



مدلسازی در مهندسی پزشکی

فصل ششم

مقدمه

● مدل سازی

- شبیه سازی فرآیند پیچیده بدن یا یک پدیده زیستی
- مثل: مدل سازی سیستم گردش خون، مدل سازی مغز، مدل سازی راه رفتن و ...
- در مدل سازی همیشه با یک فرضیات ساده کننده روبرو هستیم.

● کاربردهای مدل سازی:

- بررسی روشهای مختلف درمانی بر روی مدل قبل از پیاده سازی واقعی آن بر روی بیمار
- استفاده از مدل در سیستم های مصنوعی مثل ربات ها و ...
- درک بهتر سیستم و پیش بینی رفتار آن

انواع مدل سازی

• مدل سازی کمی

- بیان ریاضی از یک سیستم فیزیولوژیکی که رفتار سیستم را شبیه سازی می کند.

• مدل سازی کیفی

- اغلب توسط زیست شناسان مطرح می شود.
- بیان عملکرد واقعی سیستم بدون ارائه مدل ریاضی
- در این فصل به بیان مدل سازی کمی پرداخت می شود.

انواع مدل های کمی

• مدل های معین

- در این مدل ها یک راه حل قطعی برای شبیه سازی کل پدیده وجود دارد.
- متغیرهای این مدل به طور کاملاً معین مرتبط با بخشی از پدیده مورد نظر است.
- در هر بار اجرای مدل با شرط اولیه مشخص، مدل به جوابهای یکسان می رسد.

• مدل های استوک استیک

- این مدل ها شامل متغیرهای تصادفی هستند که از قوانین احتمال پیروی می کنند.
- در هر بار اجرای مدل با شرط اولیه مشخص، مدل به جوابهای متفاوتی می رسد.

مراحل مدل سازی

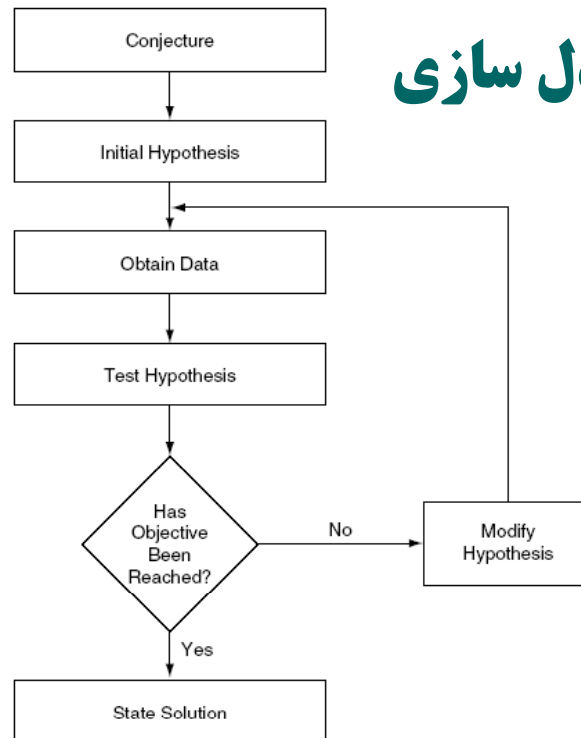


Figure 12.1 Flow chart for modeling.

مراحل مدل سازی

۱- مطالعه سیستم اصلی

- مشاهده نتایج یک آزمایش یا پدیده ای که منجر به تخمین یا توصیف کیفی سیستم بیولوژیکی مورد بررسی شود.

۲- انتخاب نوع مدل

- نوع مدل بر حسب کاربرد و ماهیت سیستم انتخاب می شود.
- به عنوان مثال اگر پاسخ سیستم در حالت گذرا مهم نباشد از مدل ایستا استفاده می شود، درغیراینصورت از مدل همگن استفاده می شود.

۳- تقسیم بندی مدل

- در این مرحله مدل به زیر سیستم های مختلفی تقسیم می شود.

مراحل مدل‌سازی

۴- تخمین پارامترها

- پارامترهای مربوط به زیر سیستم ها را پیدا کرده و تخمین می زنیم.

۵- تعیین معادلات

- در این مرحله معادلات مرتبط با زیر سیستم ها مشخص می شوند.

۶- تجزیه و تحلیل زیر سیستم ها

- هریک از معادلات زیر سیستم ها تحلیل شده و نوع پاسخ، پایداری و کنترل پذیری آن مشخص می شود.
- در این مرحله فقط برآورد تقریبی از رفتار سیستم به دست می آید.

مراحل مدل‌سازی

۷- شبیه سازی زیر سیستم های مختلف

- سیستم های بیولوژیکی معمولاً غیرخطی هستند.
- برای بررسی کارایی آنها باید از شبیه سازی استفاده کرد.
- ابتدا باید زیر سیستم ها را به طور مجزا شبیه سازی کرد.
- در این مرحله چنانچه اشکالی در طراحی زیر سیستم ها وجود داشته باشد، رفع می شود.

۸- شبیه سازی کل سیستم

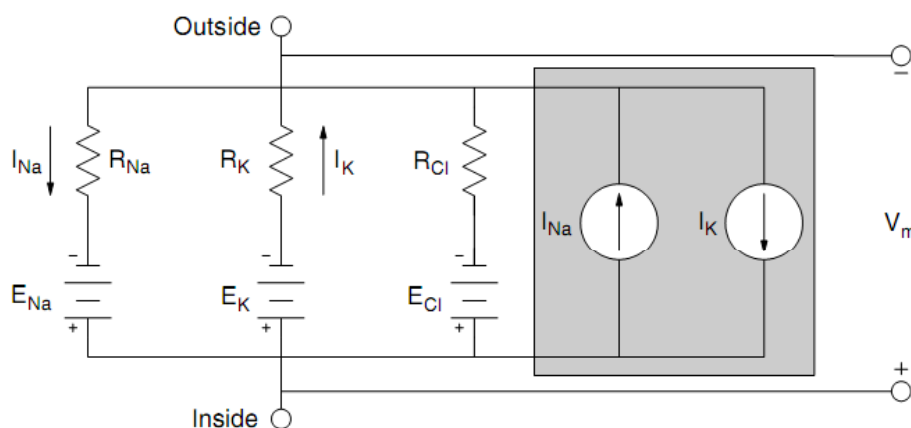
- در این مرحله خروجی نهایی سیستم به دست می آید.
- در صورتیکه نتایج شبیه سازی با داده های واقعی به دست آمده از سیستم بیولوژیکی انطباق نداشته باشد، بایستی زیرسیستم ها بازنگری و در صورت لزوم اصلاح و یا دوباره طراحی شوند.

مراحل مدل‌سازی

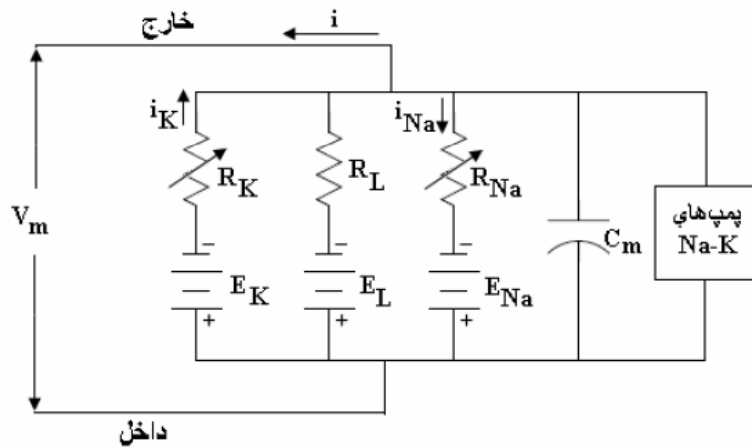
۹- بررسی کارایی مدل

- در این مرحله کارایی مدل به ازای ورودیهای مختلف بررسی شده و با استفاده از آزمون های آماری با داده های واقعی مقایسه می شود.
- همچنین یک مدل خوب باید بتواند خروجی یک سیستم بیولوژیک را به ازای ورودیهای جدید پیشگویی کند.

