3.2 GAIA: Sistema kardiobaskularra

Sarrera

Sistema kardiobaskularraren sinplifikazioa honakoa da: likidoz (odola) betetako hodi-multzo bat (baskulatura), ponpa bati konektatuta (bihotza, honek sortutako ekintza potentzia). Bihotzaren uzkurdurak sortutako presioak etengabe mugiarazten du odola sisteman, konposatu ugari garraiatuz:

TABLE 14-1 Transport in the Cardiovascular System

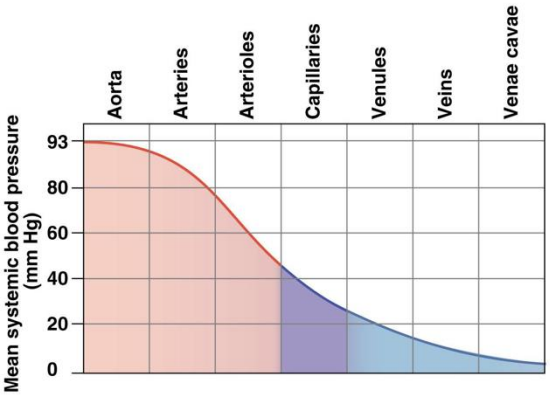
SUBSTANCE MOVED	FROM	TO
Materials entering the body		
Oxygen	Lungs	All cells
Nutrients and water	Intestinal tract	All cells
Materials moved from cell to cell		
Wastes	Some cells	Liver for processing
Immune cells, antibodies, clotting proteins	Present in blood continuously	Available for any cell that needs them
Hormones	Endocrine cells	Target cells
Stored nutrients	Liver and adipose tissue	All cells
Materials leaving the body		
Metabolic wastes	All cells	Kidneys
Heat	All cells	Skin
Carbon dioxide	All cells	Lungs

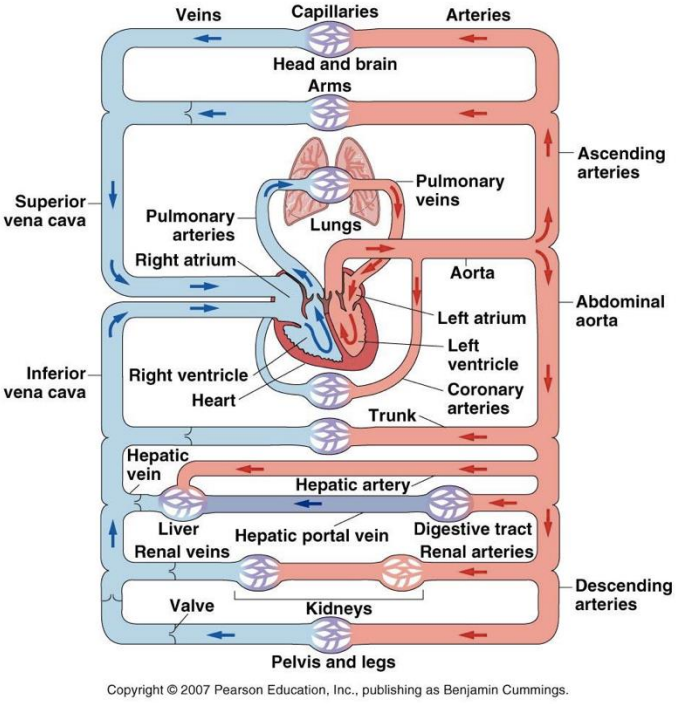
Odola bihotzetik ateratzen duten odol-hodiak **arteriak** izango dira eta odola bihotzera daramaten odol-hodiak **zainak.**

Garraioa

CO_2 askoko eta O_2 gutxiko odola bihotzera heldu eta bertatik birikietara doa. Bertan gas-trukea burutuko da eta bihotzera bueltatuko da CO_2 gutxiko eta O_2 askoko odola, organismo osoan zehar banatzeko. Kaba zainaren bidez iristen da odol guztia bihotzera.

Odola presio-gradiente bati jarraituz mugitzen da beti: presio altuagoko leku batetik presio baxuagoko leku batera.

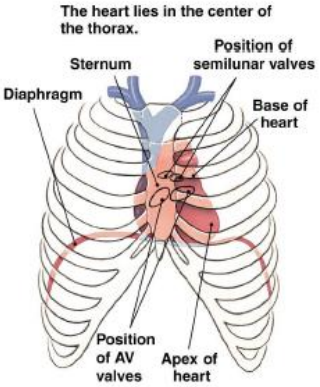


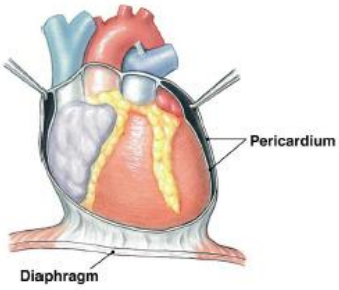


Fluidoa ez da inoiz presio txikitik handira edo presio bera duten hodien artean mugituko. Horrela, bihotzetik aortara pasako da odola eta honek presio maila altuena izango du. Grafikoan ikusten den moduan, odola garraiatu ahala, hau doan odol-hodien presioa murriztuz joango da (arteria > zaina).

Bihotza

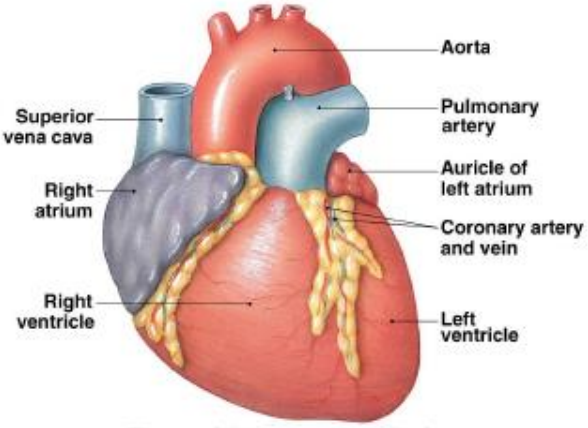
Bihotza ukabil baten tamainako organo muskularra da, barrunbe torazikoaren erdian kokatuta. Oinarria esternoiaren atzean dago eta punta ezkerrerantz kokatzen da. Inguruan **perikardio** izeneko mintza dauka.





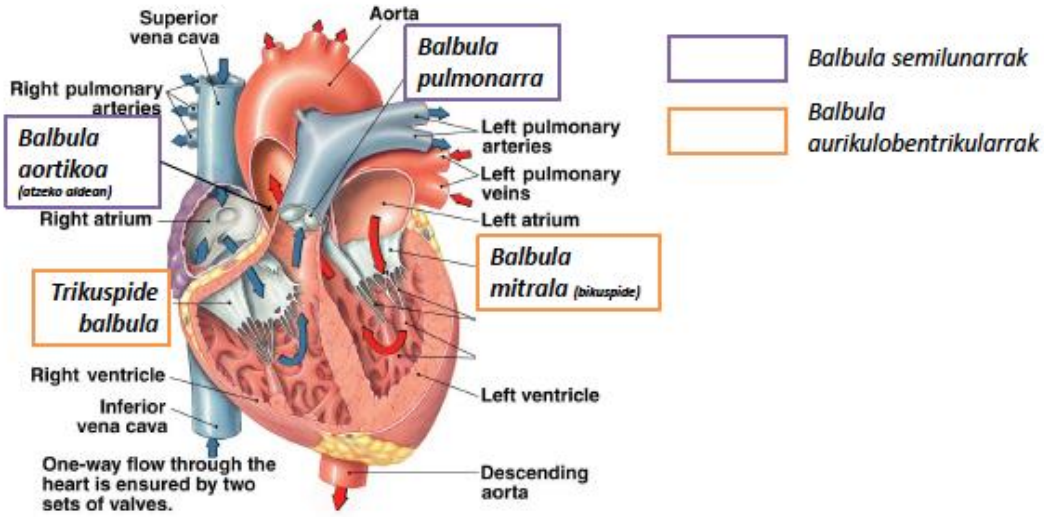
The heart is encased within a membranous fluid-filled sac, the pericardium.

Bihotza **miokardioz** (muskulu leuna) dago osatuta, mardulena bentrikuluetakoa (bereziki ezkerrekoa) izanik. Aurikuletako muskulua finagoa eta malguagoa da, odola bertatik sartzen delako. Bentrikuluetan, berriz, muskulua lodiagoa eta gogorragoa da, hemen presioa altuagoa delako eta indar gehiago egin behar duelako odol hori gorputz oson zehar banatzeko.



The ventricles occupy the bulk of the heart. The arteries and veins all

Bihotzaren oinarrian odol-hodi handienen irteerak/sarrerak daude, eta bihotzaren gainazaletik arteria eta zain koronarioak.

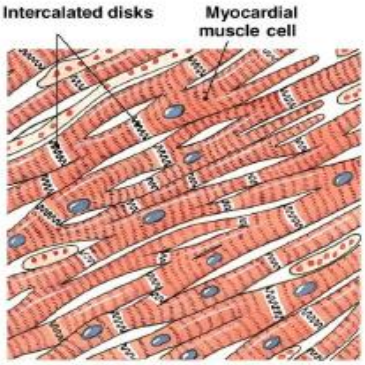


Bihotzak 4 ganbara ditu: 2 aurikula (*atrium* ingelesez) goian eta 2 bentrikulu behean. Odola aurikuletara sartzen da eta ondoren, aurikulak aldi berean uzkurtzen dira odola bentrikuluetara bidaliz. **Balbula aurikulobentrikularrek**, alde betik, ezkerreko aurikula eta ezkerreko bentrikulua eta, bestetik, eskuineko aurikula eta eskuineko bentrikulua konektatzen dituzte; odola aurikuletatik bentrikuluetara pasatzean itxi egiten da.

Bentrikuluak, aldi berean uzkurtu ondoren, odola bihotzetik arterietara ateratzen dute gorputz osoan zehar banatzeko. **Balbula semilunarrek**, ezkerreko bentrikulua aorta arteriarekin eta eskuineko bentrikulua biriki arteriarekin konektatzen dute. Odola igaro ondoren, itxi egiten dira. Balbula hauek beharrezkoak dira arterietan dagoen odola atzera buelta ez dadin.

Eskuineko eta ezkerreko aurikula-bentrikulu pareak septoa deritzon egitura baten bidez banatuta daude. Honen bidez, odolaren nahasketa ekiditen da.

