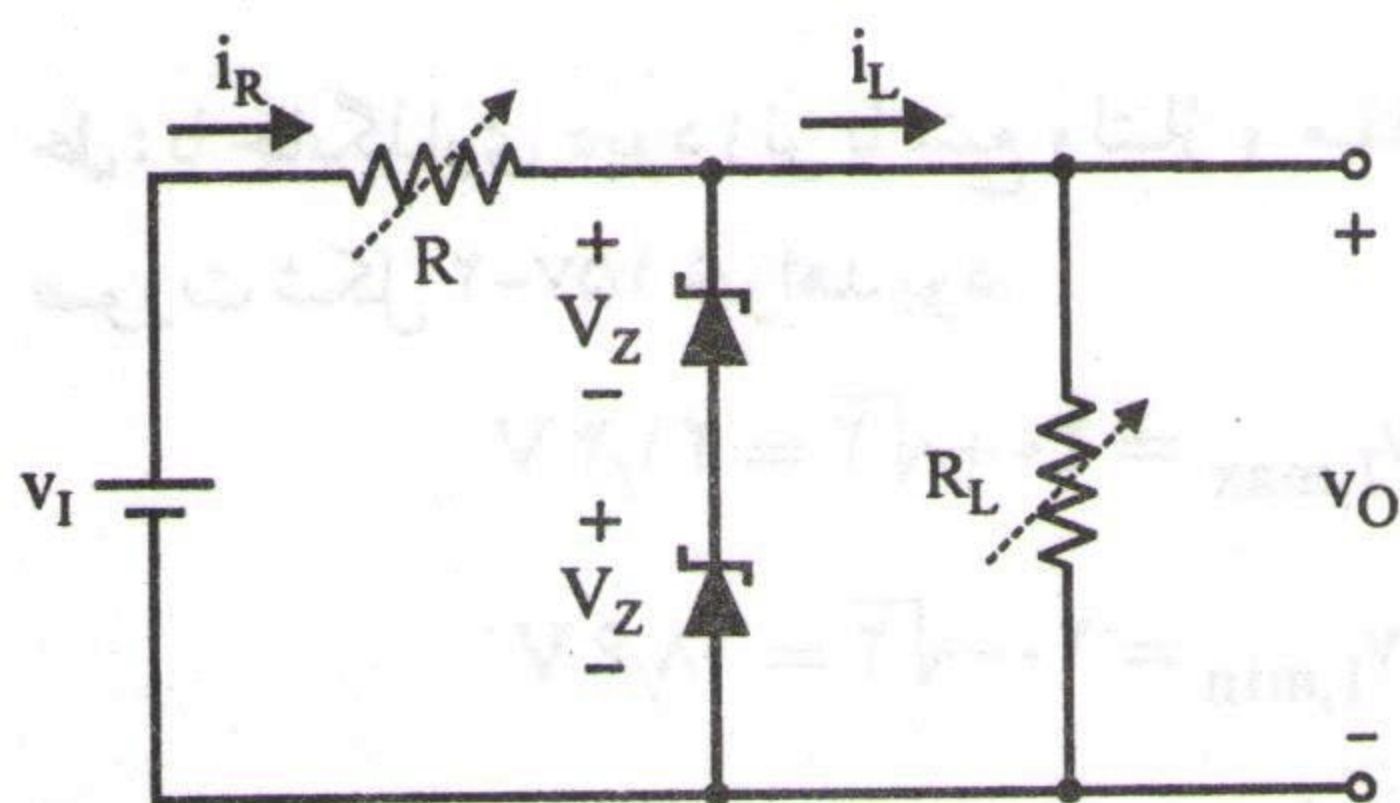
$$\Rightarrow i_{I,max} = \frac{v_{I,max} - 8.4}{R_o + R_s} = 0 + I_{Z,max} \Rightarrow I_{Z,max} = 189.5mA$$

اما برای محاسبه r_Z و V_Z از دو معادله و دو مجهول زیر داریم:

$$V_Z + r_Z I_K = v_{O,min}, \quad V_Z + r_Z I_{Z,max} = v_{O,max}$$

$$\Rightarrow V_Z = 8V, \quad r_Z = 2.17\Omega$$

$$P_{Z,max} = v_{O,max} I_{Z,max} = 1.592W$$



شکل ۲-۱۵۴

۱۰۴. در مدار تنظیم کننده ولتاژ شکل ۲-۱۵۴ دیویدهای

زنر مشابه و دارای ولتاژ شکست V_Z در فاصله

$I_K < I_Z < I_{Z,max}$ می‌باشند. حداقل مقدار R_L

را بر حسب پارامترهای مدار به دست آورید.

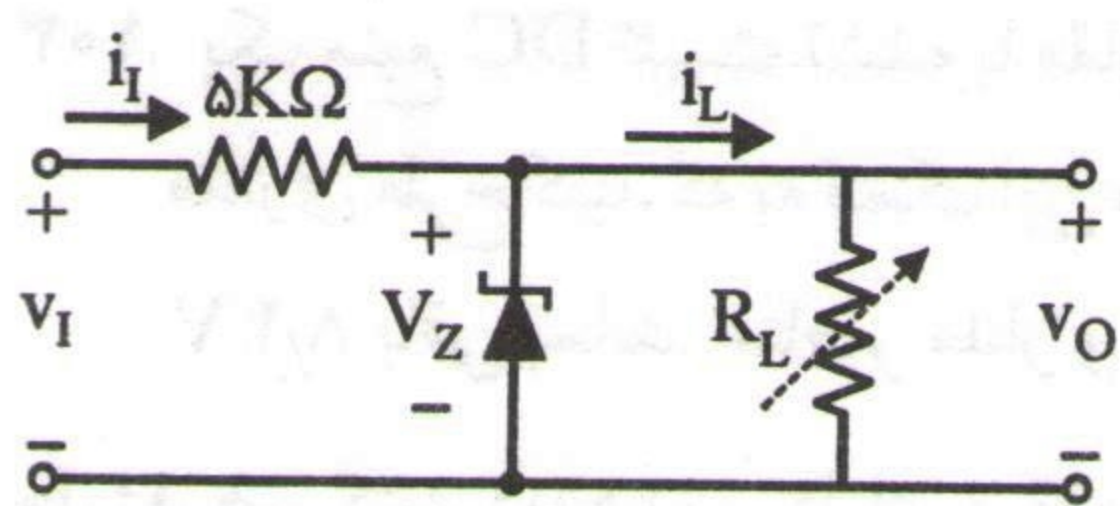
حل: در صورتی که R_L حداقل باشد، i_L حداکثر

است. بنابراین در بدترین شرایط باید حداقل جریان

زنر تأمین گردد؛ یعنی

$$i_{R,min} = I_K + i_{L,max} \Rightarrow \frac{v_{I,min} - 2V_Z}{R_{max}} = I_K + \frac{2V_Z}{R_{L,min}}$$

$$\Rightarrow R_{L,min} = 2V_Z \left[\frac{v_{I,min} - 2V_Z}{R_{max}} - I_K \right]^{-1}$$



شکل ۲-۱۵۵

۱۰۵. در مدار تنظیم کننده ولتاژ شکل ۲-۱۵۵ از یک دیود زنر ۵۰ ولتی ایده‌آل ($I_K = 0, r_Z = 0$) استفاده شده است. محدوده مقاومت بار را به گونه‌ای تعیین کنید که برای تغییرات ولتاژ ورودی بین ۸۰ تا ۱۲۰ ولت، ولتاژ بار مقدار ثابتی باشد.

حل: با توجه به مدار، جریانهای i_I و i_L به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$i_I = \frac{v_I - V_Z}{5} \Rightarrow i_{I,max} = \frac{120 - 50}{5} = 14 \text{ mA}, \quad i_{I,min} = \frac{80 - 50}{5} = 6 \text{ mA}$$

$$i_L = \frac{V_Z}{R_L} \Rightarrow i_{L,max} = \frac{50}{R_{L,min}}, \quad i_{L,min} = \frac{50}{R_{L,max}}$$

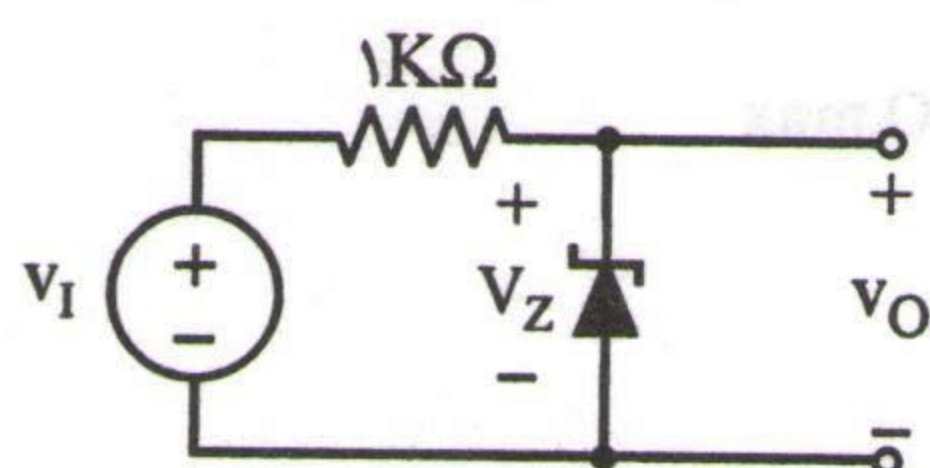
برای اینکه دیود در ناحیه شکست قرار گیرد باید حداقل جریان لازم برای دیود تأمین گردد.

$$i_{I,min} = I_K + i_{L,max} \Rightarrow 6 = 0 + \frac{50}{R_{L,min}} \Rightarrow R_{L,min} = 8.33 \text{ K}\Omega$$

حداکثر جریان دیود زنر به ازای R_L بی‌نهایت برابر است با

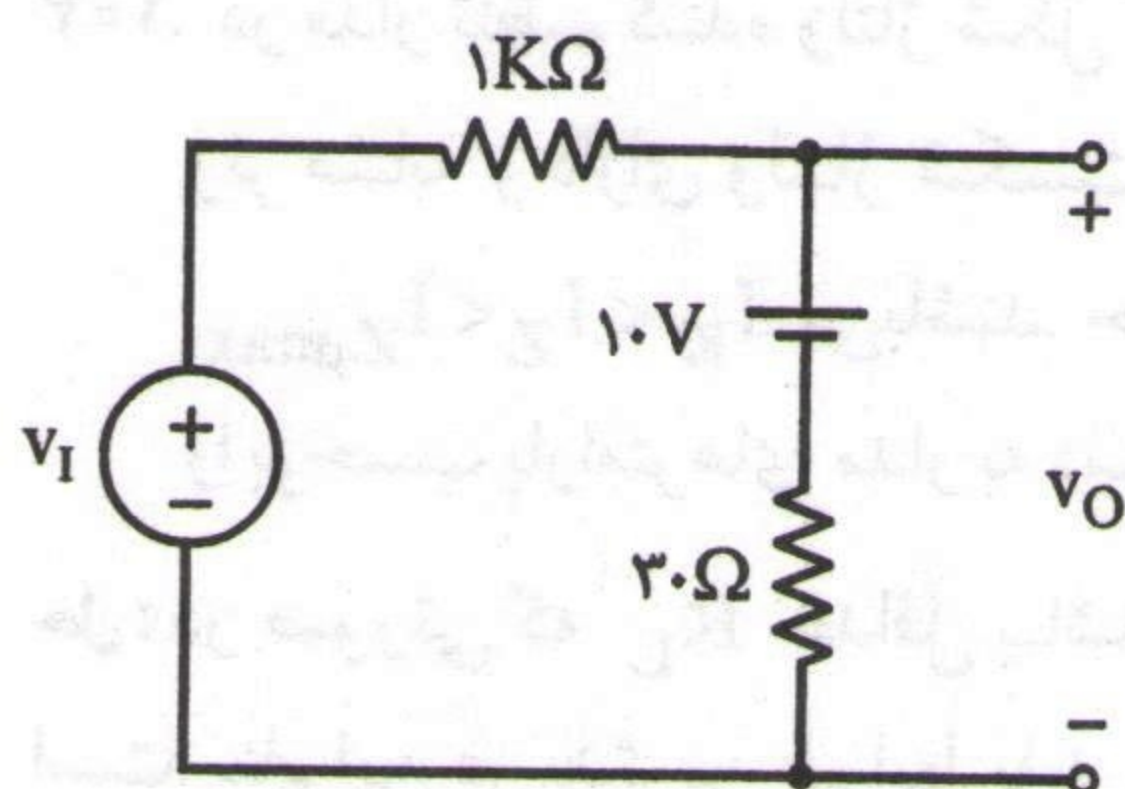
$$I_{Z,max} = i_{I,max} - i_{L,min} = 14 - \frac{50}{R_{L,max}} = 14 \text{ mA}$$

بنابراین با محدوده مقاومت R_L بین ۸.۳۳ کیلو اهم تا حالت اتصال باز ($R_{L,max} = \infty$) جریان زنر بین صفر تا ۱۴ میلی آمپر تغییر می‌کند.



شکل ۲-۱۵۶

۱۰۶. در مدار شکل ۲-۱۵۶ ولتاژ شکست زنر برابر ۱۰ ولت بوده و مقاومت داخلی آن برابر ۳۰ Ω است. برای ورودی $v_I = 20 + \sqrt{2} \cos \omega t \text{ V}$ ضریب ریبیل ولتاژهای ورودی و خروجی را بیابید.



شکل ۲-۱۵۷

حل: با جایگذاری دیود زنر با منبع ولتاژ و مقاومت، مدار به صورت شکل ۲-۱۵۷ خواهد بود.

$$v_{I,max} = 20 + \sqrt{2} = 21.4 \text{ V}$$

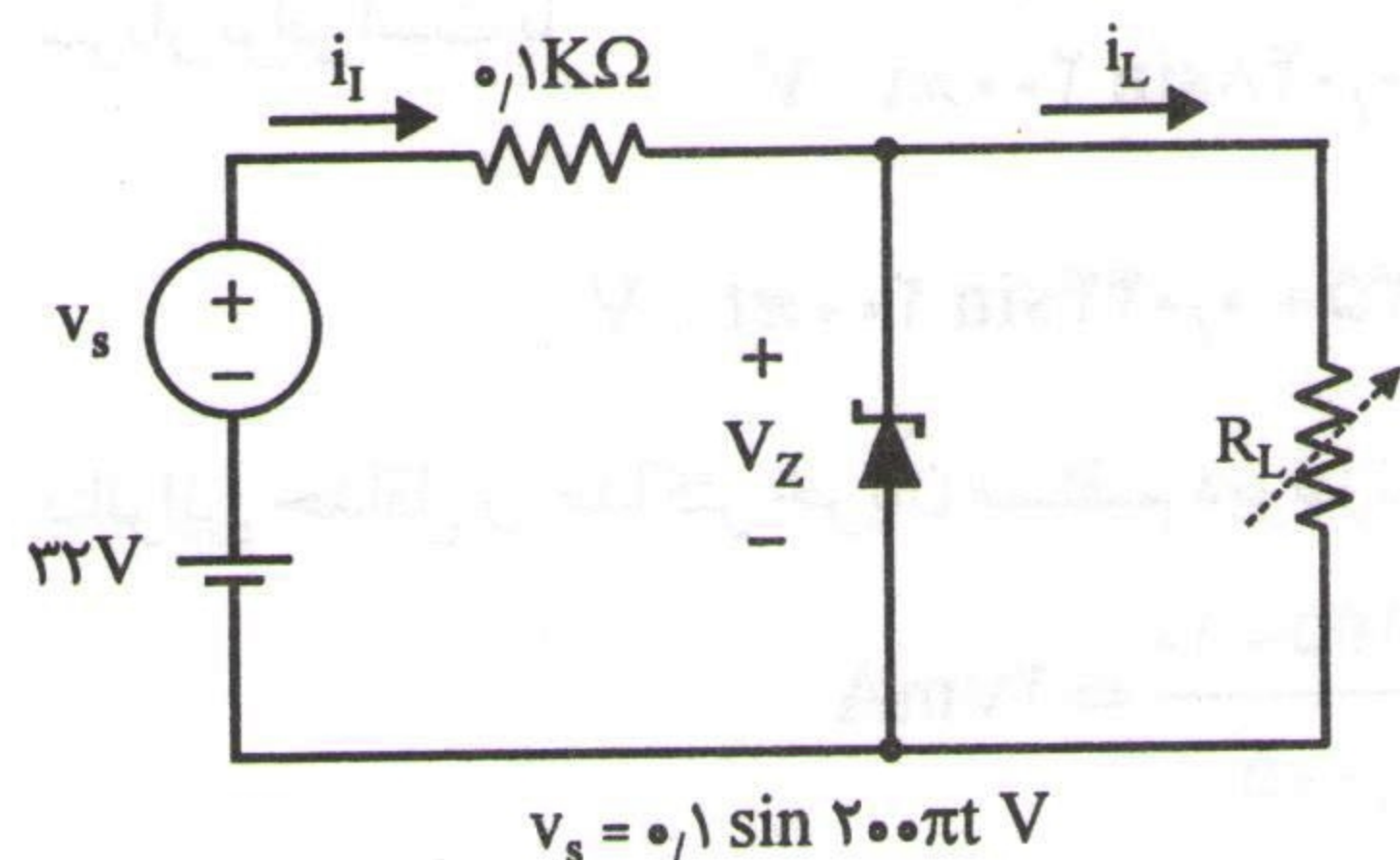
$$v_{I,min} = 20 - \sqrt{2} = 18.6 \text{ V}$$

$$v_O = \frac{v_I - 10}{1000 + 30} \times 30 + 10 = 10.29 + 0.041 \cos \omega t$$

$$r.f.in = \frac{v_{r,in}(rms)}{V_I} = \frac{\sqrt{2}/\sqrt{2}}{20} \times 100 = 5\%$$

$$r.f.out = \frac{v_{r,out}(rms)}{V_O} = \frac{0.041/\sqrt{2}}{10.29} \times 100 = 0.28\%$$

۱۰۷. در مدار شکل ۱۵۸-۲ مقاومت بار از 50Ω تا 1000Ω متغیر است. دیود زنر دارای $r_Z = 0$ و $V_Z = 10$ ولت می باشد.



