

17. GAIA: ODOL-ZIRKULAZIOAREN FISILOGIA

1. FLUIDOEN DINAMIKA

1.a) Fluidoak

Def: Tentsio bat aplikatzean etengabe deformatzen den substantzia bat da (edukiontziairen forma hartzen duen substantzia).

- Ezaugarri horien arrazoia da, partikulen arteko indarrak “txikiak” direla.
- Fluidoaren barnean gasak eta likidoak barnebiltzen diren arren, gu likidotan zentratuko gara.

1.b) Fluido idealak

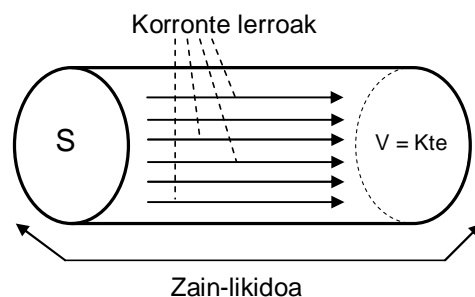
Def: Alegiazko fluidoak. Fluido mota hori ez da existitzen baina, fluidoaren dinamika ulertzeko erabili dira, izan ere, fluido errealeen mugimendua aztertzea konplexua da.

Ezaugarriak:

- Ez da likatsua (biskositatea = 0 // barne marruskadura = 0)
- Fluxu egonkorra du (abiadura konstante denboran zehar)
- Konprimaezina da
- Ez du errotazio fluxurik (ez du zurrumbilorik egingo)

• Mugimendu geldikorra

Mugimenduan dagoen likidoaren molekula batek egiten duen ibilbideari **korrante lerroa** deritzen. Korrante lerroen multzoari **zain-likidoa** deritzen. Likidoak daraman abiadura, puntu guztietan, konstantea denean, **mugimendu geldikorra** duela esaten da.



Fluxua (Q): Hodi baten sekzio jakin bat iragaten den likido bolumena denborarekiko

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

Q: Fluxua
 ΔV : Iragaten den bolumen aldaketa
 Δt : Denbora tarte

Mugimendu geldikorrean, sekzio jakin bateko puntu guztietatik, likidoa abiadura berdinarekin pasatzen denez, abiadura fluxuarekin erlazioa dezakegu:

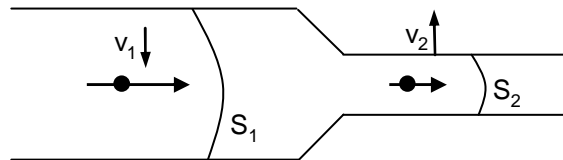
$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} \xrightarrow{\Delta V = S \cdot \Delta x} Q = \frac{S \cdot \Delta x}{\Delta t} \xrightarrow{\Delta x = v \cdot \Delta t} Q = S \cdot v \cdot \frac{\Delta t}{\Delta t} \rightarrow Q = S \cdot v$$

Δx : distantzia (ibilitako espazioa) // **S**: sekzioa // **v**: abiadura

Gainera, fluido erreal baten, fluxua konstante mantentzen bada, ondoko **jarraipen ekuazioa** betetzen da:

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

Hau da, sekzio handiagoa duten hodiedetan, likidoaren abiadura txikiagoa izango da, eta alderantziz.



- **Bernoulli-ren legea**

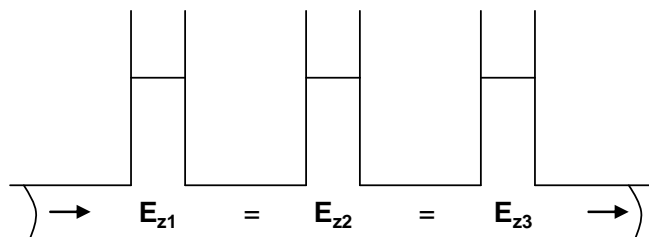
Energia mekanikoaren kontserbazio-printzipioan oinarritzen da, hau da, fluido ideal batek daukan energia konstante mantentzen da ibilbide osoan zehar ($E_1 = E_2 = E_3 \dots$).

Energia hori hiru osagaietan banatu ahal dugu:

- E_z (energia zinetikoa): fluidoaren mugimendua dela eta sortzen dena
- E_h (energia potentziala): fluidoaren altueraren menpean dago
- P (presio hidrostatikoa): fluidoa, geldirik, duen pisuagatik sortzen dena

Beraz, Bernoulli-ren arabera:

$$E_{\text{fluido}} = P_1 + E_{z1} + E_{h1} = P_2 + E_{z2} + E_{h2}$$



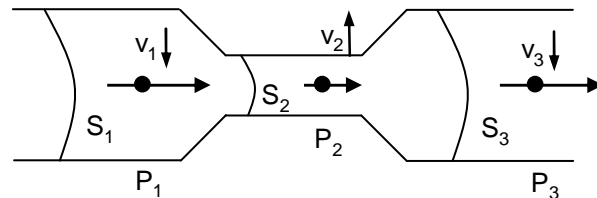
Aurreko ekuazio hori zabalduz:

$$E_{\text{fluido}} = P_1 + \frac{1}{2} \cdot d \cdot v_1^2 + d \cdot g \cdot h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \cdot d \cdot v_2^2 + d \cdot g \cdot h_2 = Kte$$