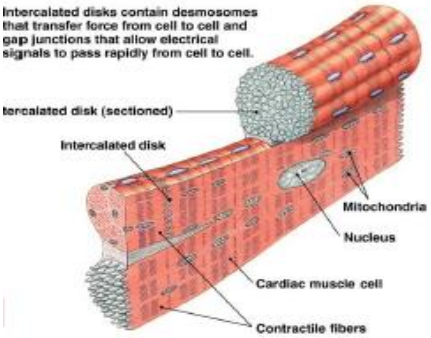
Bihotzaren uzkurketa



Myocardial muscle cells are branched, have a single nucleus, and are attached to each other by specialized junctions known as intercalated disks.

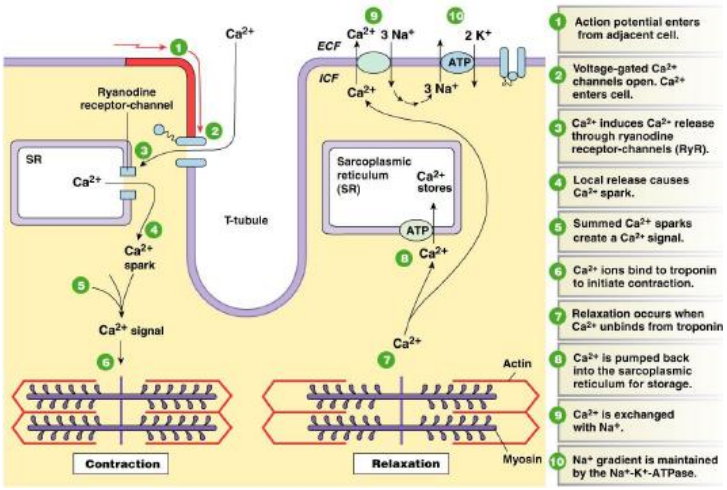
Miokardioan hiru motatako zelulak daude. Alde batetik, %99a zelula uzkurgarriak dira, muskulu eskeletikoko zelulen antzekoak. Nukleo bakarreko zelula txikiak dira. Ezberdintasunak:

- Zelula txikiagoak eta nukleo bakarrekoak
- Zelula adarkatuak eta beste zelula batzuekin lotuak: sare konplexua
- Zelulen arteko lotura: tartekatutako diskoak, gap loturak + desmosomak (sinapsi elektrikoa eta sinkronizazioa + indarraren transmisioa)
- Ca^{2+} gutxiago metatu e. sarkoplasmikoan: zelulaz kanpoko Ca^{2+} ere sartu behar
- Mitokondrioak oso ugariak: E asko behar etengabe



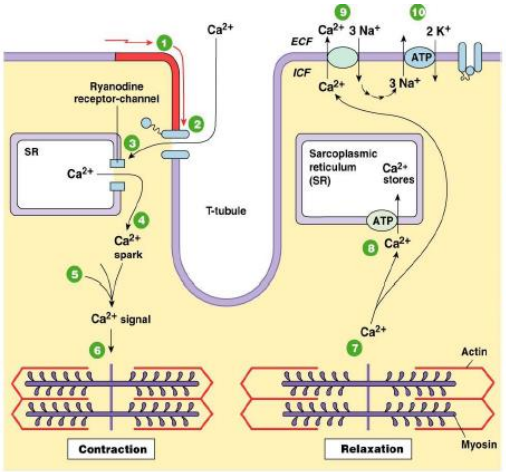
Bestalde, %1 zelula autoerritmikoak/taupada-markagailuak. Hauek ekintza-potentzialak sortu espontaneoki. Zelula uzkurgarri modifikatuak, espontaneoki sortu ekintza-potentzialak etengabe.

Zelula uzkurgarriak uzkurtzen dira zelula autoerritmikoen ondorioz; hau da, nerbio sistema sinpatiko zein parasinpatikoak zelula autoerritmikoak kontrolatzen ditu, eta hauek eragingo dute zelula uzkurgarrietan. Gainera, zelula eroaleak daude, zeintzuek bihotzeko uzkurketa koordinatua izan dadin, ekintza potentzialaren garraio arina egiten dute, toki guztietara seinalea heltzeko.

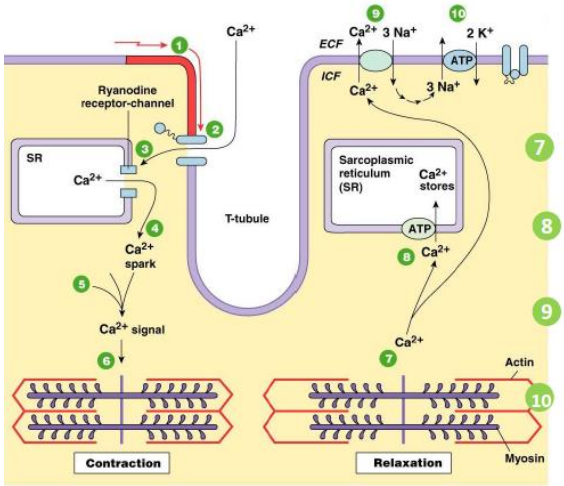


Kitzikapenaren eta uzkurduraren arteko erlazioa kaltzioak eragiten du. Bi egoera daude: erlaxatuta dagoenean, non kitzikatzeko beharrezkoa den kaltzioa zelulara sartzea, rianodina hartzaileen bidez. Kaltzio sarrerak, aldi berean erretikuluan dagoenaren askapena eragingo du. Horrek kaltzio seinale sendoa sortuko du, troponinarekin lotu eta zelula uzkurtuko da. Erlaxatzerakoan, kaltzioa kanporatu egiten da eta ERRkoa barneratu.

Kanalak irekita daude eta kaltzioa sartzen hasten da. Kaltzioarentzako kanalak dira **rianodinak**, eta kaltzioak zabaltzen ditu. Kaltzioa sartzen hasten denean, kontzentraziuo igoerak kanal horien itxiera eragiten du. Hori dela eta, beharrezkoa da erretikuluko Ca askapena horren kontzentrazioa geroz eta altuagoa izan dado. Erretikulukoa askatuko ez balitz, ez litzateke kontzentrazio hori hain altua izango, kanalak itxiko baitita.



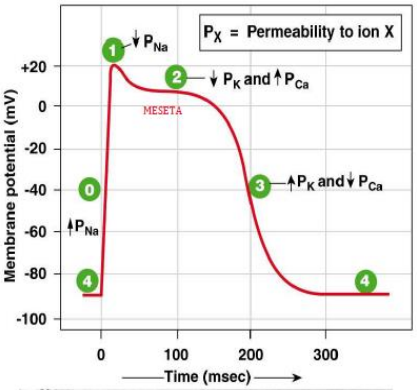
1. EP alboko zeluletik sartzen da
2. Mintzean boltai-menpeko Ca^{2+} kanalak irekitzen dira
3. Sartzen den Ca^{2+}ak erretikulu sarkoplasmikoaren Ca^{2+} kanalak aktibatzen ditu
4. Erretikulu sarkoplasmatikotik Ca^{2+} kanporatzen da
5. Ca^{2+} metaketak Ca^{2+} seinalea sortuko du
6. Ca^{2+} troponinarekin batu eta UZKURKETA hasten da

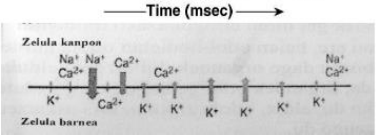


7. Erlazaxioa Ca^{2+} troponinatik banantzen denean gertatzen da
8. Ca^{2+} erretikulu sarcoplasmatikora ponpatzen da, han metatzeko
9. Ca^{2+} a Na^{+}gatik trukatzen da mintzan (kontrako garraioa)
10. Na^{+}/K^{+} ponpak gradientea mantentzen ditu

Ekintza potentziala

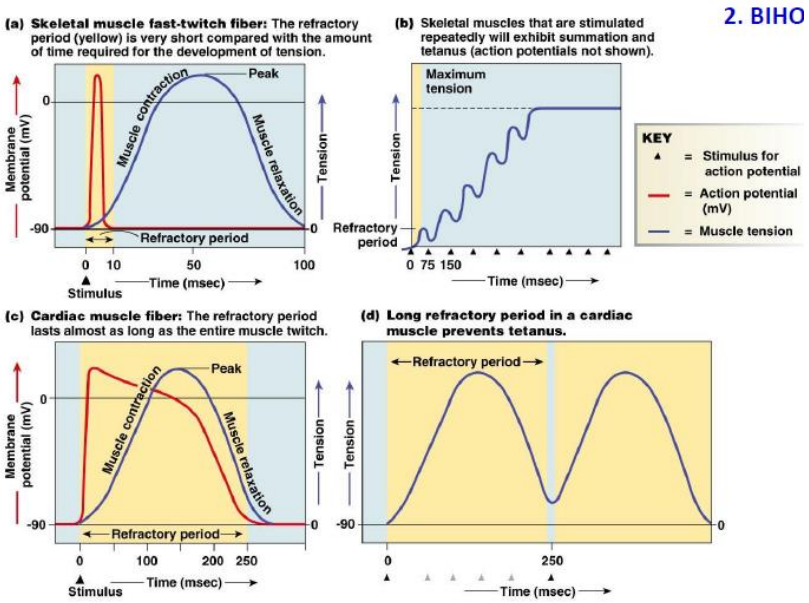
Kurbaren egitura ezberdina da kaltzioaren eragina dela eta. Mintza atsedenean dago eta despolarizazio azkarra ematen da. Horrek atari maila igarotzen duenean despolarizazio azkarra eragingo du eta 0-1 puntuen tarteko malda handia agertuko da. 2. puntuan, aldiz, errepolarizazioa hasten da, baina kaltzio kanalak zabalik daude honen sarrera ahalbidetuz. Ondorioz, nahiz eta potasio pixka bat kanporatu, kaltzio sarrera ere hain handia denez, ez dago potentzialaren aldaketarik, eta lautada moduko egitura hartzen du grafikoak.