شکل ۱۵۸-۲

الف) حداقل و حداکثر جریان مستقیم دیود زنر را محاسبه کنید.

ب) ضریب رپل دو سر بار را به دست آورید.

ج) بندهای (الف) و (ب) را با فرض $r_Z = 50\Omega$ تکرار نمایید. ضریب رپل را در دو حالت بار حداقل و حداکثر محاسبه کنید.

حل: الف) مقادیر حداقل و حداکثر جریان DC دیود زنر به صورت زیر محاسبه می شوند:

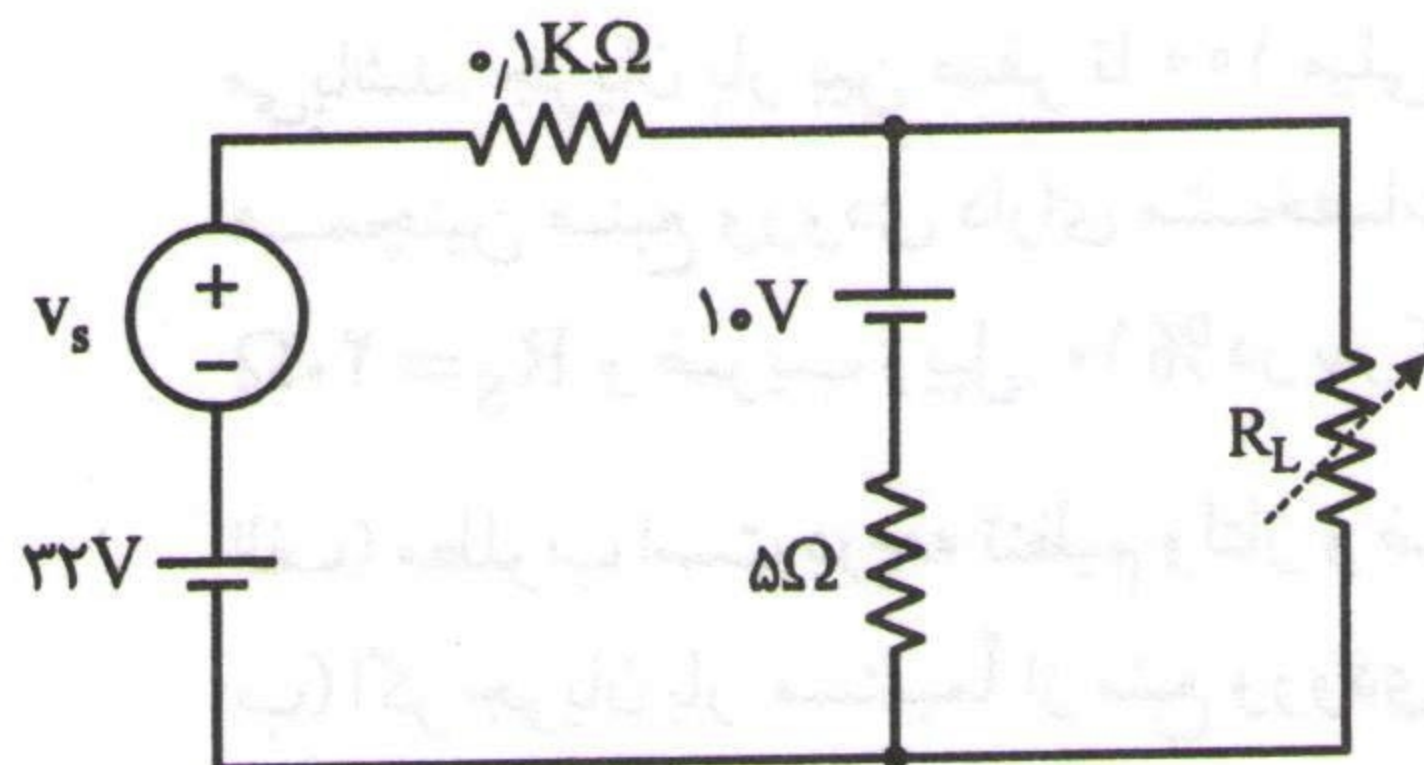
$$I_{Z,max} = i_{I,max} - i_{L,min} = \frac{32 - 10}{0.1} - \frac{10}{1} = 210 \text{ mA}$$

$$I_K = i_{I,min} - i_{L,max} = \frac{32 - 10}{0.1} - \frac{10}{0.05} = 20 \text{ mA}$$

ب) ولتاژ مستقیم دو سر بار به ازای تمام مقادیر R_L ثابت و برابر ۱۰ ولت می باشد. بنابراین به دلیل ایده آل گرفتن دیود زنر، ضریب رپل دو سر بار صفر است. منبع v_s باعث ایجاد نوساناتی در جریان زنر می گردد. به عنوان مثال به ازای $R_L = 50\Omega$ داریم

$$i_Z = I_K + i_z = 20 + \frac{v_s}{0.1} = 20 + \sin 200\pi t \text{ mA}$$

ج) برای محاسبه حداقل و حداکثر جریان مستقیم دیود زنر مدار شکل ۱۵۹-۲ را در نظر بگیرید. با به دست آوردن مدار معادل تونن از دو سر بار داریم



شکل ۱۵۹-۲

$$V_{Th} = \frac{32 + v_s - 10}{100 + 5} \times 5 + 10 = 11.1 + 0.048 v_s \text{ V}$$

$$R_{Th} = 100 \parallel 5 = 4.762 \Omega$$

بنابراین جریان بار برابر است با

$$i_{L,max} = \frac{V_{Th}}{R_{Th} + R_{L,min}} = 2.27 + 0.008 \sin 200\pi t \text{ mA}$$

$$i_{L,min} = \frac{V_{Th}}{R_{Th} + R_{L,max}} = 11 + 0.048 \sin 200\pi t \text{ mA}$$

در نتیجه جریان مستقیم بار بین ۱۱ تا ۲۰٫۲۷ میلی آمپر متغیر می‌باشد. مقادیر حداکثر و حداقل ولتاژ دو سربار برابر است با

$$V_{L,max} = R_{L,max} i_{L,min} = 11 + 0.48 \sin 200\pi t \text{ V}$$

$$V_{L,min} = R_{L,min} i_{L,max} = 10.135 + 0.44 \sin 200\pi t \text{ V}$$

بنابراین حداقل و حداکثر جریان مستقیم دیود زنر برابر است با

$$I_K = \frac{V_{L,min} - V_Z}{r_Z} = \frac{10.135 - 10}{0.005} = 27 \text{ mA}$$

$$I_{Z,max} = \frac{V_{L,max} - V_Z}{r_Z} = \frac{11 - 10}{0.005} = 200 \text{ mA}$$

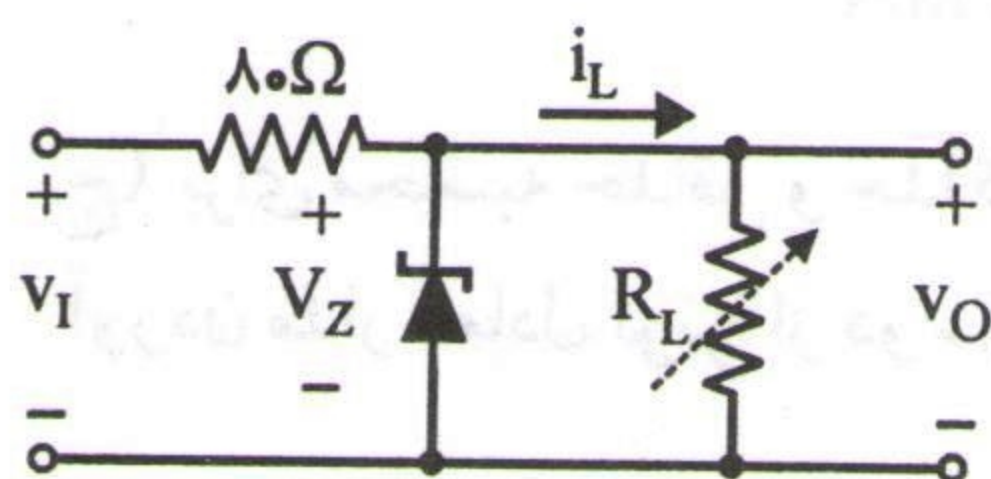
به این ترتیب با تغییر جریان مستقیم بار از ۱۱ تا ۲۰٫۲۷ میلی آمپر، ولتاژ DC خروجی بین ۱۰٫۱۳۵ تا ۱۱ ولت و جریان DC دیود زنر بین ۲۷ تا ۲۰۰ میلی آمپر تغییر خواهند کرد.

ضریب رپل خروجی در $R_L = 1 \text{ K}\Omega$ با توجه به V_L در این حالت، به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\text{r.f. \%} = \frac{v_r(\text{rms})}{V_L} \times 100 = \frac{0.48/\sqrt{2}}{11} \times 100 \approx 0.31\%$$

و در $R_L = 50 \Omega$ داریم

$$\text{r.f. \%} = \frac{v_r(\text{rms})}{V_L} \times 100 = \frac{0.44/\sqrt{2}}{10.135} \times 100 \approx 0.31\%$$



شکل ۲-۱۶۰

۱۰۸. در مدار تنظیم کننده ولتاژ شکل ۲-۱۶۰، دیود زنر دارای

$r_Z = 5 \Omega$ و $V_Z = 7 \text{ V}$ ، $I_{Z,max} = 250 \text{ mA}$ ، $I_K = 0$

می‌باشد. جریان بار بین صفر تا ۱۰۰ میلی آمپر متغیر بوده و

همچنین منبع ورودی دارای مشخصات $V(NL) = 30 \text{ V}$ ،

$R_S = 20 \Omega$ و ضریب رپل ۱۰٪ در بار کامل است.

الف) مطلوب است درجه تنظیم ولتاژ و ضریب رپل خروجی در بار کامل.

ب) اگر جریان بار مستقیماً از منبع ورودی گرفته شود، درجه تنظیم ولتاژ در بار کامل چقدر خواهد بود؟

حل: الف) برای منبع ورودی در بار کامل داریم

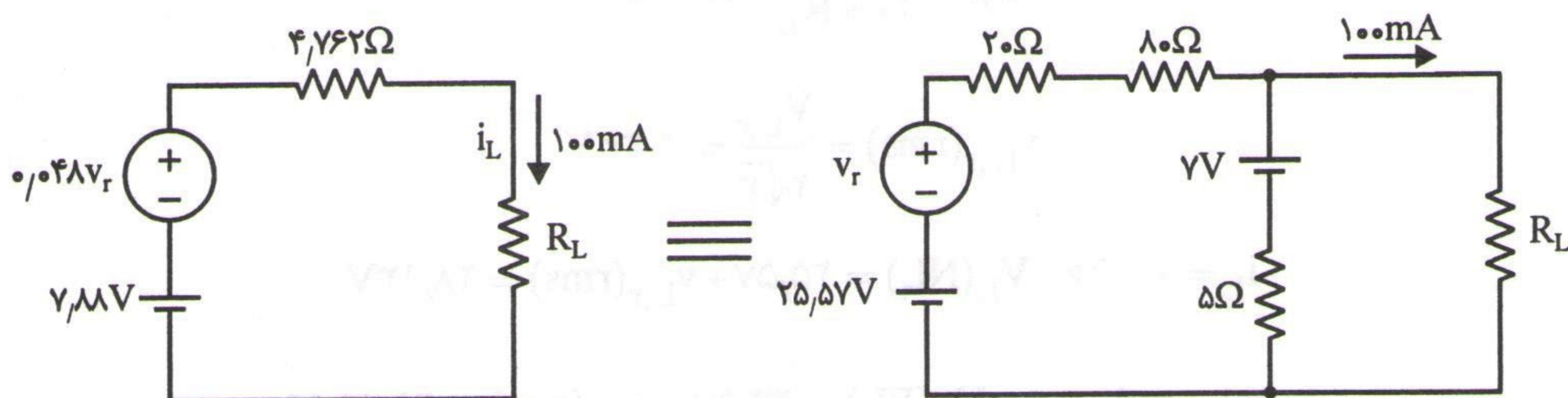
$$\text{r.f. \%} = \frac{v_r(\text{rms})}{V_{dc}} \times 100 = 10 \Rightarrow v_r(\text{rms}) = 0.1 V_{dc}$$

از طرفی داریم

$$V_{dc} \approx V(NL) - \frac{V_r}{2} = 30 - \frac{2\sqrt{3}v_r(\text{rms})}{2} = 30 - 0.1\sqrt{3}V_{dc} \Rightarrow V_{dc} = 25.57 \text{ V}$$

$$v_r(\text{rms}) = 0.1 V_{dc} = 2.56 \text{ V}$$

مدار معادل دربار کامل را می توان به صورت شکل ۱۶۱-۲ در نظر گرفت



شکل ۱۶۱-۲

حال با در نظر گرفتن مقادیر DC، مقدار R_L را به دست می آوریم.

$$0.048 = (4.762 + R_L) \times 100 \times 10^{-3} \Rightarrow R_L = 74\Omega$$

بنابراین مقدار ولتاژ DC خروجی عبارت است از

$$V_L = R_L I_L = 7.4V$$

و مقدار ولتاژ رپیل خروجی برابر است با

$$V_{L,r} = \frac{0.048V_r}{4.762 + 74} \times 74 = 0.045V_r$$

همچنین برای مقدار مؤثر رپیل خروجی داریم

$$V_{L,r}(\text{rms}) = 0.045 \times V_r(\text{rms}) = 0.045 \times 2.56 = 0.115V$$

به این ترتیب ضریب رپیل خروجی در بار کامل برابر است با

$$\text{r.f. \%} = \frac{V_{L,r}(\text{rms})}{V_L} \times 100 = 1.6\%$$

برای محاسبه درجه تنظیم ولتاژ خروجی در بار کامل، با توجه به ناچیز بودن ضریب رپیل می توان از رپیل خروجی صرف نظر کرد. بنابراین با توجه به مدار معادل داریم

$$i_L = 0 \Rightarrow V_L(\text{NL}) = 7.88V, \quad i_L = 100\text{mA} \Rightarrow V_L(\text{FL}) = 7.4V$$

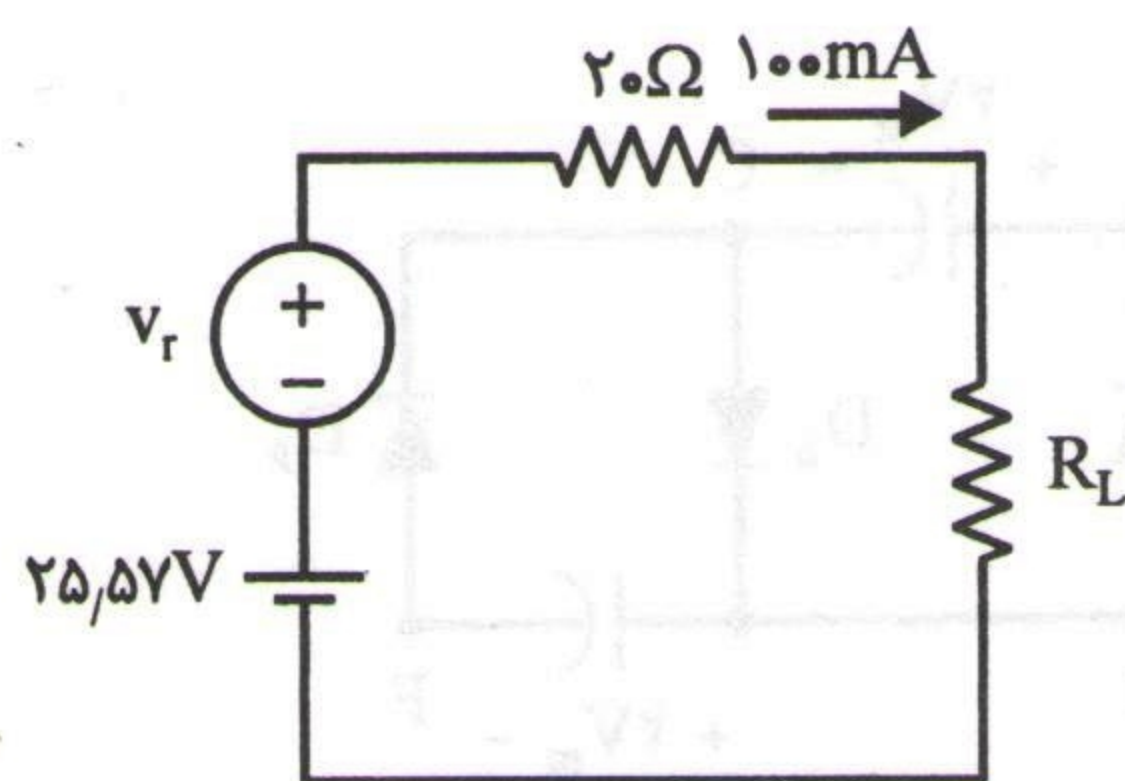
$$\text{V.R \%} = \frac{V_L(\text{NL}) - V_L(\text{FL})}{V_L(\text{FL})} \times 100 = 6.5\%$$

ب) مدار در این حالت به صورت شکل ۱۶۲-۲ خواهد بود.