مثال ۱: مدل سلول عصبی



مثال ۱: مدل سلول عصبی



شکل ۱۰-۳: مدل قسمت کوچکی از غشای عصب یا ماهیچه. باتری‌ها پتانسیل نرنست برای یون‌های سدیم (E_{Na})، پتاسیم (E_K) و نشتی (E_L) هستند. E_L و E_K مقادیر منفی دارند. گذرگاه نشتی اصولاً مربوط به یون‌های کلر است. جریانی که از سلول خارج می‌شود جریان مثبت تعریف می‌شود. پمپ‌های سدیم و پتاسیم در مقایسه با زمان دوره جهش ولتاژ خیلی آهسته‌اند.

مثال ۲: مدل سازی سیستم ساکاد (حرکت سریع) چشم

مطالعه سیستم ساکاد چشم

- حرکت ساکاد (Saccade) به حرکت سریع چشم از روی یک تصویر به تصویر دیگر گفته می‌شود.
- سیستم ساکاد چشم تشکیل شده از:
 - سیستم اکولوموتور (oculomotor) که همه حرکات چشم را با توجه به هر تحریکی کنترل می‌کند.
 - مولد حرکات ساکاد (Saccade generator)

مثال ۲: مدل سازی سیستم ساکاد (حرکت سریع) چشم

- سیستم اکولوموتور شامل:

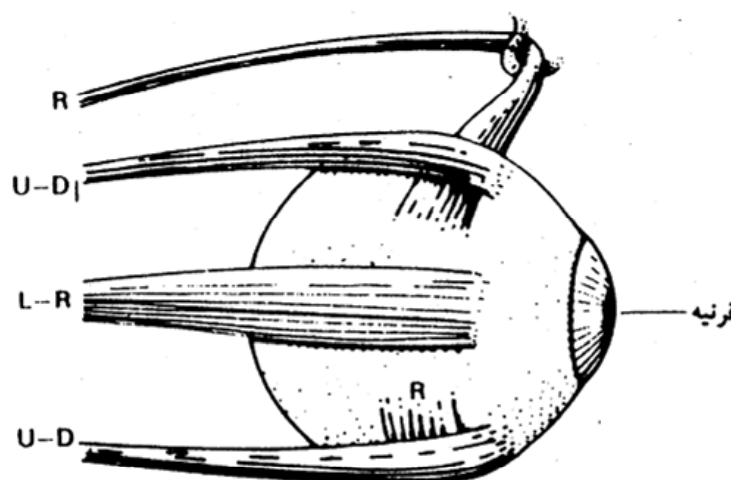
- سه جفت عضله آگونیست و آنتاگونیست

- کره چشم

- این سه جفت عضله قادرند چشم را در سه جهت حرکت دهند:

- افقی، عمودی و مَوْرَب

سه جفت عضله آگونیست و آنتاگونیست چشم



شکل ۴-۱۵. شش ماهیچه چشم راست گسترده‌ای از حرکتهای مختلف را میسر می‌سازد. هر یک جفت ماهیچه هماهنگ با هم کار می‌کنند: یک جفت حرکتهای بالا و پایین (U-D)، یک جفت حرکتهای چپ و راست (L-R) و یک جفت چرخش (R) چشم را کنترل می‌کنند. ماهیچه‌های چرخشی از حلقه‌های استخوانی می‌گذرند. هر شش ماهیچه در ناحیه پشت چشم به مجموعه متصل می‌شوند.

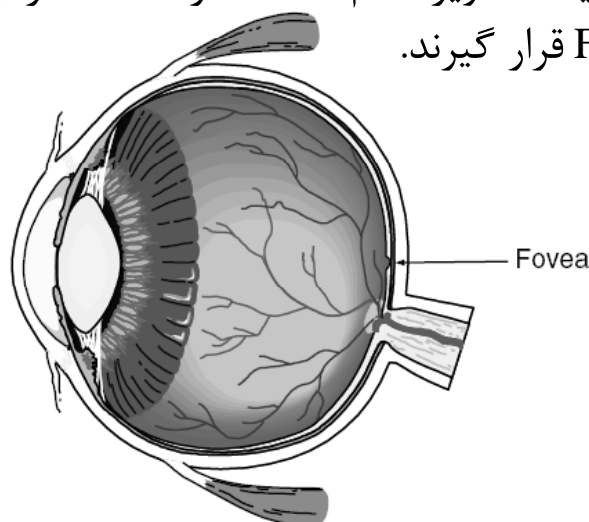
مطالعه سیستم ساکاد چشم

- سیستم اکولوموتور چشم به تحریکات دیداری، شنیداری و بخش دهلیزی گوش (وستیبولار) پاسخ داده و یکی از ۵ نوع حرکت ذیل را انجام می دهد:

- ۱- حرکت سریع، برای قرار دادن یا به دست آوردن اهداف
- ۲- حرکت تعقیب کنایی نرم، برای پیگیری و دنبال کردن یک هدف
- ۳- حرکت وستیبولار، برای حفظ موقعیت چشم بر روی هدف در هنگام حرکت سر
- ۴- حرکت کناری، برای پیگیری اهداف دور و نزدیک
- ۵- حرکت جنبشی، حرکت انعکاسی چشم برای حفظ موقعیت آن بر روی هدف در طول چرخش مداوم سر

مطالعه سیستم ساکاد چشم

- صرفنظر از نوع ورودی، سیستم اکولوموتور مسئول حرکت چشم است به نحویکه تصویر تمام اهداف در منطقه مرکزی شبکیه چشم به نام Fovea قرار گیرند.



مطالعه سیستم ساکاد چشم

- در سطح شبکیه سلولهای گیرنده نوری قرار دارند.
- وظیفه آنها تبدیل تصاویر به پالسهای عصبی است.
- پالسهای عصبی از طریق سلولهای عصبی بینایی به بخش مربوط به کورتکس بینایی در مغز ارسال می شوند.
- در ناحیه fovea تمرکز سلولهای گیرنده نوری بیشتر است. بنابراین تصاویر با دقت بالا در ناحیه fovea ایجاد می شوند.
- هدف fovea واضح تر کردن تصویر یک شیء است.
- اما نواحی پیرامون شبکیه‌ای به ما اجازه می دهند تا تصاویر جدید را شناسایی کنیم.