0. Na^{+} kanalak irekitzen dira
1. Na^{+} kanalak ixten dira
2. Ca^{2+} kanalak irekitzen dira
   K^{+} kanal arinak ixten dira
3. Ca^{2+} kanalak ixten dira
   K^{+} kanalak geldoak irekitzen dira
4. Atseden potentziala

Kaltzio kanalak inaktibatzen doazen heinean, zabalik dauden potasio kanal kopurua handiagoa da, honekiko iragazkortasuna igoz (3). Errepolarizazioa amaituko da eta hiperpolarizazio fase gabe helduko da atseden potentzialera (4).



2. BIHO

Gorriz ekintza potentziala dago. Zelula despolarizatua dagoenean ezin da beste ekintza potentzial bat eman (aldi errefraktarioa). Muskuluak aldi errefraktario oso txikia dauka. Horren ondorioz, erlaxazioa eman aurretik, beste ekintza potentzial bat heldu daiteke, erlaxatzen uzten ez diona. Lasaitzeaz bukatu aurretik uzkurtzen hasiko da berriro. Uzkurtu-lasaitu zikloa apurtzen da → tetanosa.

Bihotzean hori ezin da gertatu. Sodio kanalak ezin dira despolarizatu eta ezin da berriro beste ekintza bat sortu. Beraz aldi errefraktario askoz luzeagoa dagoenez, muskuluak uzkurtzeko eta lasaitzeko behar duen denbora izango du eta ez da Tetanosa bezalako egoera fisiologikorik emango.

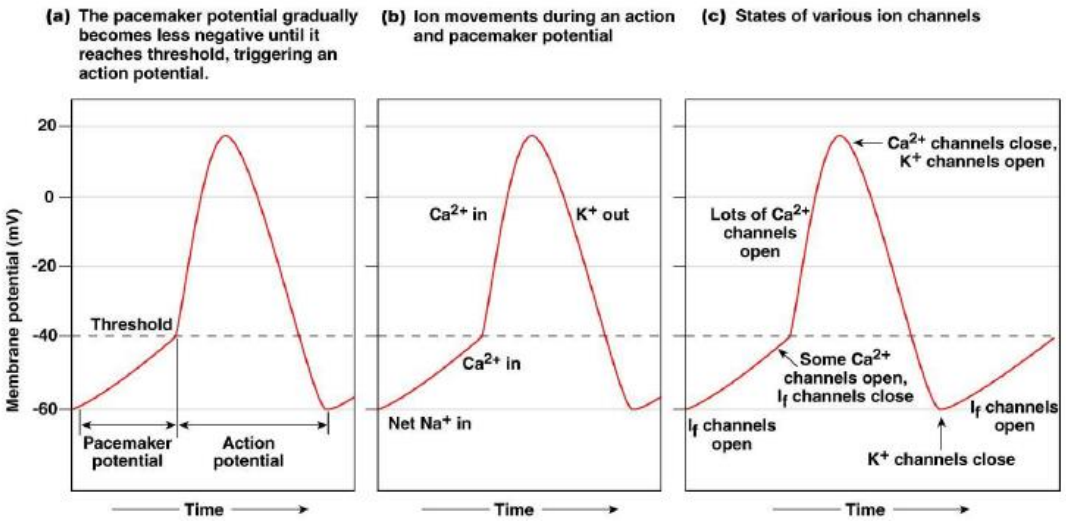
Ekintza potentzialaren aldi errefraktarioa uzkurketa osoan zehar ematen da: Fibrilazioak saihesten ditu.

	MUSKULU ESKELETIKOA	MUSKULU KARDIAKOA
Mintz Potentziala	-70 mV	-90 mV
EP-ren sormena	Na^+ sarrera Ach kanaletik	Despolarizazioa GAP loturetatik sartzen da
EP-ren goranzko fasea	Na^+ sarrera	Na^+ sarrera
Birpolarizazio fasea	Azkarra; K^+ kanporatzen delako	Meseta Ca^{2+} ren sarreragatik; fase azkarra K^+ ren kanporaketagatik
Hiperpolarizazioa	K^+ ren iragazkortasun altua dela eta K^+ gehiago kanporatzen delako	Ez dago; atsedeneko potentziala -90 mV (K^+ oreka potentzialaren antzekoa)
EP iraupena	Laburra: 1-2 mseg	Luzea: 200 ms baino gehiago
Aldi errefraktarioa	Jeneralean laburra	Luzea Na^+ EP-ren amaierarte

Ekintza potentzialak eta euren modulazioa

Nola sortu ditzakete ekintza potentzialak nerbio sistemaren seinalerik gabe? Zelula autoerritmikoek ez daukate mintz potentzial egonkorrik. Horren ordez, kanal batzuk dituzte mintzean, eta hauek inolako seinalerik gabe, espontaneoki, ireki eta itxi egiten dira. Kanal horiek I_f kanalak, Ca^{+2} kanalak eta K^+ kanal motelak dira. Horrela, sodioaren sarrera eta potasioaren kanporaketa eragiten dute. Beraz, espontaneoki despolarizatu eta ekintza potentziala sortuko dute.

Bestalde, seinalerik ez dutenez, ez daukate oreka potentzial zehatzik. -60mVera heltzean normalean despolarizazioa ematen da jarraian. Sodio sarrerak boltai menpeko kaltzio kanalen irekiera eragiten dute eta kaltzio horrek sortuko du zelulen despolarizazio azkarra, gap loturen bitartez zeluletatik zehar igaroko baita.



Hala ere, nahiz eta bere kabuz ekintza potentziala sortu dezakeen, nerbio sistemak ere eragina dauka horren erritmoan. Alde batetik, **NS sinpatikoak** despolarizazio-erritmoan eragiten du, despolarizazio-abiadura handituz.

- Norepinefrina → I_f eta Ca^{2+} kanalen iragazkortasuna ↑ → ekintza-potentzialen erritmoa ↑ → maiztasun kardiakoa ↑

NS parasinpatikoak (azetilkolina) kontrakoa eragiten du, aldiz, K^+ kanalen iragazkortasuna handituz eta Ca^{2+} kanalena txikituz. Beraz, despolarizazio-abiadura murriztu egiten da.

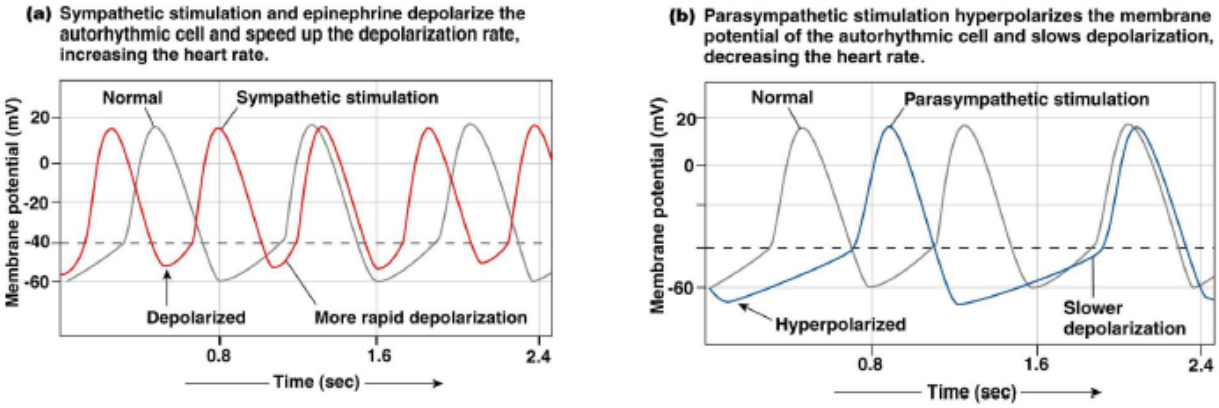
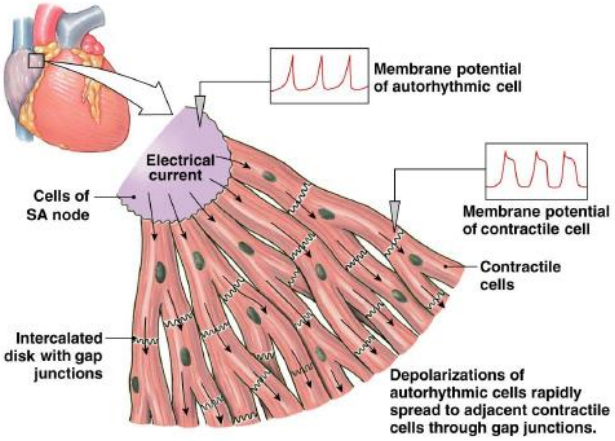


TABLE 14-3 Comparison of Action Potentials in Cardiac and Skeletal Muscle

	SKELETAL MUSCLE	CONTRACTILE MYOCARDIUM	AUTORHYTHMIC MYOCARDIUM
Membrane potential	Stable at −70 mV	Stable at −90 mV	Unstable pacemaker potential; usually starts at −60 mV
Events leading to threshold potential	Net Na^+ entry through ACh-operated channels	Depolarization enters via gap junctions	Net Na^+ entry through I_f channels; reinforced by Ca^{2+} entry
Rising phase of action potential	Na^+ entry	Na^+ entry	Ca^{2+} entry
Repolarization phase	Rapid; caused by K^+ efflux	Extended plateau caused by Ca^{2+} entry; rapid phase caused by K^+ efflux	Rapid; caused by K^+ efflux
Hyperpolarization	Due to excessive K^+ efflux at high K^+ permeability when K^+ channels close; leak of K^+ and Na^+ restores potential to resting state	None; resting potential is −90 mV, the equilibrium potential for K^+	None; when repolarization hits −60 mV, the I_f channels open again
Duration of action potential	Short: 1–2 msec	Extended: 200+ msec	Variable; generally 150+ msec
Refractory period	Generally brief	Long because resetting of Na^+ channel gates delayed until end of action potential	None