$$2.56 = (R_L + 20) \times 0.1 \Rightarrow R_L = 235.7\Omega$$

$$V_L = R_L I_L = 23.57V$$

$$V_r = 2\sqrt{3}V_r(\text{rms}) = 2\sqrt{3} \times 2.56 = 8.868V$$



شکل ۱۶۲-۲

$$V_{L,r} = \frac{V_r}{2 + R_L} R_L = 17.17 V$$

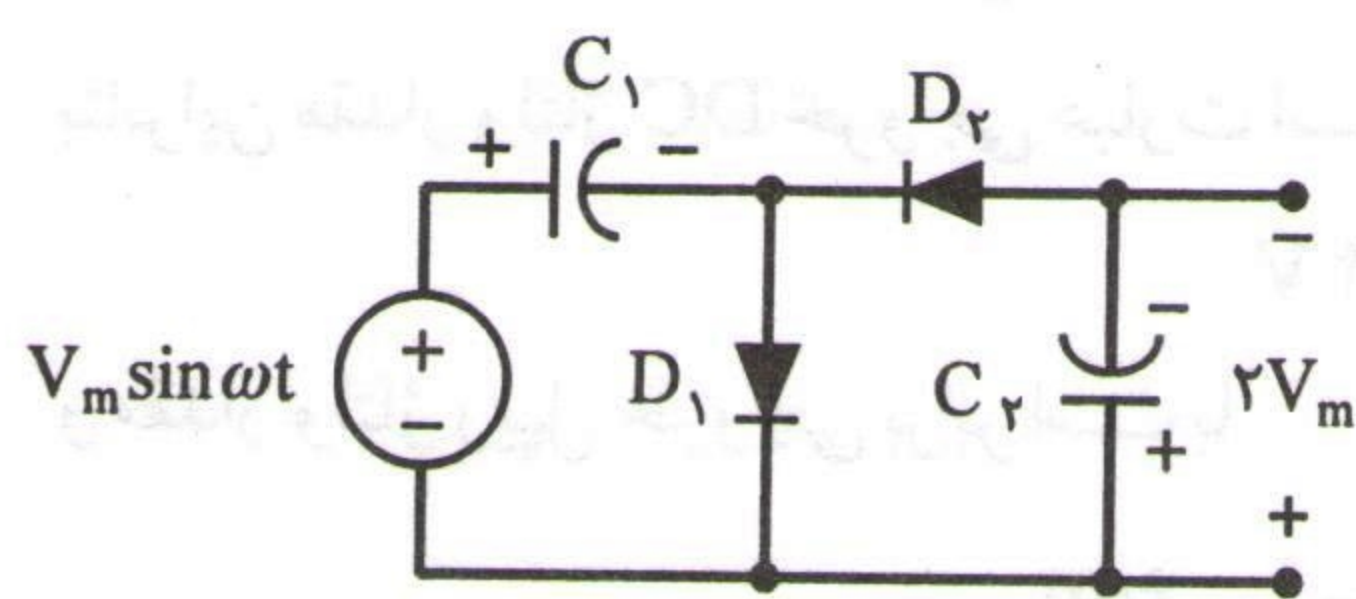
$$v_{L,r}(rms) = \frac{V_{L,r}}{2\sqrt{3}} = 2.36 V$$

$$i_L = 0 \Rightarrow V_L(NL) = 25.57 + v_{L,r}(rms) = 28.13 V$$

$$i_L = 100 mA \Rightarrow V_L(FL) = 23.57 + v_{L,r}(rms) = 25.39 V$$

$$V.R \% = \frac{V_L(NL) - V_L(FL)}{V_L(FL)} \times 100 = 8.5 \%$$

۱۰۹. مدار شکل ۲-۱۶۳ را در نظر بگیرید.



شکل ۲-۱۶۳

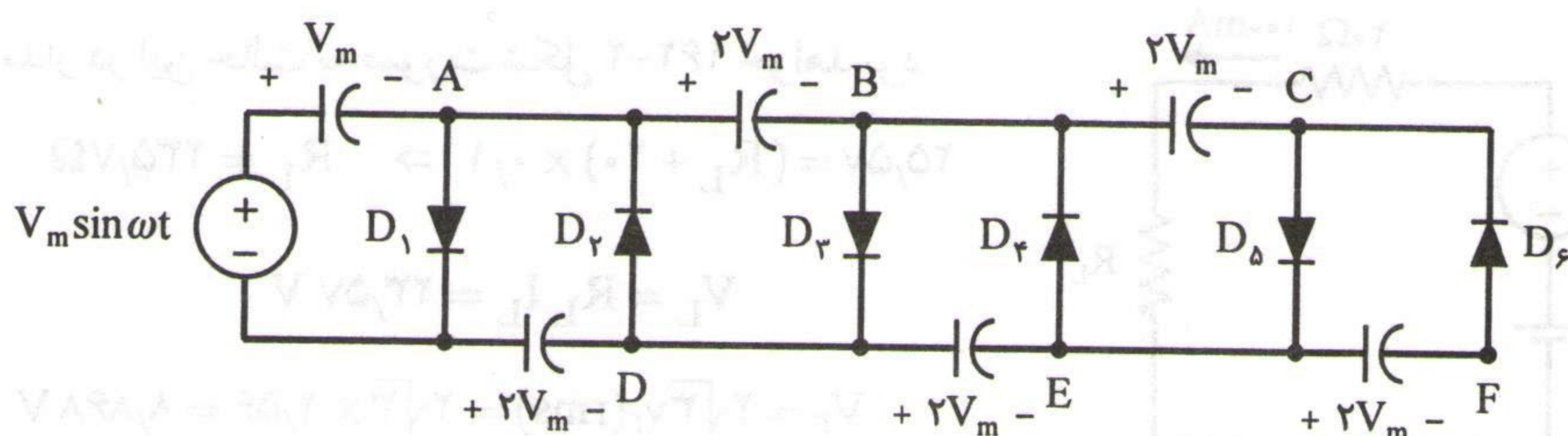
الف) توضیح دهید که چگونه این مدار به صورت یک مدار دو برابر کننده ولتاژ عمل می‌کند؟
ب) چگونه می‌توان با تکمیل این مدار یک مدار چهار برابر کننده ولتاژ به دست آورد؟

حل: الف) با فرض اینکه خازن‌ها شارژ نشده‌اند، در نیم سیکل مثبت ولتاژ ورودی، دیود D_1 هدایت کرده و خازن C_1 به اندازه V_m و با پلاریته نشان داده شده شارژ می‌گردد. این اتفاق در یک چهارم سیکل اول صورت می‌گیرد و از آن به بعد دیود D_1 قطع می‌شود. با شروع نیم سیکل منفی، دیود D_2 به صورت مستقیم بایاس شده و هدایت می‌کند. در نتیجه خازن C_2 با پلاریته نشان داده شارژ می‌گردد تا مقدار آن به $2V_m$ برسد (V_m از خازن C_1 و V_m دیگر از ولتاژ ورودی).

ب) مدار چهار برابر کننده ولتاژ را می‌توان به صورت شکل ۲-۱۶۴ در نظر گرفت. این مدار را به همان روش قبلی می‌توان تحلیل کرد. مشاهده می‌شود ولتاژ نقاط نشان داده شده در شکل برابرند با

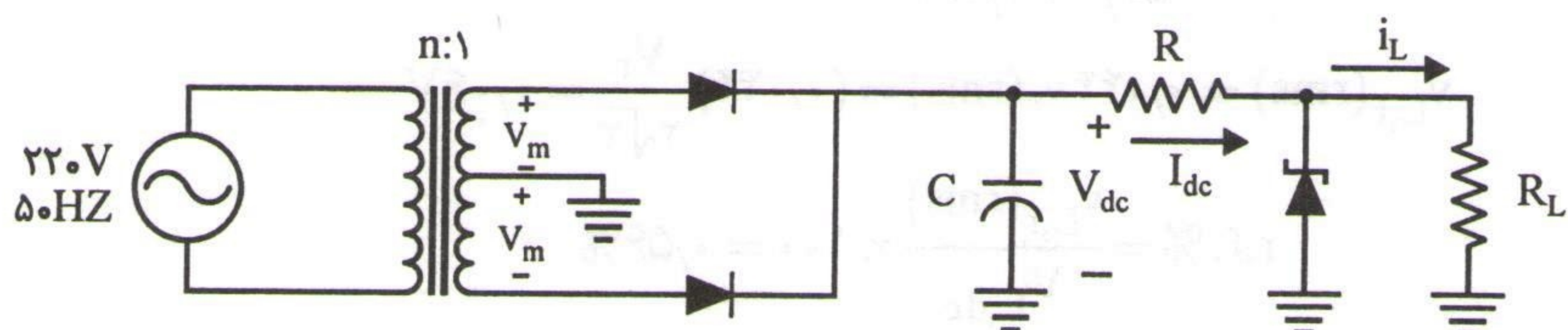
$$V_A = V_m, \quad V_B = 2V_m, \quad V_C = 5V_m$$

$$V_D = 2V_m, \quad V_E = 4V_m, \quad V_F = 6V_m$$



شکل ۲-۱۶۴

۱۱۰. در مدار شکل ۲-۱۶۵، $C = 100 \mu F$ ، $R = 100 \Omega$ ، $V_m = 36V$ و دیود زنر دارای $V_Z = 10V$ و $r_Z = 5\Omega$ است. جریان بار بین صفر و $200mA$ متغیر است. دیودها را ایده آل فرض کنید.
- الف) حداقل و حداکثر جریان دیود زنر را به دست آورید.
- ب) ضریب رپیل دو سر بار را به ازای بار کامل محاسبه کنید.
- ج) ولتاژ بار کامل و بدون بار و ضریب تنظیم دو سر بار را به دست آورید.



شکل ۲-۱۶۵

حل: الف) در یکسوکننده تمام موج با ترانس سر وسط داریم

$$V_{dc} = V_m - \frac{V_r}{2} = V_m - \frac{I_{dc}}{2fC}, \quad I_{dc} = I_Z + I_L$$

از طرفی با نوشتن KVL داریم

$$V_{dc} = RI_{dc} + V_Z + r_Z I_Z$$

$$\Rightarrow V_m - \frac{I_L + I_Z}{2fC} = R(I_L + I_Z) + V_Z + r_Z I_Z \Rightarrow 26 = 110 I_L + 115 I_Z$$

با توجه به اینکه وقتی جریان بار حداکثر است جریان دیود زنر حداقل می باشد و بالعکس، داریم

$$26 = 110 i_{L,min} + 115 I_{Z,max} \Rightarrow I_{Z,max} = 226 mA$$

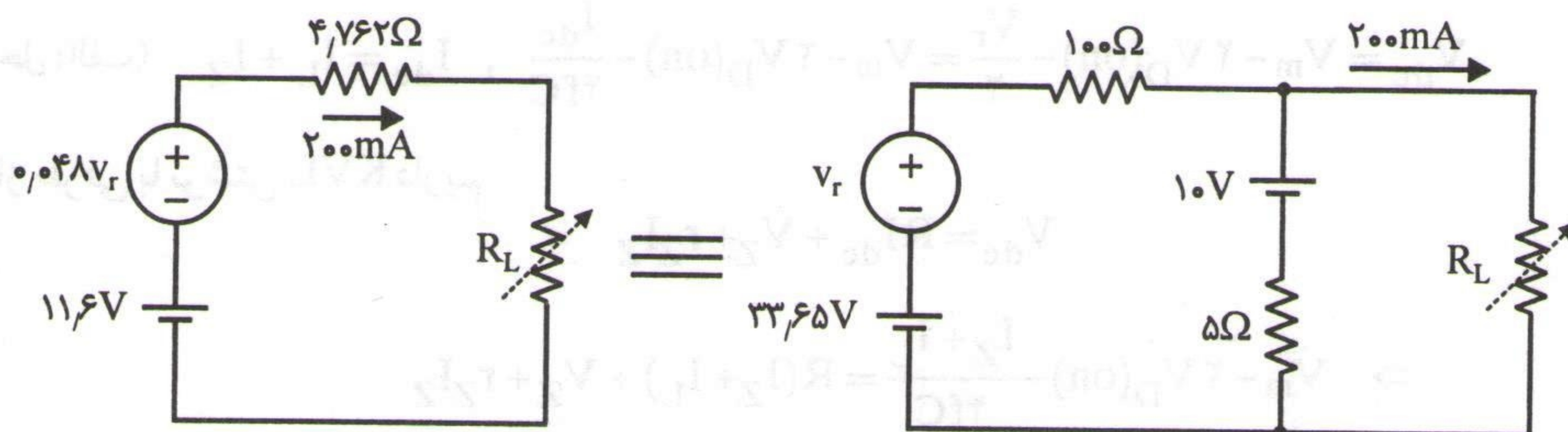
$$26 = 110 i_{L,max} + 115 I_K \Rightarrow I_K = 35 mA$$

$$I_{dc} = i_{L,max} + I_K = 200 + 35 = 235 mA$$

ب)

$$V_r = I_{dc} / 2fC = 4.7V \Rightarrow V_{dc} = 36 - \frac{1}{2} \times 4.7 = 33.65V$$

در حالت بار کامل، مدار معادل را می توان به صورت شکل ۲-۱۶۶ در نظر گرفت.



شکل ۲-۱۶۶

$$\text{KVL: } 11.6 = (R_L + 4.762) \times 0.2 \Rightarrow R_L = 53.2 \Omega$$

$$\Rightarrow V_{L,dc} = R_L I_L = 10.64 \text{ V}$$

برای ولتاژ رپیل دو سر بار داریم

$$V_{L,r} = \frac{0.48 V_r}{53.2 + 4.762} \times 53.2 = 0.44 V_r$$

$$V_{L,r}(\text{rms}) = 0.44 V_r(\text{rms}) = (0.44) \frac{V_r}{\sqrt{2}} = 0.6 \text{ V}$$

$$\text{r.f. \%} = \frac{V_{L,r}(\text{rms})}{V_{L,dc}} \times 100 = 0.56 \%$$

$$V_O(\text{NL}) = 11.6 \text{ V}, \quad V_O(\text{FL}) = 10.64 \text{ V}$$

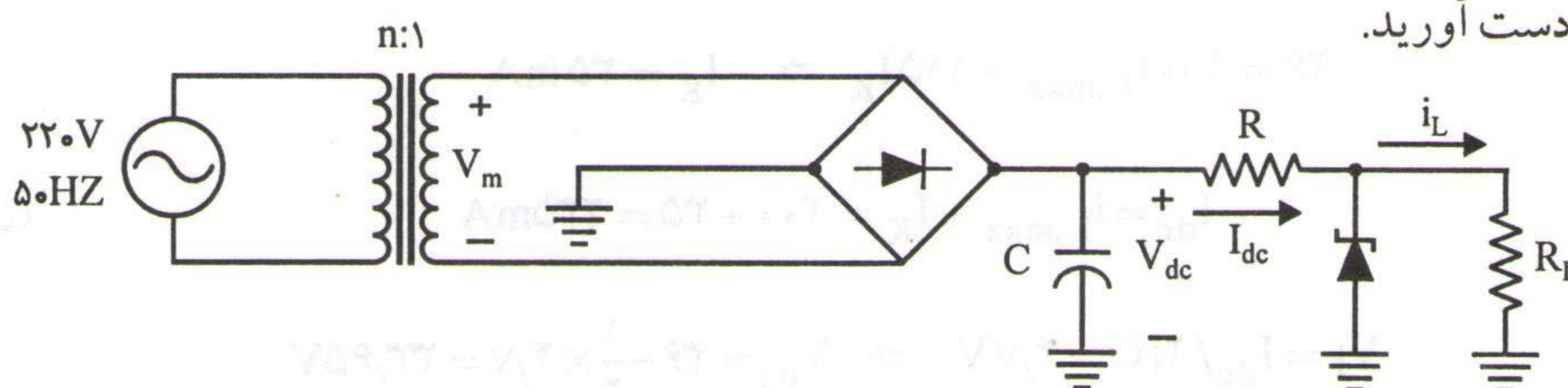
(ج)

$$\Rightarrow \text{V.R \%} = \frac{V_O(\text{NL}) - V_O(\text{FL})}{V_O(\text{FL})} \times 100 = 9 \%$$

۱۱۱. در مدار شکل ۲-۱۶۷، $C = 500 \mu\text{F}$ ، $n = 10$ و جریان بار 100 mA است. برای تثبیت ولتاژ خروجی از یک دیود زنر با $V_Z = 12 \text{ V}$ و $r_Z = 5 \Omega$ استفاده شده است. جریان لازم برای روشن شدن دیود زنر برابر 10 mA و حداکثر جریان مجاز آن 200 mA می‌باشد.

(الف) محدوده مقاومت R را طوری تعیین کنید که به ازای تغییرات ولتاژ برق شهر از 180 تا 240 ولت، خروجی ثابت باشد.

(ب) اگر $R = 80 \Omega$ باشد، ولتاژ DC خروجی و ضریب رپیل را به ازای ولتاژ 220 ولت برق شهر به دست آورید.