(**d**: dentsitatea // **v**: abiadura // **h**: altuera)

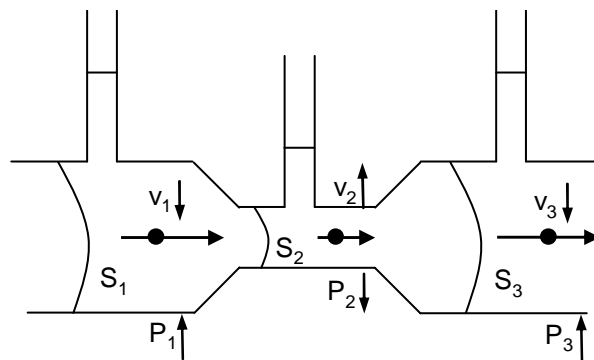
Hurrengo marrazkian, S_1 sekzioa duen hodi batetik doan likidoa, diametro txikiagoa duen zati batetik (S_2) igaro behar bada, baina hodiaren zati guztien altuera berdina bada ($h_1 = h_2 = h_3$), Bernuilli-ren ekuazioa soilik hurrengo ekuaziora mugatzen da:

$$E_{\text{fluidoa}} = P_1 + \frac{1}{2} \cdot d \cdot v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \cdot d \cdot v_2^2 = Kte$$



Lehen ikusi dugun **jarraipen-ekuazio**agatik badakigu, sekzioa (S) handiagoa den tokian, abiadura (v) txikiagoa dela ($S_1 > S_2 // v_1 < v_2$), eta alderantziz. Baina, Bernuilli-ren legeagatik, badakigu ere bi puntuetako energia berdin mantendu behar dela ($E_1 = E_2$). Beraz, aurreko marrazkiko lehenengo zatiko abiadura bigarren zatikoa baino txikiagoa bada ($v_1 < v_2$), konpentsatzeko (eta goiko formulaz baliatuz), lehenengo zatiko **presio hidrostatikoa** (P) bigarregoa baino handiagoa izan beharko da ($P_1 > P_2$). Hau da, presio hidrostatikoa handiagoa da abiadura txikiagoa (**presio zinematiko** txikiago) den tokietan, hots, sekzio handiagoko tokietan. Eta alderantziz.

Aurreko marrazkiari zutabe bertikalak jarriko bagenizkio, hodi nagusiaren diametroa aldatzen denean, abiaduran gertatutako aldaketak sortzen duen presio hidrostatiokoaren aldaketa ikusiko genuke. Efektu horri, **Venturi efektua** deritzo:



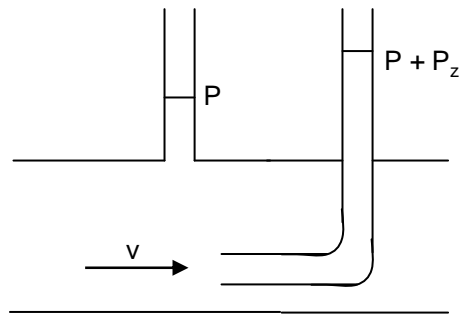
Presio zinematikoak (P_z) adierazten digu zein izango litzatekeen likido batek eragingo lukeen presioa haren abiaduraren arabera, likidoaren norabidearekiko elkarzut kokatua dagoen azalera baten aurka joko balu. Ondorengo marrazkian ikusten da nola, zain-likido batean hodi bat jartzen badugu eta, hodi horren ahoa korrante lerroekiko paralelo jarrita badago, presio hidrostatikoa (P) neurtu ahal izango dugu. Aldiz, jartzen dugun hodiaren ahoa korrantearen aurka jartzen badugu, presio hidrostatikoa (P) gehi presio zinematikoak (P_z) neurtuko ditugu, hau da, **presio hidrodinamikoa**.

$$P_z = \frac{1}{2} \cdot d \cdot v^2$$

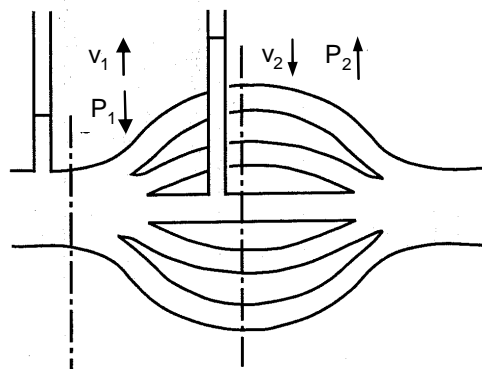
Presio zinematikoak

$$P_h = P + P_z$$

Presio hidrodinamikoa



Bernouilli-ren legearen ondorioak baliogarriak dira hodia adarkatzen bada ere. Adibidez, ondorengo marrazkian, lehenengo sekzioko abiadura (v_1) bigarren sekziokoa (v_2) baino handiagoa da eta horregatik, presio hidrostatikoa lehenengo sekzioan (P_1), bigarren sekzioan baino (P_2) txikiagoa da. Hori garrantzitsua izango da odol-hodietan.



1.d) Fluido errealak

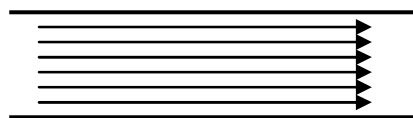
Ezaugarriak:

- Biskositatea dute (marruskadura dute eta desplazamenduarekiko erresistentzia eragingo dute).
- Biskositatearen arabera, fluidoaren abiadura aldatuko da.
- Konprimagarriak dira (neurri batean)
- Molekulen posizio erlatiboa etengabe alda daiteke edo ez.