مشخصه های سیستم ساکاد چشم

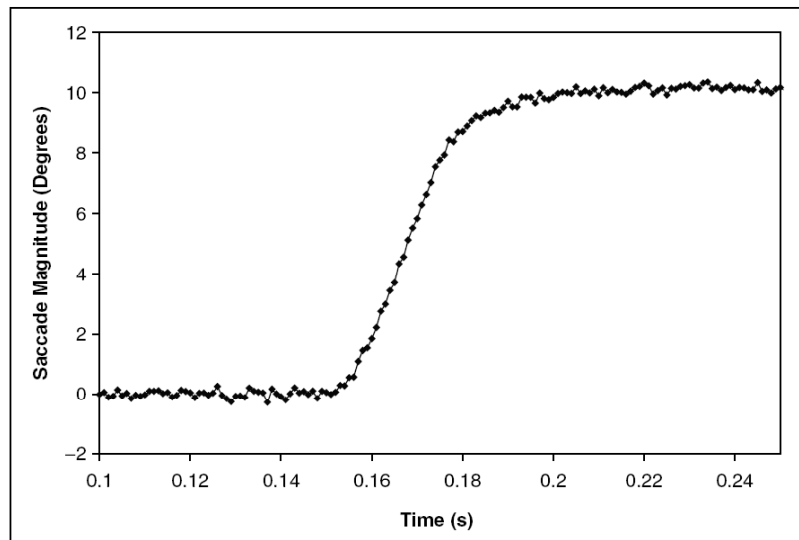
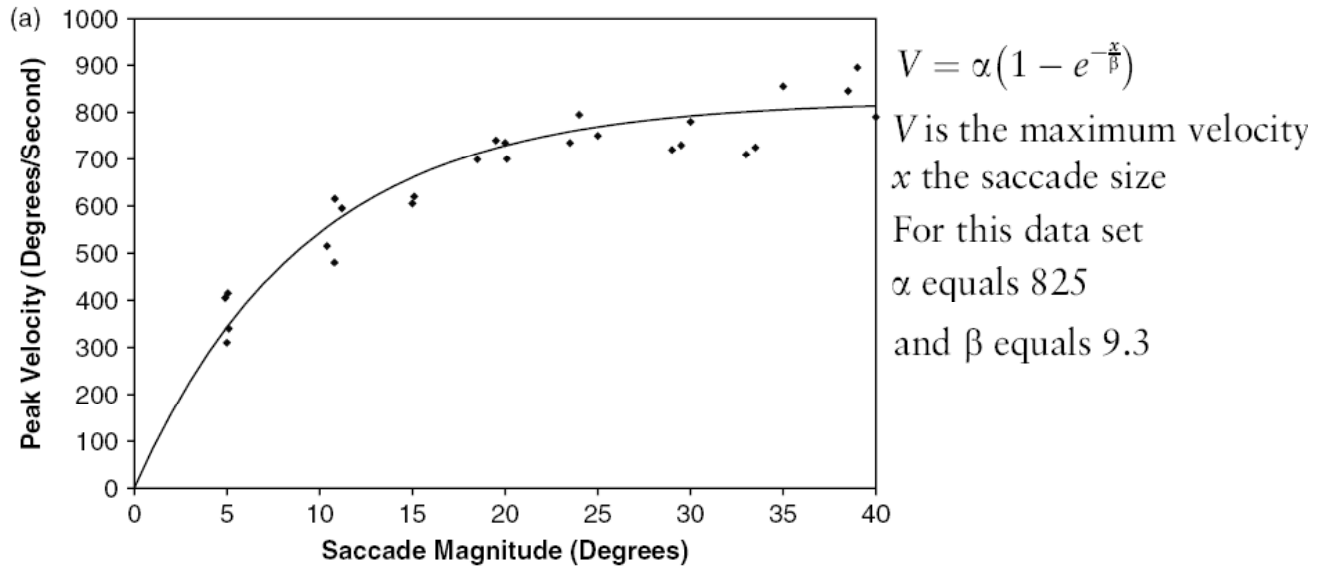


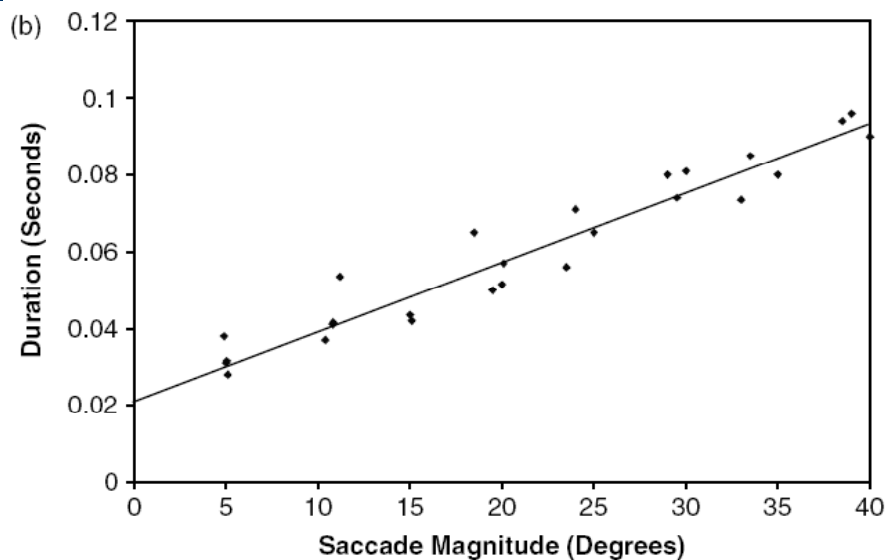
Figure 12.10 Sample saccadic eye movement of approximately 10 degrees. Data was collected with a sampling rate of 1000 samples/s.

مشخصه های سیستم ساکاد چشم



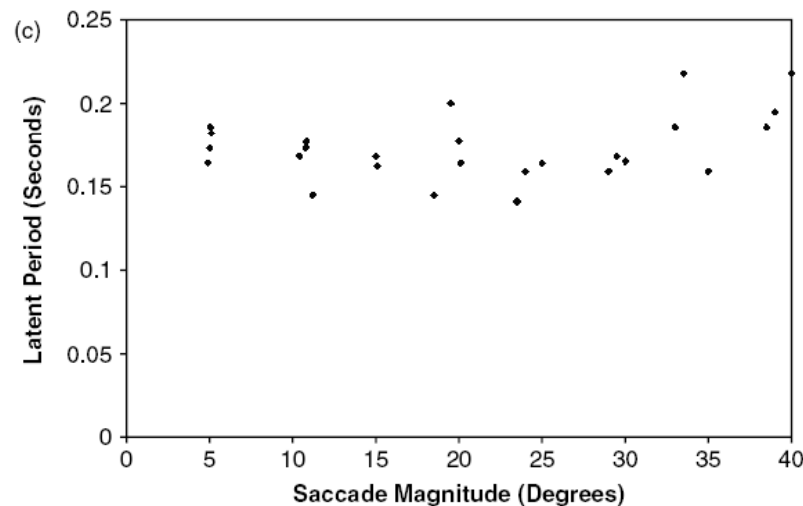
(a) Peak velocity–saccade magnitude for 26 saccadic movements by a single subject

مشخصه های سیستم ساکاد چشم



(b) saccade duration–saccade magnitude for 26 saccadic movements by a single subject

مشخصه های سیستم ساکاد چشم

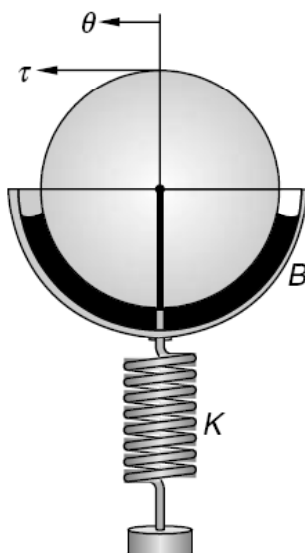


(c) latent period-saccade magnitude for 26 saccadic movements by a single subject

مدل Westheimer برای حرکت ساکادیک چشم

- مدل Westheimer درجه ۲ ذیل را برای حرکت ساکادیک چشم ارائه کرده است:

$$J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + K\theta = \tau(t)$$



θ موقعیت زاویه ای چشم

$\tau(t)$ گشتاور ایجاد شده توسط ماهیچه های بالا و پایین

و چپ و راست چشم

J اثر اینرسی سکون

B اثر اصطکاک

K اثر سفتی ماهیچه

مدل Westheimer برای حرکت ساکادیک چشم

- با گرفتن تبدیل لاپلاس از طرفین رابطه قبل داریم:

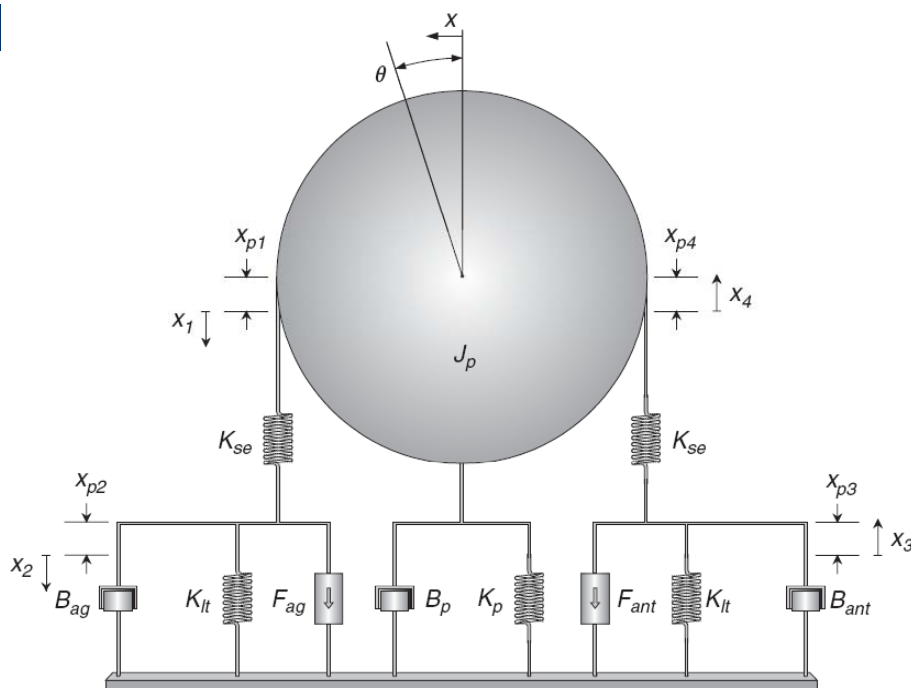
$$s^2 J \theta + s B \theta + K \theta = \tau(s)$$

$$(s^2 J + s B + K) \theta = \tau(s)$$

$$H(s) = \frac{\theta(s)}{\tau(s)} = \frac{\frac{\omega_n^2}{K}}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{J}}, \quad \zeta = \frac{B}{2\sqrt{KJ}}$$

مدل توسعه یافته برای حرکت ساکادیک چشم

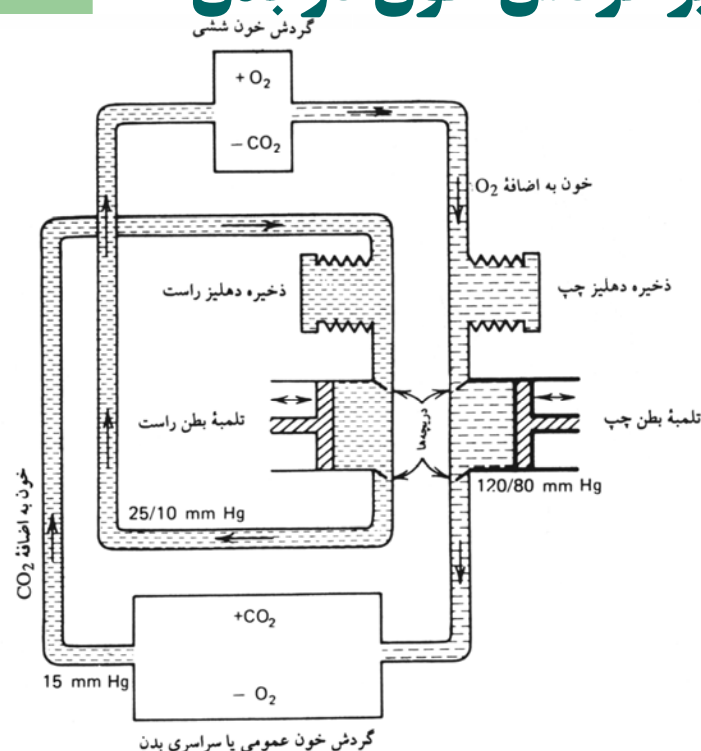


مثال ۳: مدل سازی سیستم گردش خون

● مطالعه سیستم گردش خون

- ۱- مسیر گردش خون در بدن
- ۲- اجزای اصلی سیستم گردش خون
- ۳- بررسی پارامترهای اصلی سیستم گردش خون

۱- مسیر گردش خون در بدن



شکل ۸-۲. سیستم گردش خون را می توان یک سیستم حلقه ای بسته با دو تلمبه تصور کرد. درجه های یک طرفه سبب جریان یافتن خون از تلمبه به طرف پایین می شوند. فشار با mmHg (میلی متر جیوه) نشان داده شده است.

۲- اجزای اصلی سیستم گردش خون

● الف- قلب

● ب- سرخرگها و وریدها (سیاهرگها)

الف- قلب

● قلب چپ (Left Heart)

- دهلیز چپ (Left Atrium)

- بطن چپ (Left Ventricle)

- دریچه میترال (بین بطن چپ و دهلیز چپ)

- دریچه آئورتیک (بین آئورت و بطن چپ)

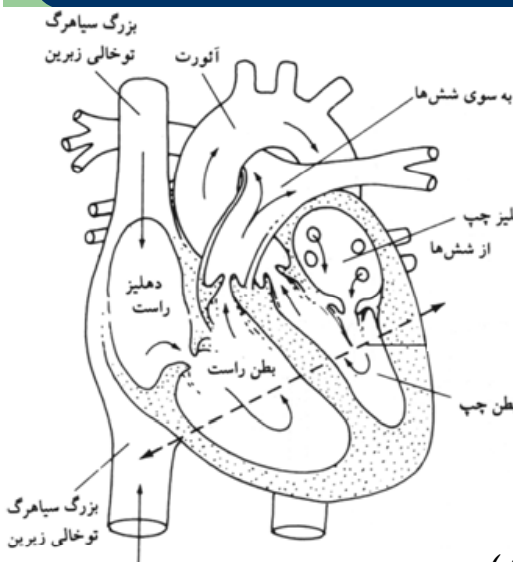
● قلب راست (Right Heart)

- دهلیز راست (Right Atrium)

- بطن راست (Right Ventricle)

- دریچه سه لتی (بین بطن راست و دهلیز راست)

- دریچه ریوی (بین سرخرگ ریوی و بطن راست)



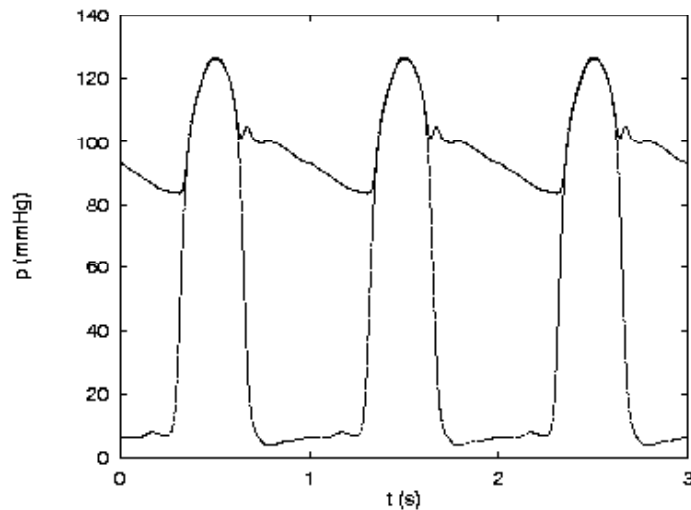
ب- سرخرگ ها و وریدها

- مقاومت دیواره رگها در مقابل جریان خون
- اینرتانس در مقابل جریان خون
 - نسبت تغییرات فشار به آهنگ تغییرات جریان خون
- کامپلیانس (الاستیسیته) رگها
 - خاصیت ارتجاعی دیواره رگ ها

۳- بررسی پارامترهای اصلی سیستم گردش خون

- جریان خون (Blood Flow)
- فشار خون (Blood Pressure)
- حجم خون (Blood Volume)