شکل ۲-۱۶۷

$$\text{حل: الف)} \quad V_{dc} = V_m - 2V_{D(\text{on})} - \frac{V_r}{f} = V_m - 2V_{D(\text{on})} - \frac{I_{dc}}{4fC}, \quad I_{dc} = I_L + I_Z$$

از طرفی با نوشتن KVL داریم

$$V_{dc} = R I_{dc} + V_Z + r_Z I_Z$$

$$\Rightarrow V_m - 2V_{D(\text{on})} - \frac{I_Z + I_L}{4fC} = R(I_Z + I_L) + V_Z + r_Z I_Z$$

$$\Rightarrow V_m - 14.4 = R(I_Z + 0.1) + 15 I_Z$$

با توجه به تغییرات برق شهر و اینکه $n=10$ است، V_m بین $18\sqrt{2}$ تا $24\sqrt{2}$ ولت تغییر می‌کند. وقتی که V_m حداکثر است، جریان دیود زنر نیز حداکثر می‌گردد و بالعکس. بنابراین

$$18\sqrt{2} - 14.4 = R(10 \times 10^{-3} + 0.1) + 15 \times 10 \times 10^{-3} \Rightarrow R = 99.14 \Omega$$

$$24\sqrt{2} - 14.4 = R(200 \times 10^{-3} + 0.1) + 15 \times 200 \times 10^{-3} \Rightarrow R = 55.1 \Omega$$

$$R = 80 \Omega, \quad V_m = 220\sqrt{2}/10 = 31.1V \quad (ب)$$

$$31.1 - 14.4 = 80(I_Z + 0.1) + 15I_Z$$

$$\Rightarrow I_Z = 91.7mA, \quad I_{dc} = 91.7 + 100 = 191.7mA$$

$$V_r = \frac{I_{dc}}{2fC} = 3.83V, \quad v_r(rms) = \frac{V_r}{\sqrt{2}} = 1.11V$$

$$V_{L,dc} = r_Z I_Z + V_Z = 12.45V, \quad R_L = \frac{12.45}{0.1} = 124.5 \Omega$$

$$v_{L,r}(rms) = \frac{v_r(rms)}{R + r_Z \parallel R_L} (r_Z \parallel R_L) = 0.63V$$

$$r.f. \% = \frac{v_{L,r}(rms)}{V_{L,dc}} \times 100 = 0.51\%$$

۲-۳ تمرین

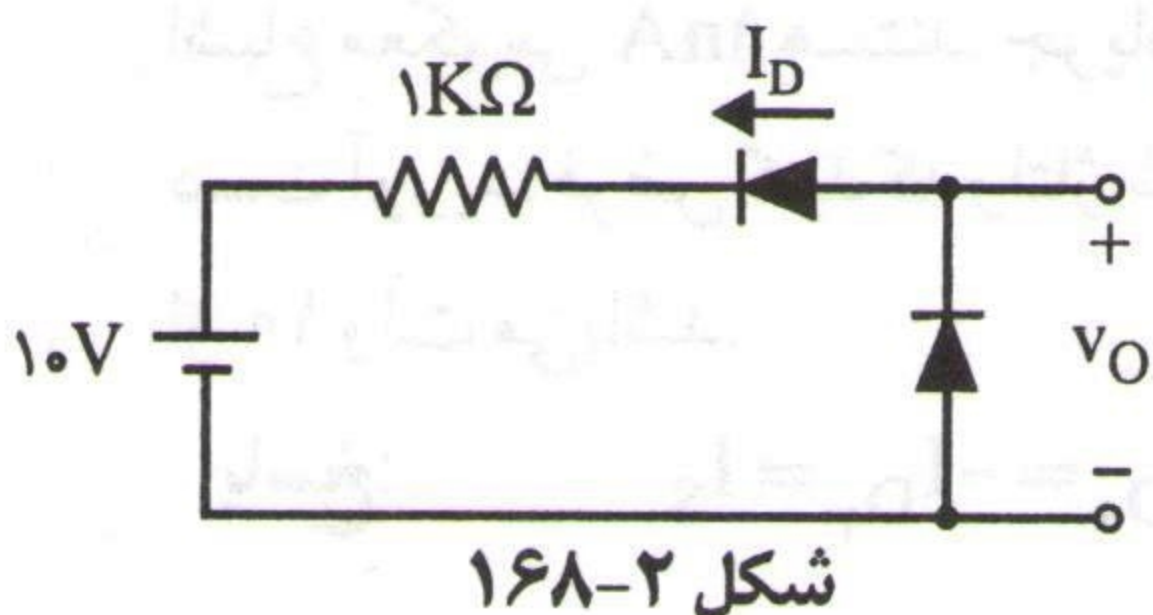
۱. یک دیود ژرمانیم در درجه حرارت $27^\circ C$ در حال کار است. برای جریان مستقیم $10mA$ ولتاژ دو سر آن $0.3V$ اندازه گیری شده است. اگر $V_D = 0.4$ ولت گردد جریان آن چقدر خواهد بود؟ جریان اشباع معکوس دیود چقدر است؟ ($V_T = 25mV$ و $\eta = 1$)

$$I_S = 61.4nA, \quad I_D = 546mA \quad \text{پاسخ:}$$

۲. جریان یک دیود ژرمانیم با جریان اشباع معکوس $I_S = 10nA$ رادر $200^\circ K$ و ولتاژ مستقیم 0.5 ولت محاسبه کنید ($V_T = 25mV$ و $\eta = 1$).

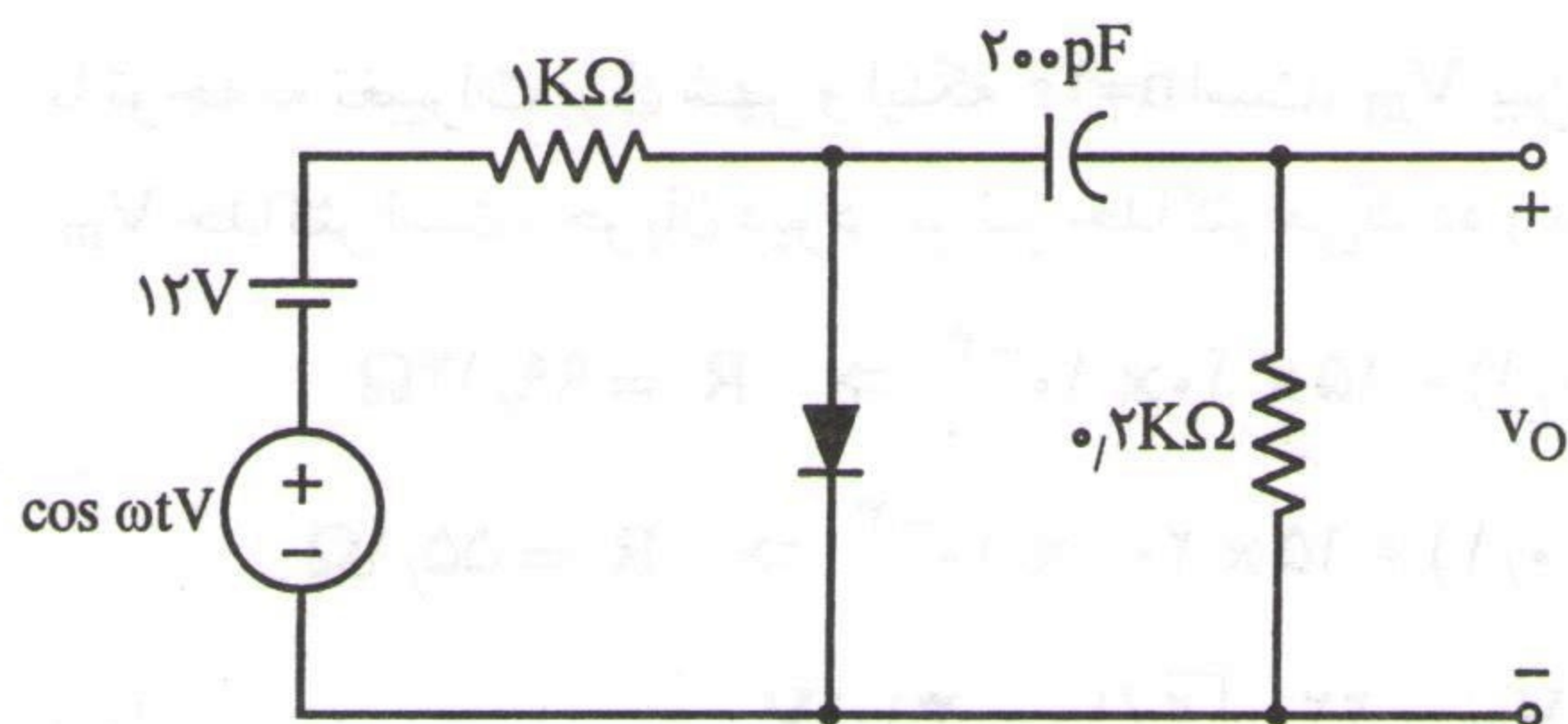
$$I_D = 4.85A \quad \text{پاسخ:}$$

۳. در مدار شکل ۲-۱۶۸ دیودها مشابه و دارای مشخصه داده شده می‌باشند. ولتاژ خروجی را به دست آورید.



$$I_D = \begin{cases} 2 \times 10^{-3} V_D & V_D \geq 0 \\ -I_S & V_D < 0 \end{cases}$$

پاسخ: تقریباً ۵ ولت



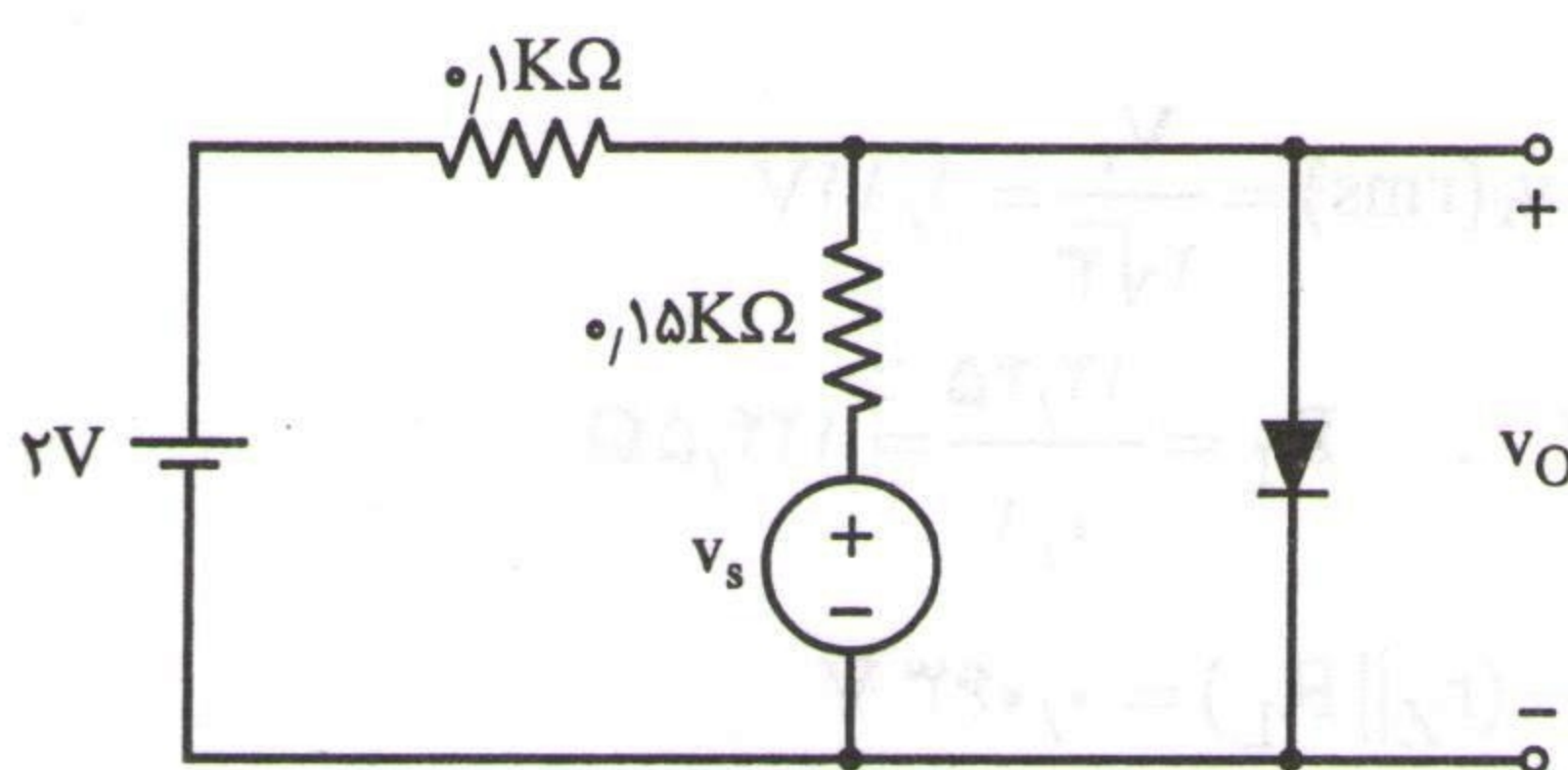
شکل ۱۶۹-۲

۴. در مدار شکل ۱۶۹-۲ دیود دارای جریان اشباع معکوس $2\mu A$ و $\eta = 1$ است. v_O را برای $\omega = 10^7 \text{ rad/s}$ محاسبه کنید.

پاسخ:

$$I_D = 11.78 \text{ mA}, \quad V_D = 0.217 \text{ V}$$

$$r_d = 2.122 \Omega, \quad v_O = 0.786 \cos(\omega t + 68^\circ)$$



$$v_s = 2 \sin \omega t \text{ mV}$$

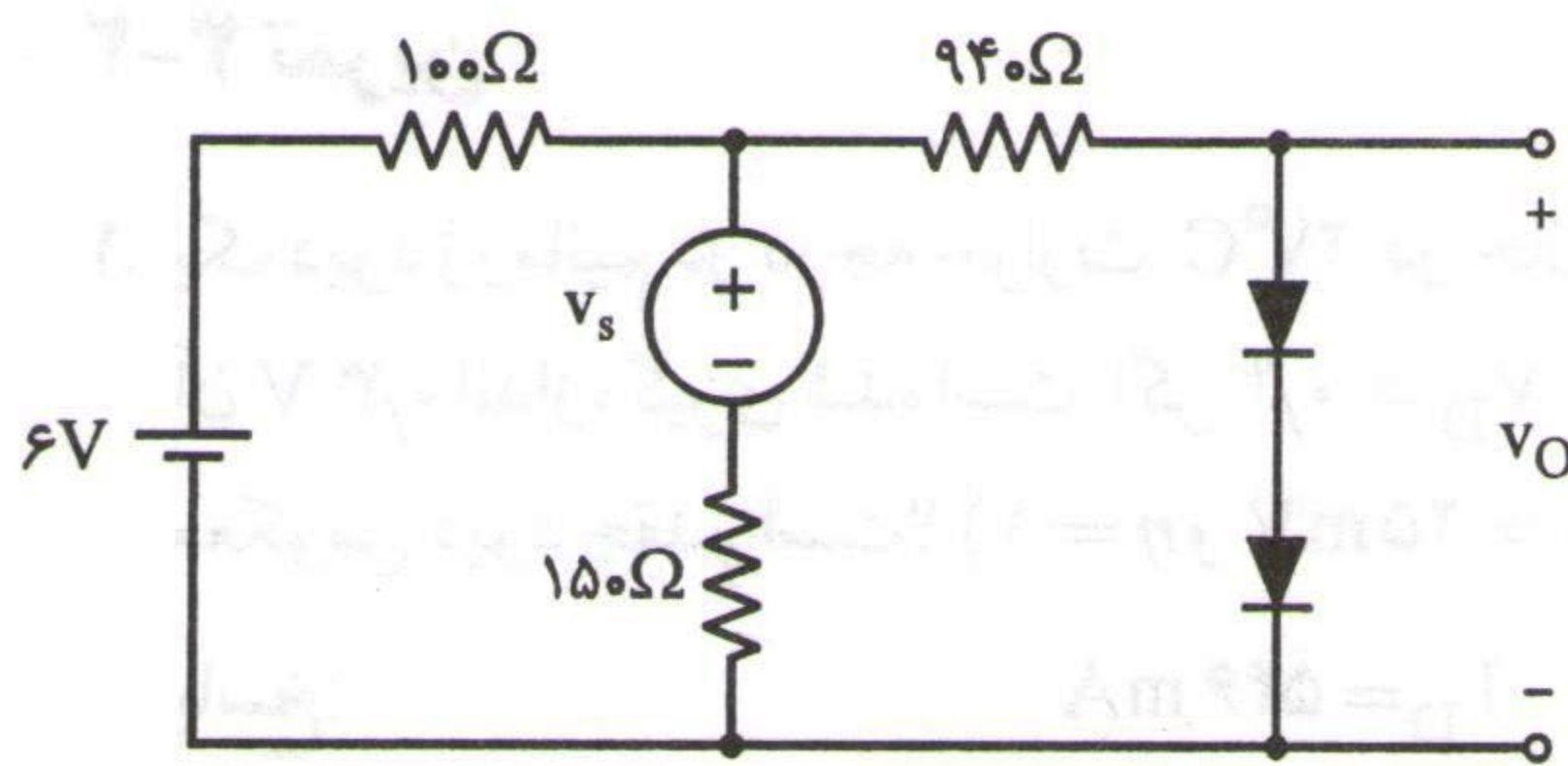
شکل ۱۷۰-۲

۵. در مدار شکل ۱۷۰-۲ دیود دارای جریان اشباع معکوس $1\mu A$ در دمای اتاق می‌باشد. ولتاژ خروجی v_O را به دست آورید ($V_T = 25 \text{ mV}$ و $\eta = 1$).

