



6. GAIA

JARIAGAIEN JARIOA

GAI HAU IKASTEAN GAITASUN HAUEK LORTU BEHARKO DITUZU:

1. Likatasuna eta dentsitatearen artean bereiztu.
2. Reynolds zenbakiaren arabera sortzen den jario mota bereiztu.
3. Muga-geruzaren kontzeptua ulertu.
4. Bernouilli-ren ekuazio erabili.
5. Marruskaduraz galtzen den energia kalkulatu.
6. Moody eta Karman-en grafikoak erabili.
7. Kalkulurako iterazio-prozedurak erabili.
8. Presio mota desberdinak bereiztu.
9. Ponparen potentzia kalkulatu.
10. Kabitazioa saihesteko baldintzak aurkitu.
11. Hoditeria sareak ebatzi.

Industria kimikoan, materia egoera solido, likido zein gas-egoeran egon daiteke. Hala ere, solidoekin lan egitea garestiagoa, zikinagoa eta nekezagoa izaten denez, ohikoa izaten da gas eta likido eran lan egitea. Likido- zein gas-egoeran dagoen materia leku batetik beste batera eramateko (erreaktoretik destilagailura, tangatik erreaktorera eta abar), hodiak erabiltzen dira.

Egoera solidoan dagoen gorputzari indar tangenziala egiten zaionean (indar ebakitzailak), oso indar handia behar da materia deformatu edo apurtzeko, solidoak barne-kohesio handia daukalako. Likido eta gasetan, ordea, indar tangenzial txiki batekin materiaren deformazioa sortzen da. Egoera horietan, barne-kohesio txikiagoa dauka materiak.

Jariatzeko joera duen eta ingurunearen forma hartzen duen substantzia **jariagaia** da, eta likido- zein gas-egoeran egon daiteke. Jariagai baten mugimendua edo fluxua **jarioa** da. Jariagaien jarioa aztertzen duen zientziaren alorra **jariagaien mekanika** da, eta jarioan zeharreko abiadurak eta indarrak aztertzen ditu.

Industrian, sistemak egoera geldikor zein ez-geldikorrekoak izan daitezke, baina hodian barnetik doan jariagai baten jarioak egoera geldikorra hartzeko oso denbora laburra behar izaten duenez, egoera geldikorrean dihardutela onar daiteke. Horregatik, egoera geldikorreko jarioa aztertuko da.

6.1 JARIO MOTAK: SAILKAPENA

Jario motak hainbat irizpideren arabera sailkatu daitezke. Ondoren, hiru irizpideren araberrako sailkapena egingo da:

Ingurunearen arabera

1. Barne-jarioa: jarioa ingurune baten barrukoa denean (hodi baten barrukoa, adibidez).
2. Kanpo-jarioa: jariagaiak gorputz solidoa inguratzen duenean. Horrelakoa da hegazkin baten inguruko airearen jarioa, edo ingeniaritza kimikoan hainbeste erabiltzen diren ohandze finko eta fluidoak.

Konprimigarritasunaren arabera

1. Jario konprimiezina: jariagaiaren bolumen-elementu baten dentsitatea presioaren araberrakoa ez denean.
2. Jario konprimigarria: jariagaiaren bolumen-elementuaren dentsitatea presioarekin aldatzen denean.

Konprimigarritasuna neurtzeko, **elastikotasun-zenbakia** (E) definitzen da:

$$\Delta P = E \cdot \left(\frac{\Delta \rho}{\rho_0} \right)_T \quad (6.1)$$

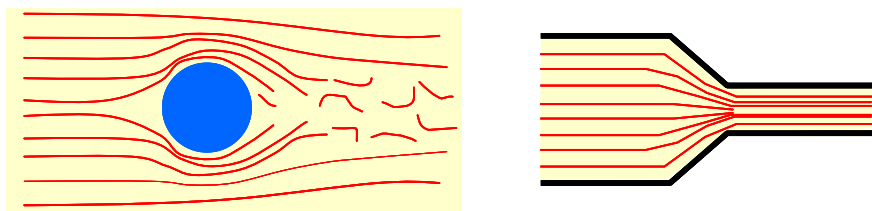
Likidoentzako $E \approx 10^4$ atm ordenakoa da; gasentzako, berriz, 1 atm ordenakoa da. Horregatik, giro-presioan likidoen jarioa konprimiezintzat hartzen da. Gasen jarioa ere konprimiezintzat har daiteke Mach zenbakia ($Ma = v/c$; v jarioaren abiadura, eta c jariagaiaren muinean dagoen soinuaren abiadura izanik) $\ll 1$ bada, baina Ma handitzen den heinean, jarioa konprimigarri bihurtzen da. Industria kimikoan, $Ma \ll 1$ erabiltzen dira gehienbat ($v < 150$ m/s), eta, horregatik, aurrerantzean jario konprimiezinak azalduko dira.

Marruskaduraren arabera

1. Jario idealak: marruskadurarik ez duen jarioa. Benetan ez da gertatzen, baina ikerketa teorikoan erabiltzen da.
2. Jario likatsua (edo benetakoa): jarioak marruskaduraz energia galtzen duenean. Benetako jarioak horrelakoak dira.

6.2 JARIOAREN IRUDIKAPENA: KORRONTE-LERROAK ETA IBILBIDE-LERROAK

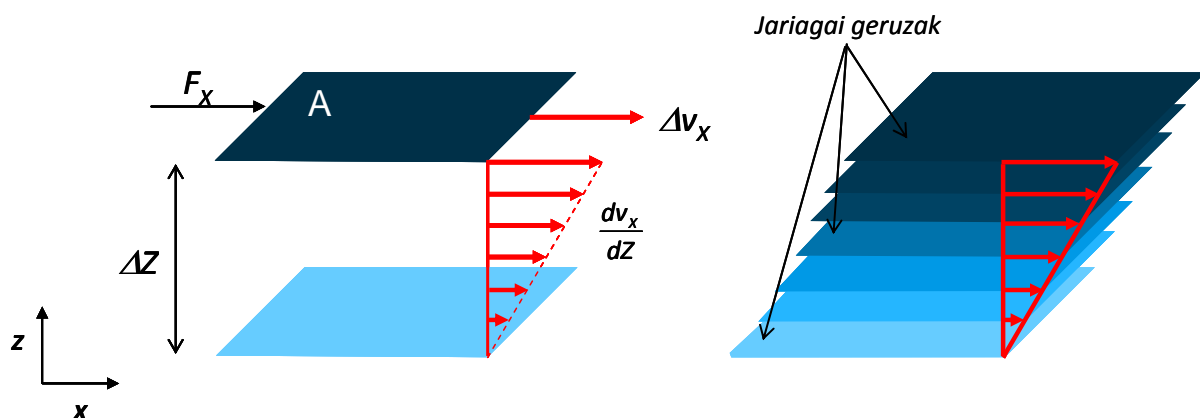
Jariagai baten jarioaren ibilbidea adierazteko, korrante-lerroak eta ibilbide-lerroak erabiltzen dira. Lehenak une batean jarioaren abiaduraren ukitzaileak diren lerroen gune geometrikoa dira. Ondorioz, korrante-lerroek ezin dute elkar gurutzatu. Ibilbide-lerroak masa gabeko jariagai-partikulak jarraitzen duen ibilbidea adierazten du, eta elkar gurutzatu dezakete. Egoera geldikorrean, bi lerro motak bat datoz. 6.1 irudian adierazten dira jarioaren irudikapenaren adibideak.



6.1 irudia. Esfera bat inguratzen duen jarioaren eta hodi barruko estugune baten barneko jarioaren korrante-lerroak.

6.3 MUGIMENDU KANTITATEAREN GARRAIO MOLEKULARRA: LIKATASUNA

Demagun bata bestetik ΔZ distantziara banatuak dauden A azalerako bi jariagai-xafla paralelo ditugula (likido zein gasa) (ikusi 6.2 irudia). Beheko jariagai-xafla geldirik badago, goiko xafla Δv_x abiadura erlatiboarekin X norabidean eskuinera mugitzeko, F_x indarra egin behar zaio xaflari, X norabidean baita ere. Jariagai-xafla, plano baten dauden molekulek osatzen duten xafla da.



6.2 irudia. Newton-en likatasun-legearen eratorpena.

Goiko jariagai-xaflari egin behar zaion indarra xaflen azaleraren (A), xaflen arteko distantziaren (ΔZ) eta X norabideko abiaduraren (Δv_x) araberakoa da. Indar hori bi jariagai-xaflen arteko marruskadura gainditzeko adinakoa da (beraz, jariagaiak egiten duen indarrak zeinu negatiboa dauka):

$$F_x = \mu \cdot A \cdot \frac{\Delta v_x}{\Delta Z} \quad (6.2)$$

$$\frac{F_x}{A} = \tau_x = \mu \frac{\Delta v_x}{\Delta Z} \quad (6.3)$$

Bi jariagai-xaflak elkarrengandik oso hurbil badaude:

$$\frac{F_x}{A} = \tau_x = \mu \cdot \frac{dv_x}{dZ} \quad (6.4)$$

Adierazpen horri Newton-en likatasun-legea deritzo. τ_x tentsio-ebakitzaille izenez ezagutzen da, eta jariagai-xaflari azalera unitateko jarioaren norabidean egin behar zaion indarra adierazten du. Ekuazio horretan, μ proportzionaltasun-konstantea azaltzen da.

μ biskositatea edo **likatasuna** da. Likatasuna jariagaien propietate fisikoa da, eta jarioari jariagaiak berak egiten dion barne-erresistentzia da. Likatasuna jariagaiaren barne-kohesioaren adierazlea da. Horregatik, jariakortasuna $1/\mu$ -ren arabera dela esan daiteke.

Likatasunak $[\mu] = M \cdot L^{-1} \cdot t^{-1}$ dimentsioa du. Unitate erabiliena **poise** da (P), g/cm·s. Hala ere, unitate handiegia denez, jariagai gehienentzat cP erabiltzen da ($1 \text{ cP} = 10^{-2} \text{ P}$).

Likido-egoeran, molekulak elkarrekiko gertuago daudenez gasean baino, elkarreragin eta kohesio-indar handiagoa dute, eta, ondorioz, likatasun handiagoa.

Likatasuna tenperaturaren arabera propietatea da. Oro har, tenperatura handitzean, txikitu egiten da likidoen likatasuna; handitu, berriz, gasen likatasuna. Bien kasuan, gasen eta likidoen teoria molekularrak ematen du likatasuna kalkulatzeko bidea, baina adierazpen enpiriko hauek ondo doitzen dituzte datu esperimentalak.

Likidoen likatasuna:

$$\mu = A \cdot e^{\frac{B}{T}} \quad (6.5)$$

A eta B osagai bakoitzaren konstanteak izanik.

Gasen likatasuna:

$$\mu = \frac{A \cdot T^{3/2}}{T + B} \quad (6.6)$$

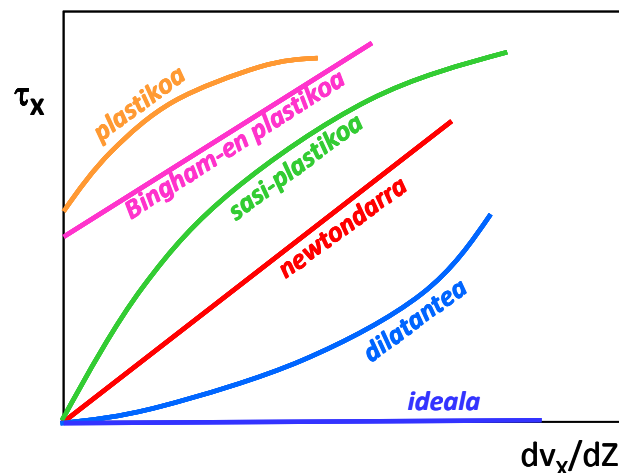
A eta B osagai bakoitzaren konstanteak izanik.

Gainazal solidoen inguruan jariagai-xaflak eta aldameneko jariagai-xaflak abiadura desberdinean mugitzen direnez², jariagaien jarioan tentsio-ebakitzailleak agertzen dira. Gainazal solidoarekin kontaktuan dagoen jariagaiak, haren abiadura dauka. Gainazal solidotik oso aldentuta dagoen jarioaren kasuan, ordea, jo daiteke abiadura berdinarekin mugitzen direla; beraz, ez dute horrelako gradienterik jasaten (xaflen arteko abiadura erlatiboa zero da). Horregatik, hodian barruko jarioan edo kanpo-jarioan, horma solidoen eragina nabarmena izanik, jariagaiak bere buruari egiten dion barne-erresistentzia gainditu behar du. 6.2 irudiari erreparatuz, goiko xaflatik beheko xaflara gradiente dagoenez, bi

¹ Liburu gehienetan jariagaiak jasaten duen marruskadura erabiltzen delako, $F_x = -\mu \cdot A \cdot \frac{\Delta v_x}{\Delta Z}$ idazten da.

² [Muga-geruza hidrodinamiko](#) azaltzean sakonago ikusiko da (6.6 atala).

muturreko xafren arteko jariagai-xafletan abiadura-gradientea (dv_x/dz) edo profila garatzen da.



6.3 irudia. Tentsio-ebakitzaila abiadura-gradientearen funtzioan: jariagai motak.

Newton-en legea betetzen duen jariagaia **jariagai newtondarra** da (ikusi 6.3 irudia). Horren arabera, jariagaiak jarioari egiten dion erresistentzia konstantea da abiadura-tarte osoan, hau da, ez da abiadura-gradientearen araberakoa. Horrelakoak dira gas eta likido gehientsuenak, eta gai honetan horrelako jariagaiak aztertuko dira.

Jariagai sasiplastikoak abiadura-gradiente handiagotzen den heinean jarioarako erresistentzia baxuagoa du (lerroaren malda apaldu egiten da, hots, likatasuna txikitu egin da). Horrelakoak dira hainbat koloideren esekidurak eta polimeroen disoluzioak. **Jariagai dilatagarriak** abiadura handitu ahala erresistentzia handiagoa jartzen dio jarioari. Horrelakoak dira arto-irinaren esekidura eta harearen ur-esekidura. Bestalde, hortz-orea edo maionesa bezalako emulzioek tentsio-ebakitzaila minimo bat behar dute jarioa hasteko, eta behin jarioa hasita, likatasun konstantea daukate. Horrelako jariagaiak **Bingham-en plastikoa** dira. **Jariagai plastikoa** ere tentsio-ebakitzaila minimoa behar dute jarioa hasteko, eta, behin jarioa hasita, abiadura handitzean, likatasuna txikitu egiten dute.

Ohartu gaitzen jariagai idealean likatasuna zero izango litzatekeela, eta jarioari ez liokeela inolako eragozpenik jarriko.

Modu berean, denboraren arabera likatasuna aldatu egin daiteke. Denborarekin likatasun txikiagoa daukaten jariagaiak tixotropiko deitzen dira (hortz-orea, adibidez), eta denborarekin likatasuna handitzen duten jariagaiei erreopektiko deritze (igeltsu-orea, adibidez).

Adibidea 6.1 adibidea

Bi xafla solido paraleloren artean 10 cP-ko likatasuneko jariagai newtondarra dago. Goiko xafla 1 m/s-ko abiaduraz mugitzen da beheko xaflarekiko, eskuinerantz. Bi xaflak 10 cm-ko distantziara badaude, kalkula dezagun garatzen den abiadura-gradiente.