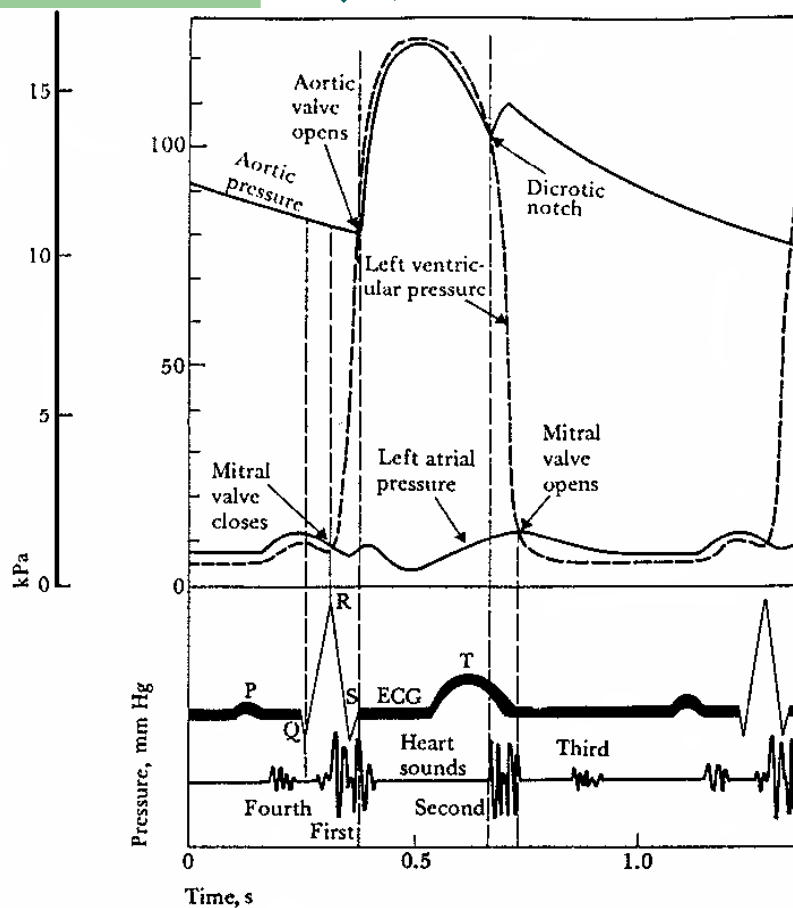
منحنی تغییرات فشار در بطن چپ و آئورت



31

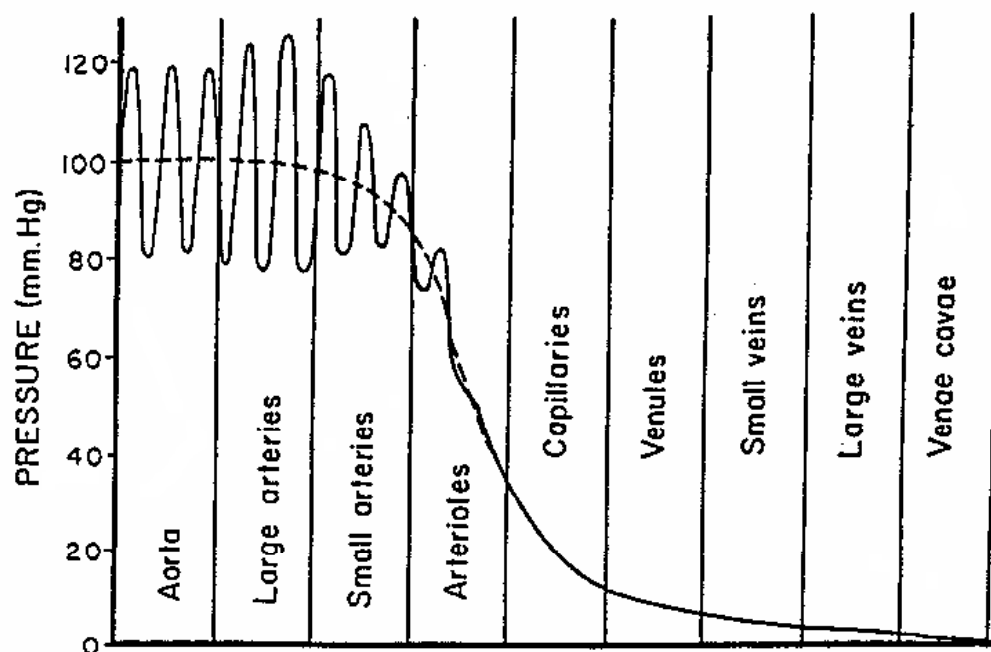
Aortic pressure (upper curve) and left ventricular pressure for three heart beats.

منحنی تغییرات فشار دهلیز چپ و آئورت



32

منحنی میزان فشار در نواحی مختلف سیستم گردش خون



33

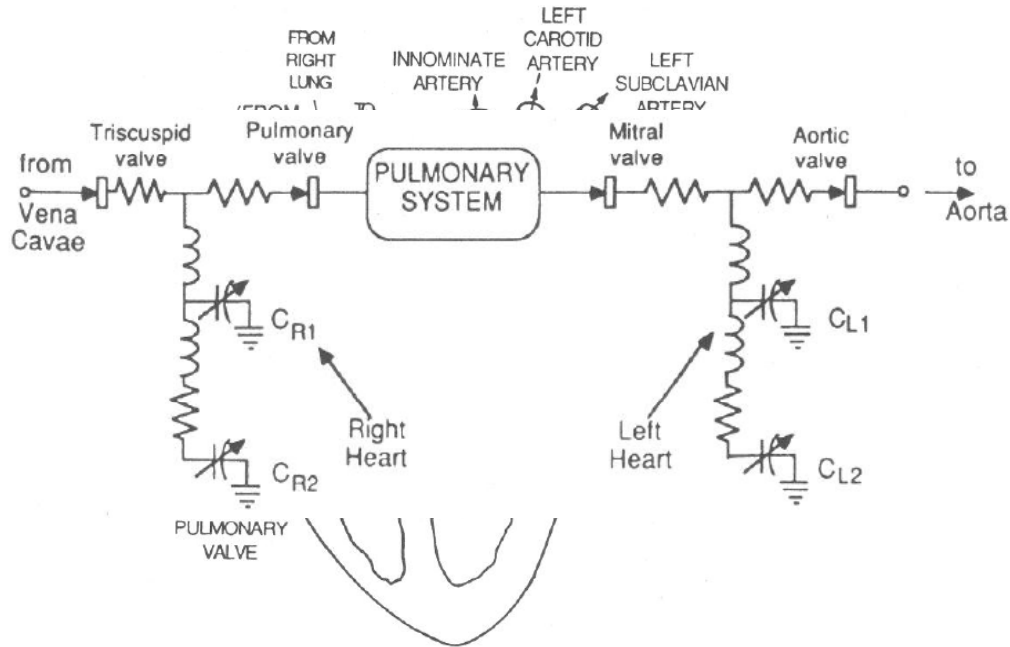
مدل سازی اجزای سیستم گردش خون

الف- مدل سازی قلب

ب- مدل سازی سرخرگها و وریدها

34

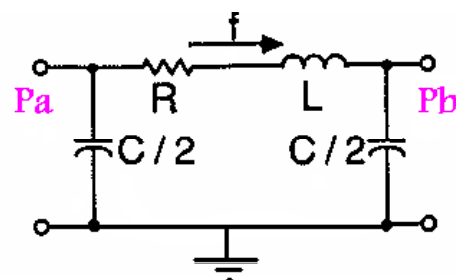
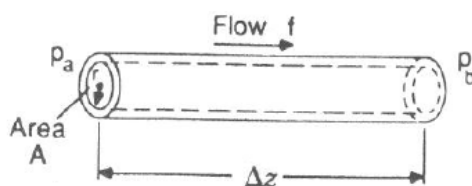
الف- مدل سازی قلب



35

ب- مدل سازی سرخرگها و وریدها

- مقاومت دیواره رگها \leftarrow مقاومت (R)
- اینرتانس در مقابل جریان خون \leftarrow سلف (L)
- کامپلیانس (الاستانس) رگها \leftarrow خازن (C)



36

ب- مدل سازی سرخرگها و وریدها (ادامه...)