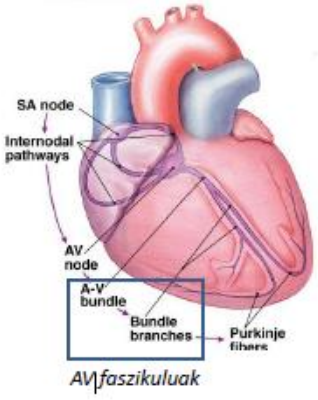
Eroapen elektrikoa bihotzean

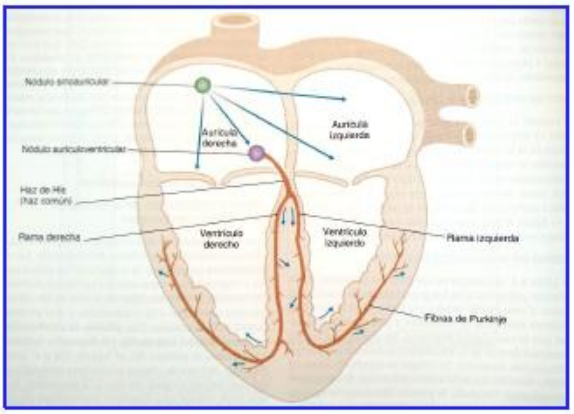


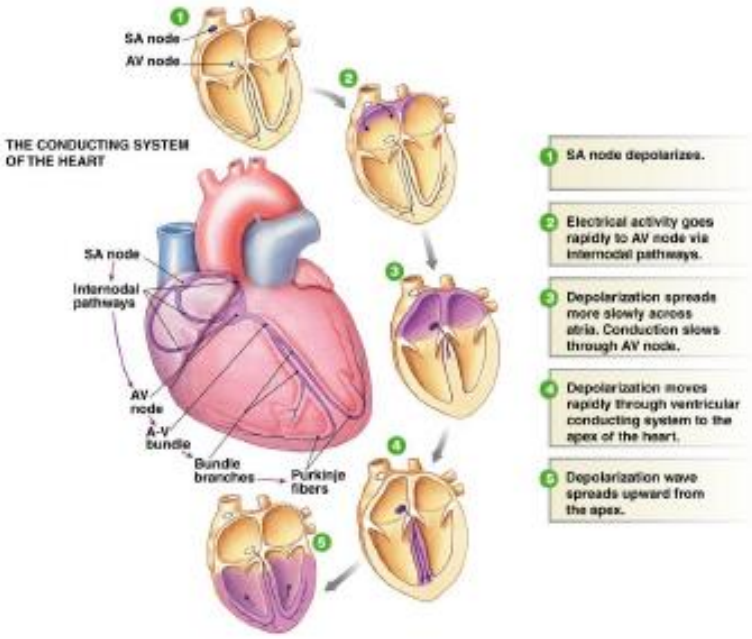
Nola antolatzen dira zelula autoerritmikoak bihotza koordinatuki uzkur dadin? Despolarizazioa puntu bakar baten hasten da: nodo sinoaurikularra (SA) (goiko aurikulan, eskuinean).

Bide internodalak dira despolarizazioa bihotz osoan zehar garraiatzeaz arduratzen diren sistema eroaleak dira. Bide hori zelula autoerritmikoek sortzen duten zuntzen sistema adarkatua da eta nodo aurikulobentrikularrean (AV) amaitzen da. Ondoren AV faszikuluetan jarraituko du bihotzaren puntaraino heltzeko, eta bertatik Purkinje zuntzek eramango dute despolarizazioa bentrikuluetara.

SAtik AVra daude 5 cm daude eta 30 ms behar ditu bide hori egiteko. Aldiz, nodoa bakarrik zeharkatzeko 120 ms behar ditu 3mm-ko distantzia egin ahal izateko. Zergatik? Lehenengo pausoan aurikulak uzkurtzen dira eta bigarren nodora heltzean mantsotzen da. Horrela bentrikuluak betetzeko denbora dago. Honek ahalbidetzen du, presio aldaketaz aprobetxatuz, odolaren ¾ pasiboki igarotzea bentrikulura, eta seinalea iristen denerako aurikulan geratzen den ¼ odola uzkurketa bidez bultzatuko da bentrikulura.







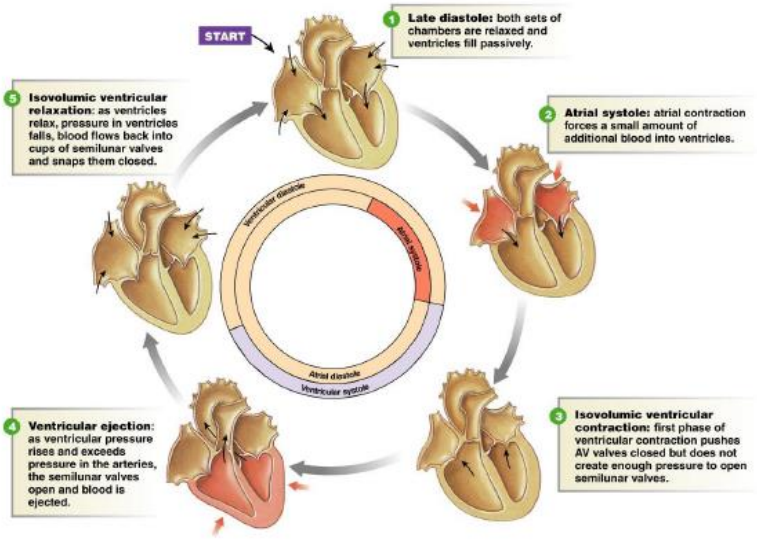
AV nodoak bi funtzio ditu:

- **Despolarizazioa bentrikulura heltzea ahalbidetu**
- **Transmisioa atzeratu:** aurikulak eta bentrikuluan aldi berean ez uzkurtzeko

Bihotzaren maiztasuna SA nodoak determinatzen du, bertan gertatzen baitira bizkorren ekintza-potentzial espontaneoak. (≈70 despolarizazio/minutu)

Bihotz zikloa

Bihotz zikloari buruz hitz egiten denean, **sistolea** (miokardioaren uzkurdura) eta **diastolea** (miokardiaren erlaxazioa) bereizten dira. Bentrikuluan diastolea eta sistolea gertatzen dira, aurikulan, aldiz, presistole edo diastole urikularra.



Uzkurdura eta gero, odola bihotzetik atera dela, bentrikulua lasaitu eta bolumena handitzen da. Horrek bentrikuluko presioaren jaitsiera eragiten du. Hori dela eta, balbula aurikulobentrikularrak ireki egiten dira eta bentrikuluak pasiboki betetzen hasiko dira. Pasiboki beteko dute odolaren 3/4rekin. Odola pasatzen hasiko da eta aurikularen eta bentrikularen presioak berdinduko dira.

Aurikula uzkurtzen denean, gelditzen zen odolaren 1/4a bentrikuluetara pasatuko da.

Orain, bentrikuluak odolez beteta daude, presioa oso altua da eta horrek balbula aurikulobentrikularrak ixten ditu. Baina oraindik ez dago presio nahikoa balbula semiluarrak irekitzeko. Presioa handitzen da uzkurdurarekin (sistolearekin) eta, horren bidez, balbula seminulinarrak zabaltzen dira. Odola aterako da eta guztiz kanporatzen denean arteriako presioa bentrikuluarena baino askoz handiagoa izango da. Une horretan balbula semilunarrak itxiko dira odola ez bueltatzeko.

Bihotz-emaria eta bere moldaketak

Bihotz-emaria edo gastu kardiakoa: bentrikulu batek minutu baten ponpatutako odol-bolumena. Egoera normaletan, diastole bentrikularraren amaieran 135 ml odol daude, eta sistole bentrikularraren amaieran 65 ml. Beraz, taupadaren bolumena = 135 ml – 65 ml = 70 ml (65 ml horiek tarte bezala erabiltzen dira. Ponpatu daitekeen bolumen max 100 ml)

Bestalde, egoera normaletan bihotz-maiztasuna 72 taupada/min bada, bihotz-emaria = 72 taupada/min x 70 ml/taupada ≈ 5 L/min. Horrek esan nahi du gorputz osoko odola mugiarazten duela bentrikulu batek minutu batean.

Hori kontuan izanda, gorputzaren beharrizanen arabera bihotz-emaria alda daiteke. Horretarako bihotzaren maiztasuna edo taupadaren bolumena aldatu behar dira.

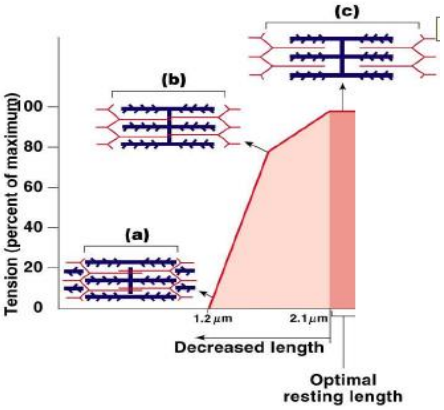
Bihotz-maiztasunaren erregulazioa

Nerbio sistema autonomoak erregulatzen du, lehen ikusi dugun bezala. Garrantzitsuena NS Parasinpatikoa da; izan ere, bere erregulaziorik gabe bihotz-maiztasuna 90 taupada/minutura igotzen da, hau da, maiztasun basala mantentzen du. Bihotz-emari altuagoa behar denean, aldiz, NS Parasinpatikoaren jarduera murriztu edo NS Sinpatikoarena handitu, NSA-k SA nodoa eta AV nodoa inerbatzen baititu. AV nodoaren gaineko modulazioak bertan gertatzen den atzerapena aldarazten du.

Taupadaren bolumena

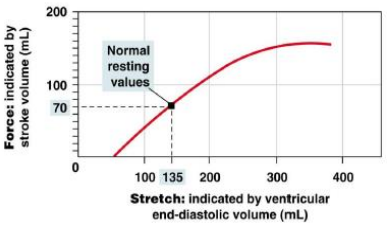
Miokardioak sistolean egindako indarraren ondorioa da. Indar hori bi parametroren menpekoa da: (1) zuntz uzkurgarrien luzera eta bihotzaren uzkurgarritasuna.

1. Zuntz uzkurgarrien luzera



Sarkomeroa geroz eta luzeagoa izan orduan eta indar gehiago egin dezake uzkurduran. Baina, **noiz luzatzen da sarkomeroa?** Erlaxatzen denean luzatzen da, hau da, diastole bentrikularrean, Frank Starling-en legea betetzen da. Aktinak eta miosinak dituzten lotura puntuen araberakoa da uzkurtzeko ahalmena; izan ere, diastolean bentrikulak erlaxatzen direnean zenbat eta handiagoa izan sarkomeroa lotura puntu gehiago izango dituzte. Horrek gero ahalbidetzen du, uzkurketa ematen denean, uzkurketa ibilbide luzeagoa egitea.

- Zenbat eta odol gehiago eduki, geroz eta indar gehiago izango dute miokardioko muskuluek uzkurtzerakoan.