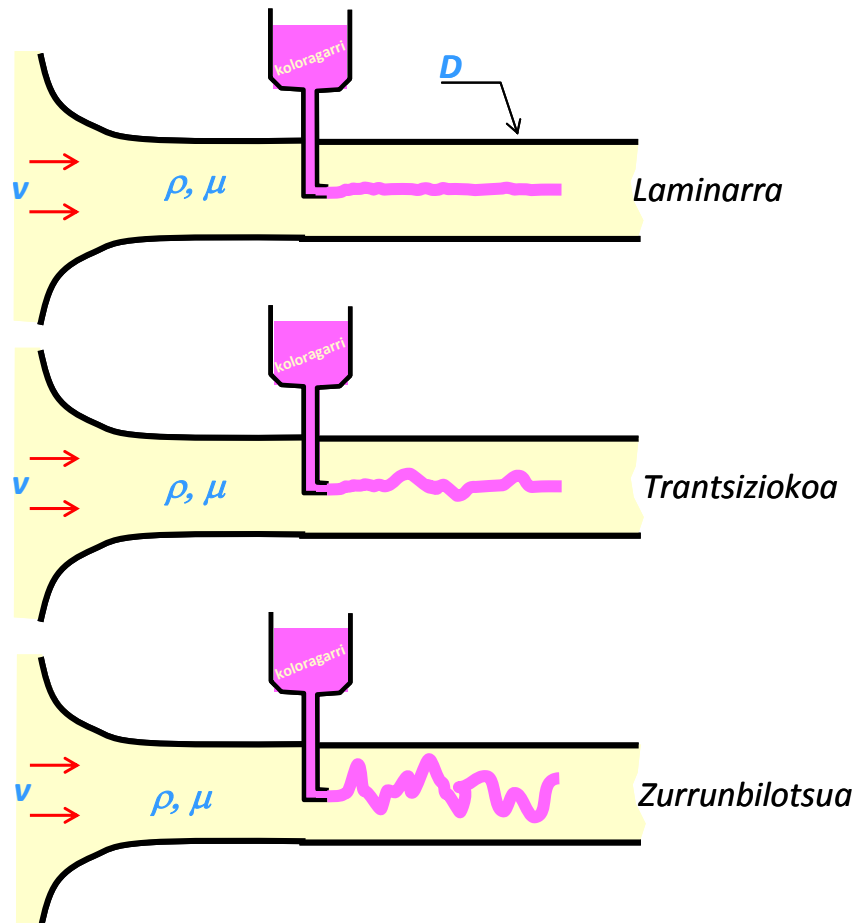
Ebazpena

Jariagai newtondarra bada, bi xafren artean dagoen tentsio ebakitzaila (azalera unitateko marruskadura-indarra) hau da (SI unitatetan):

$$\tau_x = -\mu \cdot \frac{dv_x}{dz} = -\mu \cdot \frac{\Delta v_x}{\Delta z} = -10 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{0,1} = -0,1 \text{ N/m}^2$$

6.5 LIKATASUNAREN ERAGINA JARIAGAIEN JARIOAN: REYNOLDS-EN SAIKUNTZA

Jariagaiaren jarioan likatasunak duen garrantzia aztertzeko, 6.4 irudian azaltzen den saiakuntza egin zuen Osborne Reynolds-ek 1883 urtean. D barne-diametroko beirazko hodi baten barnetik jariagai bat igarotzen da; hodiko puntu batean, tinta koloratzailea gehitzen zaio, eta hodian barrena tintak duen ibilbidearen jarraipena egiten da.



6.4 irudia. Reynolds-en saiakuntzan lortutako jario motak.

Jario mota zehazteko, dimentsio gabeko Re (Reynolds) zenbakia erabiltzen da:

$$Re = \frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu} \quad (6.7)$$

Jarioaren indar zinetikoaren eta likatasunaren ondoriozko marruskadura-indarren arteko erlazioa adierazten du Reynolds zenbakiak.

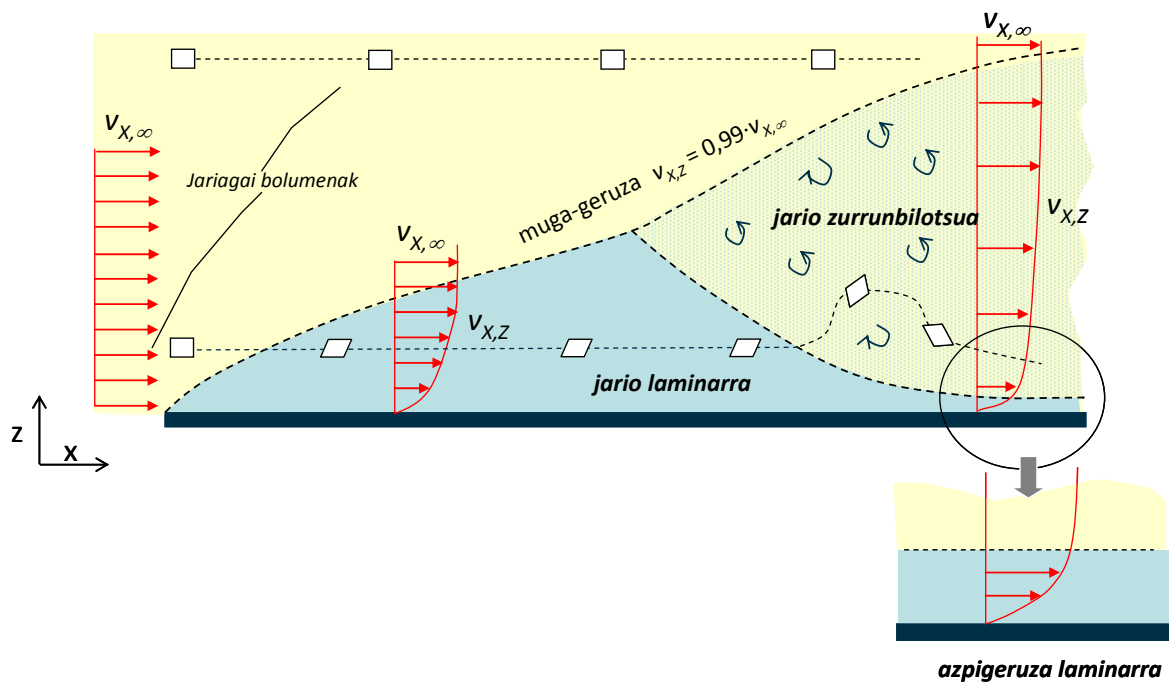
Re zenbakiaren balio baxuko jarioan (likatasun handia) tintak bere bideari jarraitzen dio, jariagaiarekin nahastu gabe. Jario mota horren eredu elkar nahastu gabe zirkulatzen duten jariagai-xafla zentrokidez osatutako jario ordenatua da. Jario mota horri jario laminar edo xaflakor deritza, eta gutxi gorabehera $Re < 2.100$ ingururaino betetzen da.

Re zenbakia handitzen den heinean, tintaren eta jariagaiaren arteko nahastea hasten da, baina oraindik ez da hein handian gertatzen. Re balio altuetara heltzean ($Re > 10^4$ gutxi gorabehera, hodiaren arabera), berriz, tintaren eta jariagaiaren arteko nahastea osoa da, eta zurrunbiloak agertzen dira, hau da, jarioa guztiz kaotiko bihurtzen da. Jario mota horretan,

jarioaren xafla zentrokideen arteko nahastea agertzen da, eta zurrunbiloak osatzen dira. Horregatik, jario mota horri **zurrunbilotsu** deritzo.

6.6 MUGA-GERUZA HIDRODINAMIKOA

Gainazal solido baten inguruko jariagai baten jarioan, jarioarekiko perpendikularra den norabidean abiadura-gradientea sortzen da, jariagaiaren likatasuna dela eta. Gainazal solidoa ukitzen duen jariagaia geldirik dagoen bitartean, bere gainaldean zirkulatzen duen jariagai-xaflari erresistentzia egiten dio, eta haren abiadura gutxitzen du. Eragin hori hedatu egiten da xaflaz xafla, eta gainazal solidotik aldentzen den neurrian eragina txikiagoa da. Gainazal solidotik oso aldentuta dagoen jariagaiaren abiadura eragina oso txikia izango da, jariagaiaren abiadura $v_{x,\infty}$ izanik, jario libreko abiadura, alegia. Beraz, abiadura-profila solidoaren inguruko eremu batean besterik ez da garatuko, **Muga-geruza hidrodinamikoa** deitzen den eremuan, alegia. Eremu horretatik kanpo, jariagaiaren abiadura konstantea da jarioarekiko perpendikularra den norabidean ($dv_{x,\infty}/dz = 0$), eta jario ideal gisa igarotzen da (likatasunaren eragina arbuigarria baita) (ikusi 6.5 irudia). Muga-geruza hidrodinamikoaren lodiera, jariagaiaren abiadura jario libreko abiaduraren %99 denekoa da. Muga-geruzatik kanpo doan jariagaiak tentsio-ebakitzailerik pairatzen ez duenez deformatu gabe doan bitartean, muga-geruzatik doan jariagaia deformatu egiten da, gainazal solidotik aldentuago dagoen aldea gainazal solidotik gertuago dagoen aldea baino azkarrago mugitzen baita.



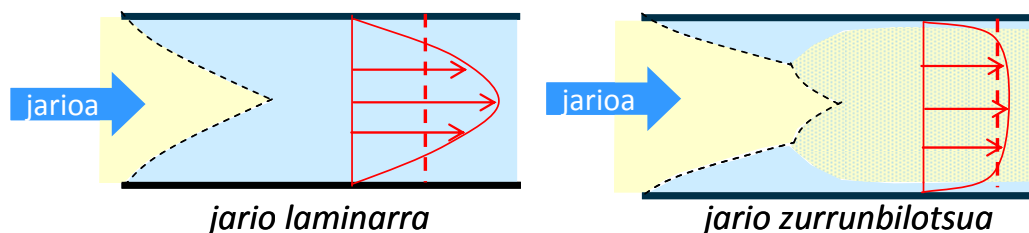
6.5 irudia. Gainazal lauaren inguruko muga-geruza hidrodinamikoaren garapena.

Muga-geruzaren lodiera gainazal solidoa ukitzen duen eremuaren luzeraren arabera handitzen da. Lehenengo eremuan jario laminarra garatzen da, abiadura-gradiente nabarmenarekin ($dv_{x,\infty}/dz \neq 0$). Solidoaren gainazalean aurrera joan ahala, muga-geruzaren lodiera handitu egiten da, eta puntu batean, muga-geruza bitan banatzen da. Batean, jario zurrunbilotsua dago (abiadura-gradiente oso txikia), eta gainazal solidoa ukitzen duen jariagaiaren eremu estuan, azpigeruza laminarra garatzen da —abiadura-gradiente handia dago—. Azpigeruza laminarrak solidoa dagoen bitartean irauten du, eta abiadura-gradiente

handiena hor gertatzen da. Ingurune zurrunbilotsuan jariagaien arteko nahastea gertatzen da.

6.6.1 Abiadura-profila hodi zilindrikoetan

Hodi zilindrikoak luzera osoan ingurune solidoa duenez, muga-geruza garatuko da zilindroaren inguruan. Muga-geruzaren lodierak hodiaren erradio osoa hartzen duenean (egoera horri jario garatua deritzo), bi egoera gerta daitezke: (a) jario zurrunbilotsua izatea, (b) jario laminarra izatea. Lehenengo kasuan, abiadura-profila ia laua da erradio osoan, hormen inguruan izan ezik. Jario laminarrean, berriz, erradio osoan gradientea garatzen denez, abiadura-profil parabolikoa garatzen da (ikusi 6.6 irudia).



6.6 irudia. Abiadura-profilak hodi zilindrikoen barruan: jario laminarra eta jario zurrunbilotsua. Lerro ez-jarraituak batez besteko abiadura adierazten du. (Ilundutako eremuak jario laminarra adierazten du).

Jario laminarrean:

$$\frac{v(r)}{v_{r=0}} = 1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2 \quad (6.8)$$

Abiadura-profila garatzen da R erradioko hodian. Hodiaren ardatzean ($r = 0$) abiadura maximoa dago, $v_{r=0} = 2 \cdot v$ (v jariagaiaren batez besteko abiadura izanik).

Jario zurrunbilotsuan:

$$\frac{v(r)}{v_{r=0}} = \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} \quad n = f(\text{Re}) \quad (6.9)$$

$\text{Re} > 2 \cdot 10^4$ denean, $n \approx 6$, eta $\text{Re} > 10^6$ denean, $n \approx 9$; eta $v/v_{r=0} \approx 0,85$ da.

6.6 irudiaren eta adierazpen horien arabera, jario zurrunbilotsuan abiadura ia uniformea da erradio osoan, azpigeruza laminarrean izan ezik. Jario laminarrean, ordea, erradio osoan nabari da abiadura-gradientea.

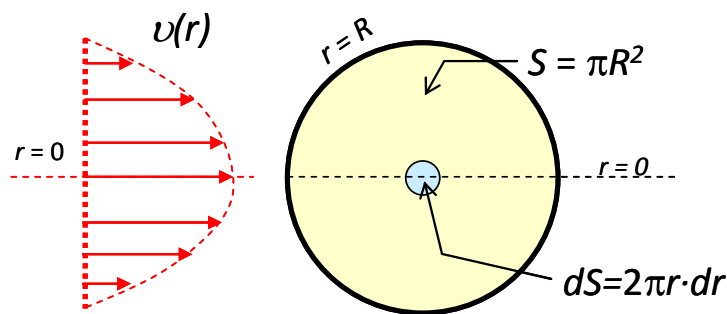
6.6.2 Jariagaiaren batez besteko abiadura hodi zilindrikoetan

Hodi baten barruko jarioaren abiadura ez da uniformea erradio guztian, ardatzean maximoa baita eta hodiaren hormetan zero balioa baitu. Hori dela eta, jariagaiaren batezbesteko abiadura (v) kalkulatzeko, erradio desberdinetako abiadura puntualak (v) erabiliko dira (azken horiek Pitot-en neurgailuz neur daitezke, 6.13 atalean ikusiko den bezala).

Definizioz, S azalerako gainazala zeharkatzen duen emari masikoa (\dot{m}) gainazalean duen batezbesteko abiaduraren (v), jariagaiaren dentsitatearen (ρ) eta azaleraren arteko biderkadura da; emari bolumetrikoa (Q), berriz, abiaduraren eta azaleraren arteko biderkadura:

$$\dot{m} = \rho \cdot S \cdot v \quad ; \quad Q = S \cdot v \quad (6.10)$$

6.11 ekuazioan agertzen da nola kalkulatu den batez besteko abiadura.



6.7 irudia. Hodi zirkularretik doan jariagaiaren batez besteko abiaduraren kalkulua.

