



ZIENTZIA ETA TEKNOLOGIA FAKULTATEA

INGENIARITZA KIMIKOA SAILA

**OHANTZEA EGONKORTZEKO GAILUZ
HORNITURIKO ITURRI OHANTZE
KONIKOEN HIDRODINAMIKA**

DOKTOREGO TESIA

Idoia Estiati Larrea

2017ko Urtarrila



ZIENTZIA ETA TEKNOLOGIA FAKULTATEA

INGENIARITZA KIMIKOA SAILA

OHANTZEA EGONKORTZEKO GAILUZ HORNITURIKO ITURRI OHANTZE KONIKOEN HIDRODINAMIKA

Ingeniaritza Kimikoan Doktore izateko

Idoia Estiati Larrea-k

aurkeztu duen

TXOSTENA

Leioan, 2017ko Urtarrila

Eskerrak

Lerro hauetan tesi hau posible egin duten guztiei eskertu nahi diet.

Lehenik, tesi honen zuzendariei diren Martin Olazar eta Haritz Alzibar doktoreak eskertu nahi nituzke lan hau egiteko aukera eman didatelako eta edozein zalantzaren aurrean laguntzeko prest izan ditudalako. Saileko irakasleak eta kanpotik etorritakoak ere eskertu nahi nituzke, bereziki Fabio Freire, behar izan dudan momentuetan eman didaten laguntzagatik.

Bigarrenik, nire laborategian karrera amaierako proiektua egin dutenak ere gogoan ditut euren lana tesi honen parte izan baita.

Azkenik, laborategiko kideak ezin ditu ahaztu, euren aholkuengatik eta nire zalantzak argitzeagatik. Hauei bereziki eman nahi diet eskerrak, nire laborategikoei laborategira heldu nintzenean izan nuen harreragatik eta beti nire arazoak entzuteko prest egoteagatik.

Tesi hau Eusko Jaurlaritzaren Hezkuntza, Unibertsitateak eta Ikerkuntza Saileko (BFI-2012-234) bekari esker egin ahal izan da.

AURKIBIDEA

HELBURUAK	1
1. SARRERA	5
1.1. ITURRI OHANTZEAK	5
1.1.1. Iturri ohantzearen teknologiaren garapena	5
1.1.2. Iturri ohantzearen ezaugarriak	6
1.1.3. Iturri ohantzearen abantailak eta mugak	8
1.1.4. Iturri ohantzearen aplikazioak	11
1.1.5. Iturri ohantze konikoa	14
1.1.5.1. Iturri ohantze konikoaren fluidodinamika	16
1.2. ITURRI OHANTZEAREN ALDAERAK	19
1.2.1. Erdiko hodidun iturri ohantzea	20
1.2.2. Iturri ohantze fluidizatua	26
1.2.3. Erdiko hodia duen alboko irteeradun iturri ohantzea	30
2. ESPERIMENTALA	37
2.1. EKIPOEN DESKRIBAPENA	37
2.1.1. Emari ertainetarako ekipoa	37
2.1.1.1. Emari ertainetarako ekipoen kontaktoreak, erdiko hodiak eta iturri bilgailuak	40
2.1.1.2. Emari ertainetarako ekipoen neurtutako aldagaiak	45
2.1.2. Emari handietarako ekipoa berria	52
2.1.2.1. Emari handietarako ekipoen kontaktoreak, erdiko hodiak eta iturri bilgailuak	54
2.1.2.2. Emari handietarako ekipoen neurtutako aldagaiak	57
2.2. MATERIALEN KARAKTERIZAZIOA	58

3. SOLIDOAREN ZIKLO DENBORAREN AZTERKETA	65
3.1. SOLIDOAREN ZIKLO DENBORAK	65
3.2. SOLIDOAREN ZIKLO DENBORAREN AZTERKETA HIDRODINAMIKOA	72
3.2.1. Partikula trazatuaren jarraipen metodoa: prozedura esperimentala	72
3.2.2. Partikula trazatuaren bidezko ziklo denboren emaitzak	78
3.2.2.1. Faktoreen eraginaren azterketa estatistikoa	79
3.2.2.2. Faktoreen eraginaren azterketa kuantitatiboa	83
3.2.2.3. Solidoaren ziklo denboren sistemen arteko konparazioa	92
3.2.2.4. Ziklo denbora eta zirkulazio emariaren tartekak	95
3.2.3. Ziklo denborak neurtzeko partikulak iturrian biltzeko metodoa	100
3.2.3.1. Partikulak iturrian biltzeko metodoaren prozedura esperimentala	100
3.2.3.2. Partikulak iturrian biltzeko metodoaren balioztapena	103
3.2.3.3. Partikulak iturrian biltzeko metodoaren emaitzak	108
3.3. KORRELAZIO ENPIRIKOAK	120
3.3.1. Korrelazio enpirikoen proposamenerako prozedura esperimentala	121
3.3.2. Korrelazio enpirikoen emaitzak	123
3.4. SARE NEURONALAK	127
3.4.1. Sare neuronalen prozedura esperimentala	128
3.4.2. Sare neuronalen emaitzak	134
3.5. SARE NEURONALEN ETA KORRELAZIO ENPIRIKOEN ARTEKO KONPARAZIOA BATEZ BESTEKO ZIKLO DENBORAK ESTIMATZEKO	151

4. ITURRI BILGAILUDUN ITURRI OHANTZE KONIKOAREN IKERKETA	163
4.1. ITURRI BILGAILUAK	163
4.2. ARRASTEAK EKIDITEKO ITURRI BILGAILUAREN AHALMENA	167
4.2.1. Arrastea	168
4.2.2. Arraste saiakuntzen prozedura esperimentalak	169
4.2.3. Arraste emaitzak	173
4.2.3.1. Arraste azterketa kuantitatiboa	175
4.2.3.2. Arraste saiakuntzen zinetika	183
5. APLIKAZIOAK: LEHORKETA OPERAZIOA	189
5.1. LEHORKETA OPERAZIOA	189
5.2. LEHORKETA OPERAZIOAREN PROZEDURA ESPERIMENTALA	195
5.3. LEHORKETA OPERAZIOAREN EMAITZAK	198
6. LABURPENA	213
7. ONDORIOAK	217
8. NOMENKLATURA	227
9. BIBLIOGRAFIA	233

HELBURUAK

1955ean iturri ohandze teknologia aurkitu zenetik gaur egun arte berari buruzko ikerkuntza ugari egin dira. Ikerkuntza horien ondorio gisa hainbat aurrerakuntza egin dira teknologiaren garapenean, baina oraindik ez da iturri ohandzearen eskala handitzeko prozedura egokirik ezarri, batik bat iturri ohandzearen portaera fluidodinamikoa ez delako behar den moduan ulertzen. Teknika honek eskala handitzeko dituen arazoak direla eta, gas-solido kontaktuan oinarritzen diren beste teknika batzuk (ohantze finkoa edo fluidizatu) baino garapen maila apalagoan dago. Beraz, iturri ohandzea ezezagunagoa da eta eskala handiko prozesu industrialetan beraren aplikazioa mugatuago dago.

Eskala handitzearen erronkari ekiteko, zenbait aukera aztertzen ari dira ikerkuntza arlo honetan, hala nola, iturri anitzeko ohandzeak eta erdiko hodidun iturri ohandzeak. Gainera, CFD (“Computational Fluid Dynamics”) teknikak bereziki interesgarriak dira euren simulaziorako.

Gure ikerkuntza taldeak hogeita hamar urte baino gehiago darama teknologia honen fluidodinamika sakon ikertzen. Gainera, kontaktore konikoetara bideratu da batez ere ikerkuntza, beraren portaera hidrodinamikoa egokiago delako operazio konplexuetarako. Horrela, ikerkuntza taldearen hogeita hamar urteko ibilbidean, argi frogatu da teknologia honen bideragarritasuna operazio fisikoetan eta kimikoetan.

Azken hamarkadetan, iturri ohandzeen interesa asko hazi da erdiko hodiekin ematen dieten malgutasuna handia baita tamaina banaketa zabaleko partikulak edo partikula finak tratatzeko, diseinua ere erraza baita eta partikula handiekin lan egiteko bereziki egokiak baitira. Dena den, teknika honi buruzko ikerkuntzaren sistematizazio falta nabaria da. Izan ere, tratamendu fisikoen edo erreakzioen aplikazio ezberdinei buruzko lan esperimental ugari egin den arren, bibliografian lorturiko emaitzak eta korrelazioak elkarren artean konparatzea zaila da kontaktoreen geometria bereziak eta tamaina eta dentsitate ezberdineko materialak erabili baitira.

Doktorego tesi honen bidez, iturri ohandze konikoen arloan ekarpena egin nahi izan da gure ikerkuntza taldeak iturri ohandzei buruz orain arte egindako ibilbidean aurrera eginez. Horretarako, alde batetik, mota eta tamaina ezberdineko erdiko hodiekin baliatuz esperimentuak egin dira eraginkortasuna aztertzeke eta, bestetik, tamaina ezberdineko iturri bilgailuak erabiliz esperimentuak egin dira sistemaren egonkortasuna aztertzeke. Horrela, erdiko hodidun iturri ohandze konikoei buruzko bibliografian dagoen hutsunea betetzeaz gain, zenbait urrats eman dira tesi honetan iturri ohandze konikoen ezagutzarako eta bereziki eskala handitzeko.

Tesi honen xede orokorra iturri ohandze konikoen hidrodinamikan sakontzea dela kontuan izanik, horretarako ezarri diren helburu partzialak honako hauek dira:

- Kontaktorearen eta erdiko hodiaren geometriek eta operazio baldintza ezberdinek solidoaren ziklo denboran duten eragina aztertzea erdiko hodidun iturri ohandze konikoetan. Erdiko hodirik gabeko sistemekin ere lan egitea erdiko hodidun sistemekin konparatu ahal izateko.

- Esperimentuetan erabilitako faktoreen analisi estatistikoa egitea, kontaktorearen eta erdiko hodiaren geometria ezberdinek (γ , D_0 , L_H , W_H) eta operazio baldintza ezberdinek (H_0 , ρ_s) batez besteko ziklo denboran, ziklo denbora maximoan, ziklo denbora minimoan eta solidoaren zirkulazio emarian duten eragina aztertzeke. Analisi estatistikoen bidez, aldagai esanguratsuak bereiztea. Kasu honetan, aldagai bakoitzak bakarka duen eragina aztertzeaz gain, bi aldagaien arteko elkarrekintzek duten eragina ere aztertzea.
- Material finen ziklo denborak neurtzeko metodologia berria garatzea. Metodologia berri horren fidagarritasuna balioztatzea eta ziklo denboren azterketa sakona egitea.
- Ziklo denboren eta zirkulazio emarien kalkulurako bibliografian dauden korrelazio enpirikoak bilatzea eta gure sistemetarako egokiak diren frogatzea. Desegokiak diren kasuetan, batez besteko ziklo denboraren kalkulurako korrelazio enpirikoak garatzea erdiko hodi mota bakoitzerako. Korrelazio enpirikoak eraikitzeke moduluak aukeratzea eta euren egokitasuna balioztatzea.
- Ziklo denboren eta zirkulazio emarien kalkulurako sare neuronalak proposatzea. Irteera bakarreke eta irteera anitzeko sare neuronalak diseinatzea eta gure datu-baserako egokiera aztertzea.
- Korrelazio enpirikoek eta sare neuronalek ziklo denborak eta zirkulazio emari berriak estimatzeko duten gaitasuna aztertzea. Korrelazio enpirikoak eta sare neuronalak euren artean konparatzea.
- Iturri bilgailuek katalizatzaileak bezalako partikula finen arrastea ekiditeke duten ahalmena ikertzea. Arrasteen eragiten duten aldagaiak eta arraste saiakuntzen zinetika aztertzea.
- Erdiko hodi ezberdinez horniturike iturri ohantze konikoen portaera ikertzea partikula finen lehorketarake. Iturri bilgailua erabiltzeak lehorketa prozesuan duen eragina aztertzea.