Zuntz uzkurgarrien luzera diastole bentrikularraren amaierako bolumenaren araberakoa izango da eta erlazio hori Starling-en kurban adierazten da (Frank-Starling legea).

Era berean, diastole bentrikularraren amaierako bolumena bihotzera heltzen den odol-bolumenaren araberakoa da. Horri **zain-itzulera** deritzo eta 3 parametroren menpekoa da:

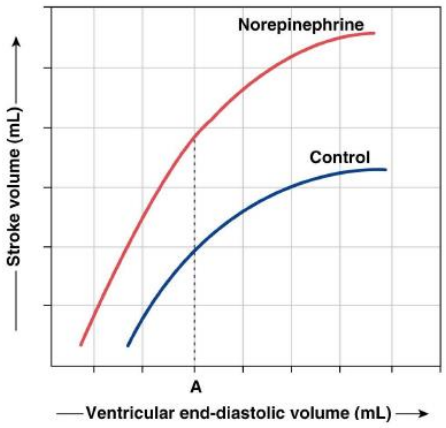
1. Muskulu eskeletikoaren ponpa. Muskulu eskeletikoaren uzkurdurak zainak ere uzkurtzen ditu, batez ere hanketan → odola bihotzerantz bultzatu

2. Arnas-ponpa. Arnasa hartzean bularra zabaldu eta diafragmak beherantz bultzatu → presioa jaitsi toraxean, beheko kaba zaina barne, eta kontrara, presioa handitu abdomeneko zainetan → odol gehiago igaro abdomenetik toraxera, zain-itzulera handituz.

*Noiz sortuko du arnasketak presio baxuko gunea torax inguruan eta noiz sortuko du presio handia? Birika bolumena handitzen denean presioa jaitsi egiten da. Presio handia dagoenean, aldiz, arterietara bultzatzen du odola.

3. NS Sinpatikoak zainen uzkurdura eragin → odola bihotzerantz bultzatu. Izan ere, NS parasinpatikoak ez ditu odol hodiak inerbatzen, eta beraz, horien uzkurdura eta erlazazioa NS sinpatikoak kontrolatzen du.

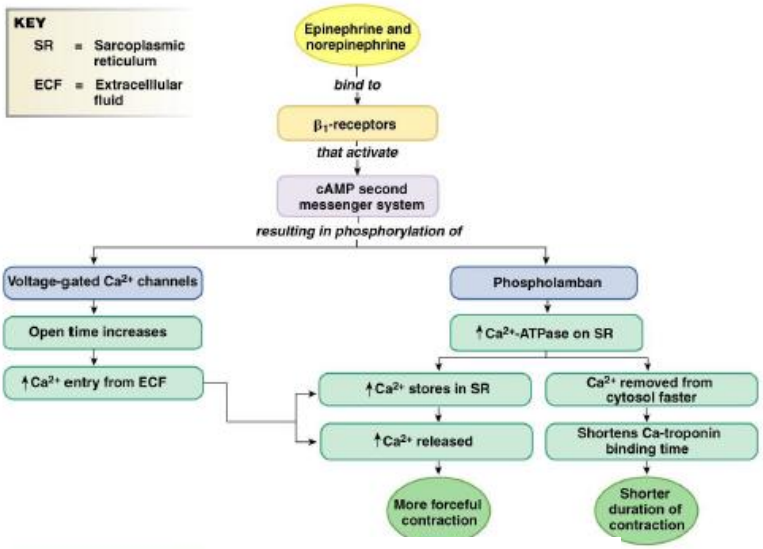
2. Bihotzaren uzkurgarritasuna

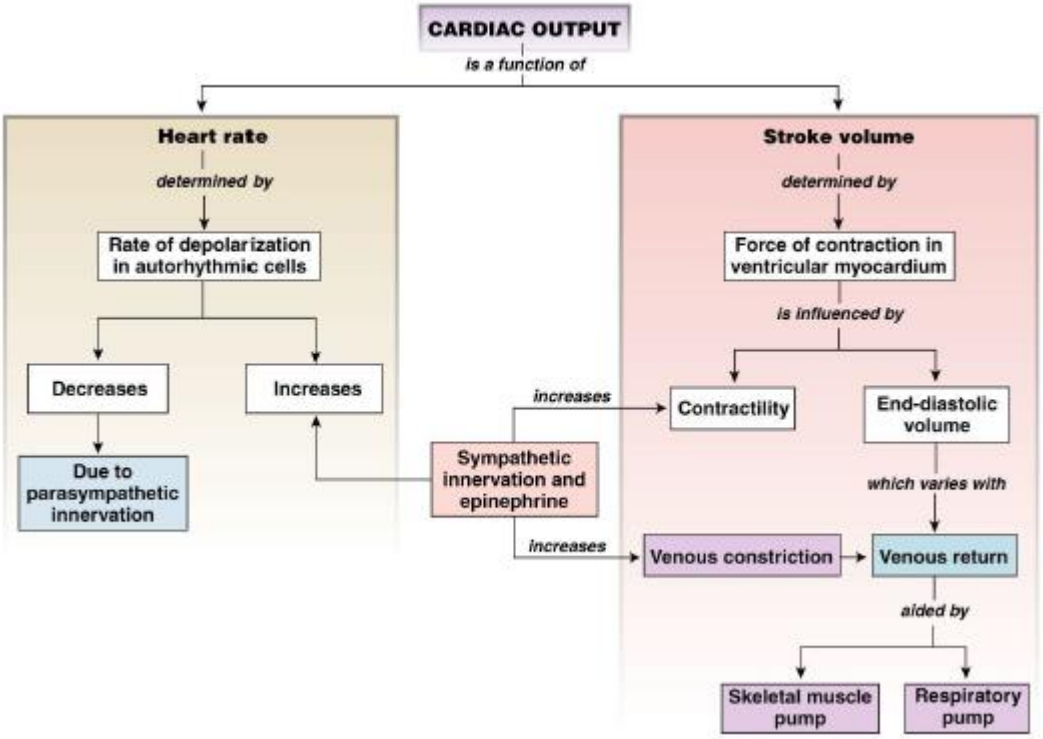


Uzkurgarritasuna: sarkomeroen luzera edozein dela, miokardioak uzkurtzeko duen gaitasun intrintsekoan zentratzen da faktore hau. Ca^{2+}-k eta zuntz uzkurgarriek duten elkarrekintzaren menpekoa da. Konposatu ezberdinek uzkurgarritasunaren gain duten eraginari **efektu inotropiko** deritze. Positiboa (uzkurgarritasuna handitu) edo negatiboa izan daiteke. Hori seinale transdukzionalen bidez lortzen da, Ca^{2+} eskuragarritasuna erregulatzen baitute. Adb. epinefrinak eta norepinefrinak eragin inotropiko positiboa dute, Sterling-en kurba aldaraziz.

Nola lortzen da hau? Uzkurketarako eskuragarri dagoen Ca^{2+}-kopurua emendatuz, zelula barneko seinale transdukzio baten ondorioz.

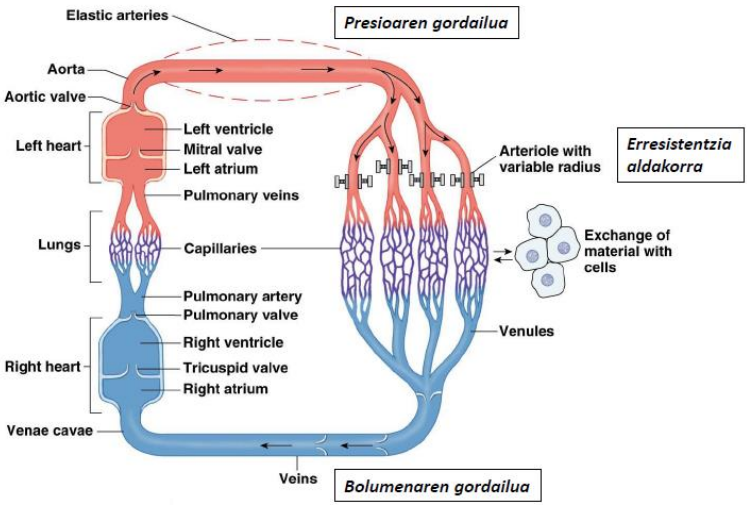
Bihotzean zenbat eta odol gehiago sartu, miokardioaren luzatzeko ahalmena igo egingo da, taupada erritmoa ere handituz. Baina honek goi muga bat dauka, zein 220-pertsonaren adina den.





Odol fluxua eta presioaren erregulazioa

Odola fluido bat da eta hori odol hodietan zehar garraiatzen da.

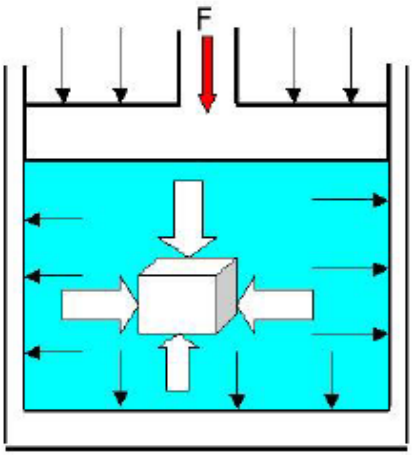


Fluidoen estatika

Dentsitatea (d) : gorputz baten masa bolumenarekiko

$$d = \frac{m}{V}$$

Unitateak (SI): kg/m^3
Beste unitateak: g/cm^3



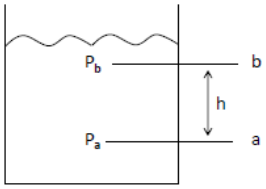
Presioa (P): fluido batek eragiten duen batez besteko indar perpendikularra gainazal batekiko.

$$P = \frac{F}{S}$$

Unitateak (SI): N/m^2 = 1 Pascal (Pa)

Beste unitateak:	barrak edo milibarrak (bar)	1 bar = 10^5 Pa
	atmosferak (atm)	1 atm = 101,3 KPa
	mm Hg	1 atm = 760 mm Hg

Presioa (P): Pausagunean dagoen fluido batek kontaktuan dagoen edozein gainazalen gain indar perpendikular bat eragiten du, hau da, edukiontziaren hormen kontra eta murgilduta dagoen edozein gorputzen kontra. Zeren menpe dago presioa: dentsitate, grabitate eta altueraren araberakoa da.



$$\Delta P = d \cdot g \cdot h$$

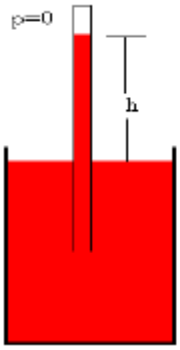
$$P_a = P_b + d \cdot g \cdot h$$

Likido baten presio hidrostatikoa, zonaldearen arabera, ezberdina izan daiteke, gainean dagoen likidoaren pisua dela eta.