Beraz, fluido idealen dinamikarako atera ditugun ondorioak ezin izango dira zuzenean aplikatu, baina hurbilketa oso ona da.

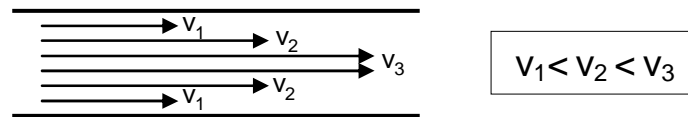
- **Fluxu laminarra**

Fluxu laminarra, fluido baten mugimendu ordenatuari esten zaio. Fluidoak lamina paraleloetan mugitzen denean gertatzen da, hau da, laminen arteko nahasketa eman gabe.



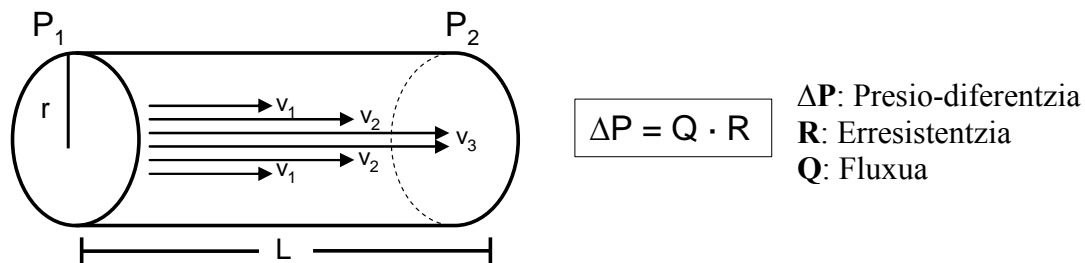
Dena dela, gainjarrita dauden lamina horietako bakoitzaren abiadura ez da berdina. Guk fluidoaren abiaduraz hitz egiten dugunean, batez besteko abiaduraz ari gara. Egia esan,

laminen abiadura handitzen doa hodiaren hormatik erdialdera, fluidoak hodiarekin duen marruskadura dela eta.



- **Erresistentzia eta Poiseuille-ren legea**

Fluido idealak, etengabe, mugimenduan mantendu ahal ziren arren, fluido errealek erresistentzia topatzen dute desplazamenduan (biskositateagatik) eta gelditzeko joera izango dute. Ondorioz, likido erreal baten mugimendua mantentzeko, hodi baten bi muturren artean, presio diferentzia bat ezarri beharko da, fluxua konstante izateko:



Beraz, formula horren bidez, erresistentzia defini dezakegu:

$$Q = \frac{\Delta P}{R}$$

Poiseuille-k definitu zuen erresistentzia hainbat faktoreren arabera aldatuko zela eta faktore guzti horien arteko erlazioa ezarri zuen:

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

R: Erresistentzia
η: Biskositatea
l: luzera
r: erradioa

Eta, azkeneko bi ekuazioak bateratuz, **Poiseuille-ren legea** lortzen dugu:

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

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

Poiseuille-ren legea: Fluido erreale baten fluxu laminar egonkorra definitzeko balio duen legea da. Horren bidez, hurrengo erlazioak ondoriozta ditzakegu:

- Erresistentziaren (R) eta erradioaren (r) arteko erlazioa:

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

- Beraz, hodi baten diametroaren (sezkoa) neurria erdia txikitzen bada, fluxua (Q) edo abidura konstante mantentzeko, behar izango dugun presio diferentzia (ΔP) 16 aldiz handiagoa izan beharko da.

- **Bernoulli-ren teorema likido errealetan**

Fluido idealetan ez bezala, fluido errealetan energiaren zati bat ibilbidean zehar galtzen da, marruskadura dela eta. Beraz:

$$E_1 > E_2$$

$$P_1 + \frac{1}{2} \cdot d \cdot v_1^2 + d \cdot g \cdot h_1 > P_2 + \frac{1}{2} \cdot d \cdot v_2^2 + d \cdot g \cdot h_2$$

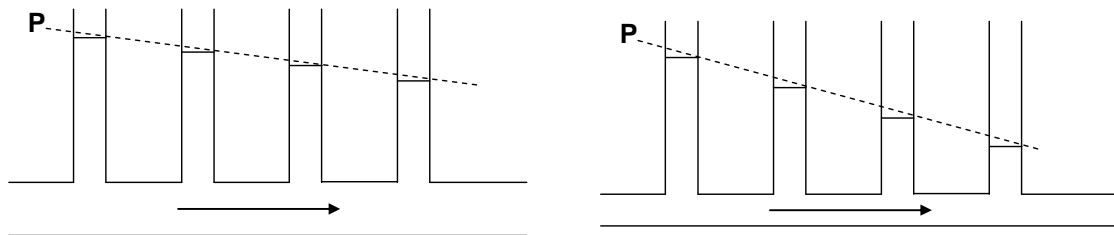
Hodiaren zati guztien altuera berdina bada ($h_1 = h_2$):

$$P_1 + \frac{1}{2} \cdot d \cdot v_1^2 > P_2 + \frac{1}{2} \cdot d \cdot v_2^2$$