1. Kapitulu

1. SARRERA

1.1. ITURRI OHANTZEAK

1.1.1. Iturri o

1.1.2. Iturri o

1.1.3. Iturri o

1.1.4. Iturri o

1.1.5. Iturri o

1.1.5.1. Iturri o

1.2. ITURRI OHANTZEAREN ALDAERAK

1.2.1. Erdiko h

1.2.2. Iturri o

1.2.3. Erdiko h

1. SARRERA

Tesi honetan lortu nahi diren helburuak ulertarazteko asmoz, iturri ohantze teknologiaren azalpenari ekingo zaio. Sarrera atalean iturri ohantzeari buruzko informazio orokorra emango da eta, lortutako emaitzak eztabaidatu baino lehen, emaitzen atal bakoitzarekin erlazionatuta dagoen sarrera espezifikoa egingo da.

1.1. ITURRI OHANTZEAK

Hurrengo ataletan, iturri ohantze teknologiaren agerraldia, ezaugarriak, abantailak, mugak eta aplikazioak emango dira aditzera. Ondoren, iturri ohantze konikoan sakonduko da tesi honetan erabilitako mota baita.

1.1.1. Iturri ohantzearen teknologiaren garapena

Hasiera batean, iturri ohantzea ohantze fluidizatuaren aldaera gisa kontsideratu zen, non sarreran gas banatzailea erabili beharrean, oinarri konikoaren erdian kokaturiko zulo bakarretik gas txorro bat injektatzen baitzen. Gaur egun, ordea, ohantze fluidizatuaren ezberdina den ukipen erregimen bezala kontsideratuta dago.

Orain dela mende bat baino gehiago, fase diluituko mineralen kiskalketarako patente batean (Robinson, 1879), iturkuntza hitza aipatu zen lehenengo aldiz. Patente horretan ohantzearen hidrodinamikari buruzko inolako erreferentziarik ez egon arren, badirudi iturkuntza bezala gero izendatu zen (Mathur eta Gishler, 1955a) fenomenoarekin zerikusirik bazuela. Dena den, iturri ohantzearen teknologia Mathur eta Gishler kanadiarrek ez zuten 50eko hamarkadaren hasiera arte aurkitu.

Iturri ohantze teknologiaren aurkikuntza ustekabeko gertaera izan zen, bere jatorria huts egindako gari aleen fluidizazioan dagoelarik. Modu honetan, Mathur eta Gishler-ek (1955a) ikusi zuten gasa erdiko zulo bakar batean zehar sartzen bazuten, partikulak ohantze fluidizatuetan bezala zorizko eran mugitu beharrean, ibilbide zirkularrak deskribatzen zituztela.

Iturri ohantzeak erabiliz garatu zuten lehenengo aplikazioa gariaren lehorketa izan zen eta, ikusi zutenek, erregimen hau ohantze fluidizatuarekin konparatuz lehorketarako nabarmen hobea zen. Ondorioz, gariaren lehorketarako pilotu erdua eraiki zuten Kanadan (Mathur eta Gishler, 1955a, b). Horretaz gain, alea hondatu barik airea tenperatura altuagoan erabiltzea posible zela ikusi zuten, ohantze fluidizatuarekiko etekinean hobekuntza lortzen zelarik (Gishler eta Mathur, 1957a, b). Ondoren, teknika hau beste material batzuren tratamendurako ere erabili zuten, jariaikin bezala airea edo ura erabiliz.

1959an Leva-k "Fluidization" izeneko liburuan iturri ohantze teknika aurkeztu zuen, iturri ohantzei buruzko lehen erreferentzia bibliografikoa bihurtuz. Gerora, Zabrodsky-ren (1966) liburua argitaratu zen. Ordurako, solidoaren eta gasaren fluxu mekanismoak fluidizazioaren mekanismoekiko ezberdinak zirela ezaguna zen. Aipatutako liburuak teknikaren interesa partikula handiak tratatzeko ahalmenean oinarritu zuen, partikula txikien tratamenduan fluidizazioak zituen abantaila asko ere bazituelarik.

Geroago, SESB (Sobietar Errepublika Sozialisten Batasuna) delakoan kontaktore konikodun iturri ohandzerantz bideratutako ikerketak hasi ziren ordurarte ikertu ziren oinarri zilindrikodun kontaktoreen orde. Hala ere, SESBean argitaratutako zientzi lanak gutxi hedatu zirenez, mendebaldeko bibliografian geratu den informazioa urria izan da.

1962an iturri ohandze teknologiaren lehenengo unitate komertzialak Kanadan ezarri ziren ale eta landare produktuen (dilistak, ilar haziak eta abarren) lehorketarako. Ondorengo unitateak arlo oso ezberdinetan izan zuten erabilera, ongarrien aleketa teknikaren arrakasta adierazgarria izanik (Berquin, 1961, 1964, 1966).

70ko eta 80ko hamarkadetan, erdiko hodian erabilpena eta batez ere aplikazio espezifikoen garapena da aipagarriena. Gaur egun, geometria ezberdineko iturri ohandzeetara bideraturik dago ikerkuntza.

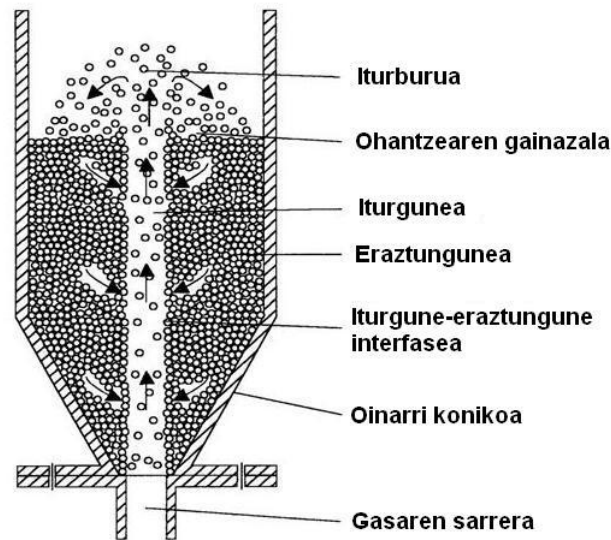
1.1.2. Iturri ohandzearen ezaugarriak

Iturri ohandze erregimena, orokorrean, gas-solido ukipen modu bat da, zeina ohandze finko eta fluidizatuaren alternatiba bat den eta interesgarria den erregimen hauek mugak dituztenean. Muga hauek solidoaren ezaugarri fisikoek eta gasaren egoitza denborek ezartzen dituzte (Mathur eta Epstein, 1974a).

Iturri ohandze baten ohiko geometriatzat oinarri konikodun (gune hilak ekiditeko da eta sekzio zilindrikoaren aldean bolumen txikia du) sekzio zilindrikoa duen kontaktorea hartzen den arren, beste geometria ezberdinak ere ikertu dira helburu espezifikoak lortzeko asmoz (Passos et al., 1987; Nitta eta Morgan, 1992).

Aipatutako ikerketetan egin diren aldaketen artean hurrengoak azpimarratuko dira: ohandze ez oso sakonak erabiltzea, non sekzio zilindrikoaren bolumena gutxi gorabehera sekzio konikoarena den; oinarri laua erabiltzea; erdiko hodiak erabiltzea iturgunearen fluxua definitzeko; jariakinaren sarrera eraztungunetik ere egitea (iturri ohandze fluidizatua) edo soilik geometria konikoa erabiltzea.

Ohiko geometria duen iturri ohandzearen oinarrizko ezaugarriak 1.1 Irudian ikus daitezke.



1.1. Irudia. Iturri ohantze erregimenaren eskema.

1.1 Irudiari erreparatuz, jariakina, normalean gasa, kontaktorearen behealdearen erditik sartzen da. Jariakinaren injekzio abiadura behar bezainbestekoa bada, sortutako gasaren zorrotadak iturgunea deituriko hutsune zilindrikoa irekitzen du kontaktorearen oinarritik ohantzearen gainazalerako bidean. Iturgune bezala ezagutzen den fase diluituan, gas zorrotadak partikula solidoak arrastatzen ditu. Bertan bi gune bereizten dira (Patrose eta Caram, 1984): lehenengoa, gasa sartzen den tokia, non arraste indarrak grabitate indarrak baino handiagoak diren eta bigarrena, gasa sartzen den tokitik gorago zentimetro gutxira, non arraste indarra grabitate indarrarekin parekatzen den, partikulak dezeleratzen hasiz. Gas zorrotadaren dezeleratzea, iturgunera sartzen diren partikulengatik eta gasaren fluxu jaitsierarengatik gertatzen da, gasa eraztungunerantz sakabanatzen delako. Hala ere, kontaktorearen oinarritik sartzen den gasaren emari totala iturgunean eta eraztungunean zehar banatzen da eta gasa iturgunetik eraztungunera ohantze guztian zehar pasatzen den arren, gehiena sarreratik zentimetro gutxira pasatzen da eraztungunera. Iturgunearen forma geometrikoa kontaktorearen faktore geometriko, lan baldintza eta solidoaren ezaugarrien menpekoa da (San José et al., 2001). Iturguneko gasaren presioak eusten dio eraztungunearen hormari (Heertjes eta Khoe, 1980).

Partikula solidoek mugimendu ziklikoa deskribatzen dute. Partikulak eraztungunean zehar jaitsiz doaz eta iturgunean gora doan gasak biltzen ditu, gehienbat kontaktorearen oinarrian (posizio honetako sekzio konikoak errazten baitu), baina iturguneko hormaren posizio longitudinal guztietan ere biltzen ditu. Partikula hauek ohantzearen goialdeko gunera iristen dira, iturburua deritzona, sortzen den iturri erako itxuragatik. Iturburuan partikulak dezeleratu egiten dira beraien abiadura arraste abiaduraren berdina den arte. Ondoren, partikulek norabidea aldatu egiten dute eta ibilbide parabolikoa deskribatuz ohantzearen gainazalean erortzen dira, zehazki, eraztungunea deituriko gunera. Honela, partikulek gasaren norantzari utzi egiten diote eta beherantzko ohantze mugikorra osatzen dute (ohantzea zeharkatzen duen gasarekin kontrakorrantean).