1. Fluido baten bi puntuen arteko presio ezberdintasuna, soilik altueraren aldakuntzaren (h) menpe dago.

2. Maila berdinean dauden untu guztiek presio berdina daukate → Torricelli-ren esperimentua.

Presio atmosferikoa: Lurraren gainean atmosferak eragiten duen presioa. Klima eta altueraren aldaketen menpekoa da.



Maila berberan dauden puntu guztiek presio berbera pairatzen dute.

$$\Delta P = d \cdot g \cdot h$$

$$\Delta P = 13550\ kg/m^3 \cdot 9{,}81\ m/s^2 \cdot 0{,}76\ m$$

$$\Delta P = 1{,}01 \cdot 10^5\ Pa = 1\ atm$$

Fluidoen dinamika

Ez baldin badago patologiarik, gure odol fluxua laminarra da. Marruskadura dela eta, energia zati bat ibilbidean zehar galtzen da. Erresistentzia ez da berdina puntu guztietan, pareten aurka indartsuagoa izango da. Zenbat eta txikiagoa izan hodia, erresistentzia handiagoa izango da.

Badakigu odola ez dela gelditzen, baina erresistentzia duenez, joera hori izango du. Fluido erreal baten energia 3 parametroen bidez adierazten da: presioa, energia potentziala eta energia zinetikoa (bernouilli-ren legea).

$$P_1 + \frac{1}{2} \cdot d \cdot v^2{}_1 + d \cdot g \cdot h_1 > P_2 + \frac{1}{2} \cdot d \cdot v^2{}_2 + d \cdot g \cdot h_2$$

Formula hori kontuan izanda, fluxua existitzeko, hau da, mugimendua egoteko, presio gradiente positiboa egon behar da ($P_1 > P_2$; kontuan izanda altuera eta abiadura berdinak direla). Beraz, presioari dagokionez axola zaiguna gradientea da, ez presioaren balio totala.

Erresistentzia biskositatea, luzera, erradioa, fluxua eta presio gradientearen menpekoa izango da. Dena den, eragin handiena izango duena erradioa izango da, formulan ber 4 moduan agertzen baita. Horrek esan nahi du ere erresistentzia eta beste datuak jakinda, fluxuaren kalkuloa egin daitekeela.

$$R = \frac{8\eta \cdot l}{\pi \cdot r^4}$$

Q: Fluxua
r: erradioa
η: Biskositatea
l: luzera
ΔP: Presio diferentzia

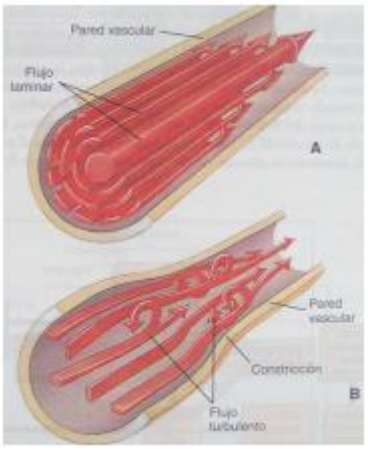
$$R \approx \frac{1}{r^4}$$

Eragina handiena daukan faktorea erradioa (r) da.

$$\boxed{Q = \frac{\pi \cdot r^4}{8\eta \cdot l} \cdot \Delta P}$$

Hemodinamika

Odol-emaria zirkulazio sistematik ikasten duen biofisikaren atala da. Fluidoen dinamikan oinarritzen da.



2 fluxu mota daude: laminarra eta zurrunbilotsua. Fluxu laminarra hodiarekiko paraleloa da eta erdigunean abiadura handiagoa du. Hori da egoera fisionogiko normalean eman behar dena, eta ez du zaratarik egiten. Aldiz, zurrunbilotsua patologietan agertzen da eta zarata egiten du. Zurrunbiloak sortzen dira bertan.

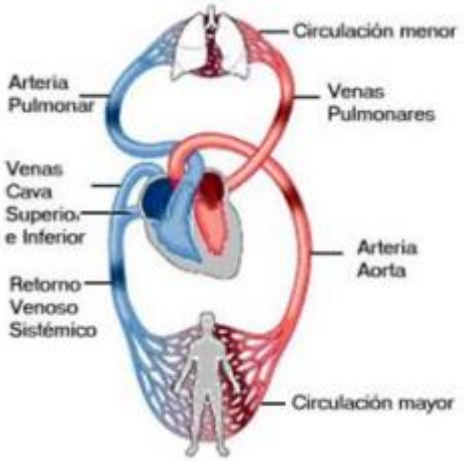
Gainera, 2 zirkuito mota daude ere: zirkulazio sistemikoa eta zirkulazio pulmonarra.

ZIRKULAZIO SISTEMIKOA

1. Ezkerreko bentrikulotik aortara
2. Ehun guztietara
3. Elkartrukea kapilarretan: nutrienteak, O_2, CO_2, ...
4. Ehun guztietatik benak eskumako aurikulara
5. Eskumako bentrikulora

ZIRKULAZIO PULMONARRA

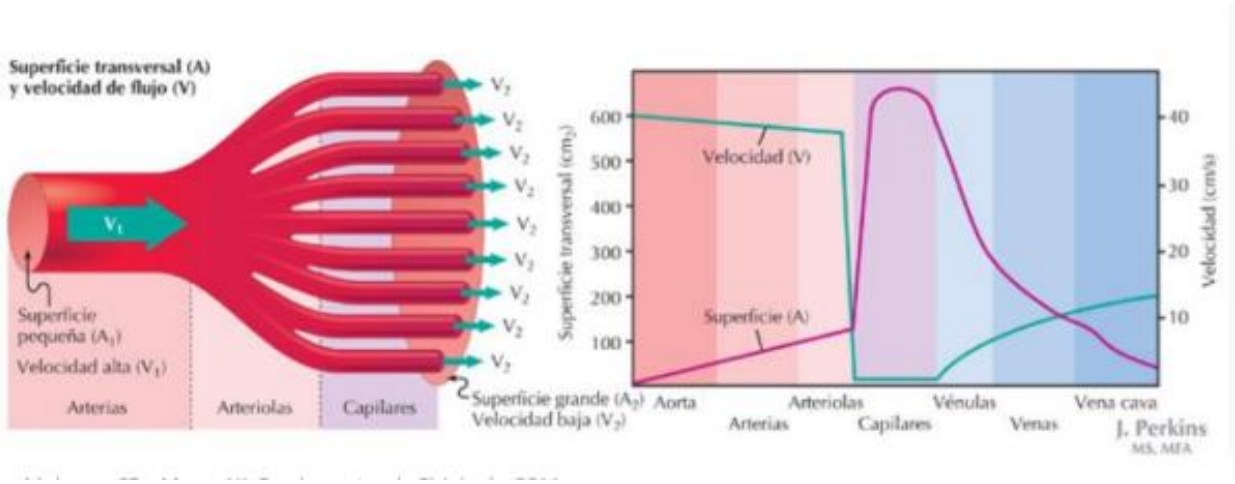
6. Eskumako bentrikulotik arteria pulmonarra
7. Birikietan (albeoloetan) O_2 hartu, CO_2 kanporatu
8. Bena pulmonarretik ezkerreko aurikulura
9. Ezkerreko bentrikulora.



Sistema kardiobaskularreko edozein puntuan fluxua berdina da. Bernouilliren legea mantentzen da, odola ez delako pasatzen diametro handiko arteria batetik diametro txikiko kapilare batera, baizik eta askotara. Horrela, hasierako erradioa zatitan banatzen da. Kapilareetatik abiadura asko jaisten da. Bertan, eritrozitoak bakarka pasa daitezke, eta horrek elkartrukea errazten du.

Jarraipen ekuazioa

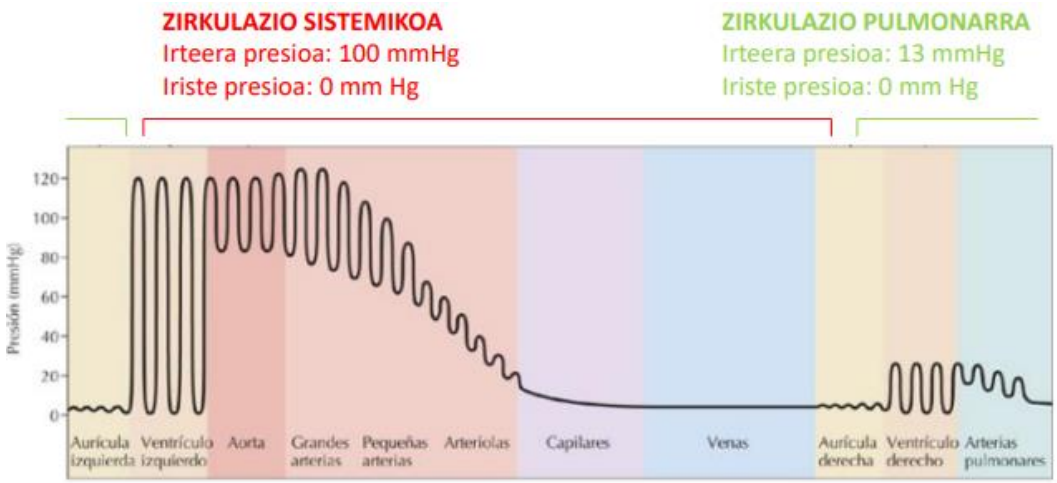
$$Q = S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 = cte$$



Presio gradientea

Fluxua konstantea izatearen arrazoia presioen desberdintasuna da zirkuituan zehar, eta horretaz bihotza arduratzen da (ponpa funtzioa). Bihotzetik odola ateratzen den lekuan presioa oso altua da, eta jaitsiz doa bertara berriz heldu arte.

Zirkulazio sistemikoak askoz presio desberdintasun handiagoa du pulmonarrak baino.