Eta abiadura konstante bada:

$$P_1 > P_2$$

Hori da Poiseuille-ren legean agertzen den presio aldaketa (ΔP). Eta hurrengo marrazkietan ikusi dezakegun bezala, presioaren jaitsiera lineala da. Gainera, hodiaren sekzioa ez bada konstante mantentzen, teorema horri erresistentziaren (R) efektua gehitu beharko zaio. Hodi mehean sekzioa txikitzen da, abiadura beraz handituko da, baina erresistentzia ere handituko da. Ondorioz, presioaren jaitsiera (aldaketa), hodi lodiagoan ikusitakoa baino handiagoa izango da:

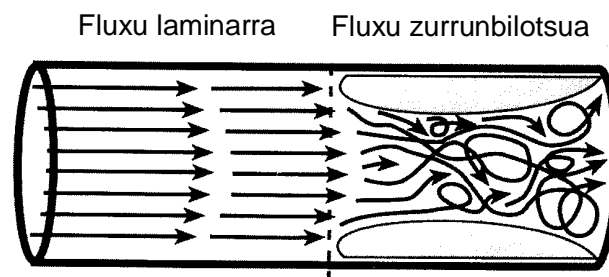


- **Fluxu zurrunbilotsua**

Fluxu laminarra abiadura limite batzuen artean ematen da. Limite horiek gainditzen direnean, fluxuaren izaera aldatzen da. Izan ere, momentu horretan, fluxua ez da laminetan mugituko eta partikulak modu irregularrean, zurrunbiloak eratuz, nahastuko dira. Fluxu berri horri, fluxu zurrunbilotsua deritzo.

Fluxu zurrunbilotsuan ez dira fluxu laminarreko ekuazioak betetzen, erresistentzia oso altua delako. Fluxu laminarra fluxu zurrunbilotsua bihurtzeko, abiadura kritiko jakin bat gainditu behar da. Abiadura kritiko hori biskositatearen, dentsitatearen, hodiaren erradioaren eta magnitude adimentsional (Reynolds-en zenbakia) baten arabera aldatuko da.

Abiadura kritikoaren limitearen azpian ere fluxu zurrunbilotsua sor daiteke, adibidez, fluidoak bidean oztopoak topatzen dituenean. Baina, oztopoa gainditu ondoren, fluxua berriro laminarra izatera bueltatuko da. Presio arteriala esfigmomanometroarekin neurtzen denean, gertaera hura froga daiteke.



2. HEMODINAMIKA

Def: Odol-fluidoaren dinamika ikasten duen zientzia

Orain arte, aztertu ditugun fluidoak “newtoniarrak” ziren (biskositate konstantea zuten) eta hodi zurrunetan zehar mugitzen ziren. Baina odola ez da fluido “newtoniarra” eta arteria, benak eta kapilarrak ez dira hodi zurrunak, elastikoak dira eta elastizitate hori aldatzen da hodi motaren eta egoeraren arabera.

2.a) Odol-hodiak

1. Arteriak

Odola bihotzetik ateratzen duten odol-hodiak dira. Odola presio altuan eta abiadura handian ateratzen da bihotzetik eta indar hori jasan ahal izateko, arteriek horma geruzatua dute:

a) **Endotelioa:** odolarekin kontaktuan dagoen geruza da eta endotelio-zelulaz osatua dago.

b) **Tunica media:** endotelioa inguratzen duen geruza da eta oinarrizko hiru osagai ditu:

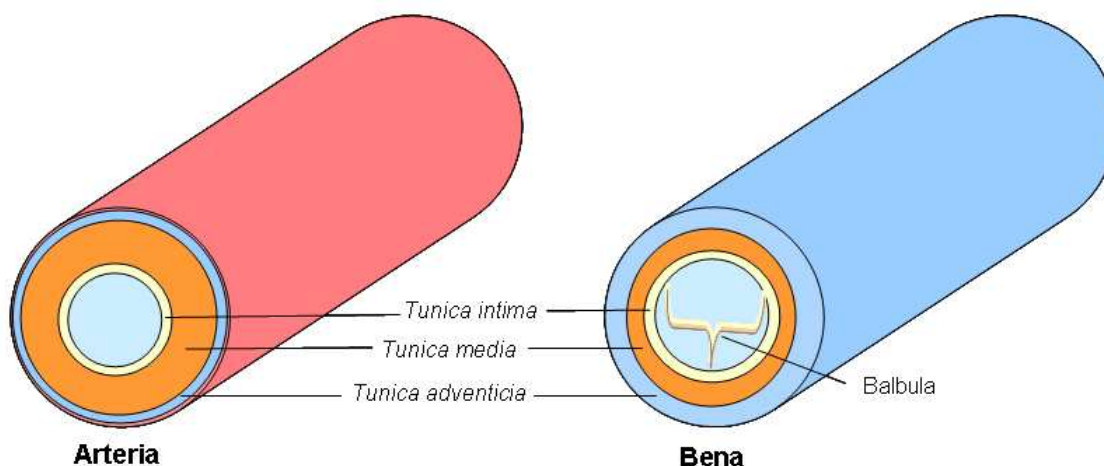
- **Kolagenoa**: proteina indartsua da eta erresistentzia ematen dio arteriari odolaren presio handiak jasan ahal izateko.