Eraztungunean partikula solidoak poliki beherantz doaz, gasa sartzen den kontaktorearen oinarri konikorarte. Bertan, erdigunetik pasatzen den gasak jasotzen ditu

partikulak eta puntu horretan, solidoaren ziklo berri bat hasten da. Solidozko ohantzea ohantze solte gisa portatzen da eraztungunean. Gune honetan, Patrose eta Caram-ek (1984) solidoaren fluxua gasaren sarrerako abiaduraren eraginpean ez dagoela ondorioztatu zuten, baizik eta solidoaren ezaugarrien eraginpean dagoela, hots, formaren, neurriaren eta zimurtasunaren menpe.

Azpimagarria da, iturri ohantzeetan ohantze guztiak ez duela abiadura homogenea, iturgunean partikulek bere abiadura maximoa lortzen baitute eta eraztungunean abiadura minimoa.

Honen guztiaren ondorioz, iturri ohantzeen gune nagusienak, iturgunea, eraztungunea eta iturburua direla argi geratzen da.

Ohiko iturri ohantzeetan frogatua dago oinarrian 60° inguruko angelua erabiliz aldakortasun handiarekin egin daitekeela lan baldintza egonkorretan eta oinarriaren angeluaren handitzeak sortuko lukeen kontaktorearen bolumen erabilgarriaren handitzea arbuigarria izango litzateke ohantzearen bolumen totalarekiko.

Operazio hau era jarraituan edo ez jarraituan egin daiteke. Era jarraituan operatzeko nahikoa da elikadura jarraitua eta altuera jakinean solidoen irteera ezartzea pilaketarik ez gertatzeko moduan.

Azkenik, aipagarria da iturri ohantze prozesuan mugimendu ziklikoari esker ukipen ona eta erregimen homogenea lortzen dela. Horregatik, partikulen tamainaren distribuzioa oso zabala denean edo $d_p > 1$ mm denean, iturri ohantzea erabiltzen da operazioaren ahalmena handitzeko.

1.1.3. Iturri ohantzearen abantailak eta mugak

Teknologia guztiak bezala iturri ohantzeak zenbait abantaila eta desabantaila ditu. Kasu honetan, iturri ohantzeak ohantze finko edo fluidizatuaren aldean dituen zenbait abantaila aditzera emango dira (Bridgwater, 1985; San José, 1991; Peñas, 1993; Llamosas, 1996):

- Iturri ohantzearen karga galera ohantze fluidizatuarena baino txikiagoa da. Iturgunearen horma bertikalak eragiten duen indarrarengatik gertatzen da hau, indar honek solidoa partzialki eusten baitu eraztungunean.
- Partikula handietarako ($d_p > 500 \mu\text{m}$) gas-solido ukipena iturri ohantzean ohantze fluidizatuan baino hobea da, alde batetik, gasaren zati bat eraztungunea zeharkatuz igotzen baita eta bestetik, iturgunetik igotzen den gasak iturgune-eraztungune faseartetik partikulak hartzen ditu abiadura handiz, bero eta materia transferentzia hobetu egiten delarik. Bibliografian zehazten denez, ohiko iturri ohantzeak zailtasunak ditu $500 \mu\text{m}$ baino partikula txikiagoak erabiltzen direnean. Mota honetako partikulekin, iturri ohantzeen ezaugarri den solidoaren mugimendu ziklikoaren ordeztu fluidizazioaren ezaugarri den mugimendu nahaskorra sortzen da (Rooney eta Harrison, 1974). Gure ikerkuntza taldean, aipatu den muga hori gasaren sarreraren diseinu egokiarekin zuzendu daitekeela frogatu zen (Olazar et al., 1996).

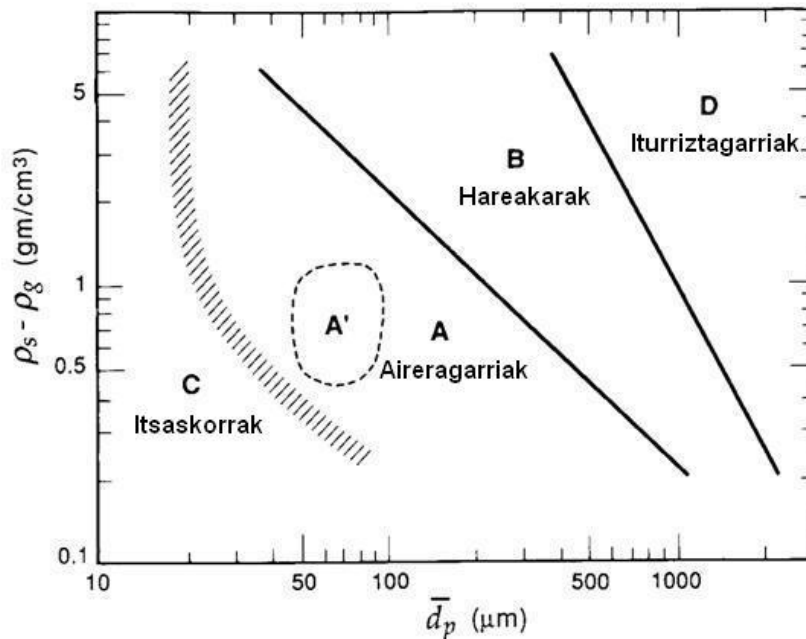
- Itsaskorrek diren materialen prozesaketarako edo, oro har, gainazaleko geruzen mugimendua behar duten materialetarako da egokia iturri ohantzea. Honen arrazoa, iturgune-eraztungune ukipenak eta iturgunean gertatzen den atrizioak material hauen aglomeratuen haustura eragitean datza.
- Ohantze fluidizatua ez bezala, iturri ohantzea tamaina ezberdineko materialen prozesaketarako, bereziki, distribuzio diskretuetarako da egokia. Honela, iturguneak partikulak ohantzearen oinarrian ez jalkitzea bermatzen du. Partikula handienek iturgunean duten arraste abiadura baino abiadura handiagoarekin lan egiten denean, partikula guztiek iturgune-iturburu-eraztungune zikloa betetzen dutela ziurtatzen da. Bestalde, kontaktorearen oinarriaren diseinuak (geometria konikoarekin) solidoaren gune hilak galarazten ditu. Ondorioz, iturri ohantzearen segregazioa ohantze fluidizatuarena baino txikiagoa da.
- Solido eta gasaren kontrakorrrenteko desplazamenduak solidoaren tenperaturaren bat-bateko aldakuntza ekiditen du iturri ohantzean. Honen ondorioz, iturri ohantzea material sentikorren (elikagaiak, farmazia-produktuak, material polimerikoak...) tratamendu termikorako egokia izateaz gain, airea tenperatura altuagoan erabiltzea ahalbidetzen du.
- Iturri ohantzearen eraikuntza erraza da, ez baita beharrezkoa plaka edo bestelako gas banatzailerik. Bakuntasun honek eraikitako iturri ohantzea aldakorra izatea egiten du eta bere eskala handitzea errazten du. Ohantze fluidizatuen diseinuan, berriz, plakaren diseinuak berebiziko garrantzia eta zailtasuna du.
- Gas-solido ukipen eraginkorra eta solidoaren ibilbide ziklikoen uniformetasunari esker, iturri ohantzea produktuen aleketarako gomendagarria da. Horretaz gain, iturri ohantzea egokia da trinkotasun eta esferikotasun handiko aleak eta prentsatzeko zailak diren materialen aleak lortzeko.
- Iturri ohantzearen erregimenak solidoaren elikadura jarraitua ahalbidetzen du, eraztungunean edo kontaktorearen oinarrian gasarekin batera sar baitaiteke solidoa. Ohantze fluidizatuan, aldiz, elikatze azken bide hau ez da bideragarria.

Bestalde, esan beharra dago iturri ohantze teknikak 500 μm baino tamaina txikiagoko partikulekin lan egiteko zailtasunak izateaz gain, hurrengo mugapenak ere badituela (Passos, 1987a; Bridgwater, 1985):

- Iturgunearen hasieran karga galera handia.
- Kontaktorearen geometria eta edukieraren mugapenak.
- Eskala aldaketen zailtasunak.
- Solidoaren propietateen mugapenak.

Solidoaren propietateen mugapenei dagokionez, ohantze fluidizatuan airea giro tenperaturan eta presio atmosferikoan elikatzen denean partikulek duten portaeran oinarrituz, Geldart-ek (1973) partikula solidoak lau taldetan sailkatu zituen. 1.2 Irudian

ikus daitekeenez, Geldart-en sailkapena erabiltzeko erraza eta argia da. Geldart-en sailkapenaren bidez, solidoaren dentsitatea eta batez besteko partikula diametroa jakinez gero, solidoak fluidizazioan izango duen portaera aurrean daiteke.



1.2. Irudia. Geldart-en sailkapena.

Geldart-en sailkapenaren arabera, solidoak lau taldetan sailkatzen dira fluidizazioan izango duten portaeraren arabera.

C taldea: partikula itsaskor edo hauts finek osatzen dute (irina, almidoia...). Talde honetako partikulen tamaina normalean $30 \mu\text{m}$ baino txikiagoa izan ohi da. Partikulen arteko indarrak gorantz doan gasarenak baino handiagoak izaten direnez, oso zaila da solido mota hauen fluidizazio normala lortzea.

A taldea: aireragarriak deritzon talde hau batez besteko partikula diametro txikia ($d_p < 30 \mu\text{m}$) edota dentsitate baxua (1400 kg/m^3 -koa baino baxuagoa) duten materialek osatzen dute. FCC katalizatzaileak dira A taldeko solidorik adierazgarrienak. Mota honetako katalizatzaileak erraz fluidizatzen dira, fluidizazio leuna eta egonkorra baitute abiadura txikietan eta burbuilen eraketa kontrolatua abiadura handietan, hots, abiadura handietan burbuila txikiak eratzen dira.

B taldea: harearen antza duten materialek osatzen dute talde hau. Horregatik, taldeko partikulak hareakarak deitzen dira, baina baita partikula burbuila sortzaileak ere. Partikula gehienek $40\text{-}500 \mu\text{m}$ bitarteko diametroa eta $1400\text{-}4000 \text{ kg/m}^3$ bitarteko dentsitatea dute. Partikula hauekin behin abiadura minimoa gaituta ohantzean burbuilak sortzen dira eta hauek tamaina handia lor dezakete. Burbuilen eraketa azkarra izan eta tamaina handituz doan arren, talde honetan solidoak ondo fluidizatzen dira.