ویسکوزیته خون

۱- مقاومت رگ

$$R = (8\pi\mu\Delta z)/(A^2)$$

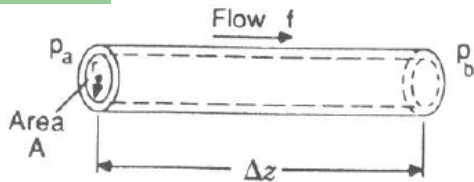
۲- اینرتانس

$$L = \rho\Delta z/A$$

چگالی خون مدول یانگ ضخامت رگ

۳- کامپلیانس رگ

$$C = (3\pi r^3\Delta z)/(2Eh)$$



منحنی تغییرات حجم رگ (Δq) به ازای تغییرات فشار (Δp)

Elastance of vessel wall

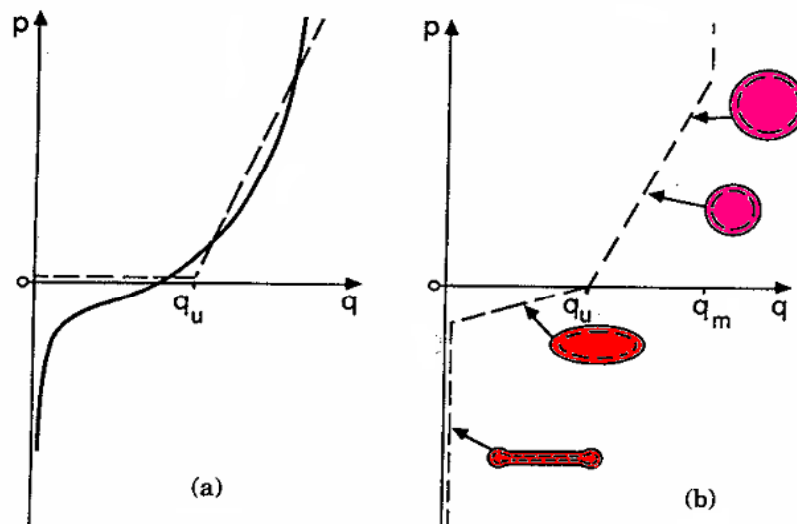


Figure 4.1.2. (a) Typical venous pressure-flow relation (solid line) and a two-section model fit (dashed line). (b) Four-straight-line model fit for the venous pressure-flow relations of (a), from full collapse to vessel rupture.

ب- مدل سازی سرخرگها و وریدها (ادامه...)

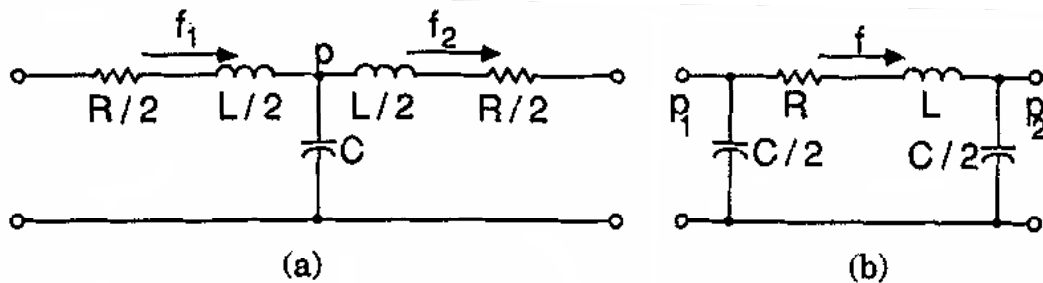


Figure 4.1.3. (a) T-section, and (b) PI-section lumped-equivalent models of a blood vessel segment.

مدل سازی آئورت همراه با یک شاخه فرعی آن

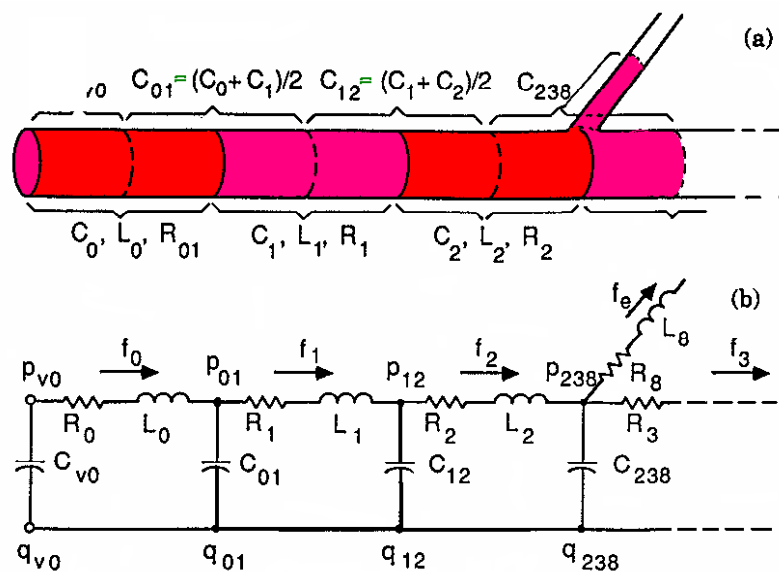
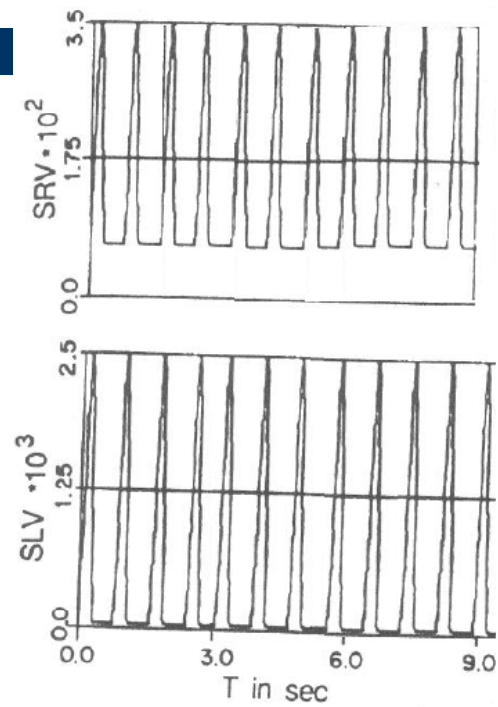
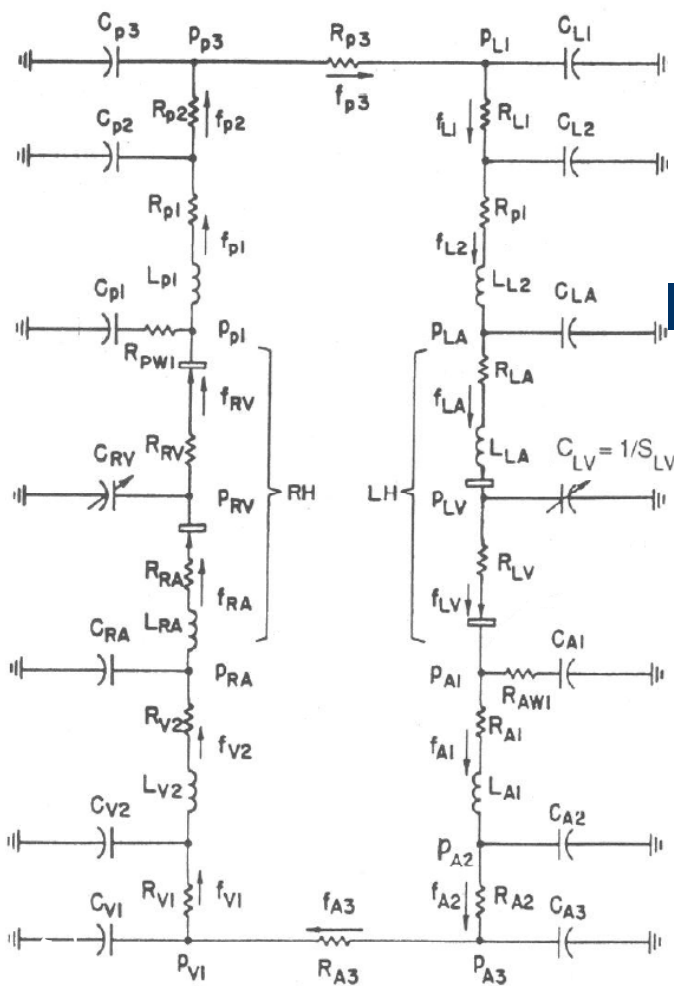


Figure 4.1.4. (a) A portion of the aorta (shown without curvature) including a branch, with division into segments shown by solid lines; dotted lines mark midpoints of segments. (b) A lumped model of (a) shown in circuit form.