- **Elastina**: proteina honek elastikotasuna emango dio arteriari eta, arteria zabaltzean, bere lehengo egoerara bueltatzen ahalbidetuko dio.

- **Muskulu leuneko zelulak**: hodian uzkurketan eta dilatazioan laguntzen dute.

d) Tunica adventicia: azken geruza da eta ehun-konjuntiboz osatuta dago. Bere funtzio nagusia da arteria inguruko ehunetatik isolatzea.

Arteriek duten egituragatik, bi ezaugarri lortzen dute: **distentsibilitatea** eta **elastikotasuna**. Ezaugarri horiengatik, alde batetik, arteriek bihotzetik ateratzen den energia absorbitu dezakete eta horrela ez dira apurtuko arteriatik urrunago dauden erresistentzia gutxiko odol-hodiak. Bestaldetik, elastikoak izateagatik, bihotza diastolean dagoenean (odola ponpatzen ez duenean), arteriak hasierako erradioa izatera bueltatzen dira eta, hori dela eta, odola odol-hodietatik mugitzen lagunduko du.



Zirkulazio sistemikoan odolaren %30-a arterietan dago, %5-a kapilarretan eta gainontzeko %65-a benetan

2. Arteriolak

Arteriak bihotzetik ateratzen direnean, adarkatzen joaten dira eta arteriolak izango dira arterien adarkaturarik txikienak. Arterien egitura berdina dute baina *tunica media*-k kolageno eta elastina gutxiago du eta, batez ere, muskulu-zuntzak topatuko ditugu. Muskulu horri esker, arteriek dilatatu edo uzkurtu ahal izango dute baina ez modu pasiboz presio-uhin bat jasotzen dutelako, baizik eta NS autonomoaren aginduz. Beraz, arteriolek odol-fluxua erregulatzeko gai izango dira eta baita ere erregulatuko dute organoetara helduko den odol kantitatea.

3. Kapilarrak

Arteriolak adarkatzen joaten dira eta azkeneko adarkaduren ondorioz kapilarrak sortzen dira. Gorputzeko odol-hodi txikienak dira eta odola eta ehunen arteko likido, elikagai, elektrolito, gas, H⁺ eta beste hainbat substantzien elkartrukeaz arduratzen dira.

Eginkizun horiek betetzeko, horma oso mehea dute, izan ere, soilik endotelio geruza batez osatzen dira eta ez dituzte *tunica media* ezta *adventicia*, gainera, elkartrukean laguntzeko, zelula batzuen artean poro-kapilarrak eratzen dira.

Kapilarrek oso diametro txikia izateagatik, eritrozitoek banan-banan pasa behar dute baina, kapilar baten sekzioa hain txikia bada, fluxua mantentzeko, odolak abiadura oso handia hartu beharko luke (jarraipen-ekuazioaren arabera; $Q=s.v$), eta abiadura horrek gas-trukean arazoak ekar litzake. Hala ere, badakigu hori ez dela gertatzen, beraz, zer gertatzen da?

Bernuilli-ren teorema aztertu genuenean, esan genuen “*Bernouilli-ren legearen ondorioak baliogarriak dira hodia adarkatzen bazen ere*” (4. orria). Beraz, arteriolatik eratorritako adar bakoitzak (kapilar bakoitzak) diametro txikiagoa daukan arren, adar guztien (kapilar guztien) diametroen batura egiten badugu eta sekzioa (S) kalkulatu badugu, konturatuko gara arteriolako sekzioa baino handiagoa dela eta, beraz, kapilarretako abiadura (v) arterioletakoa baino txikiagoa izango da. Hortaz, eritrozitoak abiadura txikiz pasako dira eta elkartruke egoki bat gertatzea posible izango da.

Azkenik, aipatu behar da kapilarrak muskulu-geruza eduki ez arren, kapilarren hasieran muskulu leunaz osatutako esfinter pre-kapilarra dutela eta uzurtuz edo lasaituz odolaren pasoa kontrola dezake.

4. Benulak

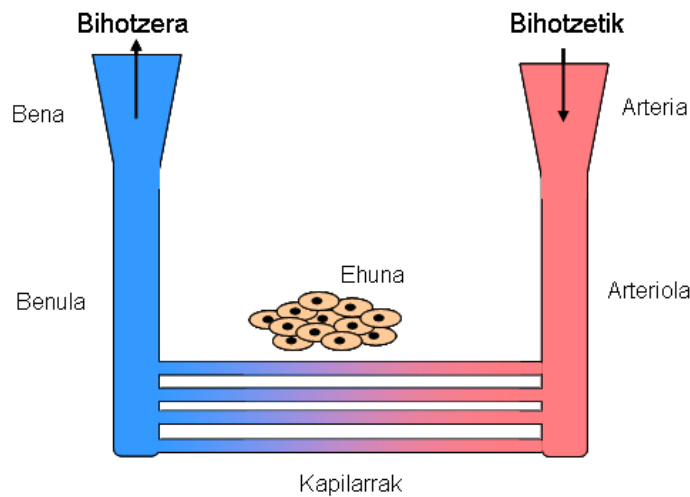
Odola kapilarretatik igaro ostean, benula izeneko odol-hodi txikietara heltzen da. Berriz ere aurrean ikusi ditugun hiru geruzez osatuak daude baina, arteriolak baino diametro handiagoa izango dute. Gainera, benulen horma askoz meheagoa da kolageno, elastina eta muskulu-zuntz gutxiago dituztelako.