پاسخ:

$$I_D = 15.97 \text{ mA}, \quad V_D = 0.242 \text{ V}$$

$$r_d = 1.566 \Omega, \quad v_O = 0.2 \sin \omega t \text{ mV}$$



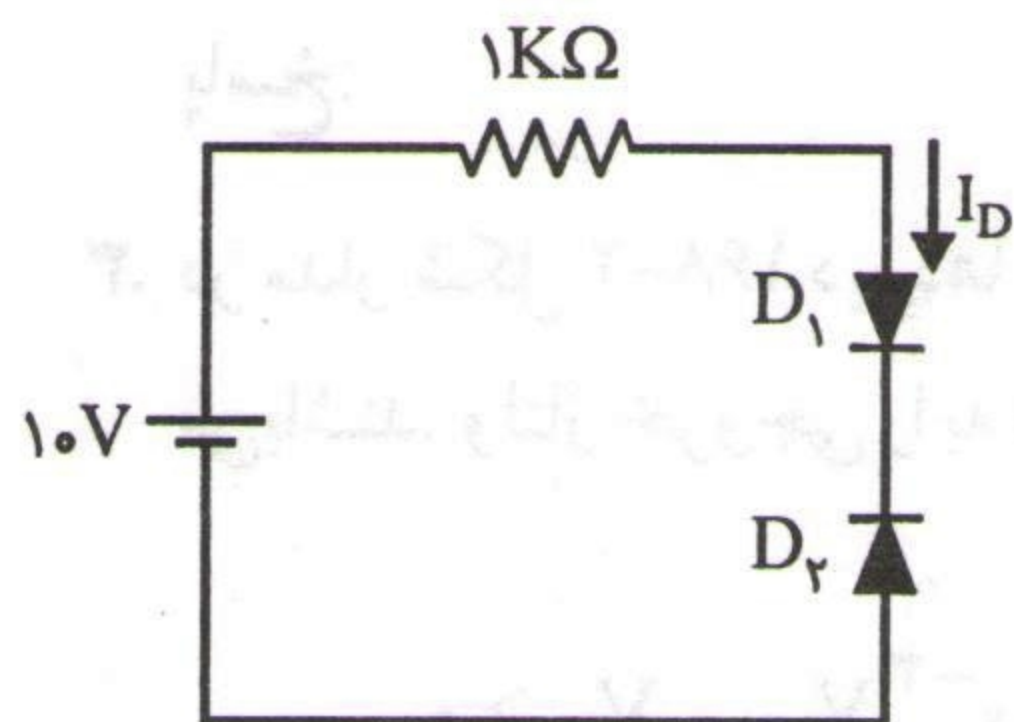
$$v_s = 0.1 \sin \omega t \text{ V}$$

شکل ۱۷۱-۲

۶. در مدار شکل ۱۷۱-۲ دیودها از جنس سیلیکن با ولتاژ هدایت 0.7 V و $\eta = 2$ می‌باشد. ولتاژ خروجی v_O را محاسبه نمایید.

پاسخ:

$$v_O = 1.4 + 1.74 \times 10^{-3} \sin \omega t \text{ V}$$



شکل ۱۷۲-۲

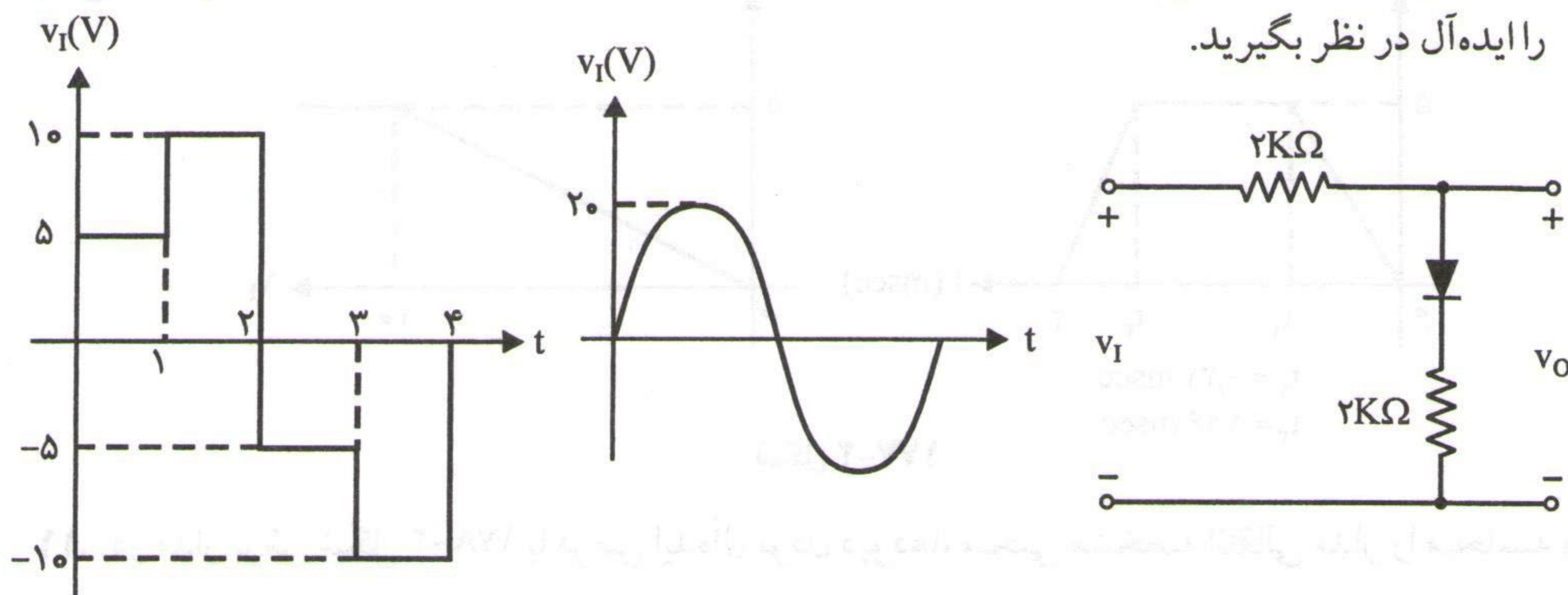
۷. در مدار شکل ۱۷۲-۲ دیودها مشابه و دارای $\eta = 1.4$ و جریان اشباع معکوس 1 nA هستند. جریان و ولتاژ هر یک از دیودها را به دست آورید. فرض کنید که ولتاژ شکست معکوس دیودها بیشتر از 10 V ولت می‌باشد.

پاسخ:

$$I_{D1} = -I_{D2} = I_S$$

$$V_{D1} = 24.3 \text{ mV}, \quad V_{D2} = -9.975 \text{ V}$$

۸. خروجی مدار برش شکل ۱۷۳-۲ را به ازای ورودیهای نشان داده شده به دست آورده و رسم کنید. دیود را ایده آل در نظر بگیرید.



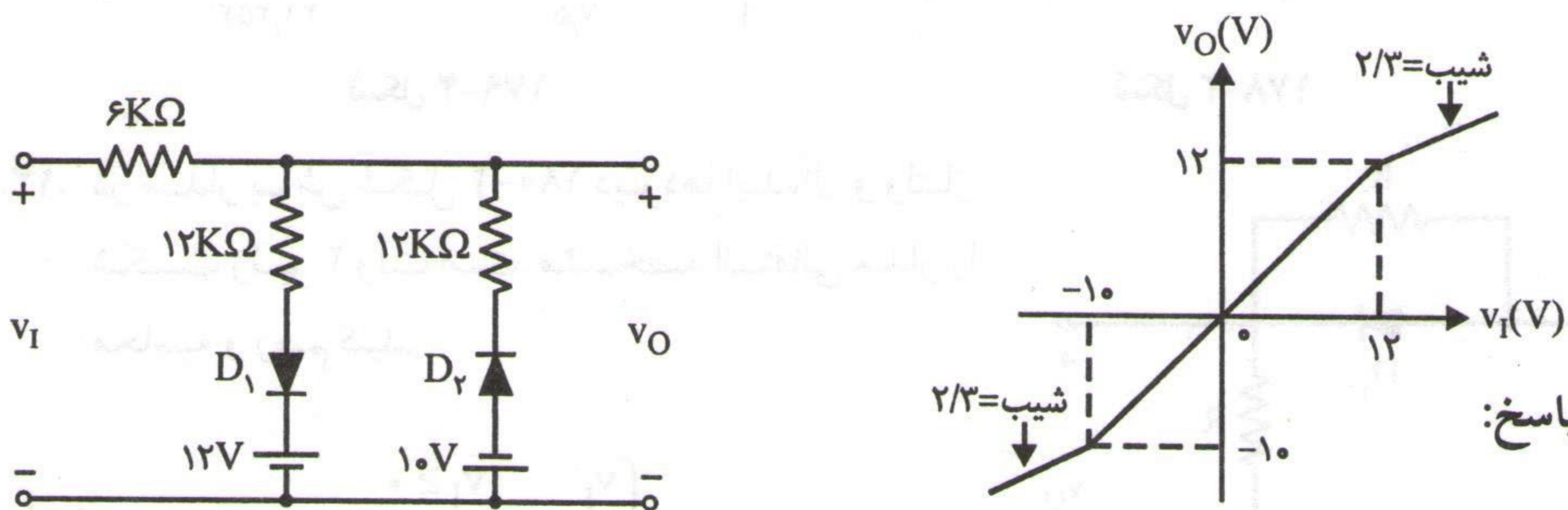
شکل ۱۷۳-۲

$$v_I \geq 0 \Rightarrow D: \text{on}, v_O = \frac{v_I}{2}$$

پاسخ:

$$v_I \leq 0 \Rightarrow D: \text{off}, v_O = v_I$$

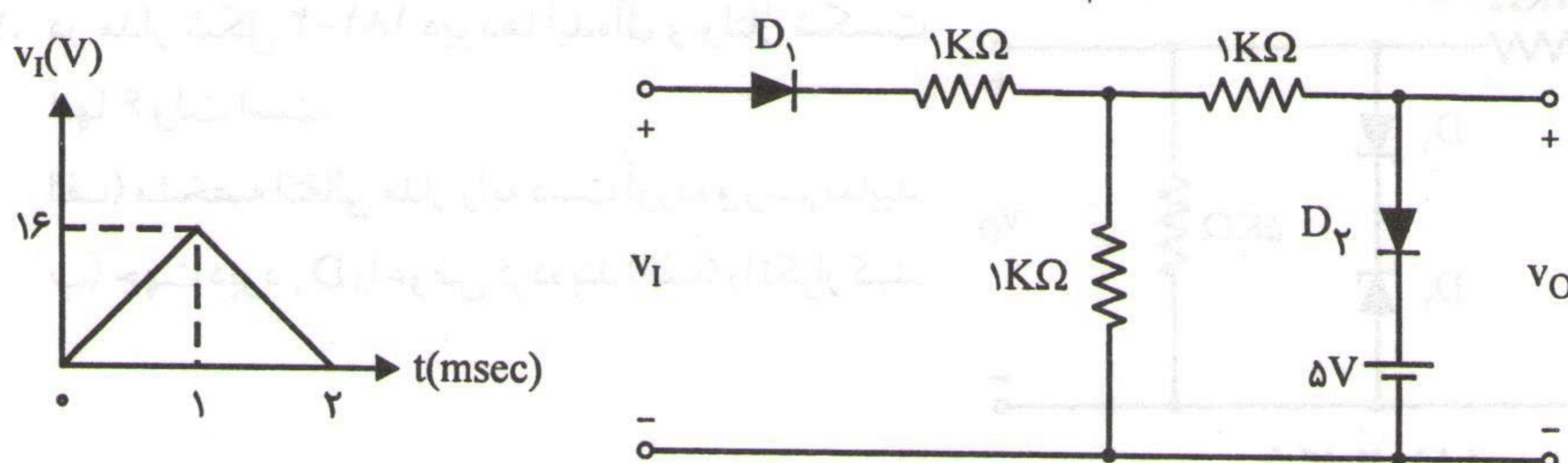
۹. برای مدار برش شکل ۱۷۴-۲ با فرض دیودهای ایده آل، مشخصه انتقالی را به دست آورده و رسم نمایید.



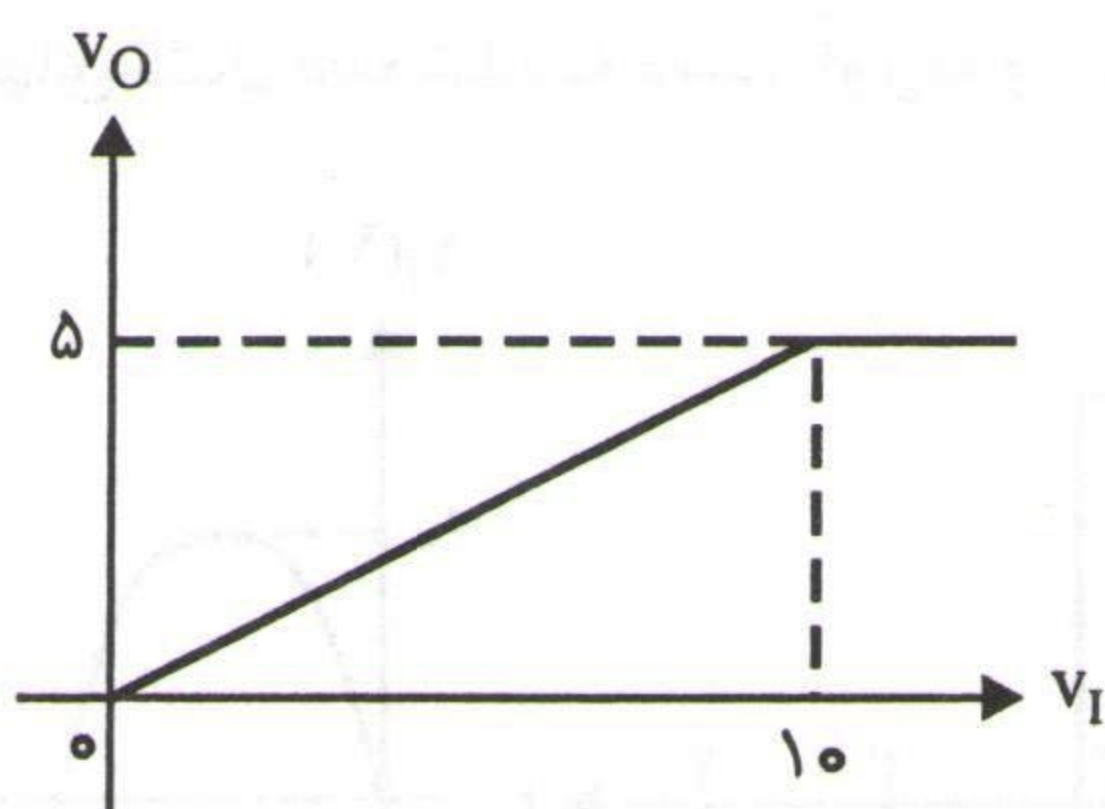
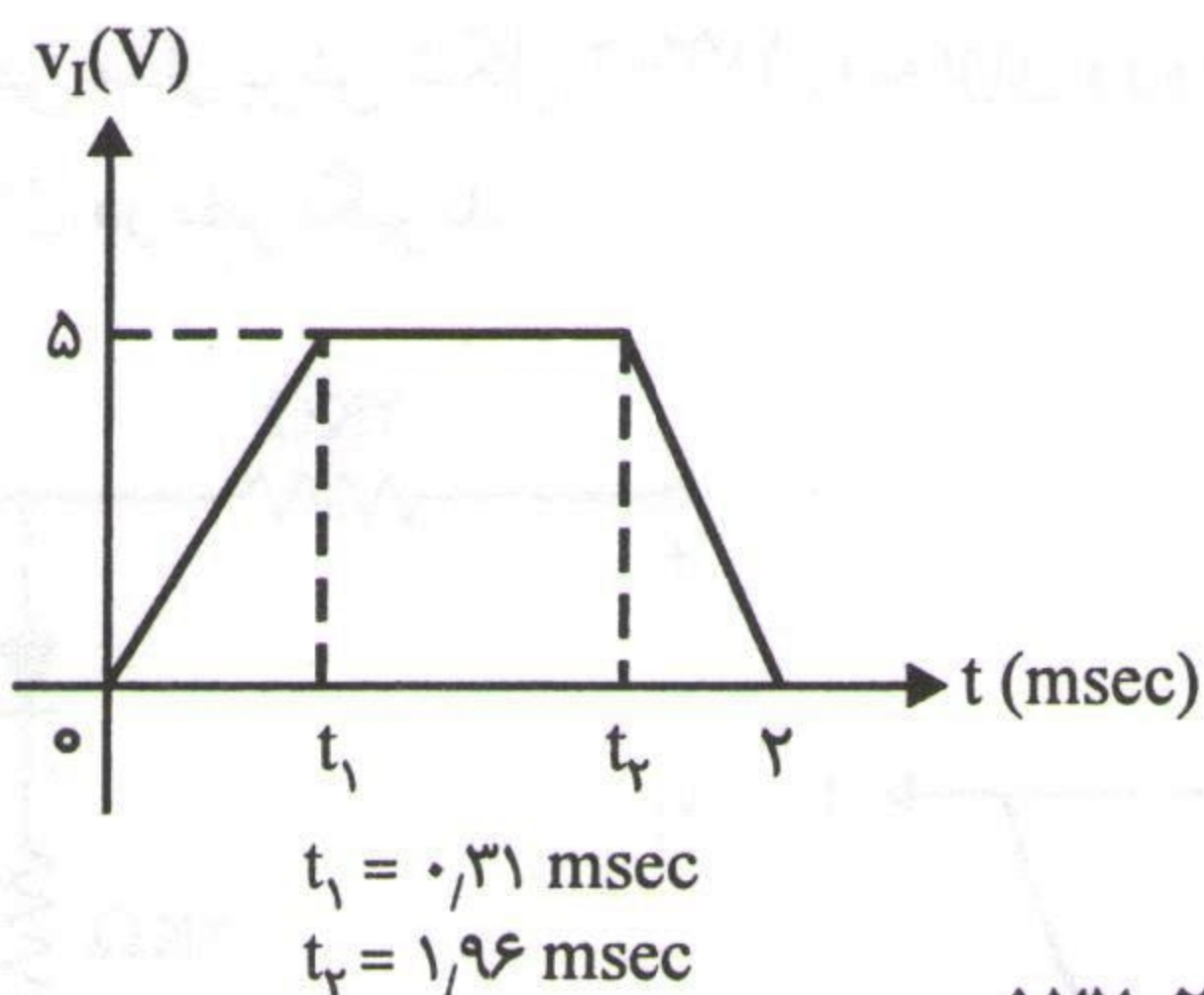
شکل ۱۷۴-۲

شکل ۱۷۵-۲

۱۰. مشخصه انتقالی مدار شکل ۱۷۶-۲ را با فرض دیودهای ایده آل به دست آورید. همچنین خروجی را به ازای ورودی نشان داده شده رسم کنید.