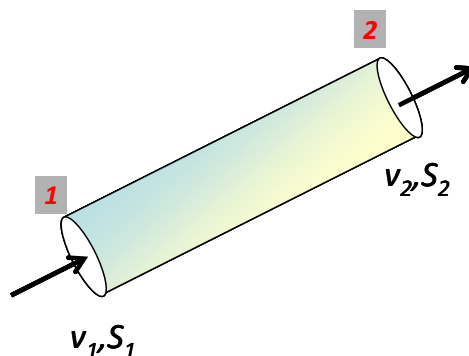
$$v = \frac{Q}{S} = \frac{\int_0^R v(r) \cdot 2\pi r \cdot dr}{\int_0^R 2\pi r \cdot dr} = \frac{\int_0^R v(r) \cdot 2\pi r \cdot dr}{S} \quad (6.11)$$

6.7 HODI BARRUKO JARIOA

Hodi barruko jariagaien jarioan masaren iraupenaren legea, energiaren iraupenaren legea eta mugimendu kantitatearen iraupenaren legea betetzen dira. Energia osoaren iraupenaren legea betetzeaz gain, sistema gehienetan termino entalpikoak arbuigarriak direnez termino mekanikoekin alderatuta, energia mekanikoaren iraupenaren legea erabiltzen da. Ondoren azalduko dira jariagaien jarioko oinarritzko ekuazioak:

6.7.1 Masaren iraupenaren legea

Hodi baten baretik doan eta erreazio kimikorik jasaten ez duen jariagai batentzat hau betetzen da egoera geldikorrean:



$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (6.12)$$

$$\rho_1 \cdot v_1 \cdot S_1 = \rho_2 \cdot v_2 \cdot S_2 \quad (6.13)$$

Jariagaiaren dentsitatea aldatzen ez bada (sistema isoterma eta konprimiezina bada):

$$v_1 \cdot S_1 = v_2 \cdot S_2 \quad (6.14)$$

$$Q_1 = Q_2 \quad (6.15)$$

6.7.2 Mugimendu kantitatearen iraupenaren legea

Newton-en bigarren legearen arabera, jariagai baten gain eragiten duten indarren baturak azelerazioa (edo mugimendu kantitatearen aldaketa) eragiten du.

$$\sum_{\text{Guztiak}} F = \frac{d}{dt}(m \cdot v) \quad (6.16)$$

Mugimendu kantitatearen iraupen legearen aplikazioa irakasgai honen helburuetatik kanpo gelditzen delako ez da gehiago sakonduko. Hala ere 7.3 atalean erabilpenaren adibide bat ematen da.

6.7.3 Energia mekanikoaren iraupenaren legea, jario konprimiezinetan: Bernouilli-ren ekuazioa

5. gaian ikusi den bezala, energia osoaren iraupenaren legea beteko da (5.1 ekuazioa). Hemen, jario konprimiezinaren legea azalduko da (likidoen kasua, batik bat). Erreakzio kimikorik gertatzen ez bada eta ingurunearekin bero-trukerik ez badu, hau betetzen da egoera geldikorrean (energia/masa eran):

$$\left(h + \frac{v_e^2}{2} + gZ \right)_1 - \left(h + \frac{v_e^2}{2} + gZ \right)_2 - w = 0 \quad (6.17)$$

$h = u + \frac{P}{\rho}$ denez,

$$\left(u + \frac{P}{\rho} + \frac{v_e^2}{2} + gZ \right)_1 - \left(u + \frac{P}{\rho} + \frac{v_e^2}{2} + gZ \right)_2 - w = 0 \quad (6.18)$$

Sisteman tenperatura-aldaketarik ez badago ($\Delta u = 0$):

$$\left(\frac{P}{\rho} + \frac{v_e^2}{2} + gZ \right)_1 - \left(\frac{P}{\rho} + \frac{v_e^2}{2} + gZ \right)_2 - w = 0 \quad (6.19)$$

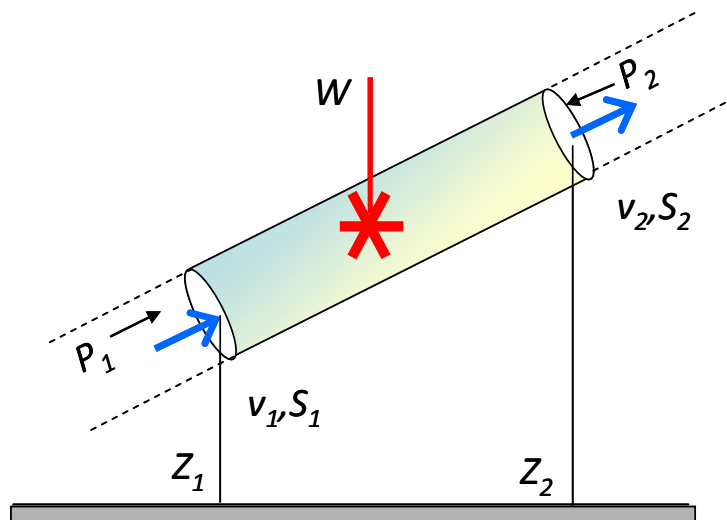
(P/ρ) terminoak presio-energia zenbatzen du. 6.8 irudian ikusten denez, $(P/\rho)_1$ terminoa atzetik datorren jariagaiak 1 gainazalean egiten duen presioa da; $(P/\rho)_2$ terminoak, berriz, 2 gainazalaren aurretik dagoen jariagaiak gainazala jarioaren aurkako noranzkoan zeharkatzeko egiten duen presioa adierazten du.

Iraupenaren legeko adierazpenean energia zinetikoaren terminoan v_e energiaren batezbesteko abiadura eraginkorra agertzen da, eta ez dator bat masaren batez besteko abiadurarekin (v).

$$v_e^2 = \frac{v^2}{\alpha} \quad (6.20)$$

Eta α zuzenketa-faktorea da, jario motaren (Re) arabera:

- Jario laminarrean, $\alpha = 0,5$ da.
- Jario guztiz zurrunbilotsuan, $\alpha \approx 1$ dela har daiteke.



6.8 irudia. Energia mekanikoaren iraupenaren legea.

Energia mekanikoaren iraupenaren ekuazioko terminoak grabitatearen azelerazioaz (g) zatitzean luzera-dimentsioa hartzen dute (jariagaiaren dentsitateko zutabe-luzera; SI sisteman, metroak dira). Sistemak ingurunearekin lanik trukatu ez balu ($w = 0$):

$$\left(\frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g\alpha} + Z \right)_1 = \left(\frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g\alpha} + Z \right)_2 \quad (6.21)$$

Adierazpen hori jariagai idealen Bernouilli-ren ekuazioa da, eta energia mekanikoaren iraupenaren legea azaltzen du, hau da, presio-energia, energia zinetikoa eta energia potentzialaren batura konstantea dela hodiko puntu guztietan. Hau da, energia mekanikoen arteko trukea gertatzen da; izan ere, bat handitzen bada, beste bien batura txikituko egiten da.

Bi gainazalen artean, ponparen batekin lana (W) ematen bazaio:

$$\left(\frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g\alpha} + Z \right)_1 + W = \left(\frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g\alpha} + Z \right)_2 \quad (6.22)$$

Orain arte, jariagaiak marruskaduraz galdu duen energia ez da kontuan hartu (hau da, $\mu = 0$ izan da); baina beste terminoekiko garrantzitsua izan daiteke, jariagaia likatsua bada bereziki, muga-geruza azaldu denean ikusi den bezala. Jariagaiak bi gainazalen arteko ibilbidean marruskaduraz galdu duen energia adierazten du h_f terminoak, jariagaiaren luzera-unitatetan.

$$\left(\frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g\alpha} + Z \right)_1 + W = \left(\frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g\alpha} + Z \right)_2 + h_f \quad (6.23)$$

Adierazpen hori Bernouilli-ren ekuazioa da, jario konprimiezinentzat erabilgarria. Ibilbidean turbina baten bidez jariagaiak lan bat egingo balu, energia hori ($-W$) gisa zenbatuko litzateke.

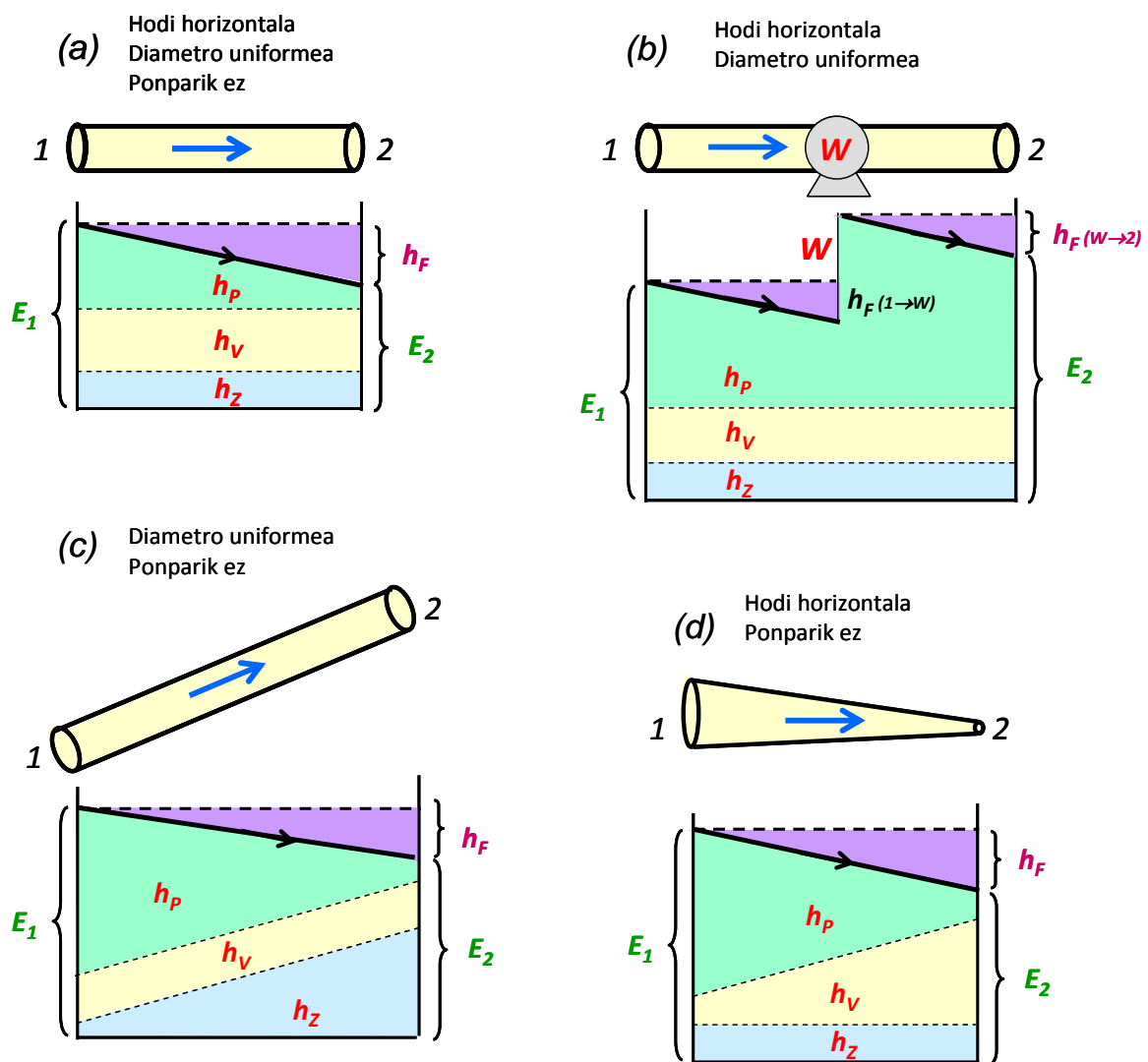
Hainbat kasuren energia mekanikoaren banaketa agertzen da 6.8 irudian. Termino mekanikoak izendatzeko, h_p (presio-energia edo presio-karga), h_v (energia zinetikoa edo karga zinetikoa) eta h_z (energia potentziala edo altuera-karga) erabiliko dira, eta E (jariagaiaren energia mekanikoa) hiru terminoen batura izango da; h_f karga-galera gisa ere ezagutzen da.

Marruskaduraz galtzen duen energia, 6.9(a) irudian ikusten den bezala, presio-energia da (hodia horizontala eta diametro uniformeduna delako). Hodian aurrera doan heinean, presio

txikiagoa izango du jariagaiak. Horregatik, bi punturen artean marruskaduraz galtzen den energia neurtzeko, bi puntuetan presioa neurtzen da eta diferentzia kalkulatu da.

Ponpa baten eragina ikusteko, 6.9(b) irudia aztertuko da. Hodia horizontala eta diametro uniformekoa bada, hodiko puntu guztietan karga zinetikoa eta altuera-karga mantendu egiten dira; ondorioz, ponpa bat ezartzean jariagaiak presio eran irabazten du energia. Hau da, ponpak jariagaiari presioa emateko erabiltzen dira, eta, ondoren, presio hori beste energia mekaniko batera eraldatu daiteke. Adibidez, tanga bateko jariagaia gorago dagoen beste tanga batera lekualdatzeko ponpa erabiltzean, jariagaiari presioa ematen zaio, eta hori altuera (energia potentzial) bihurtzen da.

6.9(c) edo 6.9(d) irudietan, marruskaduraz energia mekanikoa galtzeaz gain, 2 puntuan oso presio-karga baxua dago (batak altuera irabazi duelako eta besteak abiadura irabazi duelako), eta hoditik doan likidoaren lurrun-presioa berdintzen badu, likidoa irakiten hasiko da. Egoera hori saihestu beharrekoa da, jariora eten egin baitaiteke.



6.9 irudia. Energia mekanikoaren iraupenaren legea. (a) marruskaduraz galtzen duen energia, (b) ponparen eragina, (c) altuera-diferentziaren eragina, (d) diametroa aldatzearen eragina.

Ponparen potentzia teorikoa (Pot_T) kalkulatzeko, Bernouilli-ren ekuazioan jariagaiari ematen zaion energia mekanikoa (W) lortu ondoren, ekuazio hau erabiliko da:

Jariagaia ideala dela onar daiteke (marruskaduraz ez du energiarik galtzen, eta $\alpha = 1$).

Datua: jariagaiaren dentsitatea = 1.000 kg/m^3

Ebazpena

	①	②	③	④	⑤	⑥
D , m	↑	0,06	0,04	0,06	0,05	0,05
S , $\text{m}^2 \cdot 10^{-3}$	↑↑	2,827	1,257	2,827	1,964	1,964
P , Pa ($\cdot 10^3$)	101,3	175,8	80,75	126,8	42,53	101,3
v , m/s	~0	6,875	15,47	6,875	9,9	9,9
$h_p = P/\rho g$, m	10,34	17,94	8,24	12,94	4,34	10,34
$h_z = Z$, m	10	0	0	5	11	5
$h_v = v^2/2g\alpha$, m	~0	2,4	12,1	2,4	5	5
E_{osoa} , m	20,34	20,34	20,34	20,34	20,34	20,34

⑥ puntuan batez besteko abiadura ezaguna denez, $Q = v_6 \cdot S_6 = 0,01944 \text{ m}^3/\text{s}$.

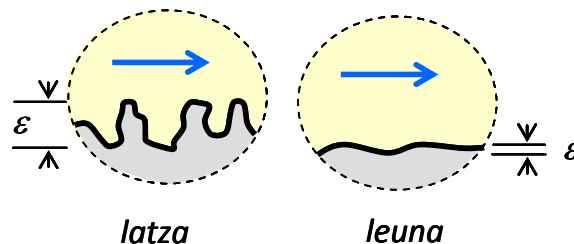
① eta ⑥ puntuak atmosferara zabalik daudenez, presio atmosferikoan daude ($101,3 \cdot 10^3 \text{ Pa}$). Bestalde, ① tangaren gainazalaren diametroa hodietako diametroen aldean oso handia denez, hango abiadura baztergarria da. Puntu guztietako energia mekaniko osoa 20,34 jariagai-metro da, presio, abiadura edo altuera erako banaketa desberdina izan arren.