Benulak presio baxuko hodi biltzaileak dira zeren eta, odolaren mugimendua gelditu ez dadin, beharrezkoa da odola geoz eta presio baxuagoko guneak topatzen joatea. Izan ere, kapilarretako odol-fluxua handituko balitz, benueltan ere fluxu hori mantendu ahal izateko, benulak errez dilatatu lirarteke oso distentsibleak eta elastikotasun gutxi dutelako.

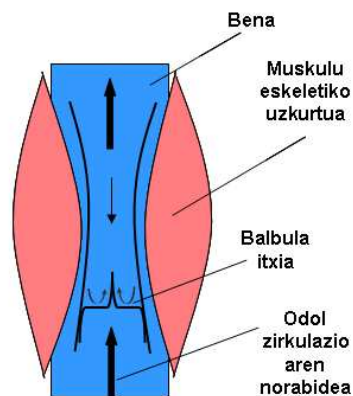
5. Benak

Bihotzera hurbiltzen diren heinean, benulak batzen joaten dira eta odol-hodi handiagoak sortzen dira, benak, alegia. Benak odola bihotzeraino eramaten duten garraio-hodiak dira. *Tunica media* geruza arterietan baino txikiagoa da baina hodiaren (lumenaren) diametroa handiagoa da, hori dela eta, presio txikiagoko guneak izango dira eta odolaren mugimendua ahalbidetuko dute.

Benen funtzio oso garrantzitsua da odolaren gordailuak izatea, izan ere, odol guztiaren % 65 benetan gordeta dago. Eta benak uzurtuz edo dilatatu, gordeta duten odola odol-zirkulaziora bidaltzeko edo zirkulaziotik bereganatzeko gaitasuna edukiko dute. Modu horretan, zirkulazioan dagoen odol-bolumena konstante mantentzen dute, nahiz eta odol-bolumen totalen aldaketak egon. Horregatik, odola ematen denean, benetatik hartzen digute, alde batetik kantitate handiagotan dugulako eta bestaldetik, benetan zehar odola presio txikiagorekin garraiatzen delako.



Hala ere, benetatik bihotzeraino dagoen presio diferentzia txikiak arazoak sor ditzake odolaren mugimenduan (odol-itzulera), adibidez, odola hanketatik bihotzeraino itzuli behar denean. Izan ere, bihotza baino beherago dauden organismoaren guneeetan, odolaren pisua dela eta sortzen den **presio hidrostatikoa** kontuan hartu behar dugu (grabitatearen eragina). Horregatik, itzulera zirkulazioan laguntzeko, benek egitura berezia dute. Egitura horiek **balbulak** dira. Odola benetatik aurrera doan heinean, balbulek odolaren atzeranzko pasabidea ixten dute. Bestaldetik, hanken muskuluen mugimenduak berehala aktibatuko du benen uzkurketa eta horrek mugimenduari lagunduko dio. Horregatik, denbora larregi geldirik gaudenean, hankak mugitzea ezinbestekoa da. Zeren eta, odola denbora luzez benetan egoten bada, kaltetuko dira, eta odol-poltsak sortuko dira; barizeak, alegia.



2.b) Odol-zirkulazioa

Zirkulazioaren **funtzioak**, besteak beste, hauek dira:

- Elikagaiak ehunetaraino garraiatu eta hondakinak ehunetatik kanporatzea
- O₂ ehunetara garraiatzea eta CO₂ biriketara eramatea (kanporatzeko)
- Hormona eta bestelako metabolitoak beharrezkoak diren ehunetara eramatea
- Oro har, **barne-ingurune** aproposa mantentzea

- **Funtzionamendua**

Zirkulazio aparatuan 2 zirkulazio nagusi bereizten dira; zirkulazio sistemikoa (periferikoa) eta biriketako zirkulazioa.