D taldea: partikula diametro eta dentsitate handiko materialek osatzen dute talde hau. Aplikaziorik nabarmenenak hurrengoak dira: ale eta hazien lehorketa, kafearen

zigorketa, ikatzaren gasifikazioa, mineral metalikoen kiskalketa eta abar. D taldeko partikulei iturritzagarriak deritze. Oro har, talde honetako partikulak ohantze ez oso sakonetan edo iturri ohantze erregimenean tratatzen dira, ohantze sakonetan fluidizatzeke zailak direlako. Gainera, ohantze sakonetan zorizko portaera dute, hau da, lehertzen diren burbuila handiak eratzen dira eta iturkuntzarako joera dute.

Geldart-en sailkapenari erreferentzia egiteko, solidoak Geldart A, B, C edo D bezala izendatzen dira.

Partikula talde bakoitzaren deskribapenaren ondorioz, tesi honetan lantzen den teknologiarako, hots, iturri ohantzerako ezaugarri onak dituzten partikulak, D taldekoak dira. Hala ere, kontaktorearen diseinu egokiaren bidez, iturri ohantzean lan egiteko erabil daitezkeen solidoak tamaina ezberdinetakoak izatea lor daiteke.

Geldart-en sailkapenean ikus daitezkeen moduan, Rooney eta Harrison-ek (1974) iturri ohantze teknikak 500 μm baino tamaina txikiagoko partikulak erabiltzeko zailtasunak izango zituela iragarri zuten. Bereziki, 90-150 μm bitarteko partikulen kasuan ohantzearen altura maximoa 1.5 cm-koa da (Bridwater, 1985). Ondorengo ikerketek (Olazar et al., 1996) muga hauek gasaren sarreraren diseinu egokiaz zuzentzen direla frogatu zuten.

1.1.4. Iturri ohantzearen aplikazioak

Iturri ohantze teknika deskribatu ostean, zertarako erabiltzen den aipatzea interesgarria denez, ondoren, bere aplikazio industrialak (operazio fisikoetan eta erreakzio kimikoetan sailkatuta) ahal den neurrian kronologikoki ordenatuta emango dira aditzera (San José, 1991). Dena dela, emaitza ataleko kapituluetan ziklo denborei, arrasteari, iturri bilgailuei eta lehorketa operazioari buruzko berrikuspen bibliografiko sakonagoa egingo da. Hori dela eta, atal honetan aipamen batzuk baino ez dira egingo.

Iturri ohantzeak erabilera asko eta oso ezberdinak ditu. Hala ere, kontuan izan behar da teknologia hau oraindik fase esperimentalean dagoela eta ondorioz, beraren gaur eguneko industri erabilpenak urriak direla, guztiz ezarrita ez dagoelako.

Operazio fisikoetan

Aplikazio zaharrenetariko bat solidoen nahasketa izan da (Bowers et al., 1960; McNab eta Bridgwater, 1979; Devahastin eta Mujumdar, 2001; Larachi et al., 2003; Hao et al., 2008; Berghel et al., 2008).

60ko hamarkadako beste erabilera bat materialen estaldura izan da (Singiser eta Lowenthal, 1961; Singiser et al., 1966; Kucharski eta Kmiec, 1989; Liu eta Litster, 1993a, b; Rocha et al., 1995, 2009; Choi eta Meisen, 1997; Ando et al., 2000; Jono et al., 2000; Pissinati eta De Oliveira, 2003; Kfuri eta Freitas, 2005; Paulo Filho et al., 2006; Martins et al., 2008; Lopes et al., 2009; Da Rosa eta Rocha, 2010; Silva et al., 2011; Chen eta Kuo, 2015).

70ko hamarkadan, aerosolen berreskuratzea eta adsorbenteen birsortzeari ekin zitzaion (Foong et al., 1976; Balasubramanian et al., 1978) eta 90ko hamarkadan, birrinketari (Khoe et al., 1990).

Ondoren, 80ko hamarkadan, iturri ohantzea partikula ezberdinak aglomeratzeko erabili zen (Kikuchi et al., 1985; Vuthaluru eta Zhang, 2001; Jacob et al., 2005).

Aleketaren bidez, itxura esferikoa eta tamaina uniformeak lortzen da (Uemaki eta Mathur, 1976; Mann, 1978; Robinson eta Waldie, 1978, 1979; Waldie eta Robinson, 1980; Waldie, 1981; Scheuch et al., 1996; Hatano et al., 2005; Borini et al., 2009).

Bero transmisioa gaur egun oraindik garatzear dagoen aplikazioa da (Mathur eta Epstein, 1974a; Szafran eta Kmiec, 2004; Swasdisevi et al., 2005; Prachayawarakorn et al., 2006; Saldarriaga et al., 2015b).

Aplikazio garatuaren artean solido mota ezberdinen lehorketa dago eta erabilitako materialak honako hauek dira: aleak, solido eranskorak eta partikulazko aglomeratuak (Passos et al., 1987b, 2004; Mujumdar, 1984; Strumillo et al., 1980; Viswanathan, 1986; Zahed eta Epstein, 1992; Correa et al., 2004; Jumah et al., 2007; Marmo, 2007; Taruna eta Jindal, 2002; Konopka et al., 2008; Markowski et al., 2007, 2010; Jittanit et al., 2013; Chielle et al., 2016), pastak, esekidurak eta disoluzioak (Romankov eta Rashkovskaya, 1968; Romankov, 1971; Szentmarjay eta Pallai, 1989; Benali eta Amazouz, 2006; Pallai et al., 2007; Almeida et al., 2010; Freire et al., 2012a; Braga eta Rocha, 2015; Perazzini et al., 2015), zerrautsa (Berghel et al., 2005, 2008; Olazar et al., 2012), kortxozko tapoiak (Magalhaes eta Pinho, 2008), biopolimeroak (Cunha et al., 2000), lokatzak (San José et al., 2013), guaiaba (De Alsina et al., 2014), jambolao hondakina (azala eta haziak) (Mussi et al., 2015) eta laranja azalezko hondakinak (Freire et al., 2016).

Prozesu kimikoetan

Iturri ohantze teknologiaren hastapenetan Klinker zementuaren produkzioari ekin zitzaion (Vukovic et al., 1972; Iammartino, 1974). Gaur egun, biogasaren produkzioa (Bernocco et al., 2013), bio olioaren produkzioa (Álvarez et al., 2014a, 2016; Makibar et al., 2015), silize amorfoaren eta kalitate handiko ikatz aktibatuaren produkzioa (Álvarez et al., 2014b) eta batez ere, hidrogenoaren produkzioa (Kechagiopoulos et al., 2007, 2009; Álvarez et al., 2014c; Arregi et al., 2015, 2016; Erkiaga et al., 2015; Barbarias et al., 2016) dira gairik aztertuenak.

70ko eta 80ko hamarkadako erabilerak erreazio-aleketa (unitate berean) (Voice, 1974; Piccinini eta Rovero, 1982), burdin mineralaren erreduzioa (Mathur eta Epstein, 1974a), gas faseko erreazio azkarrak (Piccinini et al., 1979; Rovero et al., 1983; Stocker et al., 1989) eta ikatzaren aktibazioa (Watkinson et al., 1983) izan ziren.

80ko hamarkadako aplikazioa eta oraindik gaur egun lantzen ari dena krakeaketa termikoa eta katalitikoa da (Uemaki et al., 1977; Elordi et al., 2011a, 2012; Artetxe et al., 2012, 2013, 2014; Barbarias et al., 2015).

Geroago, banadioaren berreskurapena aztertu zen mineralaren kiskalketaren bidez (Munz eta Mersereau, 1990).

Gure ikerkuntza taldearen iturri ohantze konikoaren lehenengo aplikazioa polimerizazio katalitikoa izan zen (Bilbao et al., 1987).

Iturri ohandzea ingurumena babesteko prozesuetan ere aplikatu da (Ma et al., 2000; Xu et al., 2000).

80ko hamarkadatik aurrera errekontzari loturiko aplikazioek izan zuten hazkundera (Bhattacharya eta Shah, 1987; Arbib eta Levy, 1982a, b; Zhao et al., 1987a, b; Tia et al., 1991a, b; Sue-A-Quan et al., 1995; Konduri et al., 1994, 1995; Jeng et al., 2001; Rasul, 2001). Garai horretan, gasifikazioa ere indarra hartzen hasi zen (Foong et al., 1980, 1981; Watkinson, 1987; Zak eta Natcher, 1987; Adegroye et al., 2004; Salam eta Bhattacharya, 2006; Belyaev, 2008; Spiegl et al., 2010; Da Rosa eta Rocha, 2010, Alghurabie et al., 2013; Erkiaga et al., 2013, 2014; Álvarez et al., 2015; McCullough et al., 2015; Lopez et al., 2016).

Azken aldietako aplikazio erabiliena pirolisia izan da (Mathur eta Epstein, 1974a; Ray eta Sarkar, 1976; Jarallah eta Watkinson, 1985; Konduri et al., 1999; Atutxa et al., 2005; Arabiourrutia et al., 2007, 2008, 2012; Olazar et al., 2000, 2001a, 2005, 2008; Aguado et al., 2002, 2003, 2005, 2014; Elordi et al., 2007, 2009, 2011b; Artetxe et al., 2010, 2015; Lopez et al., 2009, 2010a, 2010b, 2010c; Makibar et al., 2011, 2012; Barrozo et al., 2013; Fernandez-Akarregi et al., 2013; Du et al., 2014; Amutio et al., 2011, 2012, 2013, 2015; Niksiar et al., 2015; Xavier et al., 2016). Iturri ohandze konikoetan oinarrituriko pirolisi teknika etorkizun handiko alternatiba teknologikoa da produkzio txikiko hondakinak berreskuratzeko.

Gaur egun, gorantz ari den aplikazioa erregai nuklearrezko partikulen estaldura da (Piccinini, 1975; Ogawa eta Ikawa, 1981; Pannala et al., 2007; Zhou, 2008; Liu et al., 2014; Mollick et al., 2011, 2015). Zhou-k uranio partikulen estaldura proposatzen du tenperatura oso altuko errektore nuklearretan energia elektriko ekoizteko.

Nahiz eta iturri ohandzearen aplikazioak interesgarriak eta bere etorkizuna itxaropentsua izan, hidrodinamikaren ezagutza ohandze fluidizatuarena baino eskasagoa dela kontsidera daiteke. Horren adierazle, iturri ohandzearen ezagutzan dauden zenbait hutsune nabarmen dira. Besteak beste, Zabalak (1997) honako hauek azpimarratzen ditu:

- Gas fluxuaren deskribapenaren gabezia. Gasa kontaktorean igotzean iturgunean eta eraztungunean banatzen da. Hortaz, egoitza denboren distribuzioa izango da eta emariak zehazteko bi igoera guneen abiadura profilak ezagutzea beharrezkoa izango da. Gas fluxua karakterizatzeke ereduak urriak eta enpirismo dosi handikoak dira (Lim eta Mathur, 1976; Peñas, 1993).