6.8 MARRUSKADURAREN ONDORIOZ GERTATZEN DEN ENERGIA-GALERA

Hodi barruko jariagaien jarioan marruskaduraz galtzen den energiaren terminoa (h_f) agertzen da Bernouilli-ren ekuazioan. Hodi barruko jarioak marruskaduraz galtzen duen energia aldagai hauen funtzioa da:

$$h_f = \frac{\Delta P}{\rho g} = f(v, D, \mu, \rho, L, g, \varepsilon) \quad (6.26)$$

ε hodiaren zimurdura da, gainazalaren leuntasunaren adierazlea; alegia, $[\varepsilon] = L$ da. 6.10 irudian ikus daiteke hodi latzaren eta hodi leunaren arteko diferentzia.



6.10 irudia. Hodiaren zimurdura.

Dimentsio-analisiaren bidez, hodi zuzenarentzat adierazpen hau lortzen da:

$$h_f = \frac{\Delta P}{\rho g} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (6.27)$$

f Darcy-ren **marruskadura-zenbakia** da, dimentsiogabea. Oro har, f marruskadura-zenbakia Re zenbakiaren eta zimurdura erlatiboaren (ε/D) arabera da:

$$f = f\left(\frac{\varepsilon}{D}, \text{Re}\right) \quad (6.28)$$

Jario laminarrean ($Re < 2.100$), zimurdura erlatiboaren eragina baztergarria da, eta Re zenbakiaren alderantziz proportzionala da. Jario guztiz zurrumbilotsuan, ordea, Re zenbakiaren eragina arbuigarria da, eta ε/D zenbakiaren eragina besterik ez du. Tarteko jarioan, bi aldagaien eragina nabari da. Jarioa guztiz zurrumbilotsu bihurtzen den Re zenbakia aldakorra da ε/D -ren arabera, eta Moody-ren grafikoan (6.10 irudia) marra ez-jarraitu batez berezita azaltzen da. 6.2 taulan, zenbait materialen zimurduraren balioak adierazten dira.

$$\begin{aligned} \text{Jario laminarra (} Re < 2.100 \text{):} & \quad f = 64/Re \\ \text{Tarteko jarioa:} & \quad f = f(\varepsilon/D, Re) \\ \text{Jario guztiz zurrumbilotsua:} & \quad f = f(\varepsilon/D) \end{aligned}$$

Colebrook-en ekuazioaren bidez (6.29 ekuazioa), esperimenterki lortutako marruskadura-zenbakiaren balioak doitzen dira hainbat Re eta ε/D baliotarako, tarteko jariorako eta jario zurrumbilotsurako. Hau da $2100 < Re < 10^8$ tarterako Colebrook-en ekuazio baliagarria:

$$\left(\frac{1}{\sqrt{f}} \right) = -2 \cdot \log_{10} \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (6.29)$$

Moody-ren grafikoan (6.10 irudia), f -ren kalkulu grafikoa egin daiteke (ohartu gaitezen koordenatu logaritmikoak dauzkala).

Halaber, hainbat kasutarako interesgarria da Karman-en grafikoa erabiltzea (6.11 irudia); abszisaren Karman-en zenbakia ($Re\sqrt{f}$) adierazten da. Karman-en zenbakiaren propietate garrantzitsuena abiadurarekiko mendekotasunik eza da.

$$Re\sqrt{f} = \frac{D\rho}{\mu} \sqrt{2g \cdot h_f \cdot \left(\frac{D}{L} \right)} \quad (6.30)$$

Jariagaiaren batez besteko abiadura ezezaguna den baina marruskaduraz galtzen duen energia ezaguna denerako mugatzen da Karman-en zenbakiaren eta grafikoaren erabilera, eta abiadura kalkulatzeko erabiltzen da.

6.2 Taula. Hodien eraikuntza-material batzuen zimurdurak.

Materiala	ε (mm)
Zementua	0,3-3,0
Burdinurtua	0,26
Burdina galvanizatua	0,15
Altzairu komertziala	0,045
Beira	~0

6.8.1 Hodi ez-zirkularrak

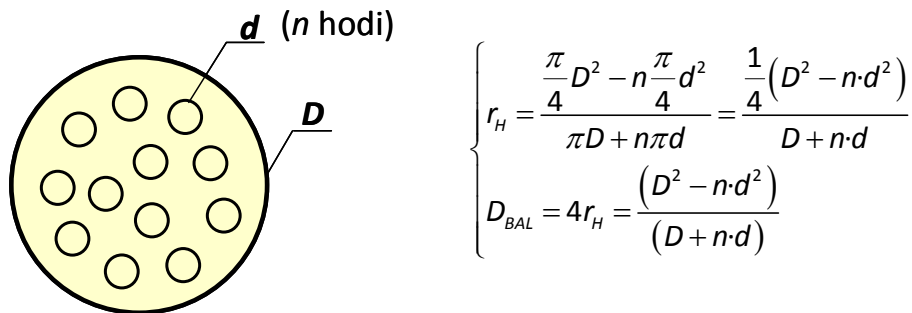
Hodiaren sekzioa zirkularra ez bada, **diametro baliokidea** erabiltzen da ε/D , Re , h_f eta ($Re\sqrt{f}$) aldagaiak kalkulatzeko. Diametro baliokidea erradio hidraulikoaren araberakoa da:

$$D_{BAL} = 4 \cdot r_H \quad (6.31)$$

Erradio hidraulikoa ondokoa izanik:

$$r_H = \frac{\text{bustitako sekzioa}}{\text{bustitako perimetroa}} \quad (6.32)$$

Adibidez, hodi/ingurune moduko bero-trukagailuetan D diametroko ingurunearen barruan n hoditxo osatutako hodi sorta badago, bakoitzaren kanpo-diametroa d izanik, ingurunetik doan jariagaiaren diametro baliokidea honela kalkulatzen da:



$$\begin{cases} r_H = \frac{\frac{\pi}{4}D^2 - n\frac{\pi}{4}d^2}{\pi D + n\pi d} = \frac{1}{4} \frac{(D^2 - n \cdot d^2)}{D + n \cdot d} \\ D_{BAL} = 4r_H = \frac{(D^2 - n \cdot d^2)}{(D + n \cdot d)} \end{cases}$$

6.8.2 Marruskaduraren ondorioz jario laminarrean gertatzen den energia-galera

Jario laminarrean $f = 64/Re$ denez, hodi zuzenaren h_f -ren adierazpen orokorrean ordezkatzeko bada:

$$\Delta P = \frac{32\mu \cdot v \cdot L}{D^2} \quad (6.33)$$

Ekuazio hori Hagen-Poiseuille-ren adierazpena da, eta, hodi barruko jario laminarrean, esan nahi du jariagaiak galtzen duen presioa batezbesteko abiadurarekiko proportzionala dela.

6.8.3 Marruskaduraren ondorioz jario guztiz zurrunbilotsuan gertatzen den energia-galera

Jarioa guztiz zurrunbilotsua denean $f = f(\varepsilon/D)$ denez eta Re zenbakiarekiko mendekotasunik ez duenez, hodi zuzena zeharkatzean, jariagaiak energia hau galtzen du marruskaduraz:

$$h_f = \frac{\Delta P}{\rho g} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (6.34)$$

Adierazpen horren arabera, jario guztiz zurrunbilotsua denean, jariagaiak galtzen duen presioa batezbesteko abiaduraren karratuarekiko proportzionala da.

6.9 BERNOULLI-REN EKUAZIOAREN APLIKAZIOA HODITERIEN DISEINUAN

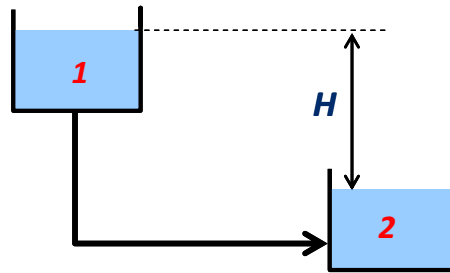
Hoditeria-sistemen diseinuan, hainbat egoera agertzen dira. Ondoren azalduko dira adibideen bidez.

6.9.1 Energia-galeraren kalkulua

Marruskaduraz galtzen den energia kalkulatzeko, emaria eta hodiaren ezaugarriak jakin behar dira.

Adibidea 6.3 adibidea

Tanga batek bere edukia beste tanga batera husten du 100 m-ko luzera baliokidea eta 0,05 m-ko barne-diametroko altzairuzko hodi baten bidez. Hodian 10 l/s-ko emaria neurtu bada, kalkula dezagun bi tangen mailen arteko diferentzia. Jariagaia ura da ($\rho = 1.000 \text{ kg/m}^3$ eta $\mu = 1 \text{ cP}$) eta altzairuaren zimurdura $\varepsilon = 4,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}$ da.

**Ebazpena**

Bernouilli-ren ekuazioa 1 eta 2 tangen gainazalen artean aplikatuko da. Bi gainazalak atmosferara zabalik egonik, bietan presio bera dago. Tangen azalera handia izanik, bietan energia zinetikoa baztergarria da. Erreferentzia gisa $Z_2 = 0$ hartuko da energia potentziala zenbatzeko orduan. Ponparik ez dagoenez, $W = 0$. Orduan, Bernouilli-ren ekuazioa hau da:

$$H = h_f$$

Ekuazio hori honela interpreta daiteke: jariagaiak 1 gainazalean duen energia erabilgarria (H) lekuz aldatzeko erabili da (marruskadura gainditzeko, alegia).

Hodiaren barne-diametroa 0,1 m bada, $S = 1,964 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ da.

$v = Q/S = 5,1 \text{ m/s}$; $Re = 0,05 \cdot 5,1 \cdot 10^3 / 10^{-3} = 2,55 \cdot 10^5$; $\varepsilon/D = 0,0009$

Bi balio horiekin Moody-ren grafikoan begiratuz, $f \approx 0,0205$ lortzen da.

$$h_f = \frac{\Delta P}{\rho g} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} = 0,025 \cdot \left(\frac{100}{0,05} \right) \cdot \frac{5,1^2}{2 \cdot 9,8} = 54,4 \text{ m denez, bi tangen mailen arteko diferentzia}$$

54,4 m da.

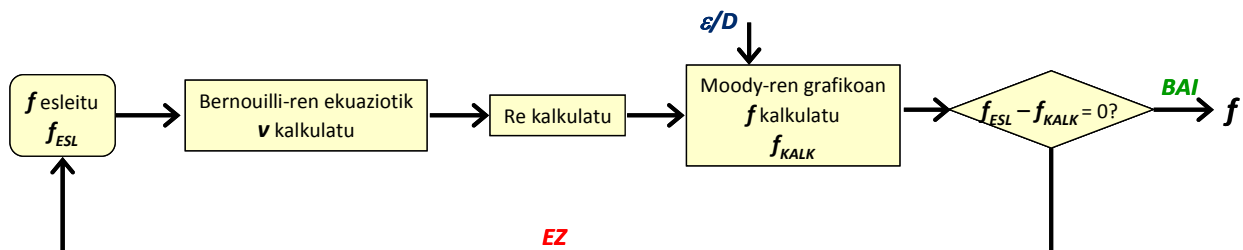
6.9.2 Hoditik doan emariaren kalkulua

Hodiaren diametroa jakina izanik, bi egoera agertzen dira: (a) marruskaduraz zenbat energia galtzen den jakina izatea, (b) marruskaduraz zenbat energia galtzen den ez jakitea.

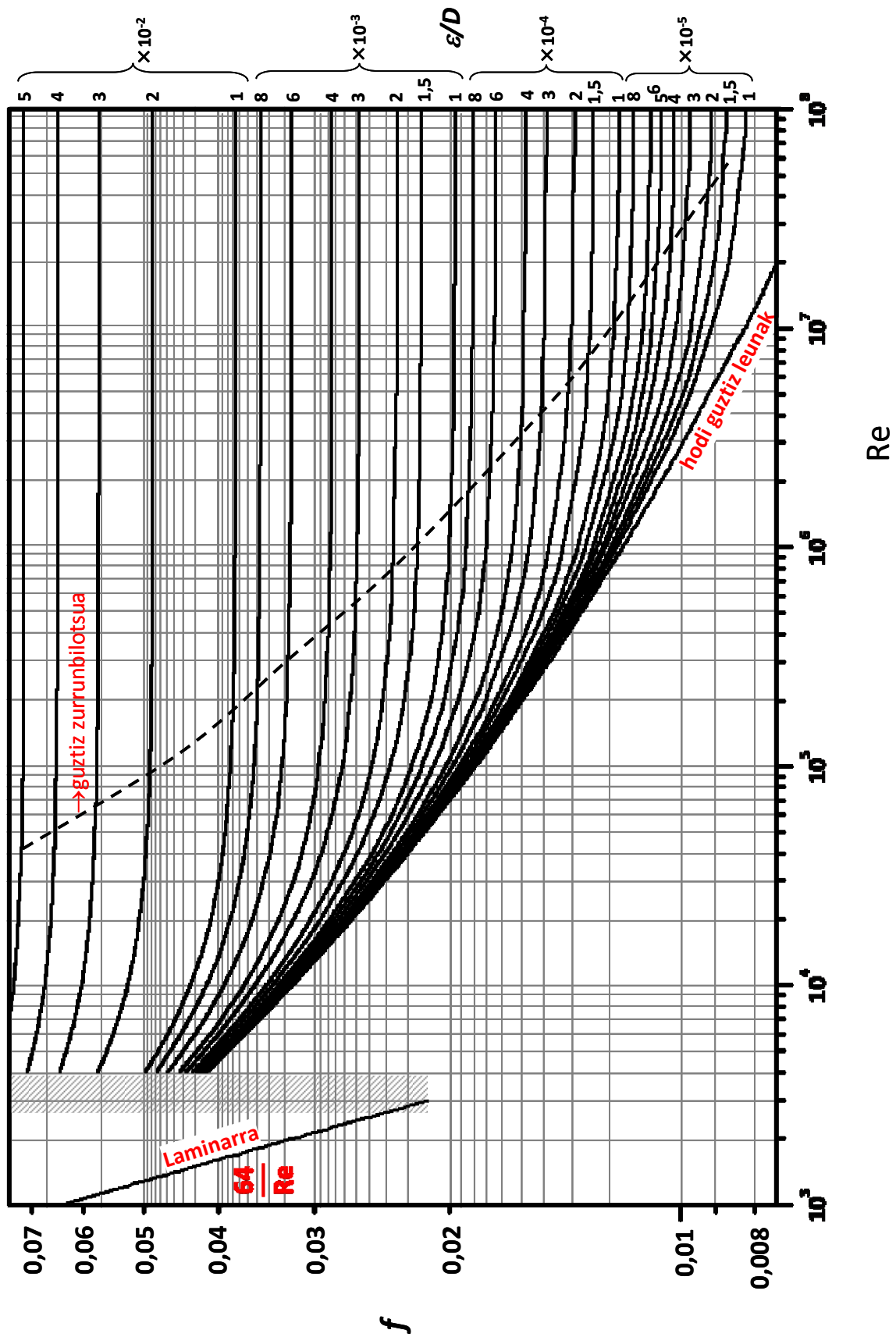
Lehenengo kasuan, Karman-en zenbakia Colebrook-en ekuazioan edo Karman-en grafikoan

erabil daiteke $\left(\frac{1}{\sqrt{f}} \right)$ kalkulatu ahal izateko.