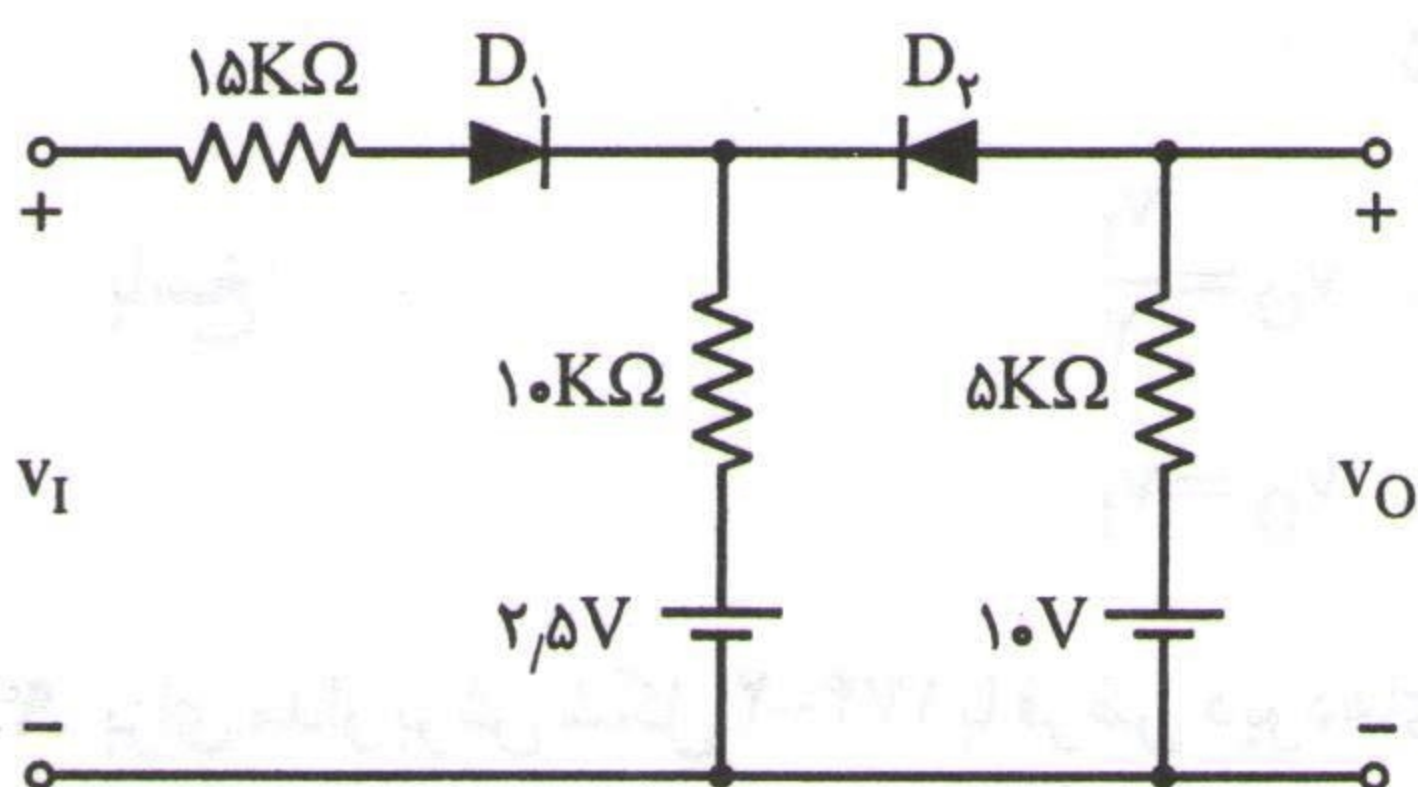
شکل ۱۷۶-۲



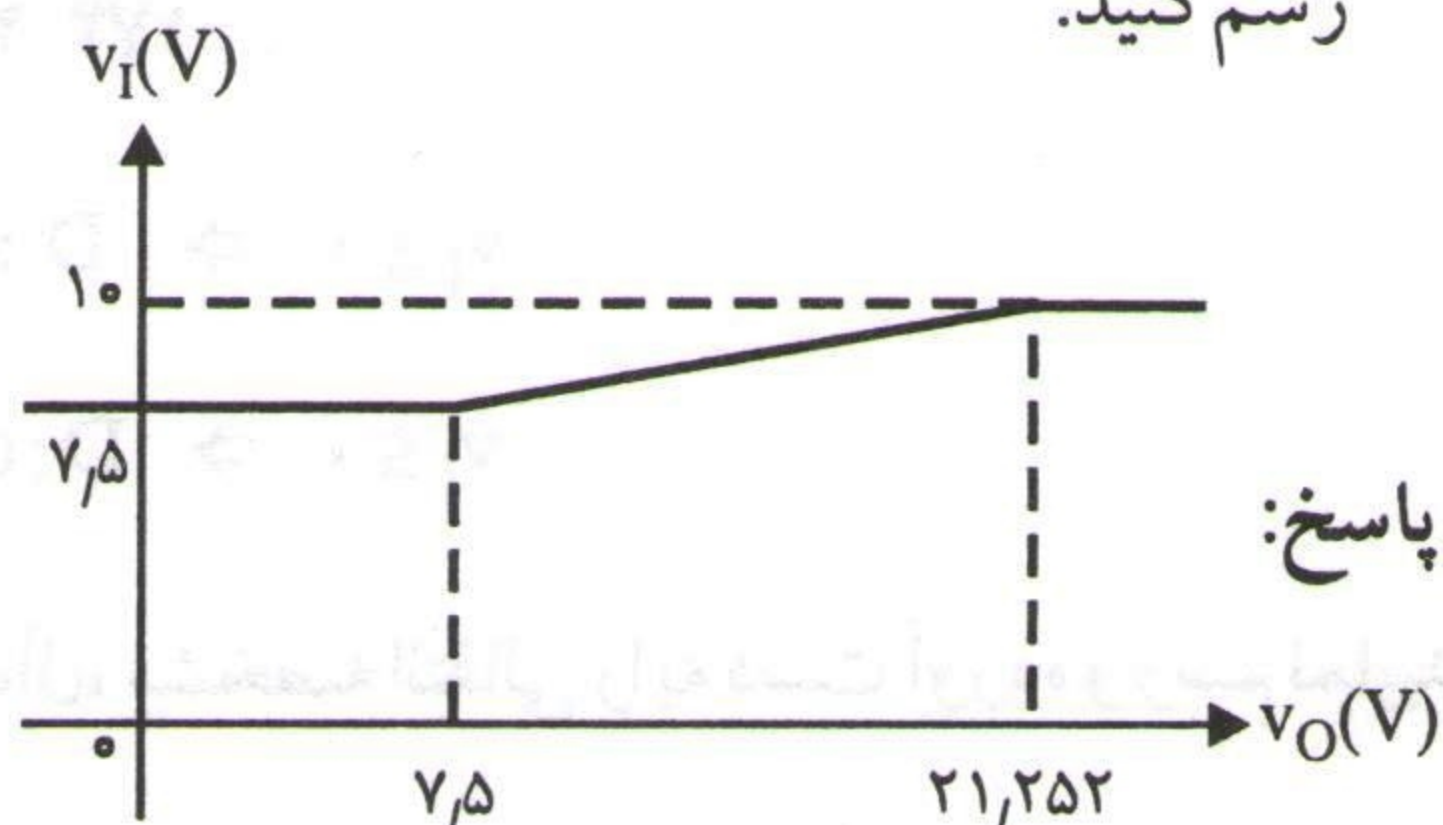
پاسخ:

شکل ۲-۱۷۷

۱۱. در مدار برش شکل ۲-۱۷۸ با فرض ایده‌آل بودن دیودها، منحنی مشخصه انتقالی مدار را محاسبه و رسم کنید.



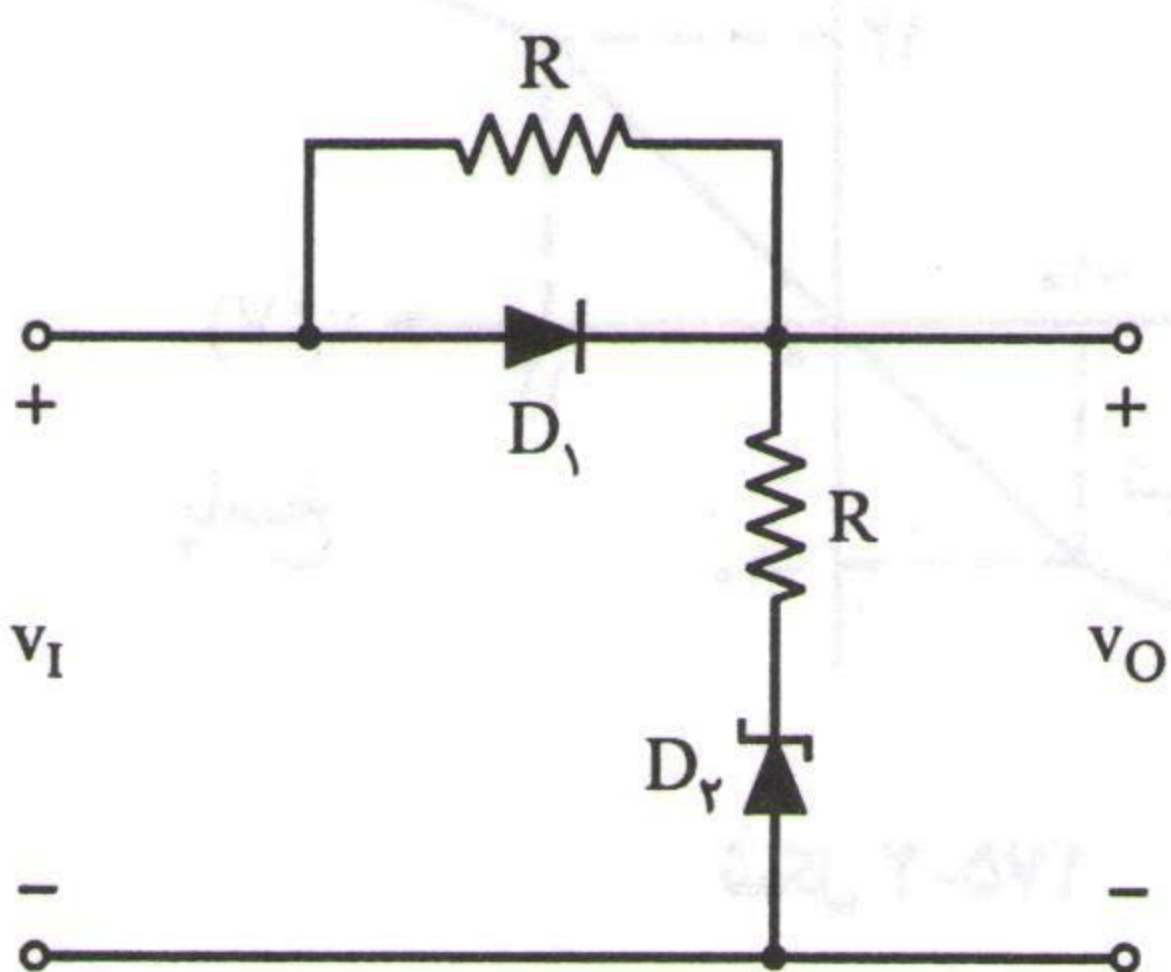
شکل ۲-۱۷۸



پاسخ:

شکل ۲-۱۷۹

۱۲. در مدار برش شکل ۲-۱۸۰ دیودها ایده‌آل و ولتاژ شکست زنر ۲ ولت است. مشخصه انتقالی مدار را محاسبه و رسم کنید.

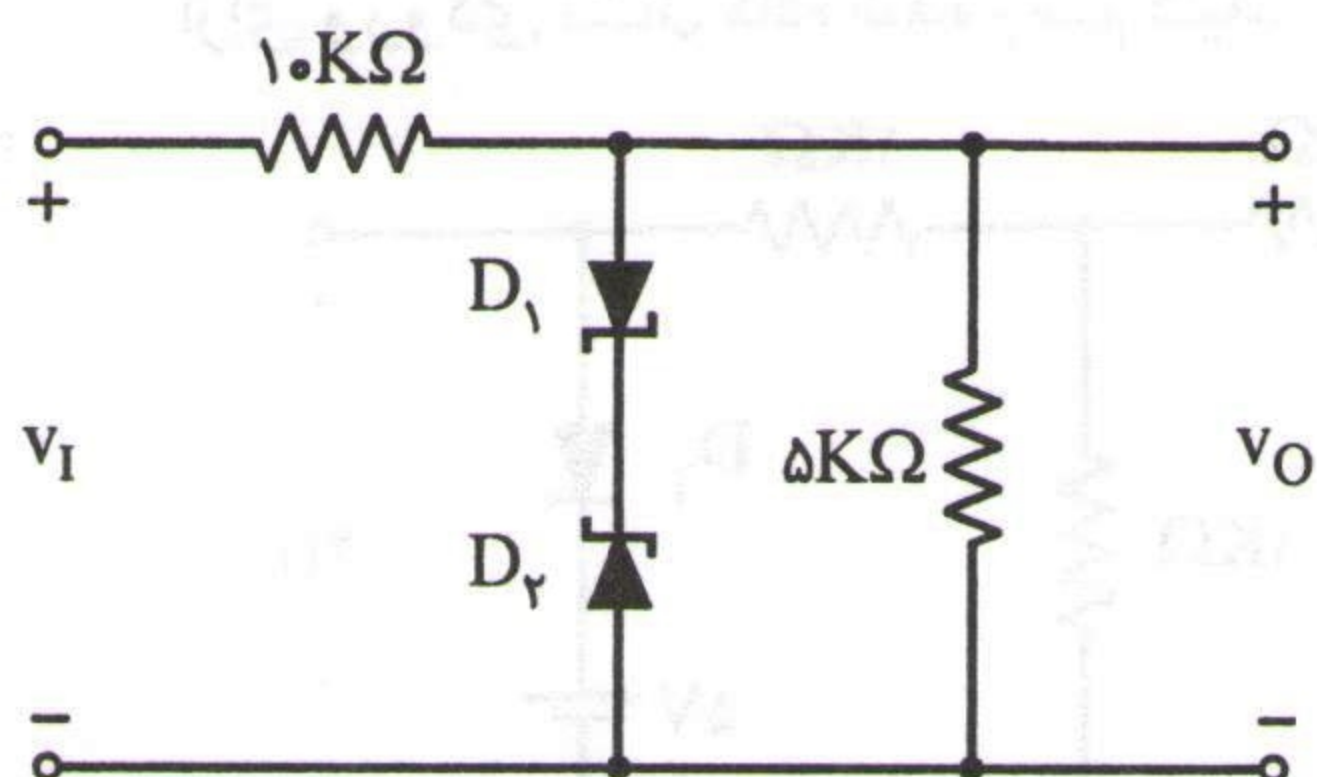


شکل ۲-۱۸۰

پاسخ:

$$v_O = \begin{cases} v_I & v_I \geq 0 \\ v_I/2 & v_I < 0 \end{cases}$$

۱۳. در مدار شکل ۲-۱۸۱ دیودها ایده‌آل و ولتاژ شکست آنها ۶ ولت است.