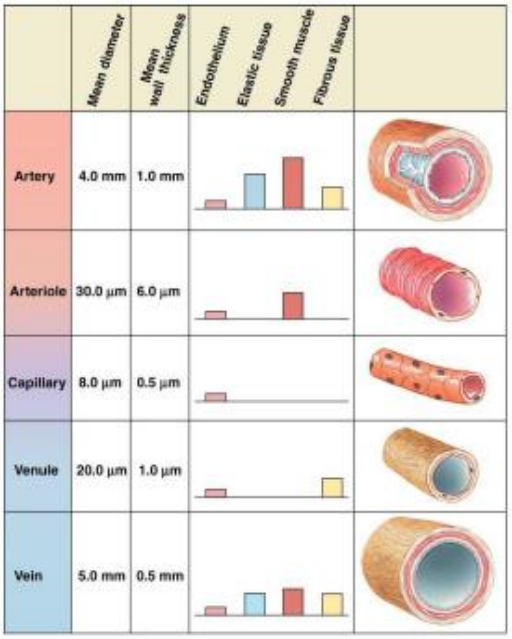
Odol-hodiak eta presioaren erregulazioa

Odol-hodiak

4 geruza izan ditzakete horman:

1. Endotelioa (barruanbea ainguratzen duena).
2. Ehun elastikoa (elastinaduna).
3. Muskulu leuna (sistema sinpakikoarekin inerbatuta).
4. Ehun konektibo fibrotsua.

Geruza horien proportzioa desberdina izango da odol-hodi motaren arabera. Izan ere, arteriek zainek baino logiagoak dituzte paretak, elastina eta muskulu leun gehiago daukatelako. Arteriolek muskuloa mantentzen dute, eta kapilarretara heltzerakoan endotelioa baino ez da geratzen, gasen elkartrukea errazteko (difusioa). Benulak ehun konektiboa dute, muskulorik gabe, eta zainak arterien modukoak dira baina finagoak.



Endotelioa epitelio berezia da, odola eta zelulen arteko muga, konposatu asko jariatzen ditu eta odol presioa, odol-hodien sorkuntza eta immunitatea bideratzen ditu. Endotelioak eta bere inguruko ehun konektibo elastikoak *tunica intima* deituriko egitura osatzen dute. Muskulu leuna inerbatuta dagoenez, uzkurtu daiteke basokonstrikzioa eraginez. Horrela, odol-hodiaren lumenaren zabalera murriztu.

Distentsibilitatea odol hodia zabaltzeko gaitasuna da, eta **elastikotasuna** bere formara bueltatzeko joera. Orduan, arteriak elastikotasun altuagoa dute eta distentsibilitate baxua, eta zainak kontrakoa. Arterien pareta ez da gehiegi aldatze, eta gainera, hori gertatzen bada, errazagoa da bere egoera normalera bueltatzea.

Arteriak eta arteriolak

Bihotzetik ateratzerakoan lehenengoak dira horiek. Paretak oso antzekoak dituzte (sendoak baina elastikoak), arterioletakoak finagoak direlarik, eta, ondorioz, elastikotasun baxuagoa dute. Nerbio sistema sinpatikoaren eraginez uzkurtu edo zabaldu egin daitezke.

Arteriolek elastikotasun gutxiago duten arren arren, muskulu leuna daukate eta, beraz, kontrolpean mantentzen dira seinale kimikoen bidez. Izan ere, gero eta muskulu gehiago izan partean, orduan eta elastikotasun gutxiago izango dute. Haien paretak hain sendo eta elastikoak dira presio handiak jasan behar dituztelako. Energia hori ehun konektibo haritsu eta elastikoan gorde egiten dute.

Gainera, arterien fluxua dibergentea dela aipatu beharra dago. Izan ere, arteriolak gero eta txikiagoak egiten dira, fluxua bide desberdinetan banatuz.

Kapilareak

Horiek ez dute muskulorik, baina hasieran esfinter prekapilarra dute, muskulu zirkular leuna. Seinalearen arabera uzkurtu edo zabal daiteke, odol kantitatean eragina izanez. Horren ostean ezin da muskulorik egon materiaren elkartrukea eman behar delako, eta ondorioz, endotelioa baino ez dago, zelula geruza bakuna.

Benulak eta zainak

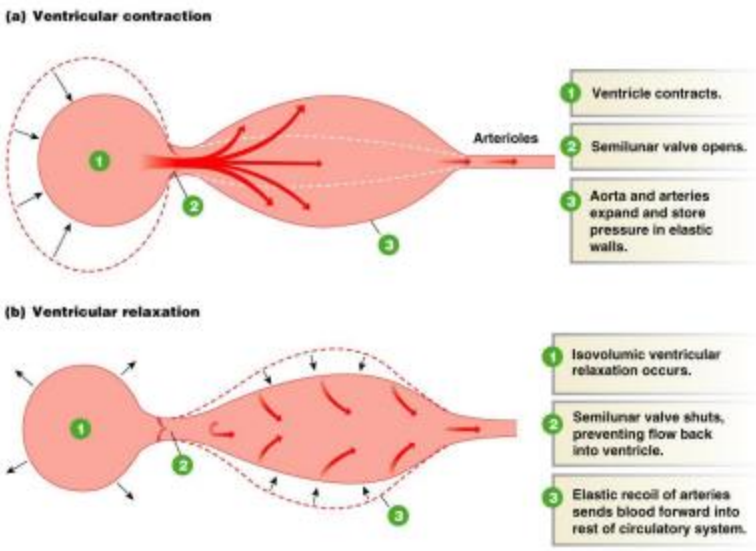
Benulak kapilareak elkartzerakoan sortzen dira, fluxu konbergentearen bidez. Hasiera batean ez dira hain desberdinak, baina handitzen direnean muskuloa agertuz doa. Asoktan muskulorik ez dutenez, ezingo dira kontrolatu nerbio-sistemaren bidez, eta gainera, geruza hori faltan izanda, elastikotasun gutxiago izango dute eta distentsibilitate handiagoa.

Hori dela-eta, errazagoa izango da zainen paretak zabaltzea odol asko badago, baina ez da hain erreza izango hodian haien berera bueltatzea. Hori gertatzen denean, barizeak agertzen dira. Nahiz eta balbulak itxi odol-fluxua murrizteko, kostatuko zaie aurreko tamainara bueltatzea.

Benulak elkartzerakoan fluxu konbergentearen bidez, zainak sortzen dira, handiagoak direnak, kaba zainera eta eskumako aurikulara heldu arte. Izan ere, zainak arteriak bano zabalagoak dira, odol-bolumen handiagoa daukate. Horri esker, zirkulazioan beti odol-bolumen berdina dago, zainak horren gordailuak direlako. Horrela, odola galdu edo ematerakoan, zirkulazioa berdin mantentzen da. Odol totalaren %65a zainetan dago gordeta.

Odol-presioa

Sistole bentrikularrak sortutako presioak eragiten du odolaren fluxuan. Ezkerreko bentrikulutik irtetean, aorta eta arteriak zabaldu egiten dira odola hartu ahal izateko. Diastole bentrikularrean, pareta arterialak beren lekura bueltatu egiten dira, horrella, odolaren presioa mantentzen da eta aurrera bultzatzen dute.



Odol fluxua likidoak jasaten duen erresistentzia eta presioaren araberakoa izango da. Hemen behean bertan eragiten duten 7 faktore agertzen dira. Bertan, orainarte ikasitakoa laburbilduta dago.

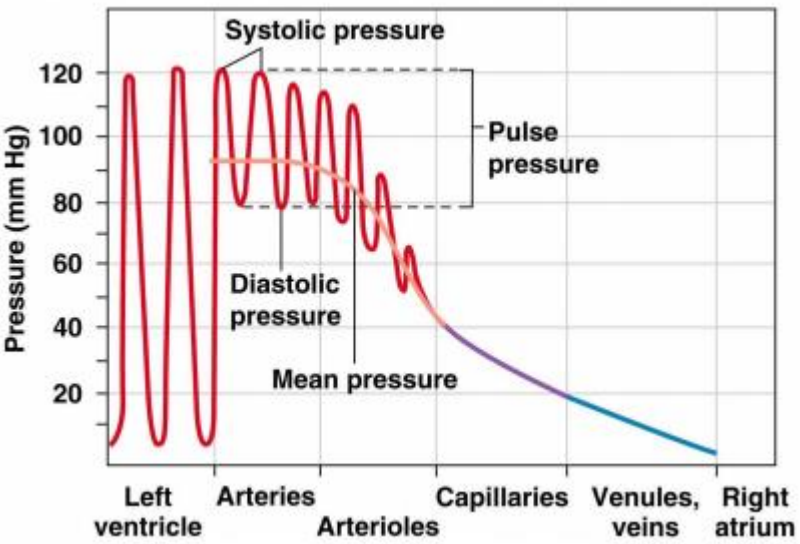
TABLE 15-1 Pressure, Flow, and Resistance in the Cardiovascular System

$$\text{Flow} \propto \Delta P/R$$

1. Blood flows if a pressure gradient (ΔP) is present.
2. Blood flows from areas of higher pressure to areas of lower pressure.
3. Blood flow is opposed by the resistance R of the system.
4. Three factors affecting resistance are radius of the blood vessels, viscosity of the blood, and length of the system [p. 462].
5. Flow is usually expressed in either liters or milliliters per minute (L/min or mL/min).
6. Velocity of flow is usually expressed in either centimeters per minute (cm/min) or millimeters per second (mm/sec).
7. The primary determinant of velocity of flow (when flow rate is constant) is the total cross-sectional area of the vessel(s).

Ondoko diagrama horretan presio sistoliko eta diastolikoen arteko desberdintasuna ikus daiteke. Gainera, pultso-pressioa irudikatuta dago presio sistolikoari diastolikoa kenduz lortzen dena.

Ikus daitekeen moduan, zainetan ez dago presio uhinik. Hori da bertan presioa baxua delako, eta batzutan bide bakarreko balbulak daude, hori zuzentzeko.