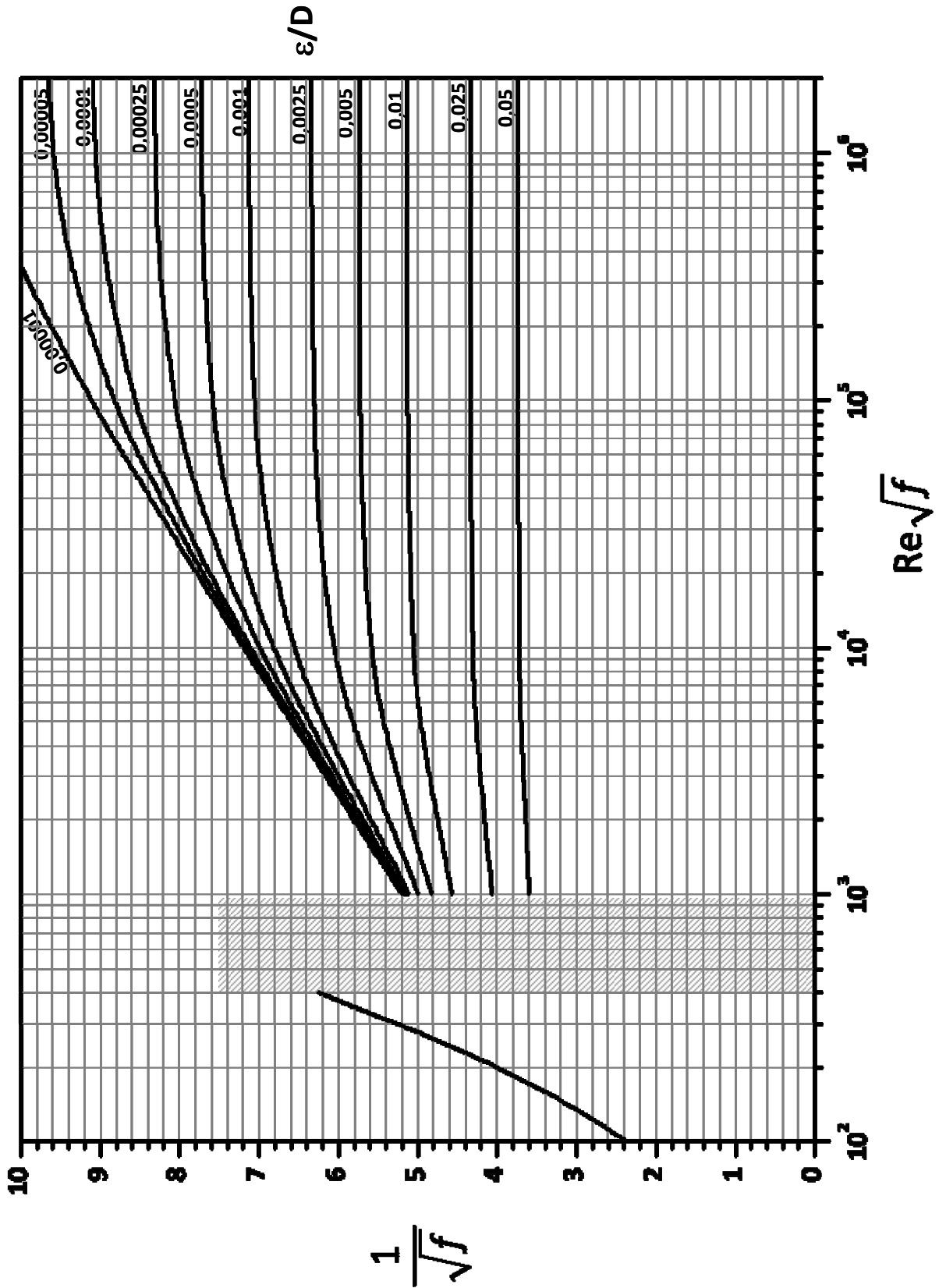
h_f jakina ez bada (edo Bernouilli-ren ekuazioarekin ezin badaiteke jakin), iterazio-kalkulua egin behar da, 6.11 irudian azaltzen den prozeduraz:



6.11 irudia. f kalkulatzeko iterazio-prozedura.



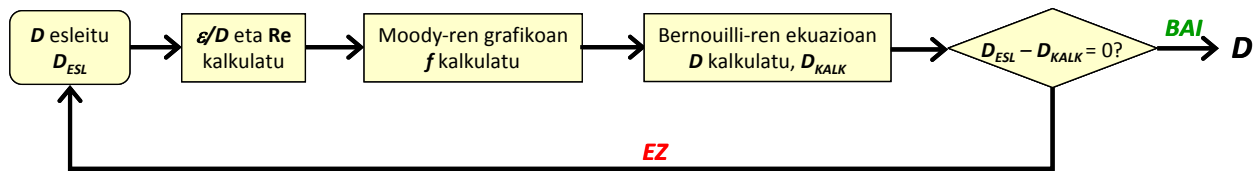
6.12 irudia. Moody-ren grafikoa.



6.13 irudia. Karman-en grafikoa.

6.9.3 Gutxienerako diametroaren kalkulua

Q emaria garraiatzeko hodi-sistema diseinatu behar denean, hodiaren gutxienerako diametroa kalkulatu behar da, marruskaduraz galtzen den energia onargarria izan dadin. 6.14 irudian agertzen den iterazio-kalkuluz ebatzen da.



6.14 irudia. Diametroaren iterazio-kalkulurako prozedura.

Adibidea 6.6 adibidea

100 m-ko luzerako hodi batetik 20 l/s ur garraiatu behar da. Hodia altzairuzkoa da ($\varepsilon = 4,5 \cdot 10^{-5}$ m), eta marruskaduraz galtzen duen energia onargarria 7 m ur da. Kalkula dezagun hodiaren gutxienerako diametroa.

Ebazpena

$$\varepsilon/D = 4,5 \cdot 10^{-5}/D;$$

$$v = Q \cdot 4 / (\pi D^2) = 0,0255/D^2;$$

$$\text{Re} = 2,55 \cdot 10^4 / D$$

Bernouilli-ren ekuazioan ordezkatzuz, ondoko adierazpena lortuko da:

$$h_f = 7 = f \cdot \frac{100}{D} \cdot \frac{\left(\frac{0,0255}{D^2}\right)^2}{2 \cdot 9,8}$$

Bertan D isolatuz:

$$D = 0,2163 \cdot f^{1/5}$$

Taula honetan agertzen da iterazioaren eboluzioa.

D_{ESL} (m)	ε/D ($\cdot 10^{-4}$)	v (m/s)	Re ($\cdot 10^6$)	f Moody	D_{KALK} (m)	% errorea
0,05	9	10,2	10,0	0,019	0,098	95,811
0,098	4,59	2,66	2,655	0,0155	0,094	-4,083
0,094	4,79	2,89	2,886	0,0155	0,094	-0,001

9,4 cm-ko diametroko hodia erabili beharko litzateke.

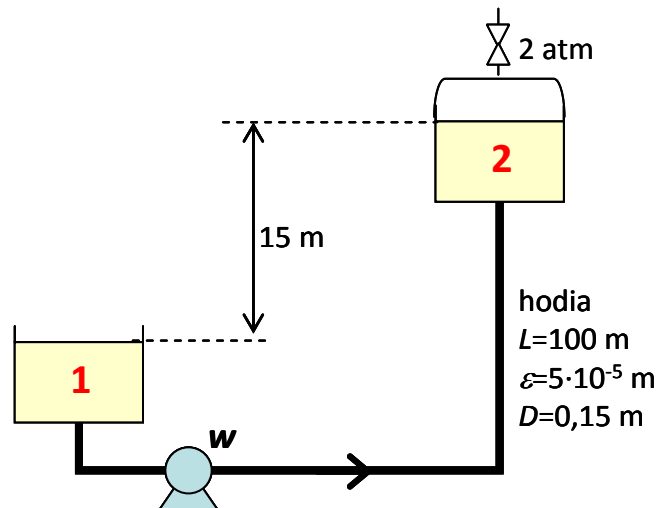
6.9.4 Ponparen potentziaren kalkulua

Jariagaiari energia emateko ponpak erabiltzen dira, jariagaiari presio-energia ematen baitzaio. Bernouilli-ren ekuazioan agertzen den W terminoak jariagaiak jasotzen duen energia adierazten du. Ponparen etekina % 100 baino baxuagoa denez, sisteman erabili beharreko ponparen potentziak Bernouilli-ren ekuazioan lortutakoa baino handiagoa izan beharko du.

$$Pot_b = \frac{Pot_r}{\eta} \quad (6.35)$$

Adibidea 6.7 adibidea

Tanga bateko edukia (ura, $\rho = 1.000 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 1\text{cP}$) bera baino 15 m gorago dagoen beste tanga batean husten da 100 m-ko luzera baliokidea eta 0,15 m-ko barne-diametroa dituen altzairuzko hodi baten bidez. 2 tanga 2 atmosferako presio absolutua dago. Hodian 50 l/s-ko emaria lortu nahi bada, kalkula dezagun ponpak zer potentzia izan behar duen, bere etekina % 75 bada.

**Ebazpena**

Hau da Bernouilli-ren ekuazioa 1 eta 2 tanga gainazalen artean ($\frac{P_2 - P_1}{\rho \cdot g} = 10,34 \text{ m}$ delako):

$$W = 25,34 + h_f$$

Ekuazioa honela interpreta daiteke: jariagaiak energia behar du 15 m igotzeko, presioa irabazteko (1 atm) eta lekuz aldatzeko.

Marruskaduraz galtzen duen energiaren kalkulua:

$$\varepsilon/D = 3,33 \cdot 10^{-4};$$

$$v = 2,83 \text{ m/s};$$

$$\text{Re} = 4,25 \cdot 10^5;$$

Moody-ren grafikoan $f \approx 0,016$ lortzen da.

$$h_f = 4,4 \text{ m}$$

$$\text{Ondorioz, } W = 29,74 \text{ m}$$

Ponpak behar duen potentzia teorikoa (6.24 ekuazioa):

$$\text{Pot}_T (\text{J/s}) = 0,05 (\text{m}^3/\text{s}) \cdot 29,74 (\text{m}) \cdot 10^3 (\text{kg/m}^3) \cdot 9,8 (\text{m/s}^2) = 14,57 \cdot 10^3 \text{ J/s}$$

Sisteman jarriko den ponparen gutxieneko potentzia (6.35 ekuazioa):

$$\text{Pot}_B (\text{J/s}) = 14,57 \cdot 10^3 / 0,75 = 19,43 \cdot 10^3 \text{ J/s}$$

potentziako ponpa erabili beharko litzateke.

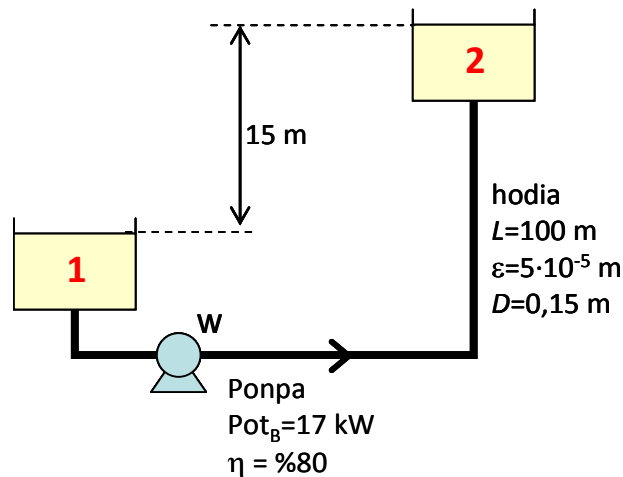
6.9.5 Potentzia jakineko ponparen funtzionamendua

Potentzia eta etekin jakin bateko ponpak eragin desberdina du sistema bakoitzean, beste termino mekanikoen arabera. Horregatik, interesgarria da sistema ezagun batean ponpa jakin bat kokatuta dagoenean ponpak jariagaiaren gain zer eragin duen jakitea. Horrelako kalkuluak iteraziozkoak dira, lanaren terminoan eta marruskaduraz galtzen den energiaren terminoan v eta f ez baitira ezagutzen.

Adibidea

6.8 adibidea

Tanga bateko edukia (ura, $\rho = 1.000 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 1\text{cP}$) bera baino 15 m gorago dagoen beste tanga batera lekuz aldatzeko, % 80ko etekinarekin diharduen 17 kW-eko potentziako ponpa erabili da. Kalkula dezagun lekuz aldatzen den uraren emaria.

**Ebazpena**

Bernouilli-ren ekuazioaren arabera, $W = 15 + h_f$.

Jariagaiak jaso behar duen energia mekanikoa ponparen benetako potentziaren eta etekinaren arabera da:

$$W = \frac{Pot_T}{Q \cdot \rho \cdot g} = \frac{Pot_B \cdot \eta}{Q \cdot \rho \cdot g}$$

Bernouilli-ren ekuazioan ordezkatzeko bada, adierazpen hau lortzen da:

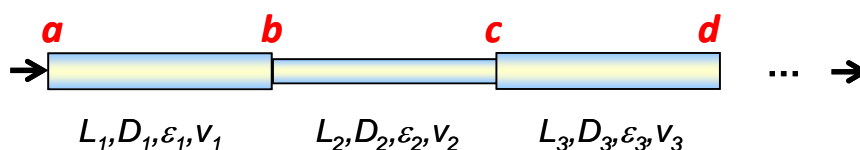
$$\frac{Pot_B \cdot \eta}{\rho \cdot g \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2} = 15 + f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

$$\frac{78,54}{v} = 15 + 34,01 \cdot f \cdot v^2$$

Ikusten den bezala, iterazio-kalkulua egiteko, 6.12 irudiko prozedura erabil daiteke. Taula honetan agertzen da iterazio-kalkuluaren eboluzioa.

f_{ESL}	v (m/s) Bernouilli	Re	f_{KALK}	% errorea
0,02	3,42	$5,13 \cdot 10^5$	0,0152	24
0,0152	3,61	$5,41 \cdot 10^5$	0,0155	-1,97
0,0155	3,60	$5,39 \cdot 10^5$	0,0155	~0

Hau da, ponpa honek 63,6 l/s emaria ponpatzen du sistema horretan, 3,60 m/s abiaduraz.

6.9.6 Seriean jarritako hodian barnean marruskaduraren ondorioz galtzen den energia

6.15 irudia. Seriean jarritako hoditeria-sistema.