- Iturgunearen definizioaren sinplifikazioa. Iturgunearen diametroa kontaktorearen sarrerarako diametroaren berbera dela edo enpirikoki lortutako batez besteko diametroa dela hartzen da oraindikarrene ere (McNab, 1972) nahiz eta egindako behaketa esperimentaletan egoera erreala zailagoa dela ondorioztatu den.

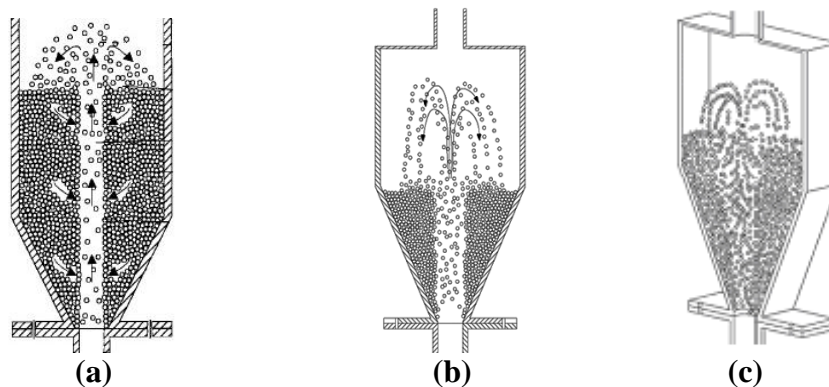
- Solidoaren fluxuaren deskribapenaren gabezia. Modu sinplifikatuan, solidoak ziklo perfektua egiten duela hartu daiteke eta kontaktorearen oinarrian sartzen dela iturgunera (Benkrid eta Caram, 1989) edo iturgunearen altueran zehar sartzen dela gune honetara (Mathur eta Epstein, 1974b). Halaber, iturburuak solidoa uniformeki banatzen duela (ohandzearen gainazaleko posizio erradialetan) eta solidoa abiadura

uniformearekin jaisten dela (eraztungunearen posizio erradial guztietan) kontsidera daiteke.

Oinarri konikodun iturri ohandze zilindrikoak ohikoak ez diren baldintzetan aplikatzen direnean batez ere, aipatutako sinplifikazioek nabarmen desbideratzen dira benetako portaeratik. Honela, ohandze ez oso sakonetan kontaktorearen oinarri konikoaren geometriak hidrodinamikan eragina duela egiaztatu da (San José et al., 1996a) eta iturgunearen diametroa nabarmen aldatzen da kontaktorearen posizio longitudinalean gora eginez (San José et al., 1996b). Azken bilakaera hau, operazio baldintzen arabera (kontaktore-partikula sistemaren aldagai geometrikoak eta jariakinaren abiadura) ezberdina da (San José et al., 1995).

1.1.5. Iturri ohandze konikoa

Bibliografian iturri ohandzearen geometria ezberdinak aurkitzen dira, erabilgarrienak hurrengoak izanik: zilindrikoa, konikoa eta bi dimentsiokoa (1.3 Irudia). Geometria zilindrikoa erabili zen lehenengo (Mathur eta Epstein, 1974a, b). Dena den, hurrengo mugak zituen: prozesatze ahalmen mugatua; iturritu daitekeen ohandzearen altuera mugatua da; kontaktorearen zati zilindrikoaren diametroa (D_c) ezin da izan metro batekoa baino handiagoa, eraztungunean gune hilak sortzen zirelako; kontaktorearen oinarriko diametroaren (D_i) eta zati zilindrikoaren arteko zatidura partikulen propietateen araberrako tarte estuan dago (Passos et al., 1987b).



1.3. Irudia. Iturri ohandzearen geometria ezberdinak: (a) zilindrikoa, (b) konikoa eta (c) bi dimentsiokoa (Freire et al., 2012b).

Ondoren, geometria konikoa garatu zen. Konfigurazio honek iturri ohandze zilindrikoaren ezaugarriak (partikula handiekin lan egiteko ahalmena, presio galera txikia, partikulen mugimendu ziklikoa eta abar) eta bere geometriari dagozkion berezko ezaugarriak (gas emari tarte zabalean operazio egonkorra mantentzeko gaitasuna) biltzen ditu (Olazar et al., 1992, 1999; San José et al., 1993). Konfigurazio konikoak gas emaria aldatzeko gaitasuna du eta, beraz, testura irregularreko partikulak, partikula finak, tamaina distribuzio zabaleko partikulak eta partikula itsaskorrekin lan egitea ahalbidetzen du. Solido hauen tratamendua beste gas-solido ukipen erregimenekin oso zaila edo ia ezinezkoa da (Bilbao et al., 1987; Olazar et al., 1993). Gainera, iturri ohandze konikoak ez du mugarik iturritu daitekeen altuerari dagokionez (Mathur eta Epstein, 1974a).

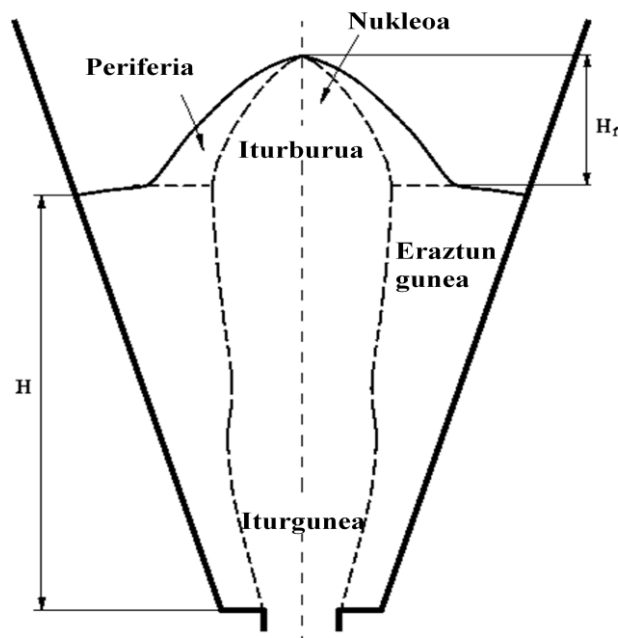
Bi dimentsioko iturri ohandzeak Mujumdar-ek (1984) proposatu zituen lehenengo aldiz iturri ohandze konikoaren mugak gaintitzeko eta eskala handitzea errazteko. Konfigurazio honi irekiduradun iturri ohandze laukizuzena deritze (ingelesez “slot-rectangular”) Freitas et al.ek (2000). Aipatu behar da hiru dimentsio izatearen efektu nabarmenak sortzen direla ohandze hauetan zabalera handiago egiten denean.

Horrela, bi dimentsioko geometriak ohandze bolumena handia bideratzen du ohandzearen zabalera handiago eginez (Mujumdar, 1984).

Aipatu diren iturri ohandzearen geometria ezberdinak zenbait aplikaziotarako egokiak diren arren, iturri ohandze konikoa berebiziko aukera da material ezberdinezko ohandzeak tratatzeko, gune hilak ekiditen dituelako eta azaldu diren ezaugarri bereziak dituelako. Gainera, iturri ohandze konikoak hurrengo paragrafoetan aipatuko diren onurak ere baditu.

Partikulak handiak direnean edota itsaskorrak edo tamaina banaketa dutenean, muga nabarmenak dituzte ohiko iturri ohandzeek. Horrelako partikulekin modu egonkorrean lan egin daiteke iturri ohandze konikoetan, bi kontaktu erregimen ezberdin erabiliz, hots, ohiko iturri ohandzea eta iturri ohandze diluitua. Bi erregimen hauek ezaugarri fluidodinamiko ezberdinak dituzte eta solido-kontakore sistema berdinarekin hel daiteke erregimen hauetara, baina gasaren abiadura tarte ezberdinetan lan eginez.

Solidoaren mugimenduaren ezaugarriek eta solidoaren kontzentrazioek kontuan izanik iturri ohandze konikoetan gune ezberdinak defini daitezke. Iturri ohandzearen gune ezberdinak (nukleoa, periferia, iturburua, eraztungunea eta iturgunea) 1.4 Irudian adierazten dira. Oro har, gune horiek ohiko iturri ohandzeetarako definiturikoen antzekoak dira.



1.4. Irudia. Iturri ohandze konikoaren gune ezberdinen arteko mugak.

Iturburuko, eraztunguneko eta iturguneko bolumena kontaktorearen aldagai geometrikoen (kontaktorearen angelua eta gasaren sarrerako diametroa) eta baldintza

esperimentalen (partikula diametroa eta ohandze geldoaren altura) menpekoa da (San José et al., 2005).

Azpimagarria da, iturburuaren erdian partikulak eta gasa aldi berean gorantz mugitzen direla, baina periferian partikulak eraztunguneko goialdera itzultzen diren bitartean gasa kontrakorrantean gorantz doa. Nahiz eta ohiko iturri ohandzeetan segregazioa iturburuan gertatzen den, iturri ohandze konikoetan hainbat txikiagoa da. Beraz, tamaina distribuzio zabala duten partikulen tratamendua egin daiteke egonkortasun arazorik izan gabe (Olazar et al., 1992).

Gainera, lehen esan den bezala, kontaktorearen geometria konikoak gasaren emari tarteari dagokionez aldakortasun handia ematen dio eta erabilera zaileko solidoekin lan egitea ahalbidetzen du ukipenerako beharrezko zurrunbilotasuna lortzen delako.

Solidoa itsaskorra den eta urtzeko joera duen operazio fisiko eta kimikoen kasuan, iturri ohandze konikoak gune hilak ekiditen dituen kontaktu zurrunbilotsua sortzen du. Hori gertatzen da polimerizazio katalitikoetan (Bilbao et al., 1987, 1989; Zabala, 1997), ikatz bitumensuaren gasifikazioan (Uemaki eta Mathur, 1976) eta solidoen enkapsulamenduan (Kucharski eta Kmiec, 1989). Aurretik esan den moduan, polimerazio katalitikoak da gure ikerketa taldean aztertu zen iturri ohandze konikoen lehenengo aplikazioa.