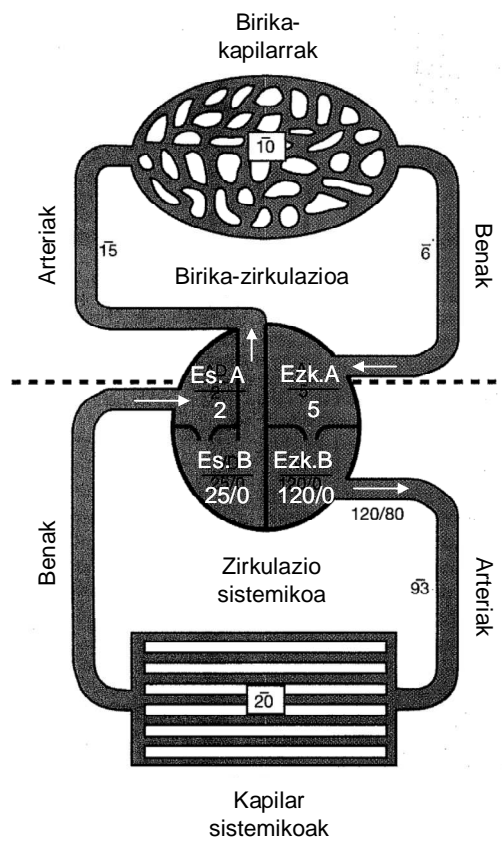
Zirkulazio sistemikoa

Bihotza uzurtzean (sistolea), ezkerreko aurikulatik ezkerreko bentrikulura pasa den odola ateratzen da aortara. Aorta arteriatik doan odola O₂-z betea egongo da. Odol-hodiak gero eta gehiago adarkatzen dira azkenean hodi mehe meheak emateko (aorta arteria → arteria nagusiak → arteriolak → kapilarrak). Kapilarretan gertatzen da substantzien elkartrukea (elikagaiak eta O₂ ehunetara eta hondakinak eta CO₂ kapilarretara). CO₂ jasotzean, odola bihotzera bueltatzen da, oraingoan hodi meheak diametroa handituz joago dira (kapilarrak → benulak → benak → kaba bena). Odol hura bihotzera sartuko da bihotza erlaxatzean (diastolea), eskumako aurikulatik sartuko da eta eskumako bentrikulura pasatuko da hurrengo uzurketa zikloan. Bihotza berriz uzurtzean (hurrengo sistolean) beraz, CO₂-z betetako odolak birikietara joko du, “birikietako zirkulaziora” pasatzen da, alegia.

Biriketako zirkulazioa

Bihotzeko eskumako bentrikulutik atera den CO₂-z betetako odolaren bidea ondoko hau da: birika-arteria → arteriolak → kapilarrak. Kapilarretan gasen elkartrukea emango da (CO₂ albeoloetara eta O₂ odolera) eta oxigenatutako odolak bihotzera joko du ondoko bidea jarraituz: benulak → benak → birika-benak. Bihotza erlaxatzean (diastolean), ezkerreko aurikulan sartuko da odola eta hurrengo bihotz-uzurketan (sistolean) zikloa berriz hasiko da.

Bide guzti hori egiteko, odola hainbat erresistentziekin topatuko da. Erresistentzia haiei aurre egiteko ditugun lanabesak ikusiko ditugu. Halaber, ikusiko dugu zergatik diren garrantzitsuak erresistentzia haiek eta zergatik sortzen diren.



**2.d) Fluxua,
erresistentzia**

presioa eta

Gorputzeko odol-fluxuak (Q) ehunen beharren arabera kontrolatua egon behar du. Odol-hodietan dagoen fluxua bi faktoreengatik zehaztua dago; presio aldaketa eta erresistentzia:

$$Q = \frac{\Delta P}{R}$$

$$\Delta P = Q \cdot R$$

$$R = \frac{\Delta P}{Q}$$

1. Odol-hodiko bi muturren arteko presio aldaketa (ΔP):

Odol-zirkulazioa posiblea izatearen arrazoia da organismoan presio aldaketak daudela. Bihotzak, ponpa hidrauliko baten moduan jokatzen du eta jasotzen duen odolaren presioa handitzen du, ehunetara bidali ahal izateko. Bihotzak presio handia eragin behar dio odolari zirkulazioan mantentzeko. Baina, fluxua egotearen arrazoia odol-hodien muturren arteko presio diferentzia da, eta ez presioa egote hutsa. Horregatik, arteria-sisteman dagoen presioa zain-sisteman dagoen presioa baino altuagoa da.

Aurrean ikusi ditugun formulak erabiliz, ondoriozta dezakegu, odolaren fluxua konstante izateko, haren ibilbidean erresistentzia gero eta handiagoa denez (odol-hodiak txikitzen joaten direlako), ΔP handia izan behar dela ere:

Adibidea (8. orriko marrazkia begiratu)

- **Sistema periferikoan**
 - Irteera presioa ≈ 100 mmHg
 - Iriste presioa ≈ 0 mmHg

Aorta arteria → arteria nagusiak → arteriolak → kapilarrak → benulak → benak → kaba bena

100 mmHg

90 mmHg

17 mmHg

10 mmHg

0 mmHg

- **Birika-sisteman**
 - Irteera presioa ≈ 13 mmHg
 - Iriste presioa ≈ 0 mmHg

2. Erresistentzia (R):

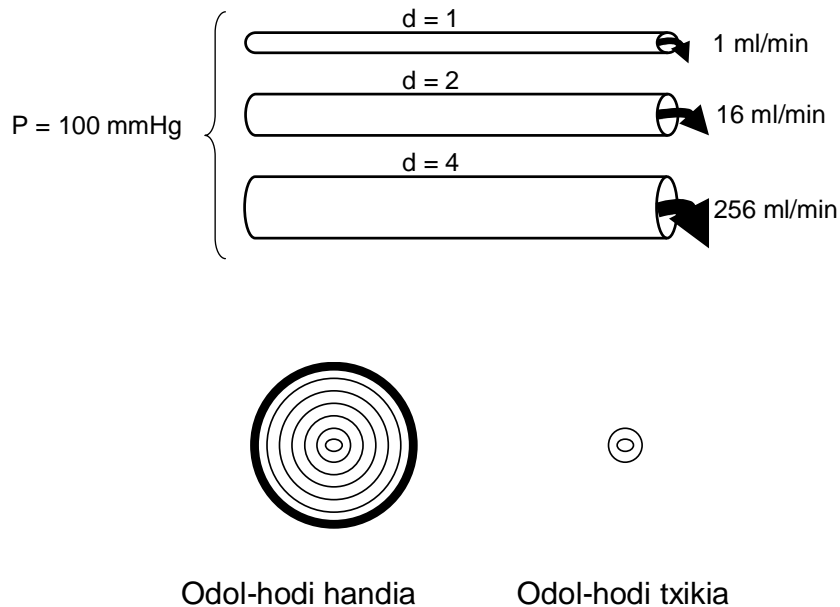
Erresistentzia da odol-hodietan odolaren fluxuak duen oztopoa. Ezin da zuzenean neurtu eta beraz, aurreko formula erabiliz kalkulatzen da: Odol-hodi baten bi puntuen arteko presio-aldaketa 1 mmHg bada eta fluxua 1 ml/sg bada, erresistentzia 1PRU-koa da (*Peripheral Resistance Unit*).