مدل سازی کل سیستم گردش خون



نتایج شبیه سازی مدل کل سیستم گردش خون

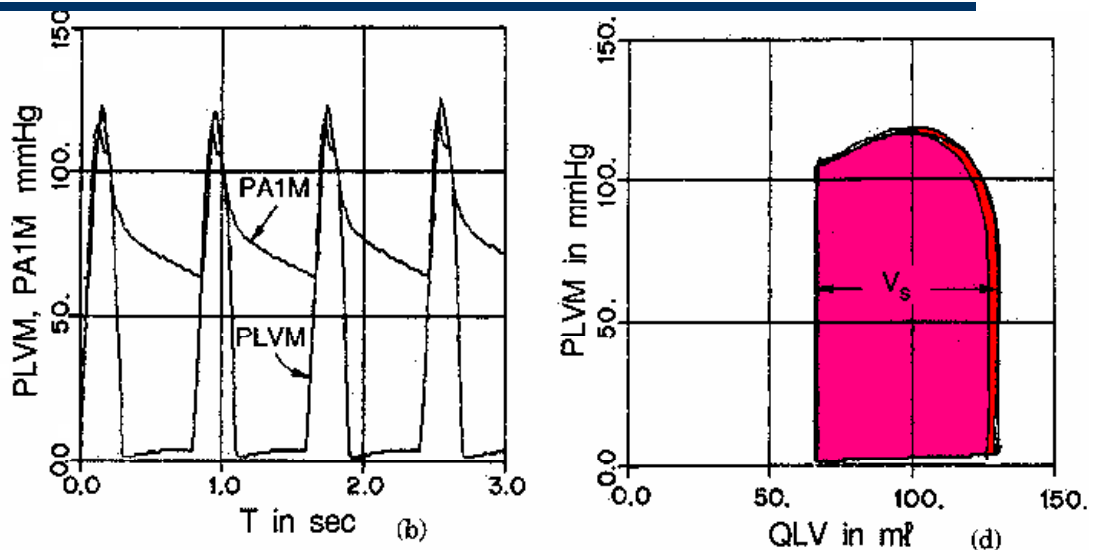


Figure 4.3.7. Model PF-1 in normal operation.

(b) Left ventricular and aortic pressures.

(d) Pressure-volume plot for the left ventricle.

نتایج شبیه سازی مدل کل سیستم گردش خون

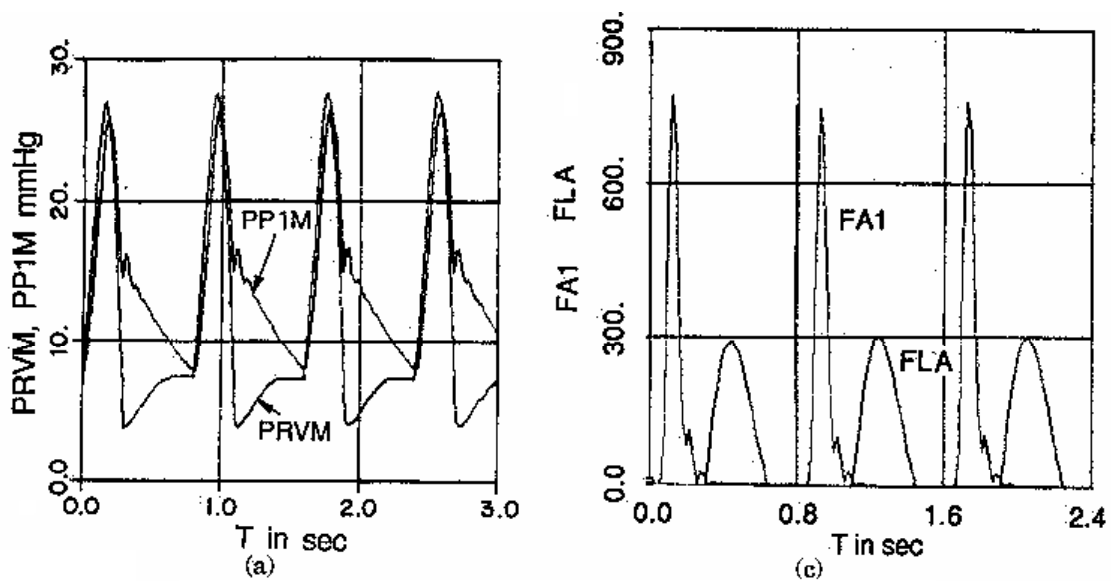


Figure 4.3.7. Model PF-1 in normal operation.
(a) Right ventricular and pulmonary artery pressures.
(c) Aortic flow, FLV and mitral valve inflow FLA, to ventricle.

نتایج شبیه سازی مدل به ازای آنفارکتوس ناگهانی

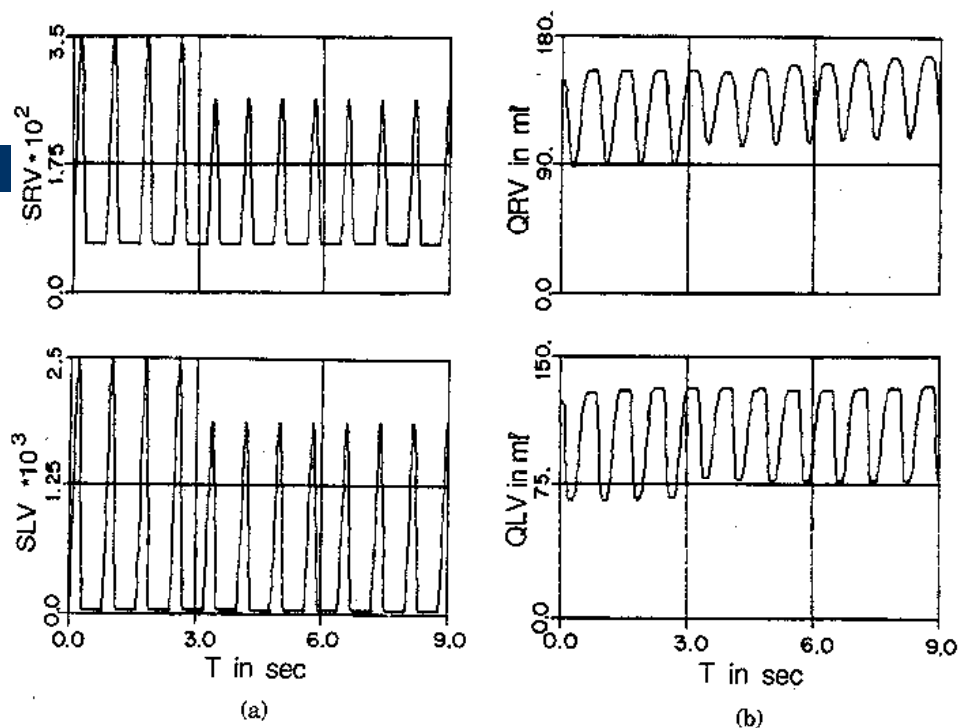


Figure 4.3.8. Model PF-1 with a simulated sudden infarction.
(a) Sudden decreases in SRV and SLV at THI = 2.4 sec.
(b) Ventricular volumes. Note the slow recovery in stroke volume after the infarct.