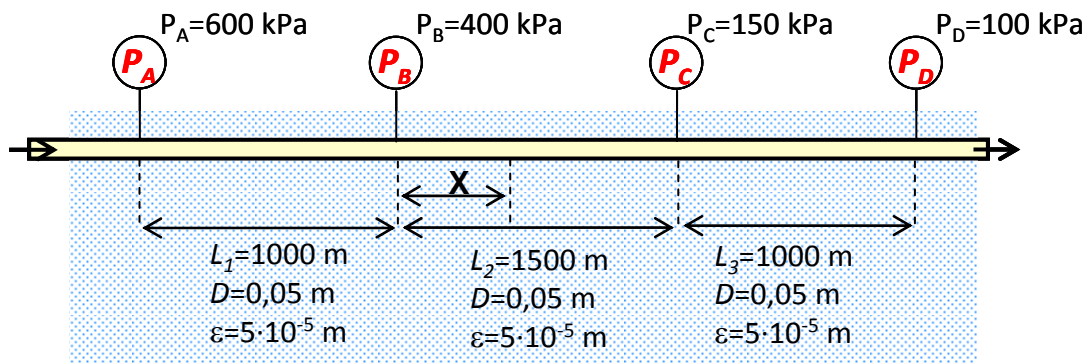
Egoera geldikorrean Q konstantea denez, $Q = v_i \cdot S_i$. N hodi sortaz osatutako sisteman:

$$h_{f,OSOA} = h_{f,1} + h_{f,2} + h_{f,3} + L = \sum_{i=1}^N h_{f,i} \quad (6.36)$$

Hodien diametroak desberdinak badira, jariagaiaren batezbesteko abiadura desberdina da bakoitzean. Hodi bakoitzak bere marruskadura-zenbakia izango du. Sistema osoan zehar jariagaiak marruskaduraz galtzen duen energia hodi zati bakoitzean galtzen duenaren batura da.

Adibidea 6.7 adibidea

Lurpean horizontalki doan altzairuzko hodi batek ura darama, eta ihes-korronterik daukan ikusteko, jariorearen presioa neurtzen da lau puntutan (A, B, C eta D). AB eta CD tarteetan ihes-korronterik ez dagoela ikusten da. Kalkula ditzagun (a) AB eta CD tarteetako emariak, (b) ihes-korronterik egotekotan, korronte horren emaria, (c) ihesa non dagoen eta hango presioa zein den.



Ebazpena

Bernouilli-ren ekuazioa lehen eta hirugarren tarteetan aplikatzen bada (jariagai m-tan):

$$\text{AB tarte: } 20,4 = h_{f,AB}$$

$$\text{CD tarte: } 5,1 = h_{f,AB}$$

Karman-en zenbakiak kalkulatu dira, Colebrook-en ekuaziotik $\left(\frac{1}{\sqrt{f}}\right)$ kalkulatzeko :

AB tarte:

$$(\varepsilon/D)_{AB} = 0,001$$

$$(\text{Re}\sqrt{f})_{AB} = 7,07 \cdot 10^3$$

$$\left(\frac{1}{\sqrt{f}}\right) = 6,408$$

$$f_{AB} = 0,02435$$

$$v_{AB} = 0,906 \text{ m/s eta } Q_{AB} = 1,78 \text{ l/s}$$

CD tarte:

$$(\varepsilon/D)_{CD} = 0,001$$

$$(\text{Re}\sqrt{f})_{CD} = 3,53 \cdot 10^3$$

$$\left(\frac{1}{\sqrt{f}}\right) = 6,016$$

$$f_{CD} = 0,02763$$

$$v_{AB} = 0,425 \text{ m/s eta } Q_{AB} = 0,84 \text{ l/s}$$

CD tarteko emaria AB tartekoa baino txikiagoa denez, BC tartean ihes-korrontea dago, 0,94 l/s-ko emarikoa.

BC tartea bitan banatuko da: lehenengo tartea X luzerakoa da, eta hortik emari osoa igarotzen da (1,78 l/s). Azken tartean, (1.500 – X) m luzerakoan, emaria 0,84 l/s da.

Bi azpitarteetan Bernouilli-ren ekuazioa ebatziz:

$$\text{BX azpitartea: } 40,8 - \left(\frac{P_X}{\rho g} \right) = h_{f,BX}$$

$$\text{XC azpitartea: } \left(\frac{P_X}{\rho g} \right) - 15,3 = h_{f,XC}$$

Bi ekuazioak batzen badira:

$$25,5 = hf_{BX} + hf_{XC}$$

$$h_{f,BX} = 0,02435 \left(\frac{X}{0,05} \right) \frac{0,906^2}{2 \cdot 9,8} = 0,02095 \cdot X$$

$$h_{f,XC} = 0,02763 \left(\frac{1500 - X}{0,05} \right) \frac{0,425^2}{2 \cdot 9,8} = 0,0050925 \cdot (1500 - X)$$

Ihes-korrontea B puntutik X= 1.168 m-ra dago.

6.9.7 Paraleloan kokatutako hodian barnean marruskaduraren ondorioz galtzen den energia

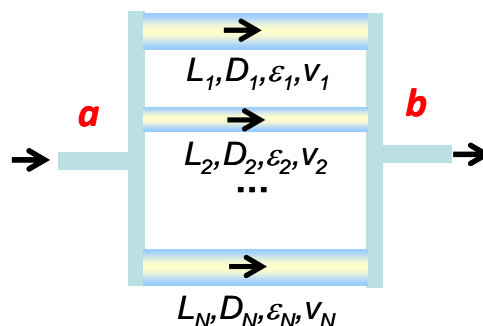
Hoditeria-sareen diseinuan ohikoa da paraleloan kokatutako hodiak izatea.

Paraleloan dauden hodian sisteman, marruskaduraz galtzen den energia osoa hodi bakoitzean galtzen denaren berdina da. Jariagaiaren emari osoa banatu egiten da adar guztietan karga-galera berdina izateko.

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_N \quad (6.37)$$

N hodi sortaz osatutako sisteman:

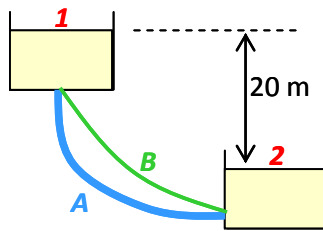
$$h_{f,OSOA} = h_{f,1} = h_{f,2} = L = h_{f,i} = L = h_{f,N} \quad (6.38)$$



6.16 irudia. Paraleloan kokatutako hoditeria-sarea.

Adibidea 6.8 adibidea

1 eta 2 tangen artean ura jariatzen da A eta B hodietatik ($\rho = 1.000 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 1 \text{ cP}$). Kalkula dezagun bi tangen artean lekuz aldatzen den uraren emaria.



A hodia:
 $L=30 \text{ m}$
 $D=0,075 \text{ m}$
 $\varepsilon=5 \cdot 10^{-5} \text{ m}$

B hodia:
 $L=20 \text{ m}$
 $D=0,05 \text{ m}$
 $\varepsilon=2,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}$

Ebazpena

1 eta 2 tangen arteko jario osoa bi hodietako jarioen batura da. $Q = Q_A + Q_B$. Bernouilli-ren ekuazioaren arabera (jariagai m-tan):

$$\text{A hodia: } 20 = h_{f,A}$$

$$\text{B hodia; } 20 = h_{f,B}$$

A hodia

$$\varepsilon/D = 6,67 \cdot 10^{-4};$$

$$\left(\text{Re} \sqrt{f} \right) = 7,42 \cdot 10^4; \text{ Colebrook-en ekuazioan ordezkatzuz:}$$

$$\left(\frac{1}{\sqrt{f}} \right) = 7,34.$$

$$v_A = 7,27 \text{ m/s};$$

$$Q_A = 32,1 \text{ l/s-ko emaria du.}$$

B hodia

$$\varepsilon/D = 5 \cdot 10^{-4};$$

$$\left(\text{Re} \sqrt{f} \right) = 4,95 \cdot 10^4; \text{ Colebrook-en ekuazioan ordezkatzuz:}$$

$$\left(\frac{1}{\sqrt{f}} \right) = 7,46.$$

$$v_B = 7,39 \text{ m/s};$$

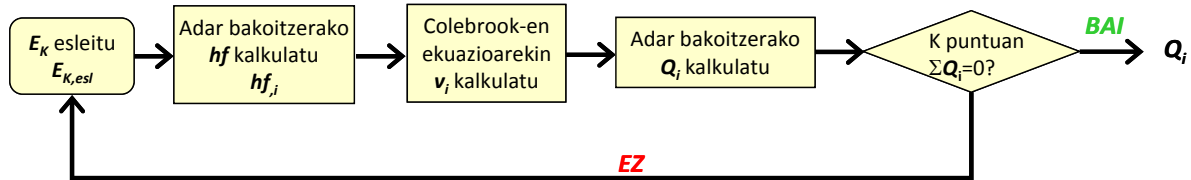
$$Q_B = 14,5 \text{ l/s-ko emaria du.}$$

1 eta 2 tangen artean lekuz aldatzen den uraren emari osoa $Q = 46,6 \text{ l/s}$ da.

6.9.8 Hodi-sareen kalkulua

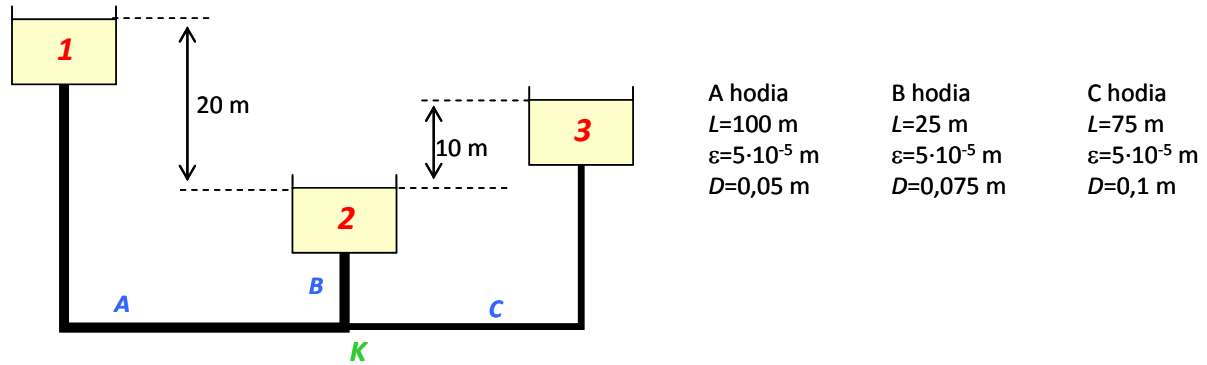
Hodi-sareen ebazpenean, komeni da adarkatze-puntuetako energia mekaniko osoa erabiltzea. Adarkatze-puntu bakoitzean (K), emarien baturak zero izan behar du. Iterazio-prozedura bati jarraitu behar zaio, 6.17 irudian azaltzen den moduan. K adarkatze-puntu bakoitzean baldintza hau bete behar da:

$$\sum Q_i = 0 \quad (6.39)$$



6.17 irudia. Hodi-sareak kalkulatzeko iterazio-prozedura.

Adibidea 6.9 adibidea



Hiru tangaz osatutako sistemaren barnean ura doa. Kalkula dezagun tanga bakoitzaren huste- edo betetze-emaria.

Ebazpena

Egoera geldikorrean K puntura sartzen diren emarien batura eta handik irteten direnena berdinak dira. Hiru tangetako gainazalak aukeratuko dira Bernouilli-ren ekuazioan erabiltzeko; bestalde, hiru hodiekin bat egiten duten K puntua ere aukeratuko da. Kalkula ditzagun 1, 2, 3 tangen gainazal eta K puntuko energia mekaniko erabilgarriak ($h_p + h_v + h_z$).

Energia potentzialerako 2 tangaren maila $Z_2 = 0$ dela hartuko da. Presio atmosferikoa ur-tan 10,34 m bada:

$$E_1 = 10,34 + 20 = 30,34 \text{ m}$$

$$E_2 = 10,34 \text{ m}$$

$$E_3 = 10,34 + 10 = 20,34 \text{ m}$$

Hiru tangetako energiak aztertuta, argi dago 1 tanga hustu egingo dela eta 2 tanga bete egingo dela (kontuan izan jariagaia energia mekaniko altueneko gunetik baxueneko gunera doala). 3 tangen zer gertatzen den jakiteko, K puntuko energia mekanikoarekin konparatu beharko da.

K puntuko energia mekanikoa 10,34-30,34 m tartean egongo da, egoera geldikorrean. Taula honetan agertzen da ebazpenaren eboluzioa (K puntura sartzen den emaria > 0 eta K-tik irteten den emaria < 0 direla jotzen da).

Sistema horretan, Bernouilli-ren ekuazioaren adierazpenak hauek dira:

$$h_{f,A} = E_1 - E_K$$

$$h_{f,B} = E_K - E_2$$

$$h_{f,C} = E_3 - E_K \text{ edo } E_K - E_3$$

E_K (m)	$h_{f,A}$ (m)	$h_{f,B}$ (m)	$h_{f,C}$ (m)	Q_A (l/s)	Q_B (l/s)	Q_C (l/s)	ΣQ_i (l/s)
22	8,34	11,66	1,66	-3,76	+26,76	+11,76	+34,75
12	18,34	1,66	8,34	-5,68	+9,78	-27,32	-23,22
15	15,34	4,66	5,34	-5,18	+16,71	-21,68	-10,15
20	10,34	9,66	0,34	-4,21	+24,30	-5,03	+15,06
17	13,34	6,66	3,34	-4,81	+20,08	-16,98	-1,71
17,2	13,14	6,86	3,14	-4,77	+20,39	-16,44	-0,82
17,3	13,04	6,96	3,04	-4,76	+20,54	-16,16	-0,37
17,4	12,94	7,06	2,94	-4,74	+20,70	-15,88	+0,08

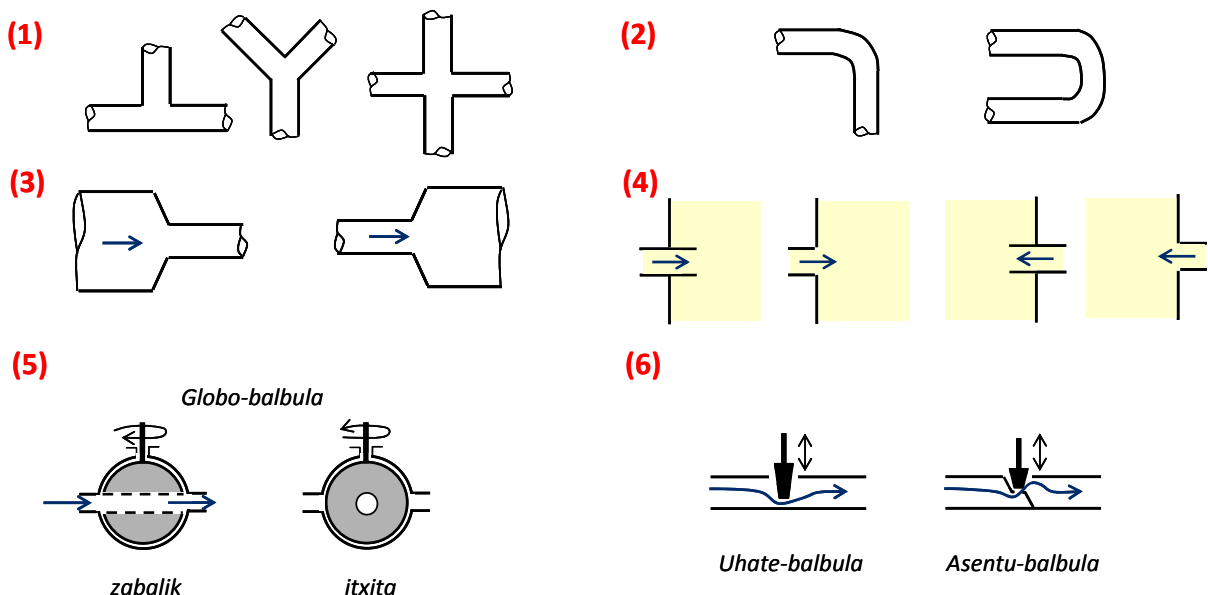
Sistema horretako emariak hauek dira: 1 tanga hustu egiten da 4,74 l/s-ko emariaz; 2 tanga bete egiten da 20,70 l/s emariaz eta 3 tanga hustu egiten da 15,88 l/s emariaz.