- **Odol-hodiko diametroan emandako aldaketa txikiak asko aldatzen dute erresistentzia:**

Odol-fluxua determinatzen duten faktore guztietatik garrantzitsuenak, odol-hodiaren erradioaren neurria da. Lehen ikusi dugun fluidoaren fluxu-laminarra dela eta, hurrengo irudian ikusten ditugun eraztun zentrokide (*concentric-circles*) bakoitza desberdina da. Odol-hodi handian, hodiaren horma ukitzen duen fluido-eraztuna zailtasun handiagorekin mugituko da, endotelio baskularrarekin kontaktuan egoteagatik baina, gero eta erdirago dauden eraztunak arinago mugituko dira. Odol-hodi txikian, aldiz, ia odol guztia hormarekin kontaktuan dago eta beraz, ez da existitzen fluxu zentral arinik. Poiseuillek honela formulatu zuen fluxuaren kalkulua:

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

Beraz, argi geratzen da, odol fluxuaren abiadura odol-hodiaren “4aren berreduraren” baliokide dela:



- **Zirkulazio sistemikoa eta biriketako zirkulazioaren arteko diferentziak**
Biriketako zirkulazioa, zirkulazio sistemikoa ez bezala, presio baxuko, erresistentzia baxuko eta hodi oso elastikoko sistema da. Birika-arteriolek ez dute muskulu askorik eta ezin dira horrenbeste uzkuritu, era berean, birika-benen hormak meheak eta oso elastikoak dira. Kapilarrak ere desberdintasunak dituzte, izan ere, kapilar sistemikoe hodi-sare tubularra osatzen dute eta birika-kapilarrek albeoloen paretarekin bat egiten dute eta odola mintz mehe bat sortuz dabil. Hau da, birika-kapilarrak hodi-sare bat baino, hodi-geruza bat sortzen dute.

Harrigarria den beste gauza bat da, bihotzak ponpatutako odola nola garraiatu daitekeen birika-sisteman zehar, zirkulazio sistemikoan erabilitako presioa baino askoz presio txikiagoarekin. Argi geratzen da, beraz, birika-sistemako hodi-erresistentzia oso txikia dela (sistemikoa baino 10 aldiz txikiagoa, hain zuzen):

$$R = \frac{\Delta P}{Q}$$

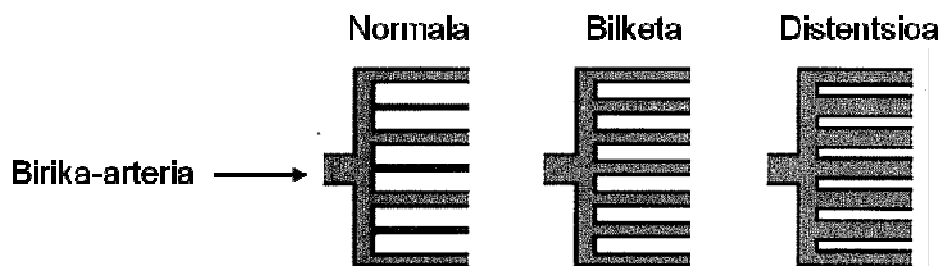
- **R sistemikoa** = $93 \text{ mmHg} - 10 \text{ mmHg} / 5 \text{ l/min} = 16,6 \text{ mmHg/l/min}$

- **R birika-sistema** = $15 \text{ mmHg} - 5 \text{ mmHg} / 5 \text{ l/min} = 2 \text{ mmHg/l/min}$

Birika-hodien beste berezitasun bat hau da: gastu kardiakoa (fluxua) igotzen denean, erresistentzia txikitze gaitasuna dute. Hau da, gastu kardiakoaren handipenak birika-arterien presioaren igoera sortzen duenean, erresistentzia baskularra txikitzen da.

Erantzun hori, zirkulazio sistemikoan ematen denarekin alderatuz, oso desberdina da. Baina fenomeno horren erantzuleak bi mekanismo lokal dira:

- 1) **Kapilarren bilketa**: Fluxuaren presio txikia dela eta, hainbat kapilar itxita daude. Baina, fluxua handitzean, presioa ere handitzen da eta kolapsatutako kapilarrak irekitzen dira, modu horretan, erresistentzia txikitzen da.
- 2) **Distentsio kapilarra**: Kapilar txikiek erradioa handitzen dute eta erresistentzia txikitzen da.



Odolaren fluxua handitzen denean, abiadura handitzeko joera dago, baina, aurreko 2 fenomeno horiengatik, azalera (sekzioa) handitzen denez, abiadura ez da horren handia izango eta gas-trukea ondo gertatuko da.