مثال ۴: مدل سازی سیستم تنفس

● مطالعه سیستم تنفس

- مشخصات کمیّتی تنفس
- مسیر ورودی هوا به درون ششها
- مکانیسم تنفس

مشخصات کمیّتی تنفس

هوای بازدمی (میلیتر جیوه)	هوای حبابچه‌ای (میلیتر جیوه)	هوای مرطوب (میلیتر جیوه)	هوای جو (میلیتر جیوه)	
۵۶۶/۰ (۷۴/۵٪)	۵۶۹/۰ (۷۴/۹٪)	۵۶۳/۴ (۷۴/۰۹٪)	۵۹۷/۰ (۷۸/۶۲٪)	ازت
۱۲۰/۰ (۱۵/۷٪)	۱۰۴/۰ (۱۳/۶٪)	۱۴۹/۳ (۱۹/۶۷٪)	۱۵۹/۰ (۲۰/۸۴٪)	اکسیژن
۲۷/۰ (۳/۶٪)	۴۰/۰ (۵/۳٪)	۰/۳ (۰/۰۴٪)	۰/۳ (۰/۰۴٪)	انیدرید
۴۷/۰ (۶/۲٪)	۴۷/۰ (۶/۲٪)	۴۷/۰ (۶/۲۰٪)	۳/۷ (۰/۵۰٪)	کربنیک
۷۶۰ (۱۰۰٪)	۷۶۰ (۱۰۰٪)	۷۶۰ (۱۰۰٪)	۷۶۰ (۱۰۰٪)	آب
				کل

مشخصات کمیّتی تنفس (ادامه...)

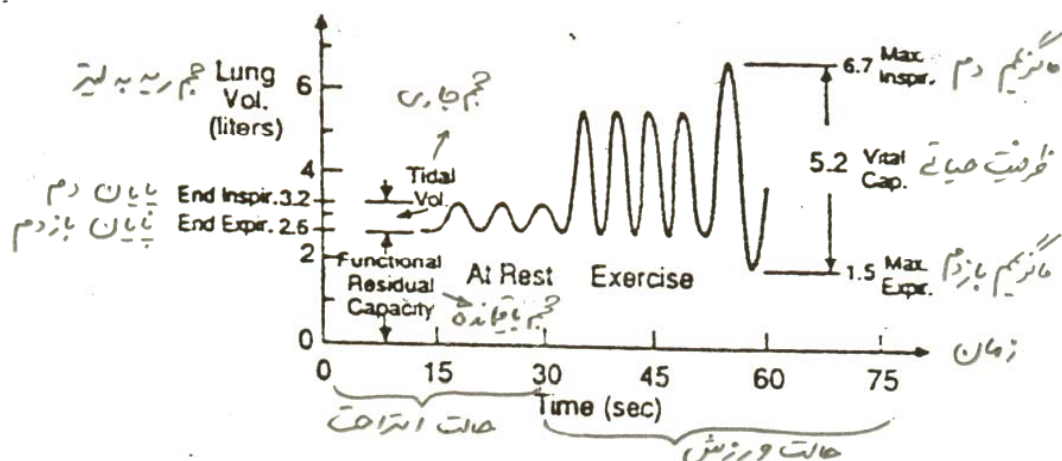
• نرخ تنفس در حالت استراحت

- مردان: ۱۲ بار در دقیقه
- زنان: ۲۰ بار در دقیقه
- نوزادان: ۶۰ بار در دقیقه

• حجم هوای تنفس شده در دقیقه

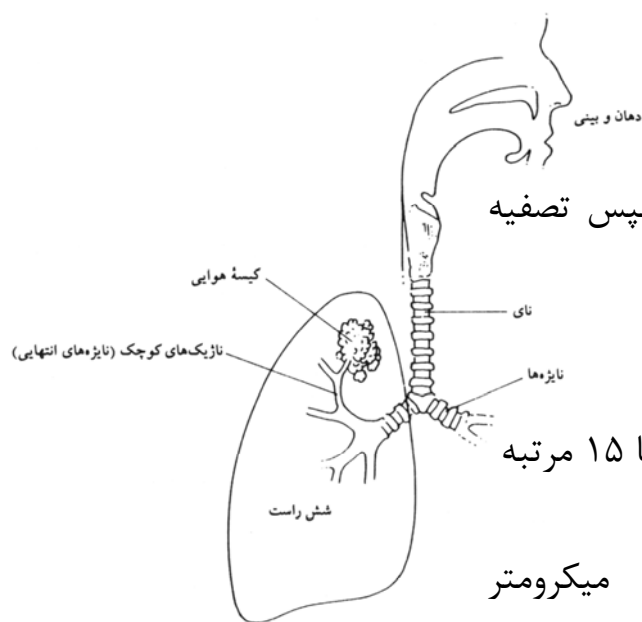
- حدود ۶ لیتر

مشخصات کمیّتی تنفس (ادامه...)



(شکل ۱-۲)

مسیر ورود هوا به ششها



- بینی: در آنجا هوا گرم و مرطوب و سپس تصفیه می‌شود.

- نای

- نایژه‌ها

- نایژک‌ها: تقسیم نایژه‌ها به نایژک‌ها تا ۱۵ مرتبه

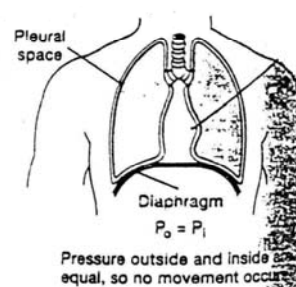
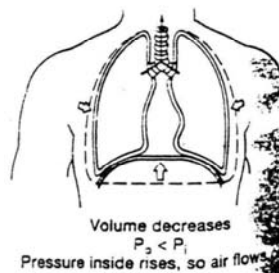
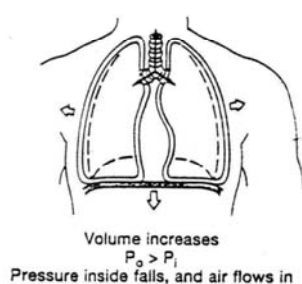
- کیسه‌های هوایی:

- حدود ۰.۲ میلیمتر قطر و ۰.۴ میکرومتر ضخامت دارند.

شکل ۷-۲. شمایی از مسیرهای جریان هوا به درون ششها

- محل مبادله اکسیژن و دی‌اکسیدکربن با خون

مکانیسم تنفس

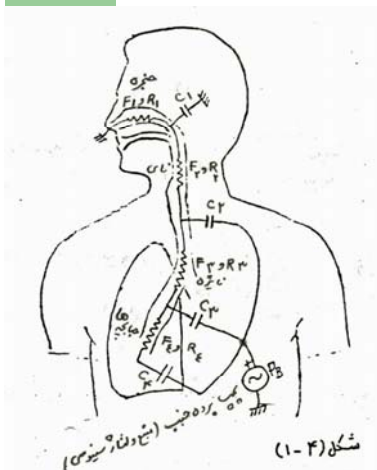


مکانیسم تنفس (ادامه...)

- شش‌ها در حالت طبیعی فرو نمی‌خوابند، زیرا در یک محفظه غیر قابل نفوذ به هوا (قفسه سینه) قرار گرفته‌اند.
- در حالت طبیعی فشار منفی ۱۰-۵ میلیمتر جیوه در فضای داخل جنبی بین قفسه سینه و شش‌ها وجود دارد.
- انقباضات متناوب دیافراگم و عضلات تنفسی، باعث تنفس پیوسته شخص با نرخ مشخص می‌شود.

مدل سیستم تنفس

- در حالت طبیعی فشار جنب کمتر از فشار اتمسفر بوده لذا منبع ولتاژ سینوسی که بجای دیافراگم در نظر گرفته می‌شود، دارای بایاس منفی است.
- کمپلیانس یا خازن در نظر گرفته شده برای بخشهای مختلف سیستم تنفس، به دلیل خاصیت ارتجاعی دیواره آنها است.
- کمپلیانس در نظر گرفته شده برای نای و نایژه‌ها و حلق بدلیل ارتجاع کم دیواره آنها، ناچیز و قابل صرف نظر است.



مدل سیستم تنفس (ادامه...)