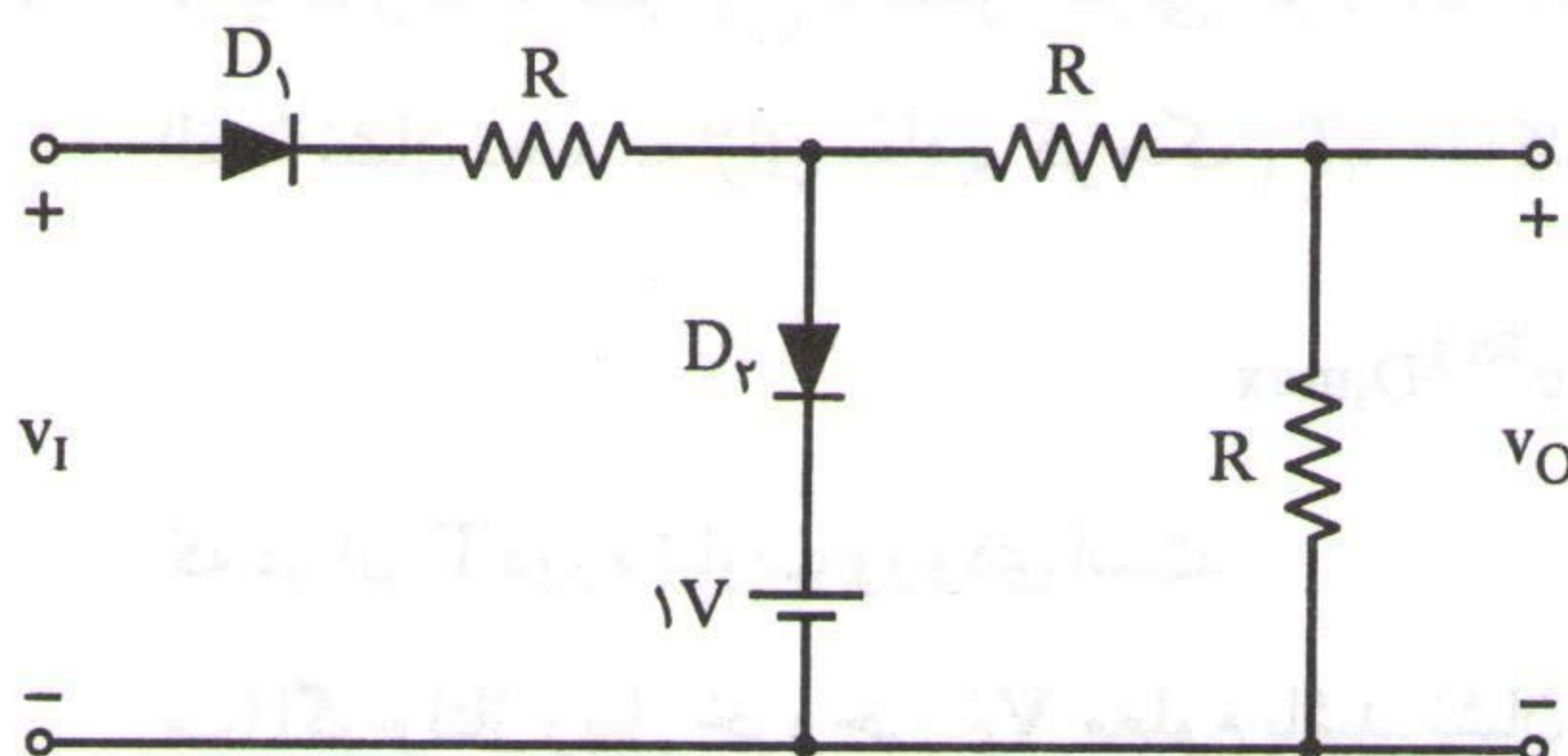
شکل ۲-۱۸۱

الف) مشخصه انتقالی مدار را به دست آورده و رسم نمایید.
ب) جهت دیود D_1 را عوض کرده بند (الف) را تکرار کنید.

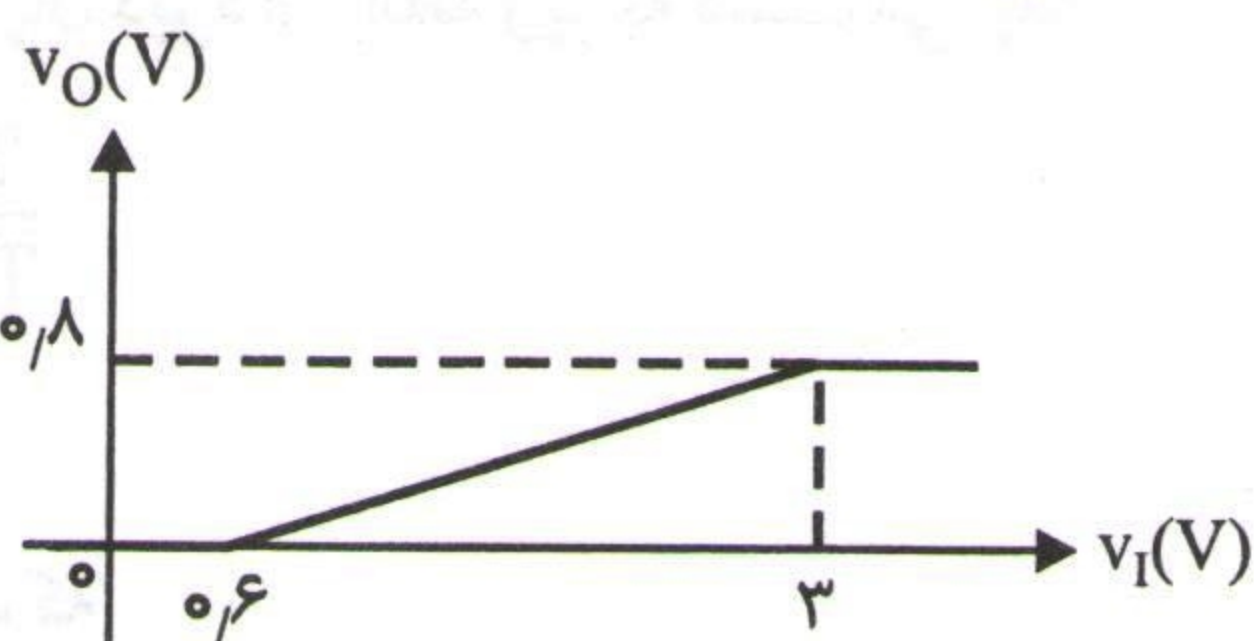
$$v_O = \begin{cases} 0 & v_I \leq 0 \\ \frac{1}{3} v_I & 0 \leq v_I \leq 36V \\ 12V & v_I \geq 36V \end{cases} \quad \text{پاسخ: الف) } v_O = \begin{cases} \frac{1}{3} v_I & v_I \leq 18V \\ 6V & v_I \geq 18V \end{cases}$$

۱۴. دیودهای به کار رفته در مدار برش شکل ۱۸۲-۲ دارای $V_{\gamma} = 0.6V$ ، $R_f = 0$ و $R_r = \infty$ می باشند. مشخصه انتقالی مدار را محاسبه و رسم کنید.

پاسخ:



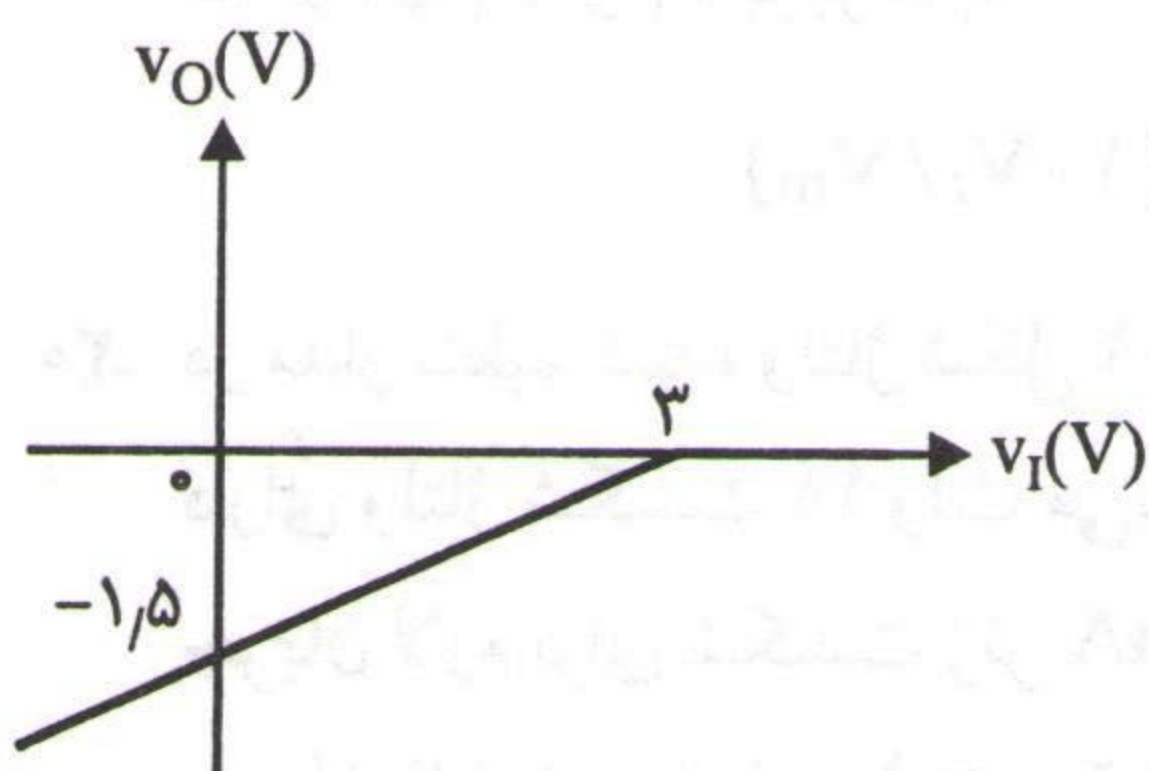
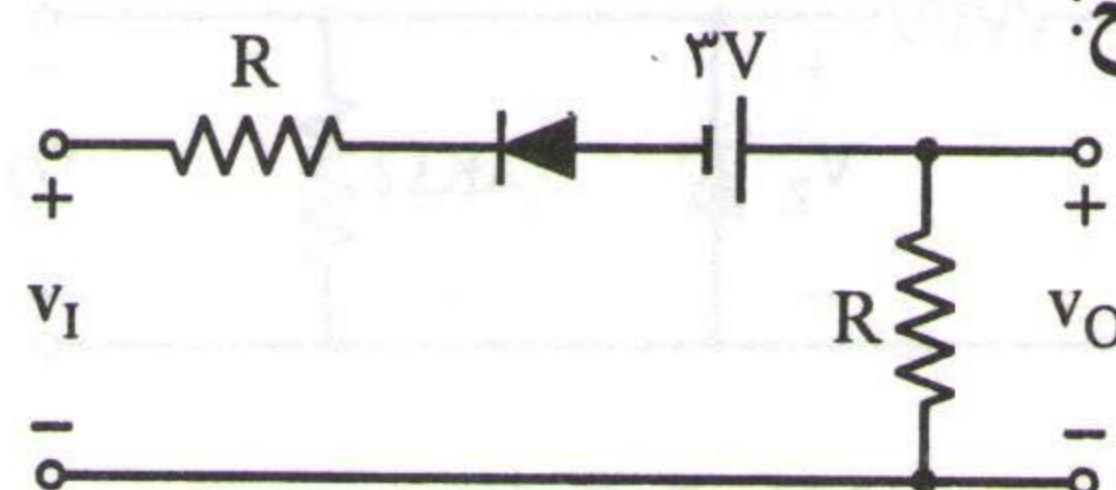
شکل ۱۸۲-۲



شکل ۱۸۳-۲

۱۵. با استفاده از دیودهای ایده آل مداری با مشخصه انتقالی نشان داده شده در شکل ۱۸۴-۲ طرح کنید.

پاسخ:



شکل ۱۸۴-۲

شکل ۱۸۵-۲

۱۶. مدار یکسوکننده تمام موج غیر پل را با فیلتر خازنی در نظر بگیرید. در صورتی که ولتاژ بین هر یک از سرهای ثانویه و زمین به صورت $v_I = V_m \sin 2\pi 50t$ با $V_m = 100V$ باشد.

الف) $V_{L,dc}$ و V_r خروجی را محاسبه کنید ($R_L = 5K\Omega$ و $C = 40\mu F$).

ب) در صورتی که دیودها دارای $V_{\gamma} = 0.6V$ باشند، آیا مقادیر فوق به نحو قابل ملاحظه ای تغییر خواهند کرد؟

ج) دیودهای به کار رفته در این مدار چه جریان حداکثر و چه ولتاژ معکوس حداکثری را باید بتوانند تحمل کنند؟

پاسخ:

الف) $V_{L,dc} = 96.98V$ ، $V_r = 4.85V$ ب) $V_{L,dc} = 97.56V$ ، $V_r = 4.88V$

ج) $I_m = 1.26A$ ، $PIV = 200V$

۱۷. درصد رپیل ولتاژ خروجی یک منبع تغذیه تمام موج با جریان مستقیم 80mA را به دست آورید. دامنه ولتاژ ثانویه ترانس را 25V و خازن صافی را $120\mu\text{F}$ در نظر بگیرید. فرکانس برق شهر 60Hz فرض می‌شود.

پاسخ: 7.22%

۱۸. یک منبع تغذیه 24V ولتی در جریان 50mA را با استفاده از یکسوساز تمام موج با ترانس سر وسط طرح کنید به طوری که ضریب رپیل دو سر بار کمتر از 1% باشد.

۱۹. در یکسوکنده نیم موج با فیلتر خازنی اگر زمان هدایت دیود را با T_1 نشان دهیم:

(الف) نشان دهید به ازای مقادیر کوچک T_1 ، حداکثر جریان دیود از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{T}{T_1} I_{dc} \approx I_{D,max}$$

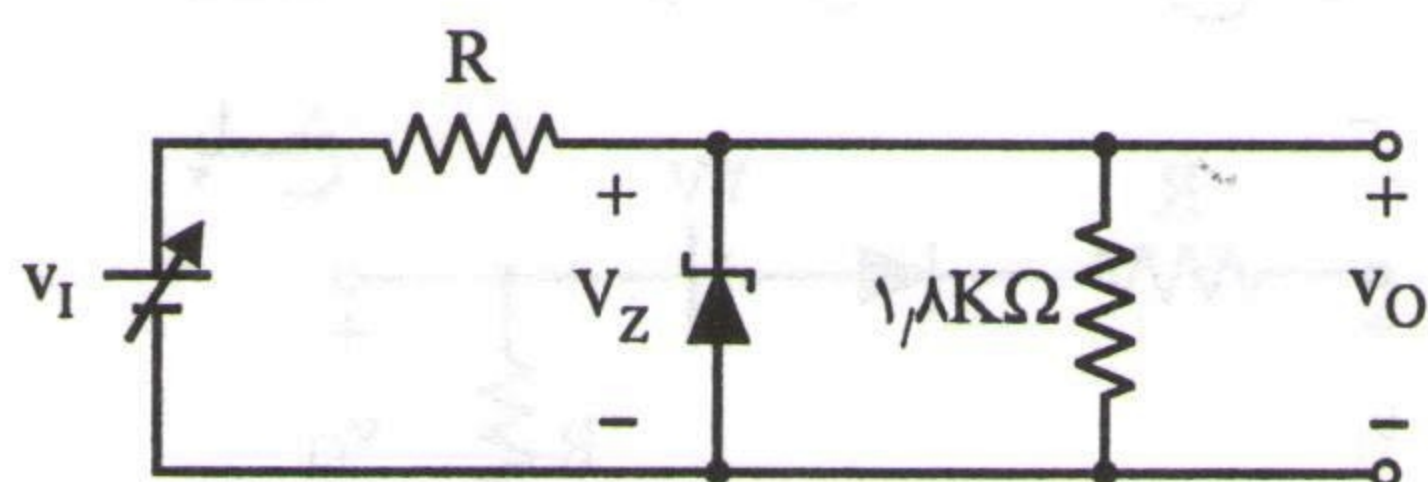
که در آن T دوره تناوب ورودی است.

(ب) اگر ولتاژ رپیل خروجی V_r معلوم باشد. نشان دهید که

$$\omega T_1 = \theta_2 - \theta_1$$

که در آن θ_1 و θ_2 برابرند با

$$\theta_2 = \pi - \tan^{-1}(RC\omega), \quad \theta_1 = \sin^{-1}(1 - V_r/V_m)$$



شکل ۲-۱۸۶

۲۰. در مدار تنظیم کننده ولتاژ شکل ۲-۱۸۶ دیود زener

دارای ولتاژ شکست 18V ولت می‌باشد. حداقل

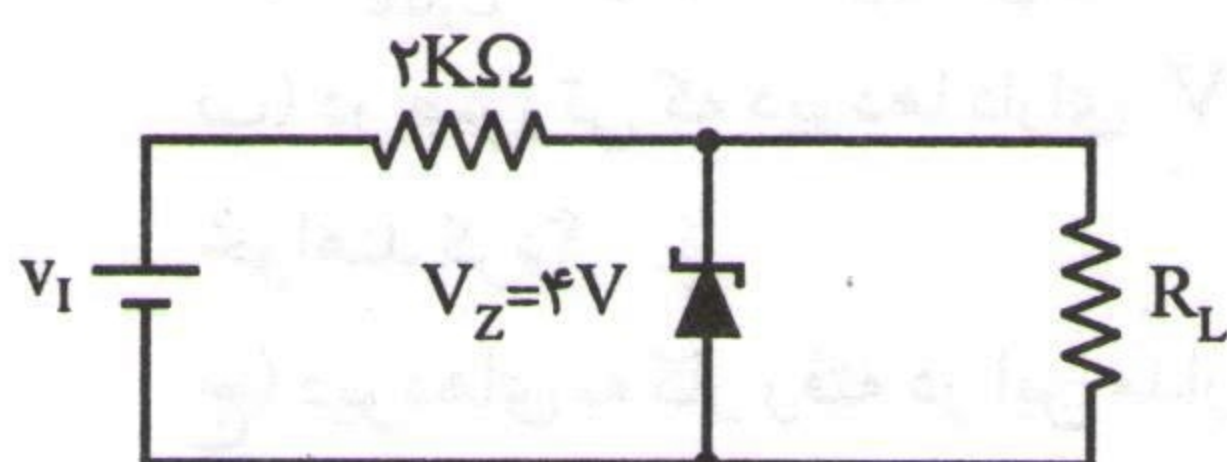
جریان لازم برای شکست زener 2mA و حداکثر

جریان قابل تحمل آن 200mA است. محدوده

R را به گونه‌ای تعیین کنید که اگر ولتاژ ورودی بین

22V تا 28V ولت تغییر کند، خروجی در مقدار 18V ولت ثابت بماند. ماکزیمم توان تلف شده در دیود چقدر است؟

پاسخ: $47.6\Omega \leq R \leq 333\Omega$, $P_{Z,max} = 3.6\text{W}$



شکل ۲-۱۸۷

۲۱. در مدار تنظیم کننده ولتاژ شکل ۲-۱۸۷ جریان حداقل

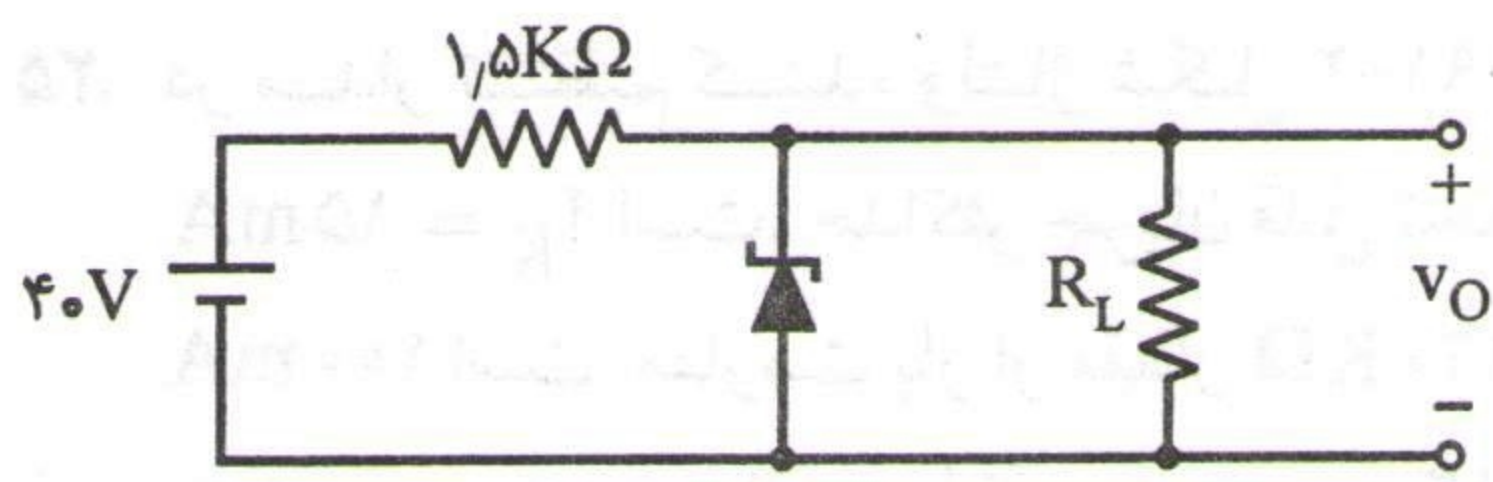
زener برابر 4mA است حداقل ولتاژ ورودی لازم در

هر یک از حالات زیر را تعیین کنید.