6.10 GALERA KOKATUAK

Orain arte azaldutakoak hodi zuzenerako balio du. Hala ere, hodi-sistema gehienetan, hodi zuzenaz gain, beste hainbat osagarri erabiltzen dira jarioa bideratu eta kontrolatzeko. Elementu horiek jariagaiari energia-galera eragiten diote, eta osagarria dagoen gune zehatzean gertatzen denez, **galera kokatu** deritze.

Hauek dira, besteak beste, osagarri aipagarrienak (6.18 irudian agertzen dira):

- (1) Hodi-zatiketak eta -adarkatzeak, emariak batzeko eta banatzeko.
- (2) Jarioaren norabidea aldatzekoak (ukondoak, bihurguneak...).
- (3) Zabalgunek eta estugunek.
- (4) Tangen eta hodien arteko loturak.
- (5) Jarioa eteteko balbulak.
- (6) Jarioa erregulatzeko balbulak.



6.18 irudia. Hoditeria-sistemetako hainbat osagarri. (1) Zatiketak eta adarkatzeak, (2) ukondoak eta bihurguneak, (3) zabalguneak eta estuguneak, (4) tangen eta hodien arteko loturak, (5) globo-balbula, (6) erregulazio-balbulak.

Osagarri horiek jariagaiari eragiten dioten karga-galera **galera-koefizienteen** bidez ematen da:

$$h_f = K \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (6.40)$$

K osagarriaren galera-koefizientea da. Osagarri bakoitzak bere galera-koefizientea du, eta Re-ren eta geometriaren mendekoa da.

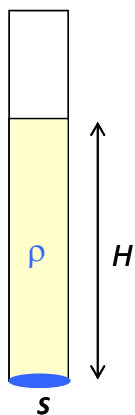
Hoditeria-sisteman hodi zuzenaz gain hainbat osagarri badago, orotara jarioak marruskaduraz galtzen duen energia eta seriean kokatutako hodi zatien eta osagarrien sistemak eragiten dion galera berdina dira:

$$h_{f,OROT} = h_{f,hodi-zuzena} + \sum_{i=1}^N h_{f,osagarria,i} \quad (6.40)$$

6.11 JARIAGAIAREN JARIOAREN PRESIO MOTAK

Zutikako hodi bat jariagai batez H altueraraino beteta badago, hodiaren azpialdeko azalerako presioa jariagaiaren dentsitatearen (ρ) eta altueraren (H) araberakoa da:

$$P = \rho \cdot g \cdot H \quad (6.41)$$



Adibidez, hodia 760 mm merkurioz betetzen bada, azpialdean 1 atm-ko presioa neurtuko da. Presio hori lortzeko, hodiak 10,34 m urez beteta egon beharko luke (uraren dentsitatea merkurioarena baino 13,6 aldiz txikiagoa baita).

Zero absolutuarekiko (hutsarekiko) neurtutako presioa **presio absolutua** da. Presio atmosferikoarekiko neurtutako presioari **presio manometriko** deritzen. Itsas mailako presio absolutua 1 atm da, baina presio manometrikoa 0 atm da. Jariagaien jarioan bi punturen arteko presio-diferentziarekin lan egin ohi da maiz. Orduan, bi presioak erreferentzia-puntu berarekiko neurtu behar dira.

Jariagai baten jarioan hiru presio mota neur daitezke:

- (1) *Presio estatikoa*: jarioarekiko paraleloa den gainazalean neurtzen den presioa. Termino hau Bernouilli-ren ekuazioan erabiltzen dena da ($P/\rho g$, jariagai m-tan emana).
- (2) *Talka-presioa*: jarioarekiko perpendikularra den gainazalean neurtzen den presioa. Termino hau Bernouilli-ren ekuazioko $(P/\rho g) + (v^2/2g\alpha)$ terminoa da, jariagai m-tan emana.
- (3) *Presio zinetikoa*: talka-presioaren eta presio estatikoaren arteko diferentzia da; Bernouilli-ren ekuazioko $(v^2/2g\alpha)$ terminoa da, jariagai m-tan adierazia.

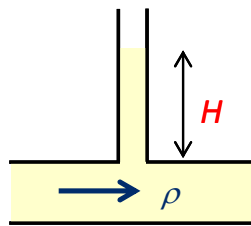
6.17 irudian azaltzen da manometro diferentzialen bidez hiru presioak neurtzeko modua.

6.12 PRESIO-NEURGAILUAK

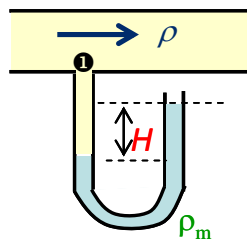
Jariagaiaren presioa jakitean, jarioari buruzko informazio asko jakiten da. Adibidez, iheskorronterik dagoen azter daiteke, hoditik doan emaria kalkula daiteke eta ponparen funtzionamendua egokia den azter daiteke.

Presioa neurtzeko gailuak **manometroak** dira. ρ_m dentsitateko likido manometrikoz betetako U-itxurako hodiak dira; adar bat presioa neurtu nahi den hodiko puntura lotzen da, eta beste muturra atmosferara zabalik uzten edo hodiko beste puntu batera lotzen da. Lehenengo kasuan, hodiko puntuko presio manometrikoa neurtzen da, eta, azken kasuan, bi puntuen arteko presio-diferentzia. Azken horiei manometro diferentzialak deritze. Hoditik doan jariagaiarekin nahasezina eta hura baino astunagoa izan behar du likido manometrikoak. Zenbat eta berdinagoak izan ρ_m eta ρ , orduan eta zehatzagoa da presio-diferentzia berdinetarako H -ren irakurketa.

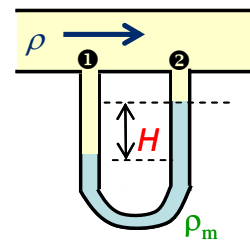
Hodi piezometrikoak ez du likido manometrikorik erabiltzen; hodi irekian gora hodi nagusitik doan jariagaia bera erabiltzen da.



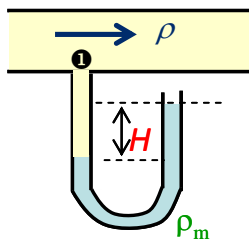
Hodi piezometrikoa
 $P = \rho \cdot g \cdot H$



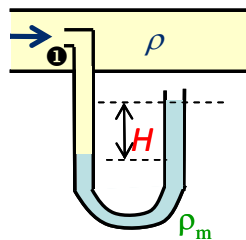
Manometroa
 $P - P_{atm} = (\rho_m - \rho) \cdot g \cdot H$



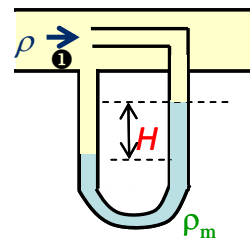
Manometro diferentziala
 $P_1 - P_2 = (\rho_m - \rho) \cdot g \cdot H$



①-en presio estatikoa



①-en talka-presioa



①-en talka-presioa
②-ren presio estatikoa

6.19 irudia. Presio-neurgailuak eta presio mota desberdinak neurtzeko prozedura.

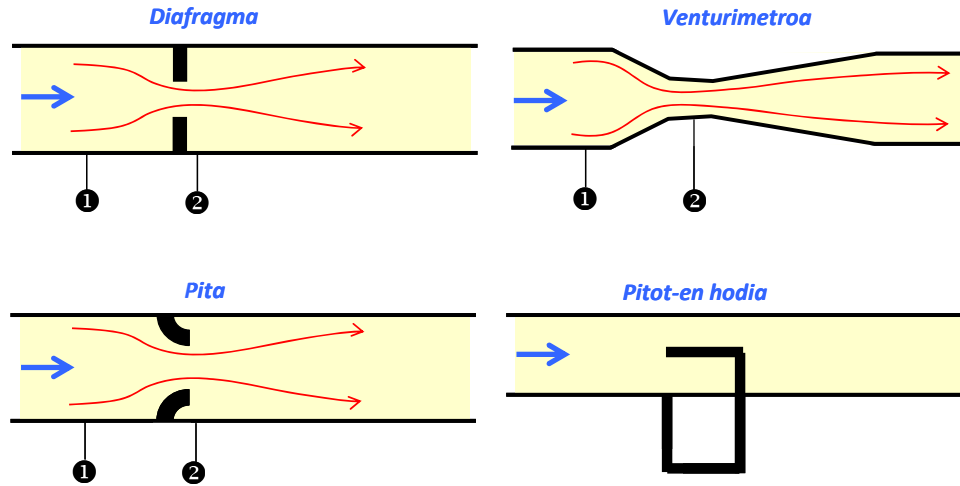
6.13 EMARIAREN NEURKETA

Ezinbestekoa da jarioaren emari masikoa edo bolumetrikoa jakitea, prozesua kontrolpean edukitzeko. Jarioaren emaria neurtzeko gailuei **emari-neurgailu** deritze. Ekipo horiek emaria zuzenean edo zeharka neurtzen dute.

Emaria zuzenean neurtzen duten neurgailuen adibide bat **emari-neurgailu birakorrak** dira. Ingurune baten barruan biraka dabilen gailua zeharkatzen du jariagaiak. Jariagaiaren emaria biragailuak ematen dituen biren arabera da. Ekipo hauek kalibratu egin behar dira, bira kopurua eta emaria erlazionatu ahal izateko.

Beste emari-neurgailu batzuk, ordea, emaria zeharka neurtzen dute: jariagaiari presio-diferentzia sorrarazten zaio, eta presio-diferentzia neurtzen dute, ondoren emariarekin erlazionatu ahal izateko. Horrelako neurgailuak dira, besteak beste, **venturimetroa**, **pita**, **diafragma** eta **Pitot-en hodia** (ikusi 6.20 irudia).

Lehenengo hiruretan, jarjarioa igarotzeko azalera estutu egiten da (estutze-maila $\beta = \frac{D_2}{D_1}$ da), eta manometro diferentzialarekin 1 eta 2 puntuetako presio-diferentzia neurtzen da. 1 puntuan jariagaiak hodi osoa betetzen du, eta 2 puntuan lepo estutik pasatzen da. 2 puntua estugunetik ahalik eta hurbilen egon behar da neurketa egokia izan dadin.



6.20 irudia. Presio-diferentzian oinarritutako emari-neurgailuak.

Bernouilli-ren ekuazioaren arabera, marruskaduraz galtzen den energia baztertzen bada, diametroa estutzean, jariagaiak energia zinetikoa irabazten du presio-energia murriztearen truke. Hala, gune estutik doan emaria ekuazio honekin zenbatetsi daiteke:

$$Q = C_D \cdot A_2 \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_{1-2} \cdot 2 \cdot \alpha}{\rho \cdot (1 - \beta^4)}} \quad (6.42)$$

C_D neurgailuaren zuzenketa-faktorea da. Egindako hurbilketak zuzentzen ditu dimentsio gabeko faktore horrek, eta Re_2 , β eta gailuaren araberakoa da. Hiru gailuetatik venturimetraok lortzen ditu emaitza onenak; izan ere, lepo estuko azalera (2 gunekoa, alegia) jakina da, eta pitatan eta diafragman, berriz, hurbilketa da. Diafragmetan $Re > 10^5$ denean, $C_D = 0,605$ era hurbiltzen da; pitetan $C_D = 0,98$ ingurukoa da, eta venturimetrotan $C_D = 0,99$ ingurukoa da.

Pitot-en hodiarekin talka-presioa eta presio estatikoa neurtzen dira, eta bien diferentziak presio zinetikoa ematen du. Talka-presioa neurtzen duen manometroaren adarra mugikorra da, eta hodiko zenbait erradiotan abiadura neurtzen ditu ($v(r)$ abiadura-profilarekin, batez besteko abiadura (v) eta emaria lor daiteke).

$$v(r) = \sqrt{\frac{\Delta P \cdot 2 \cdot \alpha}{\rho}} \quad (6.43)$$

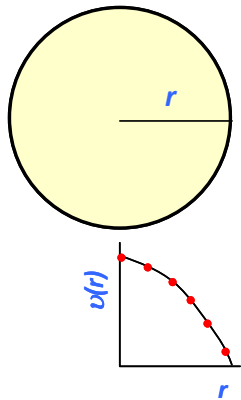
Adibidea 6.10 adibidea

10 cm-ko barne-diametroa duen hoditik $\rho = 850 \text{ kg/m}^3$ dentsitateko eta $\mu = 1,2 \text{ cP}$ likatasuneko jariagaia doa. Pitot-en hodia erabiliz, zenbait erradiotan abiadura puntual hauek neurtu dira:

r (cm)	0	1	2	3	4	4,75
$v(r)$ (m/s)	2	1,7	1,4	1	0,5	0,1

Kalkula ezazu hoditik doan jariagaiaren batez besteko abiadura eta emari bolumetrikoa.

Ebazpena



$$dQ = v(r) \cdot dS = v(r) \cdot 2\pi r \cdot dr$$

$$Q = \int_{r=0}^{r=5\text{cm}} v(r) \cdot 2\pi r \cdot dr$$

$$v = \frac{\int_{r=0}^{r=5\text{cm}} v(r) \cdot 2\pi r \cdot dr}{S}$$

Emaria kalkulatzeko, irudian azaltzen den integrala ebatzi behar da. Lauki zuzenen hurbilketazko metodoa erabiliz, ebazpenaren eboluzioa taula honetan agertzen da:

r (cm)	$v(r)$ (m/s)	$v(r) \cdot 2\pi r$ (m ² /s)	Δr (m)	$(\overline{v(r) \cdot 2\pi r})$ (m ² /s)	$\Delta r \cdot (\overline{v(r) \cdot 2\pi r})$ m ³ /s
0	2	0	-	-	-
1	1,7	0,107	0,01	0,053	$5,341 \cdot 10^{-4}$
2	1,4	0,176	0,01	0,141	$1,414 \cdot 10^{-3}$
3	1	0,188	0,01	0,182	$1,822 \cdot 10^{-3}$
4	0,5	0,126	0,01	0,157	$1,571 \cdot 10^{-3}$
4,75	0,1	0,030	0,0075	0,078	$5,832 \cdot 10^{-3}$
5	0	0	0,0025	0,015	$3,731 \cdot 10^{-5}$

$Q \approx 5,961 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ -ko emaria kalkulatu da, eta batez besteko abiadura, $v = 0,76 \text{ m/s}$.

6.14 JARIAGAIA PONPATZEKO GAILUAK

Jariagaiak lekuz aldatzeko erabiltzen den hodi-sisteman (hodi zuzena eta osagarri anitzen batura) energia galtzen da marruskaduraz. Hori dela eta, geroz eta energia erabilgarri gutxiago geratzen zaio jariagaiari. Modu berean, xurgaketa-puntua baino energia mekaniko altuagoko gunera aldatu nahi bada (presio handiagoko gunera, gorago dagoen gunera edo energia zinetiko handiagoko gunera), kanpoaldetik energia mekanikoa eman behar zaio.

Jariagai likidoari energia mekanikoa emateko **ponpak** erabiltzen dira. Jariagaia gasa denean, haizagailu eta konpresoreak erabiltzen dira. Atal honetan, jariagai likidoak ponpatzeko gailuak azalduko dira bakarrik.