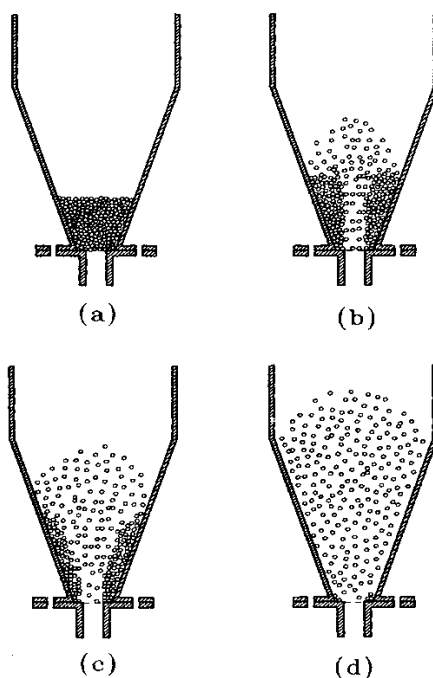
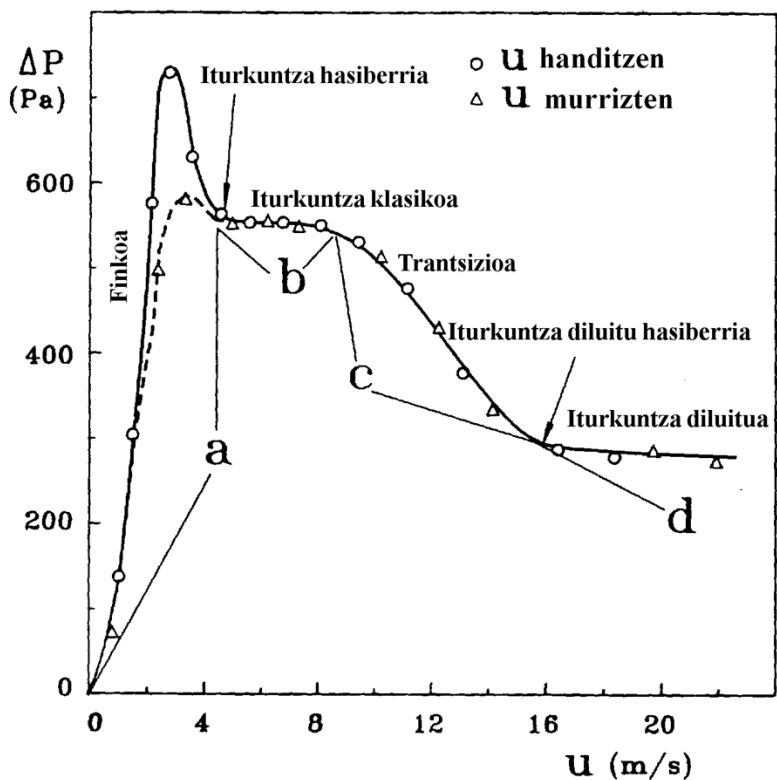
Ildo beretik, iturri ohandze konikoetan egoitza denbora laburra izatea lor daiteke. Esate baterako, erreakzio azkarretan, ultrapirolisian bezala (Vogiatzis et al., 1988), hautakortasuna da diseinua baldintzatzen duen faktorea, gasaren egoitza denbora optimoak milisegundo batzuetakoa izan behar baitu.

Honen guztiaren ondorioz, iturri ohandze konikoei dagokien erregimenak abantaila garrantzitsuak ditu gas-solido kontaktuari dagokionez eta alternatiba interesgarria da beste diseinu konplexuko errektoreen kasurako (Tamir eta Kitron, 1989; Kmiec eta Leschonski, 1991). Hala ere, gure ikerketa taldeko artikulak baino lehen, iturri ohandze konikoen hidrodinamikari buruz bibliografian aurki daitekeen informazioa oso urria da. Honen arrazoietako bat, Europa Ekialdeko ikertzaileek egindako lanek izan duten difusio txikia da.

1.1.5.1. Iturri ohandze konikoaren fluidodinamika

Gure ikerketa taldearen helburuetako bat iturri ohandze konikoek gas jarioaren arabera duten aldakortasuna izan da. Hala, gas jarioaren abiadura handitzean iturri ohandze erregimenak duen hedakuntza ikertu da eta hedakuntza horren hidrodinamika karakterizatu da. Erregimen horri iturri ohandze diluitua deritzo (Olazar et al., 1992).

Iturri ohandze konikoaren sorrera eta ondorengo hedakuntza azaltzeko, 1.5 Irudian karga galeraren (goiko grafikoa) eta partikulen mugimenduaren (beheko irudiak) bilakaera gasaren abiadurarekiko erakusten da (San José, 1991).



1.5. Irudia. Karga galeraren eta partikulen mugimenduaren bilakaera gasaren abiadura handitzean ohantze konikoan (San José, 1991).

1.5 Irudian ikus daitekeenez, hasierako ohantze finkoan, karga galera jariakinaren abiadurarekin handituz doa (grafikoaren a gunea) balio maximoa lortu arte eta ondoren, bat-batean jaitsi egiten da. Hau gasaren kanalizazioa sumatzen hasten denean gertatzen da eta iturkuntza hasiberria edo ohantze finkotik iturkuntzarako trantsizioa bezala ezagutzen da. Gasaren abiadura handitzean, karga galera konstante mantentzen da iturri

ohantzearen operazio egonkorreko erregimenera iritsi arte (grafikoaren b gunea), non eraztungunea eta iturgunea argi ezberdintzen diren.

Gasaren abiadura handituz doan heinean, lehenago ezberdinduta zeuden eraztungunea eta iturgunea nahasten hasten dira. Egoera horretan, karga galera jaitsiz doa eta trantsizio egoera (grafikoaren c gunea) lor daiteke. Trantsizioa eboluzionatuz doa eraztungunea eta iturgunea bereiztea ezinezkoa den arte eta ohantzearen porositatea uniforme izan arte (iturkuntza diluitu hasiberria deritzona). Orduan, iturri ohantze diluituzko erregimenari dagokion karga galera (grafikoaren d gunea) lortzen da (Olazar et al., 1992).

1.4 Irudian karga galeraren bilakaeran histeresi fenomeno nabaria da, ohantze fluidizatuetan ematen denaren antzekoa izanik. Iturri ohantze erregimena hasten deneko abiaduraren determinazioa (iturkuntza abiadura minimoa) erreproduzigarritasun eta zehaztasun handiagoz egiten da abiadura jaitsiz lortutako bilakaeraren arabera (Mathur eta Epstein, 1974b; Kucharski eta Kmiec, 1983; San José, 1991).

Bestalde, gure ikerkuntza taldeko aurretiko lanetan, iturri ohantze konikoen aplikazioa aztertu da material ezberdinetarako (beirazko bolak, aleak, lekak, zeramikak, poliestirenoa eta zura, besteak beste), iturri ohantzeen ohiko operazio tartearen barruan (Arquimedes-en moduluaren $7.8 \cdot 10^4$ eta $5.8 \cdot 10^7$ balioen artean). Lan horien ondorioz, kontaktorearen, kontaktore-partikula sistemaren eta iturri diluituen faktore geometrikoen operazio tartearak ezarri dira iturri ohantze konikoetan.

- Gasaren sarrerako diametroaren eta konoaren oinarriko diametroaren arteko erlazioa, D_0/D_i

Iturri ohantzerako eta iturri ohantze diluiturako, D_0/D_i erlazioa 1/2 eta 5/6 bitartean egon behar da. Beheko muga karga galerak eta oinarrian eratzen diren gune hilek ezartzen dute. Azken hau era jarraituan lan egiteko arazo larria da. Goiko muga balio handietarako sortzen den iturgunearen mugagabetasunari dagokio. Ezegonkortasuna iturriaren errotazio mugimenduak sortarazten du.

- Konoaren angelua, γ

Iturri ohantzerako ez dago konoaren angeluaren goi-mugarik eta geometria zilindrikora arte handitu daiteke. Dena den, ikuspuntu praktikotik 60° baino angelu txikiagoa erabiltzea komeni da solidoa hormetan gera ez dadin. Beheko muga 28° -koa da, angeluaren balio txikiagoetarako ohantzea ezegonkorra baita.

Iturri ohantze diluituetan, konoaren angeluak 28° eta 45° arteko balioa izan behar du. Angeluaren balio txikiagoetarako, partikula txikiak nahaste erregimena ematen dute eta ez da iturri ohantze erregimenaren bereizgarri den mugimendu ziklikoa lortzen. Horretaz gain, gasaren abiadura partikulen arraste abiaduraz mugaturik dago. Kontuan izan behar da partikula tamainaren banaketa duten solidoen tratamendurako eraginkortasuna murriztu egiten dela konoaren angelua txikitzean.

45° baino angelu handiagoetarako gasaren abiadura ez bada trantsizio egoeran bezalakoa ohantzea horman geldi geratzen da. 45° baino handiagoak diren angeluetarako gasaren egoitza denboraren banaketa nabarmen zabaltzen da gasaren

zirkulazioan gertatzen den errotazio fenomenoarekin batera. Honen ondorioa ohantzearen ezegonkortasuna da fenomeno hau partikula diametro txikien kasuan garbiago sumatzen delarik.

➤ Sarrerako diametroaren eta partikula diametroaren arteko erlazioa, D_0/d_p

Kontaktore zilindrikoetan oinarrituriko iturri ohantzeetan, ohantzearen egonkortasuna lortzeko D_0/d_p erlazioak 30 baino txikiagoa izan behar du (Mathur eta Gishler, 1955a; Passos et al., 1987a), baina kontaktore konikoetan D_0/d_p erlazioaren tartea zabalagoa izan daiteke operazio egonkorreko. Olazar et al.ek (1992) tarte hau 50 ere izan daitekeela frogatu zuten iturri ohantze konikoetan partikula handiak erabiltzen direnean.

Iturri ohantze diluituan, D_0/d_p erlazioaren balioa 1 eta 80 artean egon daiteke. Muga hauek ez dira egonkortasunerako, eraginkortasunerako baizik. Beheko muga 0.70 inguruko porotasunei dagozkie ohantzearen homogeneousotasuna lortzen dela. Goiko muga berriz, 0.99tik gorako porotasunei dagozkie.

Azkenik, eredu teorikoen bidez iturri ohantzearen portaera fluidodinamikoa deskribatzeko zenbait simulazio teknika daude. Horien artean interesgarriena bat jarriena dinamika konputazionala da ("Computational Fluid Dynamics", CFD). Bibliografian teknika horri buruzko lan ezberdinak aurki daitezke eta iturri ohantzeen konfigurazio ezberdinei aplikatu zaie, hala nola, ohiko iturri ohantzei (Wu eta Mujumdar, 2008), iturri ohantze konikoei (Duarte et al., 2009; Wang et al., 2010c; Rong eta Zhang, 2010; Hosseini et al., 2014; Wang et al., 2016), bi dimentsioko iturri ohantzei (Hosseini et al., 2010), baita erdiko hodidun iturri ohantzei ere (Szafran eta Kmiec, 2004; Szafran et al., 2005; Szafran, 2005; Hosseini et al., 2009; Wang et al., 2010a, b). CFD teknika bereziki baliagarria da hidrodinamikan parte hartzen duten fenomenoaren ulermenerako eta eskala handitzerako datuak lortzeko (Bettega et al., 2009; Melo et al., 2016). CFD modelakuntzaren abantaila nagusia gasaren eta solidoaren fluxuan ezaugarri asko aldi berean eta modu zehatzean aurreratzen datza fluxuan inolako oztoporik eragin gabe. Hala ere, modelakuntza honetan erabiltzen den aldagai kantitate handia eta erreaktorearen ulertze falta direla eta, hau da, konplexutasuna dela eta, CFD teknika baino erabiliago dira eredu enpirikoak. fluxuak oztopatu gabe.