Bihotzeko pultsoen eragina argien ikusten da arterietan. Hori zuzena ez denean, 2 arazo desberdin egon daitezke. Alde batetik hipotentsio arteriala, non grabitatearen aurkako odolaren indarra baxuegia den. Horren ondorioz, oxigeno gutxiegi heltzen da entzefalora eta zorabioak egon daitezke. Hipertentsio arteriala dagoenean, aldiz, odol-hormen kontrako presioa altuegia da, eta apurtzeko arriskua ago. Entzefaloan, beraz, hemorragia zerebrala emateko arriskua emango da, istripu zerebrobaskularra. Azkenik, aorta beherakorrean hemorragia masiboa eman daiteke barrunbe abdominalean.

Arterioletako erresistentzia:

Odol-hodiek odolari egiten dioten erresistentzia hodiaren erradioarekiko alderantziz proportzionalak dira. Beraz, zenbat eta txikiagoak izan orduan eta marruskadura handiagoa sortu. Arteriolek eragiten dute erresistentzia baskularraren %60a. Erresistentzia arterioletako muskulu ugariari esker da aldakorra. Nola erregulatzen da erresistentzia aldakor hori?

Alde batetik, epe laburreko eta luzeko erregulazio sistemak egongo dira. Ehun bakoitzak erregulazio kontrol lokala egiten du, haren beharren arabera seinale molekularrak ekoitziz. Horrela, adibidez, kapilareak baino lehen dauden esfinterrak ireki daitezke oxigeno gehiagoren beharra badago. Horrekin erlazionatuz, ehunen aktibitatea emendatzerakoan, hondakin kantitatea ere handituko da. Hondakinak kanporatzeko molekula basodilatatzaileak ekoizten dira, odol fluxua handitzeko eta molekulak barreiatzeko.

Baina hori alde bareta utziz. 3 erregulazio mota nagusi daude:

Erregulazio automiogenikoa

Muskulu leun baskularrak bere uzkurdura-maila autoerregulatu egiten dute, bestela, presioaren igoera odol horien erradioaren igoera eragingo luke. Ondorioz, paretekiko erresistentzia jaitsiko litzateke eta odolfluxua areagotu.

Hori ekiditeko, odol hodia zabaltzean muskulu zellak luzatu egiten dira, eta horrek haien uzkurdura eragiten du automatikoki. Horrela, hodiaren erradioa murriztu, paretarekiko

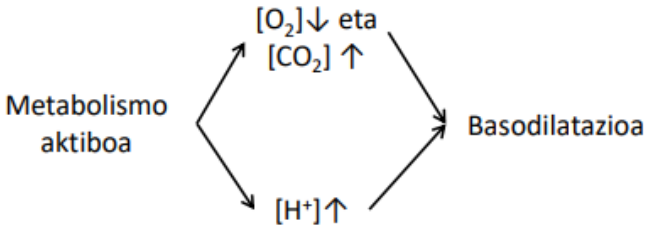
erresistentzia emandatu eta odol fluxua jaitsiko litzateke, egoera normalera bueltatuz.

Mekanismo automatiko honen bidez arteriolek etengabe kontrolatzen dute odol-fluxua. Noski, erantzun hau epe laburrekoa da.

Konposatu parakrinoak

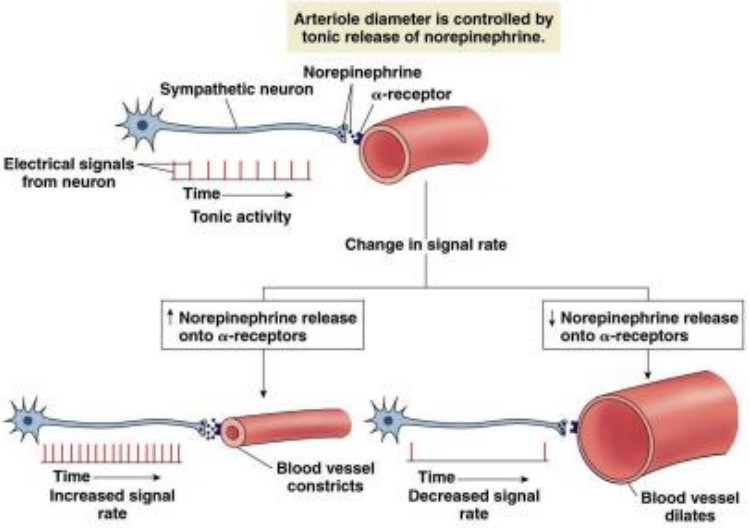
Endotelio zelulek eta odola jasotzen ari diren ehunek molekula parakrinoak jariatu egiten dituzte arteriolen uzkurdura-maila erregulatuz. Substantzia parakrino ugari proteinak edota bestelako molekula organikoak dira, baina oxigeno, karbono dioxidoa eta hidrogeno ioiak erabili daitezke.

Horrelako konposatu parakrino batzuek hemostasiarekin edo immunitatearekin dute erlazioa. Beste batzutan ehunen metabolismoa erregulatu egiten dute arterioletako erresistentzia parakrinoaren bidez. Aurretiaz azaldutako erregulazioaren antzekoa da, baina dilatazio mailan eragiteaz gain ingurunean ere eragin daiteke.



Nerbio-sistema sinpatikoa

Nerbio-sistema sinpatikoak arteriola gehienak inerbatzen ditu. Honek askatutako norepinefrinak basokonstrikzioa eragiten du (horren askapen toniko basala dago beti, tono basomotorea). Askapen hori modulatuz basokonstrikzioa edo basodilatazioa eragin daiteke.



Odola gorputzeko gune espezifikoetara bideratzeko erabiltzen da. Adibidez, digestioan gaudenean basodilatatzen dira digestio aparatura doazen bideak, bertara fluxua areagotzeko, eta beste gune batzuetan basouzkurketa ematen da. kontrol horren helburua odola gorputzak behar duen tokietara bideratzea da.

Azaldutako erregulazio mekanismoak direla-eta, atsedenaldian, eta egoera fisiologiko desberdinetan, organo bakoitzera heltzen den odol kantitatea desberdina izango da, asimetrikoa.

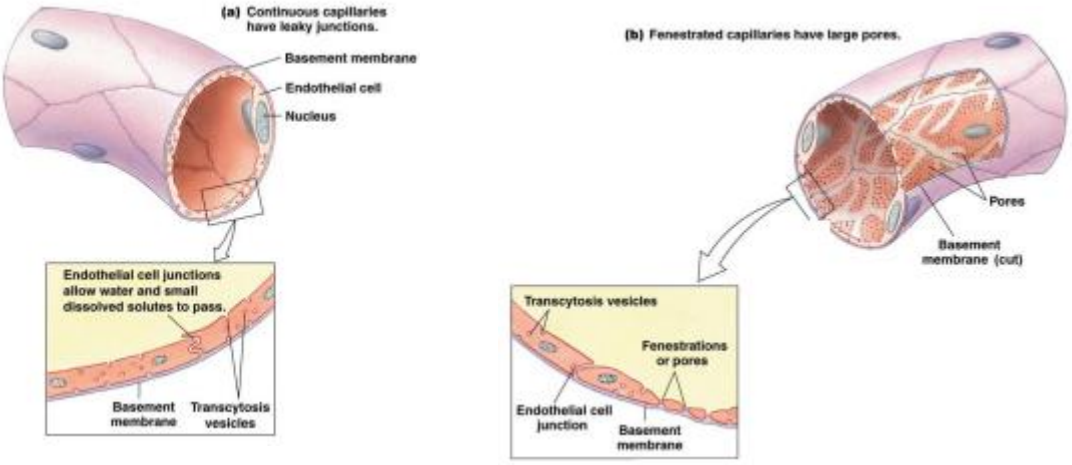
Truke kapilarra

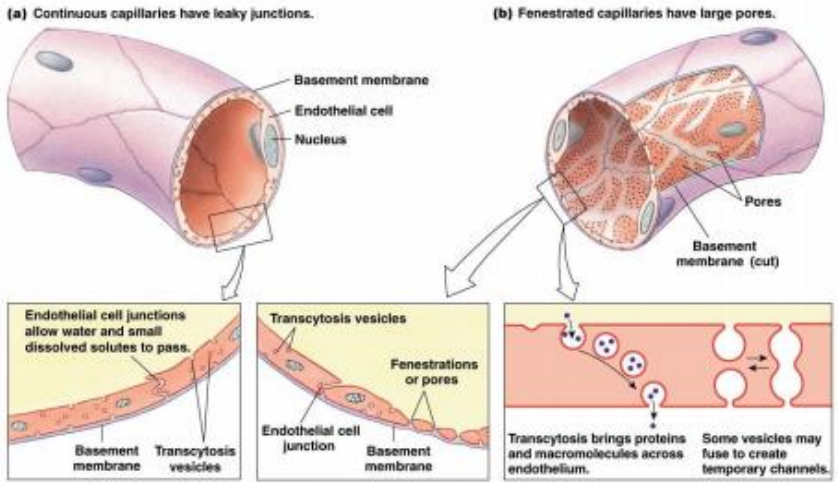
Ehunen zelula-arteko likidoaren eta plasmaren arteko materialen trukea kapilareen horma finetan zehar gertatu behar da. Hain finak dira zelula geruza bakarrez osatzen direlako, xafla basalaren gainean. Kapilareen diametroa ere oso txikia denez, eritrozitoak bakarka pasa daitezke.

Bi motatako kapilareak daude:

- **Kapilare jarraiak:** endotelio-zelulak elkarri otuta daude baina zelulen arteko loturetan hutsuneak daude.
- **Kapilare fenestratuak:** zelulek fenestra edo poroak dituzte, plasma eta zelula arteok likidoa konektatuz.

Materialaren trukea errazteko kapilareetan odol-fluxua oso motela da, nahiz eta erradioa txikia izan. Hori gertatzen da arteriola bakoitzetik sortzen diren kapilare guztietan banatzen delako fluxua.





Elkartrukea emateko 4 aukera ezberdin daude:

- **Zelulen arteko hutsuneetatik:** Hau endotelio jarraien kasuan ematen da. Hutsune horiek solutu txikiek soilim zeharka ditzakete, proteinek adibidez ez.

- **Zelulak zeharkatuz difusioz:** Konposatu apolarrek zelulak difusioz zeharka dezakete. Adibidez, disolbatutako gasak hori egin ahal dute, plasma eta zelula-arteko likidoen artean orekara helduz.

- **Transzitosiz:** Endotelioko zelulak konposatuak alde batean jaso egiten dituzte endozitosiz, eta besikulak zitoplasma zeharkatzen dute beste aldean exozitatu arte.

- **Poroetan zehar epitelio fenestratuan**