Likidoak ponpatzeko ekipoak bi talde nagusitan banatu daitezke:

(a) **Desplazamendu positibokoak.**

Jariagaia ingurune baten barruan dagoen eremuan itxita dago, eta pieza higikor baten mugimenduak eremu horretatik hodira desplazatzen du. Jariagaiari zuzenean presio-energia ematen dio. Ponpa horiek irteera-puntuan presio altuak emateko gai diren arren, emari baxuak ponpatzeko erabiltzen dira.

Pieza higikorraren funtzionamenduaren arabera bi motatakoak izan daitezke:

(a.1) **Atzera-aurrerako higidurako ponpak.**

Zilindro baten barnean higitzen den pistoi baten bidez jariagaia bultzatzen duen ponpa da. Presio altuak emateko gai da, baina solidoak esekita dauzkaten likidoak

ezin ditu ponpatu. Horrelakoak dira pistoi-ponpa eta mintz-ponpa (6.18 irudia), eta atzeraezeko balbulak erabili behar dira.

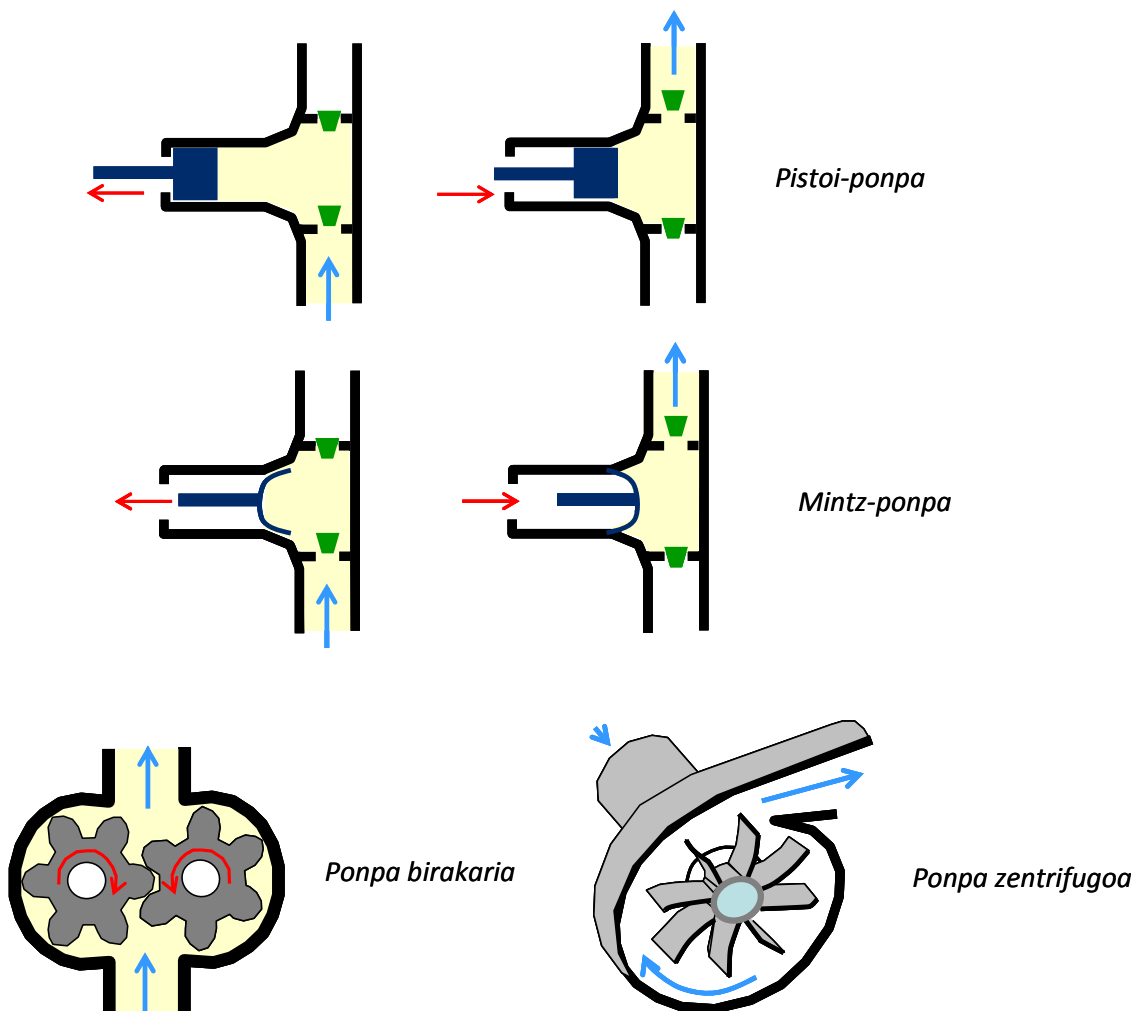
(a.2) *Ponpa birakorrak.*

Ingurune baten barnean, beren inguruan ia tarterik utzi gabe, elkarrekin engranatzan diren torloju birakariak hortzen artean garraiatzen dute likidoa (6.18 irudia).

(b) *Ponpa zentrifugoak.*

Industria kimikoan erabilera zabalena duten ponpak dira. Emari bolumetrikoki handiak mugitzeko erabiltzen dira, baina ezin dute lan egin oso presio altuetan. Jariagai likatsuekin nekez lan egiten dute, baina solidoen esekidurak ponpatzeko aproposak dira.

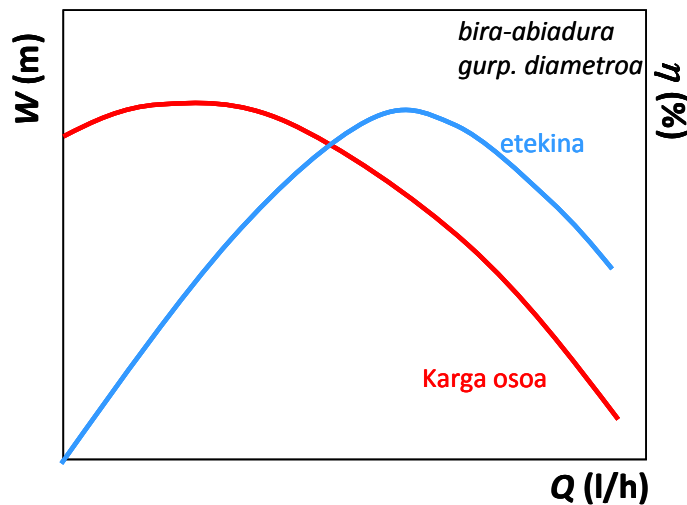
Motor elektrikoak ingurune barruan dagoen gurpila abiadura handiz birarazten du (4.000 bira/min, gutxi gorabehera), eta jariagaia gurpilaren ardatzetik elikatzen da. Barruan, gurpilak energia zinetikoa ematen dio jariagaiari (abiadura angeluarra); irteeran, hodirako konexioa egitean, jariagaiaren energia zinetikoa presio-energia bihurtzen da. Gurpila pala kurbatuz osatuta dago (6.21 irudia). Ponpa zentrifugoaren lana eta etekina gurpilen tamainarekin eta bira-abiadurarekin aldatzen da.



6.21 irudia. Ponpa motak.

Ponpa zentrifugoak jariagaiari eman diezaiokkeen presioa (karga, W) gutxitu egiten da ponpatzen duen emariarekin (Q). Halaber, ponpaketaren etekina emariaren araberakoa da, eta maximo batetik igarotzen da. Ponpa zentrifugoaren *kurba ezaugarriak* jariagaiari

ematen dion karga (W) vs ponpatze-emaria (Q) eta etekina (η) vs Q adierazpenak dira, ponpa bakoitzerako eta gurpilen diametro eta bira-abiadura finko baterako emanak. 6.22 irudian, ponpa zentrifugo baten kurba ezaugarrien adibidea agertzen da.



6.22 irudia. Ponpa zentrifugoaren kurba ezaugarri tipikoak.

Ponpak eman dezakeen energia mekaniko osoa ez zaio, ordea, jariagaiari heltzen, energia mekanikoaren zenbait galera baitaude. Galera garrantzitsuenak jariagaiaren eta ingurunearen arteko marruskadura eta gurpilaren eta ingurunearen arteko marruskadura dira. Galera horiek guztiak kontuan hartuta, ponpak jariagaiari eman diezaiokkeen energia osoa (W_B) eta jariagaiari benetan heltzen zaion energia (W_T), ponparen etekin osoak (η) lotzen ditu, 6.25 ekuazioaren antzera:

$$\eta(\%) = 100 \cdot \frac{W_T}{W_B} \quad (6.44)$$

6.20 irudiko kurba ezaugarria aztertzen bada, ohartzen gara ponpatu nahi den emaria handiagoa den heinean, jariagaiari ematen dion karga (W) txikiagoa dela emari txikietan ezik. Halaber, jariagaiari energia maximoa eman diezaion, emari jakin bat ponpatu behar du, baina etekina maximoa izatetik urrun gelditzen da.

6.14.1 Ponpa zentrifugoaren funtzionamendurako baldintzak: NPSH

Ponpara sartzen den jariagaiak abiadura angeluar izugarria hartzen du gurpil birakariak bultzatuta, eta, ondorioz, presio estatikoa gutxitzen du. Ponparen sarrerako hodiko presioarekin alderatuz presioa asko txikitu bada edo laneko tenperatura oso altua bada, ponpatzen ari den likidoa lurrundu egin daiteke (presio estatikoa likidoaren lurrun-presioa baino txikiagoa denean) eta, hala, bolumena handitu. Sortzen diren lurrun-burbuilak gurpilaren irteera-eremura pasatzean, presio handiagoko gunera pasatzen dira (abiadura angeluarra presio-energia bihurtzen baita) eta kondentsatu egiten dira. Fenomeno horri **kabitazio** deritza. Ponparen egitura mekanikoan kalte handiak sortzen ditu, eta ponpen bizitza laburtzen du; beraz, saihestu beharreko fenomeno da.

Ponparen sarrerako presioa ponpatzen ari den likidoaren lurrun-presioa baino altuagoa bada (lanerako tenperaturan neurtua, noski), kabitazioa saihestu daiteke. Kabitazioa saihesteko gainpresio horri ponparen **Xurgaketarako Karga Garbia** edo **NPSH** (ingelesezko **Net Positive Suction Head**-en akronimoa) deritza, eta ponparen sarrera-eremuko talka-presioan eta

lanerako tenperaturan likidoak duen lurrun-presioaren arteko diferentzia gisa definitzen da (jariagai m-tan adieraziak):

$$NPSH = \frac{P_s}{\rho g} + \frac{v_s^2}{2g\alpha} - \frac{P^0}{\rho g} \quad (6.45)$$

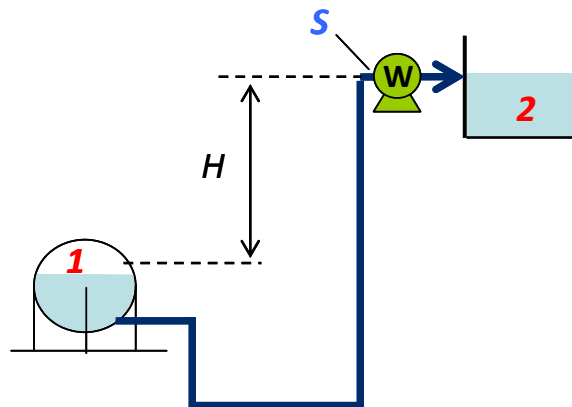
s azpiindizeak ponparen sarrera-puntua adierazten du, eta P^0 likidoaren lurrun-presioa da laneko tenperaturan.

$NPSH > 0$ bada, kabitazioa saihesten da, eta zerotik gertuago dagoen heinean, kabitazioa gertatzeko arriskua handitu egiten da. $NPSH = 0$ den unean, kabitazioa hasten da.

6.23 irudiko adibidearen $NPSH$ ren adierazpena sistemako aldagaien funtzioan adierazten bada:

$$NPSH = \frac{P_1 - P^0}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g\alpha} - H - h_f \quad (6.46)$$

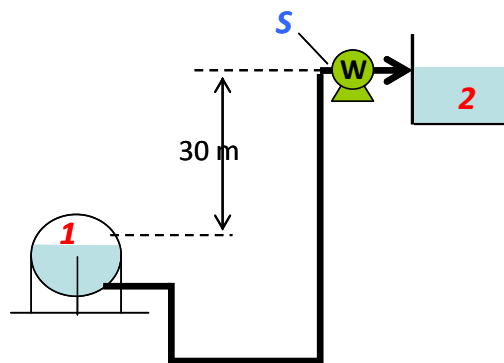
Kabitazioa saihesteko egokia izango litzateke xurgaketa-eremuko presioa (P_1) eta abiadura (v_1) handitzea, laneko tenperatura txikitzea (lurrun-presioa txikitzeko), xurgaketa-eremua baino beherago jartzea ponpa, eta bidean hodi leunagoak erabiltzea marruskaduraz energia gutxiago galtzeko.



6.23 irudia. Ponpa zentrifugoaren kokapena.

Adibidea 6.11 adibidea

28,3 m³/h ur lekualdatzen da 2 atm-ko presio manometrikoan dagoen 1 tangatik atmosferara zabalik dagoen 2 tangara, 100 m-ko luzera baliokideko eta 7,5 cm-ko barne-diametroko hodi baten bidez (hodiaren zimurdura $\varepsilon = 5 \cdot 10^{-5}$ m da). Kalkula ditzagun (a) erabili beharreko ponpa zentrifugoaren potentzia (etekina % 75 bada), (b) ponparen kokapen horretan kabitaziorik gertatzen den, eta (c) hala bada, ponpa gehienez zer altueratan jar daitekeen.



Datuak: laneko tenperaturan, uraren lurrun-presioa $P^0 = 25 \text{ mmHg}$ da. $\rho = 1.000 \text{ kg/m}^3$ eta $\mu = 1 \text{ cP}$ har daitezke.

Ebazpena

(a) 1 eta 2 tangen gainazalen arteko Bernouilli-ren ekuazioak hau dio:

$$20,68 + W = 30 + h_f$$

Jariagaiak lekuz aldatzean marruskaduraz galtzen den energia kalkulatu da:

$v = 1,78 \text{ m/s}$; $Re = 1,33 \cdot 10^5$; $\varepsilon/D = 6,7 \cdot 10^{-4}$. Moody-ren grafikoan $f \approx 0,0205$ lortzen da.

Beraz, $h_f = 4,4 \text{ m}$.

$W = 13,72 \text{ m}$; $Pot_T = 1,08 \cdot 10^3 \text{ J/s}$; $Pot_B = 1,44 \text{ kJ/s}$

(b) Sistema honetako *NPSH* balioa kalkulatu da:

$P^0 = 25 \text{ mmHg} = 0,34 \text{ ur-m}$

v_1 baztergarria da, 1 puntu gisa tangaren gainazala aukeratu delako.

$$NPSH = 20,68 - 0,34 - 30 - 4,4 = -14,06 \text{ m} < 0$$

Ponpan kabitazioa gertatuko da.

(c) Kabitazioa hasi dadin *NPSH* = bada: $0 = NPSH = 20,68 - 0,34 - H^* = 20,34 \text{ m}$

1 tangaren maila baino 20,34 m gorago jar daiteke gehienez ponparen sarrera. $h_f = 0$ hartu da, kabitazioa hastean eten egiten baita jariora.