1.2. ITURRI OHANTZEAREN ALDAERAK

Iturri ohantze teknologia 1955ean aurkitu zenetik gaur egunera arte, iturri ohantzearen eredu ezberdinak garatu dira operazio baldintzak hobetzeko asmoz. Horretarako, askotan ohiko iturri ohantzea zenbait aldaketa izan ditu. Modu honetan, iturri ohantzearen eredu ezberdinei aldaera deritze. Kontuan izan behar da, azken 60 urte hauetan garatu diren iturri ohantze aldaerak asko direla tesi honetan azaltzeko. Horregatik, batez ere, tesi honekin erlazionaturik dauden aldaerak deskribatuko dira. Aldaera hauek erdiko hodidun iturri ohantzea, iturri ohantze fluidizatua eta alboko irteeradun iturri ohantzea dira.

1.2.1. Erdiko hodidun iturri ohandzea

Iturri ohandzearen funtzionamendua ikertuz, ohandzean partikula gehiegi doanean gorantza eraturako iturria ezegonkorragoa dela frogatu zen. Beraz, partikula solido askorekin edo altuera handiko ohandzeekin lan egiteko erdiko hodia erabiltzen hasi zen. Ohiko iturri ohandzeen ezaugarri nagusia partikulak eraztungunearen edozein posiziotatik sartzean datza. Honen ondorioz, partikulen traiektoria zorizkoa da eta honek partikulen ziklo denborak oso ezberdinak izatea eragiten du. Hau ekiditeko eta operazio baldintza hobekak lortzeko asmoz, erdiko hodia erabiltzea aukerarik hoberena da.

Erdiko hodidun iturri ohandzea ohiko iturri ohandzearen eraldaketa garrantzitsu eta sinpleenetakoa da (Buchanan eta Wilson, 1965; Pallai eta Nemeth, 1972; Schwedes eta Otterbach, 1974; Krambrock, 1976), ohandzearen ezaugarriak kontuan hartuz iturri ohandzearen prozesua optimizatzeke asmoarekin eginiko eraldaketa baita. Gainera, erdiko hodiekin ohandzean zehar airearen portaeraren patroia aldatzen dute.

Erdiko hodidun iturri ohandzearen aurrekari bibliografikoei erreparatzen bazaie, Buchanan eta Wilson-ek (1965) izan ziren erdiko hodia erabili zuten lehenengoak. Ikertzaile hauek erdiko hodia erabiltzean iturri ohandzeen hidrodinamikan aldaketa nabarmenak gertatzen zirela ikusi zuten, adibidez, erdiko hodiak iturri ohandzeekin partikula finekin lan egiteko dituzten mugak gainditzea ahalbidetzen zuela. Hatate et al.ek (1997) erdiko hodi ez-porotsua duen iturri ohandzearen emariaren ezaugarriak eta aplikazioak ikertu zituzten. Matthew et al.ek (1988) erdiko hodiz hornituriko iturri ohandzeen hidrodinamika aztertu zuten beirazko bolak erabiliz. Geroago, Nagashima et al.ek (1999) ikerketa bera egin zuten baina bi tamaina ezberdineko beirazko bolen nahaste bitarrak erabiliz. Hamarkada horren inguruan ikertzaile ugari partikulen zirkulazioa aztertzeari ekin zioten (Muir et al., 1990; Grbavcic et al., 1992; Ji et al., 1997, 1998; Hattori et al., 2004). Ijichi et al.ek (1998) partikula finen iturkuntzan bereziki lan egin zuten. Zhao et al.ek (2006) erdiko hodiz eta erdiko hodiak gabe osaturiko iturri ohandzeetako partikulen zirkulazio profila ikertu zituzten. Nagashima et al.ek (2009) ohiko iturri ohandzeetan erdiko hodiaren formak gasaren eta solidoaren portaeran duen eragina ikertu zuten beirazko bolak erabiliz.

Garai horretatik aurrera ikertzaile gehienek iturri ohandze teknologia erabili duten lanetan, erdiko hodia baliatu dira. Horregatik, atala luzeegia ez egiteko ez da gaur egun arteko azterketa bibliografikoa egin. Gure ikerkuntza taldean, San José et al.ek (2007a) erdiko hodiekin buruzko lehen artikulua argitaratu zuten eta gaur egun arte egindako ia ikerketa guztietan erdiko hodiak erabili dira. Hala ere, gure ikerkuntza taldean (Altzibar, 2004) erdiko hodiak lehenago erabiltzen hasi ziren, harea hezea zegoenean erdiko hodiaren eta kontaktoreko hormaren artean ez itsasteko erdiko hodiak irekidurak izan behar zirela konturatu zirenean. Izan ere, erdiko hodiaren irekidurek harea iturgunera igarotzea ahalbidetzen dute eta, beraz, pilaketak ekiditen dira. Harearen lehorketarako egin ziren saiakuntzetan irekidura handiagoko hodiekin funtzionamendu egokiagoa zutela ikusi zen.

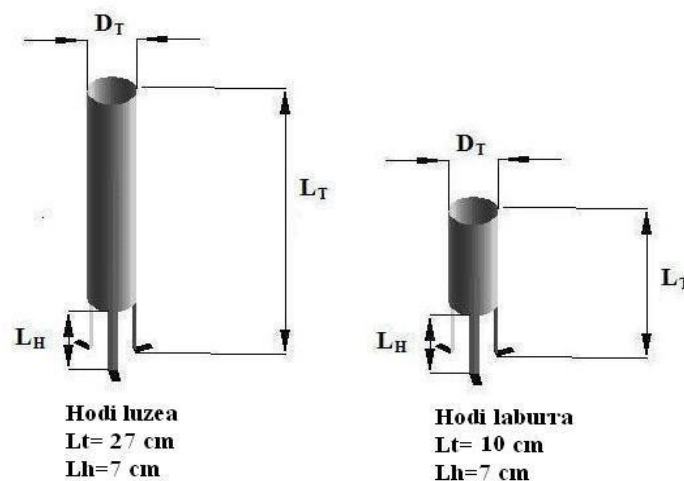
Erdiko hodiaren eginkizun nagusia solidoak eraztungunean mantentzea da, ohandzearen altuera ohiko iturri ohandzeekin konparatuz handitu ahal izateko eta presio galera txikitzeke. Ildo beretik, erdiko hodiaren beste helburu bat iturri ohandzeen egonkortasuna eta malgutasuna hobetzea da. Erdiko hodiaren bidez, partikulek iturgunera sartu aurretik eraztungunearen luzera osoa zeharkatu behar dutenez,

partikularen mugimendua askoz kontrolagarriagoa eta erregularragoa izatea lortzen da. Horrela, partikulek antzeko ibilbidea egiten dute, hots, euren ziklo denborak berdintsuak dira (Buchanan eta Wilson, 1965; Krambrock, 1976).

Erdiko hodiak iturri ohandzeetan partikulen zirkulazio emaria eta jariakinaren zirkulaziorako abiadura minimoa ohiko iturri ohandzeetan baino txikiagoak dira (Grbavcic et al., 1992). Horretaz gain, solidoaren zirkulazioa, partikularen ziklo denbora eta gas sakabanaketa ohandzearen oinarritik erdiko hodiaren beheko alderaino dagoen gunearen arabera dira (Altzibar et al., 2008).

Iturri ohandzeek aldakortasun handia duten arren, ohandzearen ezegonkortasunagatik egoera batzuetan gas-solido kontaktua ez da nahi bezalakoa eta erdiko hodia ezinbestekoa da gas-solido kontaktua hobetzeko.

Ohiko erdiko hodia hodi ez-porotsua da. Hodi mota honek itxura zilindrikoa eta gorputz solidoa du eta bere gorputzaren altuera ohandzearen altuerarekin bat etortzea saiatzen da, solidoak hoditik irtetea oztoporik ez aurkitzeko. Hodi ez-porotsua gasaren sarreratik distantzia jakin batetara kokatzen da. Bibliografian gasaren sarreraren eta erdiko hodiaren beheko aldearen arteko distantziari sarrerako gunearen altuera deritzen. Gure ikerkuntza taldean, baita tesi honetan ere, distantzia horri erdiko hodiaren hanken luzera (L_H) deitzen zaio, sarrerari lotutako hankek eusten baitiote hodiari. Sarrerako gune hau ohandzearen eraztungunean (erdiko hodiaren inguruan) dauden partikulek iturgunera pasatzeko zeharkatzen dute. Eraztungunetik iturgunera pasatzen den solido kantitatea erdiko hodiaren hanken luzeraren arabera da. Hortaz, hanken luzera handitzean, eraztungunetik igotzen den aire emaria handiagoa izango da, solidoaren zirkulazio abiadura handiagoa izango da (Zhao et al., 2006; Neto et al., 2008; Cunha et al., 2009; Da Rosa et al., 2009; Wang et al., 2010a) eta eraztungunetik iturgunera partikula gehiago pasako dira. Hori dela eta, operazioan eragin handiena duen hodi ez-porotsuaren faktorea, hodiaren hanken luzera da.

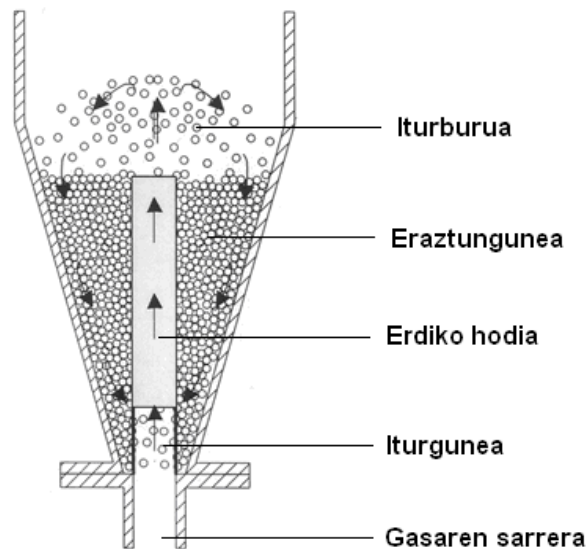


1.6. Irudia. Erdiko hodi luzea eta laburraren eskemak.

Gure ikerkuntza taldean (Amasorrain, 2005) ohartu ginenez, saiakuntzetan erdiko hodi luzeak eta laburrak (1.6 Irudia) erabiliz gero, alde batetik, erdiko hodi luzeak erabiltzean solidoaren zirkulazio eskasa lortzen da eta, bestetik, erdiko hodi laburrak erabiltzean sortutako iturriaren joera ezegonkor samarra da. Ondorioz, luzera ezberdineko erdiko

hodie eraikuntza materialak lehortzerakoan arazoak ematen zituzten. Handik aurrera, erdiko hodi luzeak eta laburrak eragiten zituzten arazoak ekiditeko, gure ikerkuntza taldean ohantzearen altueraren antzeko altuera zuten erdiko hodiak erabiltzen hasi ziren. Dena den, gasa garrantzitsua den prozesuetan, bero transmisioan edo erreazio kimiko ezberdinetan bezala, erdiko hodia erabiltzean gas iturria ezin denez iturgunetik eraztungunera pasatu, gas-solido ukipena murriztagoa da (Claflin eta Fane, 1983).