(الف) به ازای $R_L = 4\text{K}\Omega$

(ب) به ازای $R_L = 10\text{K}\Omega$

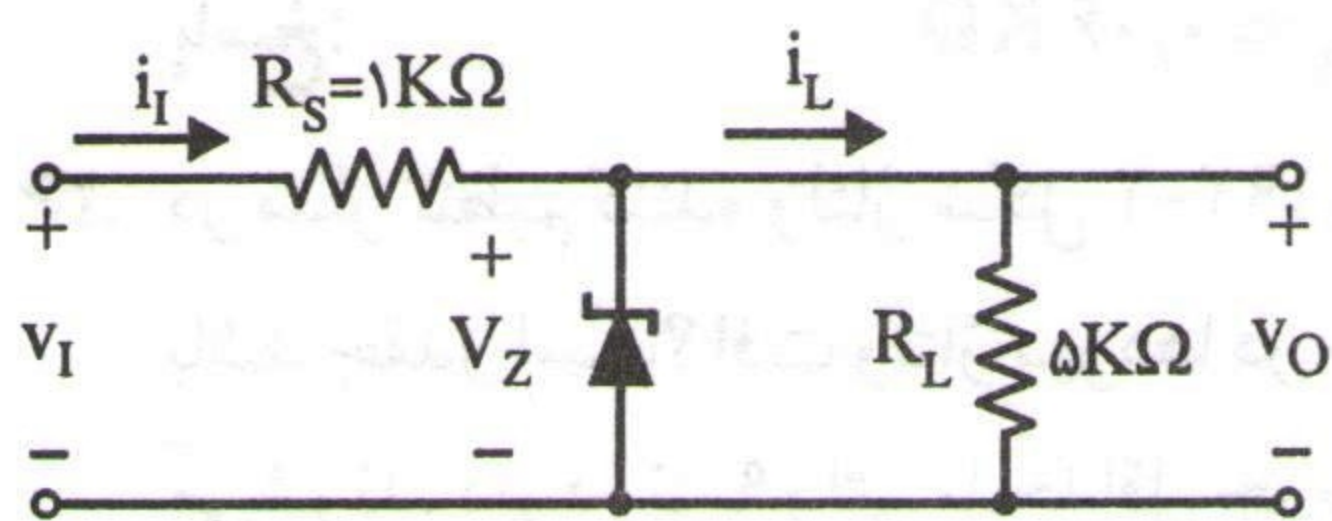
پاسخ: (الف) $V_{I,min} = 14\text{V}$ (ب) $V_{I,min} = 12.8\text{V}$



شکل ۱۸۸-۲

۲۲. در مدار تنظیم کننده ولتاژ شکل ۱۸۸-۲ دیود زنر دارای ولتاژ شکست ۱۰ ولت و مقاومت بار بین یک کیلو اهم تا بی نهایت متغیر است. مقادیر حداقل و حداکثر ولتاژ خروجی و ضریب تنظیم را به دست آورید.

پاسخ: $V_O(NL) = 10.2V$, $V_O(FL) = 10.1V$, $V.R\% = 0.99\%$



شکل ۱۸۹-۲

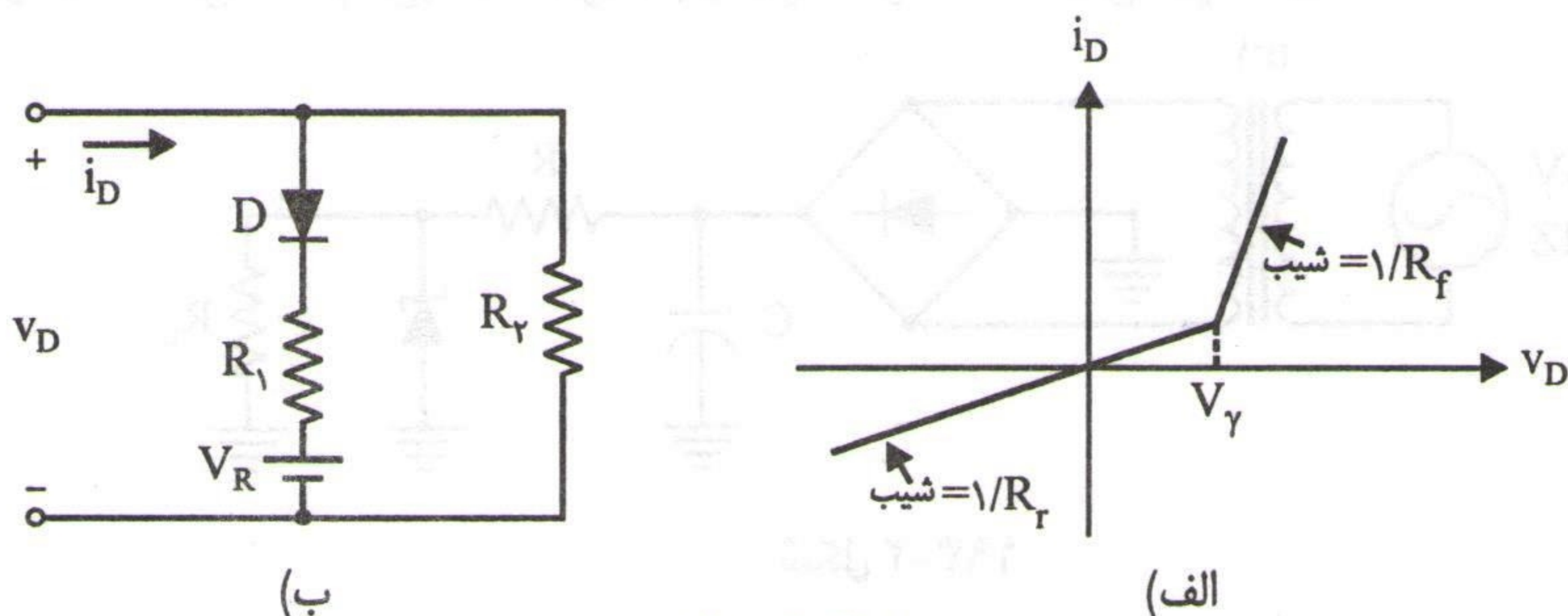
۲۳. در تنظیم کننده ولتاژ شکل ۱۸۹-۲ ورودی بین ۴۰ تا ۵۵ ولت تغییر می کند و ولتاژ شکست زنر برابر ۳۰ ولت می باشد. مشخصه زنر را ایده آل در نظر بگیرید. (الف) محدوده جریان مقاومت R_S و دیود زنر را تعیین کنید.

(ب) جریان بار و حداکثر توان تلف شده در دیود زنر را بیابید.

پاسخ: (الف) $2.5 \leq I_Z \leq 17.5 \text{ mA}$, $10 \leq i_I \leq 25 \text{ mA}$

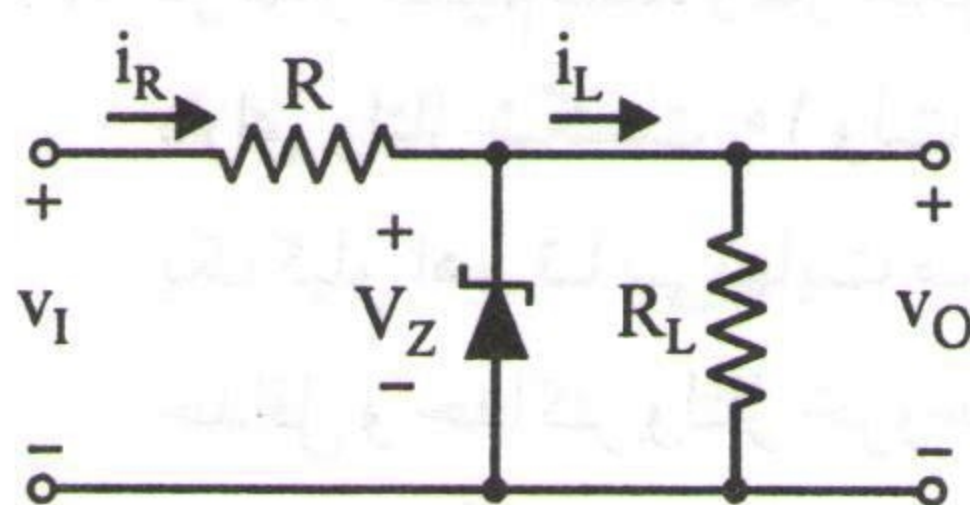
(ب) $P_{Z,max} = 525 \text{ mW}$, $i_L = 7.5 \text{ mA}$

۲۴. برای یک دیود واقعی می توان یک مدل خطی پاره ای به صورت شکل ۱۹۰-۲-الف در نظر گرفت که شامل مشخصه های V_γ , R_f و R_r می باشد. برای این مدل می توان مدار معادلی به صورت شکل ۱۹۰-۲-ب با استفاده از دیود ایده آل، مقاومت و منبع ثابت داشت. المانهای مدار معادل را برحسب مشخصه های دیود واقعی به دست آورید.



شکل ۱۹۰-۲

پاسخ: $V_R = V_\gamma$, $R_r = R_r$, $R_1 = \frac{R_r R_f}{R_r - R_f}$

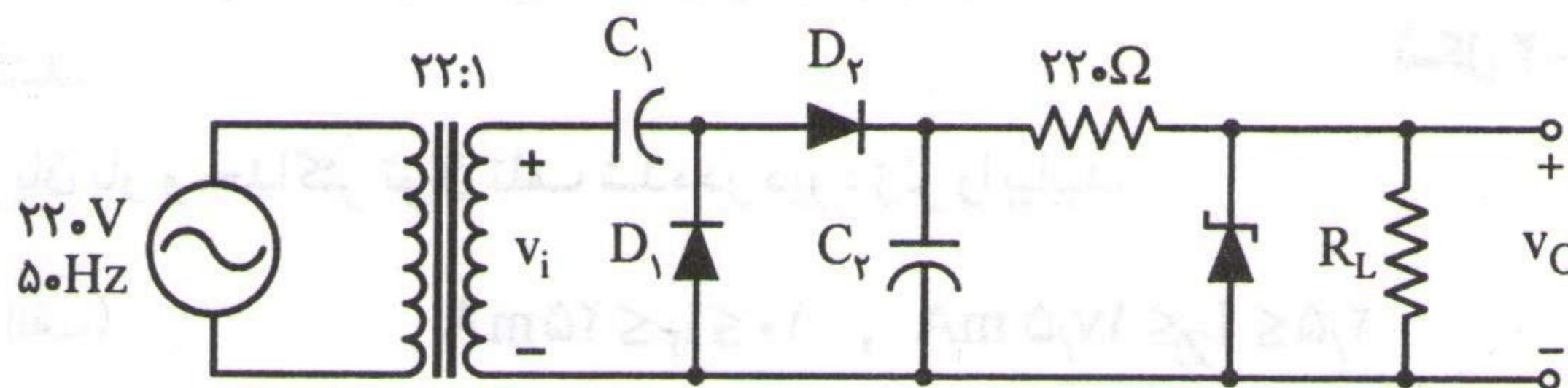


شکل ۲-۱۹۱

۲۵. در مدار تنظیم کننده ولتاژ شکل ۲-۱۹۱، $V_Z = 10V$ و $I_K = 15mA$ است. حداکثر جریان قابل تحمل دیود زنر برابر $100mA$ است. مقاومت بار از مقدار $120K\Omega$ تا حالت اتصال باز تغییر می کند. چنانچه ولتاژ ورودی بین ۱۳ تا ۱۶ ولت متغیر باشد، محدوده مقاومت R را به گونه ای تعیین کنید که ولتاژ خروجی مقداری ثابت باشد.

پاسخ: $R_{max} = 0.1989K\Omega$, $R_{min} = 0.06K\Omega$

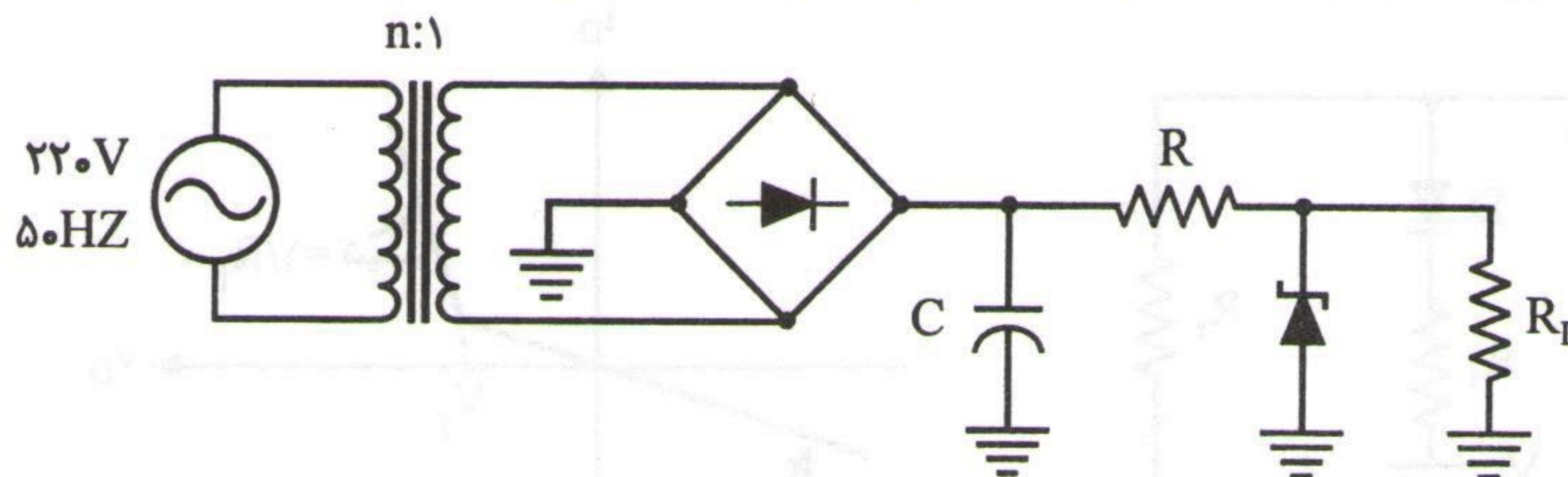
۲۶. در مدار تنظیم کننده ولتاژ شکل ۲-۱۹۲، حداکثر جریان بار در حالتی که ولتاژ خروجی تنظیم شده باشد چقدر است؟ افت ولتاژ دیودها در حالت مستقیم $0.7V$ و ولت و خازنها به اندازه کافی بزرگ فرض می شوند. دیود زنر ۹ ولتی با حداقل جریان لازم $5mA$ می باشد.



شکل ۲-۱۹۲

پاسخ: $I_{L,max} = 76.4mA$

۲۷. در منبع تغذیه شکل ۲-۱۹۳، ضریب ریزل در بار کامل کمتر از ۱% و ضریب تنظیم ولتاژ $V.R < 10\%$ است. حداکثر جریان دیود زنر چقدر است؟ دیود زنر دارای ولتاژ شکست ۷ ولت و مقاومت داخلی ۵ اهم می باشد. جریان بار بین صفر تا ۲۵۰ میلی آمپر متغیر است.



شکل ۲-۱۹۳

پاسخ: $I_{Z,max} = 140mA$