1.7 Irudian erdiko hodiak iturri ohantzean duen kokapena erakusten da. Erdiko hodia, ohantzearen erdian kokatzen den hodia da, sarrerako gasaren norantzan lerrokatuta, iturria aire korrontean sartu ahal izateko. Erdiko hodia sisteman kokatuz gero, iturgunera eraztungune fasearte erdiko hodiaren hormaz banaturik geratzen da, sarreran izan ezik.



1.7. Irudia. Erdiko hodiaren iturri ohantzearen eskema.

Bestalde, erdiko hodiaren gabeko iturri ohantzeetan, iturgunea uneoro eraztungunearekin kontaktuan dago ohantzearen altuera guztian eta beraz, inguratzen duen eraztungunea eusteko gai izan behar du. Horretarako iturgunak izan behar duen presioak eraztungunekoak baino zertxobait handiagoa izan behar du eta honen ondorioz, iturgunetik eraztungunera gasa pasarazten duen indar bultzatzailea sortzen dela uste da. Ohantze handiak erabiltzen direnean iturgunak ezin du eraztungunea eutsi eta iturri ohantze erregimena gelditu egiten da, eskala handitzea eragotziz. Iturgunea gelditu aurreko ohantzearen altuerari, iturritu daitekeen ohantzearen altuera maximoa deritzo (Mathur eta Gishler, 1955a). Erdiko hodia ohantzean kokatzen denean, berriz, aipatutako altueraren muga hori ez dago, hodiak eraztunguneari eusten baitio. Kontuan izanik erdiko hodiak kostu txikiko gailuak direla eta iturri ohantzeen funtzionamendu hidrodinamikoak optimiza dezaketela, industria mailan erdiko hodiaren gabeko iturri ohantzeak gutxitan erabiltzen dira.

Honen guztiaren ondorioz, ohiko iturri ohantzean erdiko hodia erabiltzeak hurrengo abantailak ditu (Buchanan eta Wilson, 1965; Muir et al., 1990; Konduri et al., 1999; Ishikura et al., 2003; Luo et al., 2004; Swasdisevi et al., 2004, 2005; Neto et al., 2008; Zhao et al., 2008):

- Gas jarioaren eta presio galeraren murrizketa.

- Edozein tamaina eta izaerako solidoak (partikula tamaina oso txikiekin eta tamaina banaketa duten materialekin lan egitea ahalbidetzen du) erabili ahal dira.
- Partikulen egoitza denboraren distribuzio mugatuagoa.
- Solidoaren zirkulazioaren kontrol hobea.
- Operazio malgutasun handiagoa, erabil daitekeen ohandzearen altuera askoz ere handiagoa baita (iturritu daitekeen ohandzearen altuera maximoa ekiditen baita).
- Operazioko karga galera eta iturkuntza abiadura minimoa nabarmen murrizten ditu. Era honetan, solidoaren zirkulazioa kontrola daiteke zutabearen diametroa, ohandzearen altuera edo partikula diametroa aldatuz.
- Burbuilen arazoa ekiditen du.

Azken abantailaren zergatia Littman et al.ek (1977) adierazi zuten, gas-solido sistemetan erdiko hodirik gabe lan egitean iturgunean burbuilak sortzen zirela ikusi baitzuten.

Aplikazioei dagokionez, erdiko hodia erabiltzen deneko lehorketa saiakuntzak erdiko hodirik gabeko saiakuntzekin konparatuz, lehorketa prozesua azkarragoa da eta behar den gas emaria txikiagoa da (Altzibar et al., 2008). Beraz, erdiko hodia erabiltzeak kosteak murrizten ditu.

Aldaera guztiak bezala erdiko hodiak abantailak izateaz gain, ondorengo desabantailak ere baditu:

- Bero eta masa transferentzia txikiagoa.
- Nahaste maila txikiagoa.
- Diseinuaren konplexutasuna.
- Erdiko hodiaren buxadura arriskua.
- Birzikulazio denbora luzeagoa.
- Gas-solido kontaktuaren murrizketa.

Horretaz gain, lehen esan den moduan, erdiko hodia erabiltzeak partikulen zirkulazioaren denbora luzatu egiten du (Muir et al., 1990; Ando et al., 2002; Zhao et al., 2006).

Erdiko hodiaren abantailak esker aplikazio askotan eta oso ezberdinetan erabili izan da: nahaste prozesuetan (Krambrock, 1976), olio astunen ultrapirolisian (Vogiatzis et al., 1988), hidrokarburoen pirolisian (Stocker et al., 1989), lehorketan (Khoe eta Brakel, 1983; Pham, 1983; Hattori et al., 2001; Ando et al., 2002; Szafran eta Kmiec, 2004;

Arsenijevic et al., 2004; Marmo et al., 2007; Evin et al., 2008; Liu et al., 2008; Altzibar et al., 2008; Souza eta De Oliveira, 2009; Altzibar et al., 2011), ikatzaren gasifikazioan (Uemura et al., 1992; Hatate et al., 1996), garraio neumatikoan (Ferreira eta Freire, 1992; Milne et al., 1992; Pugsley et al., 1996; Ijichi et al., 1998), errekuntzan (Konduri et al., 1995, San José et al., 2004), partikulen estalduran (Ijichi et al., 2000) eta bero transmisioan (Freitas eta Freire, 2001a, b), besteak beste.

Aurrean esan denez, ohiko erdiko hodia ez-porotsua da, baina horrek ez du esan nahi bestelako erdiko hodirik ez dagoenik. Bibliografian zenbait erdiko hodi mota daude eta gure ikerkuntza taldean hiru erdiko hodi mota erabili dira: hodi ez-porotsua, hodi porotsua eta irekiduradun hodia (diseinatu den berriena). Hiru erdiko hodi mota hauen irudiak eta dimentsioak atal esperimentalean aurkeztuko dira eta emaitzen kapitulu ezberdinetan beraien erabilerak eragiten dituen efektuak aditzera emango dira. Horregatik, atal honetan erdiko hodiak ez dira zehatz aztertuko, beraien garapena ulertzeko beharrezko diren aspektuak komentatuko dira soilik.

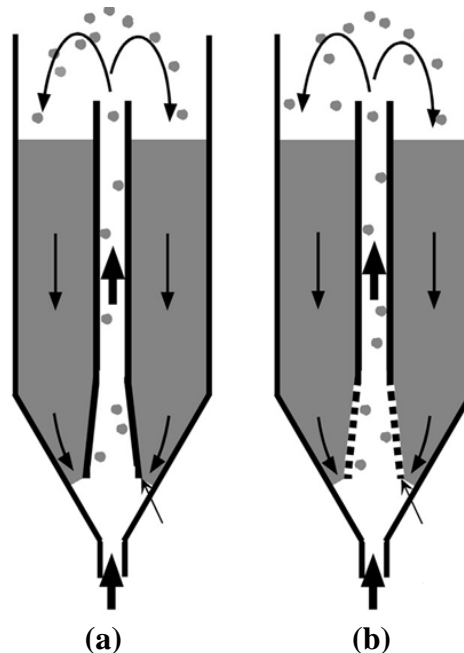
Erdiko hodi motak lehenengo banaka deskribatuko dira eta gero euren artean konparatuko dira erdiko hodi mota bakoitzaren alde onak eta alde txarrak hobeto ulertzeko. Hodi ez-porotsuek operaziorako behar duten gas emaria eta karga galera txikiak izateaz gain, euren onura nagusiena operazio baldintzak edozein direlarik ere lortzen den ohantzearen egonkortasun handia da. Hodi porotsuak iturgunetik eraztungunera aire emari handiagoa pasatzea nahi den kasuetan erabiltzen dira, eraztungunean gertatzen den bero transferentzia hobetzen dutelarik (Wang et al., 2010b). Irekiduradun hodiekin gasa iturgunetik eraztungunera eta solidoa eraztungunetik iturgunera ohantzearen altuera guztian zehar pasatzea ahalbidetzen dute (Altzibar et al., 2008, 2009). Irekiduradun hodian alde onen artean gas emari gutxiago behar izatea, solidoaren zirkulazioa azkartzea eta iturria egonkortzea daude.

Laburki azalduta, hodi ez-porotsuek gas-solido ukipen eskasena bideratzen dute, eraztungunetik aire emari oso txikia igotzen baita, irekiduradun hodiekin kontaktu hoberena ahalbidetzen dute eta hodi porotsuek bien artekoa, gasa iturgunetik eraztungunera pasatzea ahalbidetzen baitute, baina solidoa eraztungunetik iturgunera sartzea galarazten baitute hodiaren hanken gunean izan ezean. Izan ere, aurretik definitu den moduan, hodi ez-porotsuek hankak dituen gorputz solidoa dute, irekiduradun hodiekin (izenak dioen bezala) hanken arteko irekidurak (portzentaje ezberdinetakoak daude) dituzte goitik behera eta hodi porotsuak zulodun metalezko sare batez osatuta daude. Era honetan, erdiko hodi mota bakoitzak bereizten duena zilindroaren irekiduraren distribuzioa eta proportzioa da. Erdiko hodi motaren aukera egokia lortu nahi den jariakinaren portaeraren menpekoa da.

Erdiko hodi porotsuek hodi ez-porotsuekin konparatzen badira, gas-solido ukipen hobeak dute eta zirkulazio emari altuagoak lortzen dituzte (Ishikura et al., 2003; Nagashima et al., 2009; Wang et al., 2010b). Irekiduradun hodia erabiliz lortutako gas-solido ukipena, aldiz, erdiko hodi porotsuaz baliatuz eskuratutakoa baino hobeak da eta sortzen diren iturriak baxuagoak eta dentsitateak dira (Altzibar et al., 2009).

Arestian aipatu da bibliografian zenbait erdiko hodi mota daudela eta horien adibide Nagashima et al.ek (2009, 2013) beraien ikerketan erabili zituzten erdiko hodiak dira. Bereziki, orain arte existitzen ez ziren bi erdiko hodi dira, ohiko hodi ez-porotsuaren eta ohiko hodi porotsuaren aldaera ezberdin bana. 1.8 Irudian ikus daitezkeen bezala, bi hodi

koniko zilindriko ezberdin erabili zituzten. Batek zati konikoa porotsua eta zati zilindrikoa ez-porotsua du eta besteak zati konikoa zein zilindrikoa ez-porotsua du. Behealdea konikoa eta goialdea zilindrikoa duen erdiko hodi porotsuaren abantaila nagusia gasaren eta solidoaren arteko kontaktua hobetzeaz gain, solidoaren zirkulazio abiadura nabarmen handitzean datza. Beste hodiekin erkatuz gero, erdiko hodi porotsu honen desabantailak: iturkuntza abiadura minimoa eta karga galera handiagoak dira.



1.8. Irudia. Behealdeko zati konikoa eta goialdeko zati zilindrikoa duen erdiko hodi ez-porotsua (a) eta behealdeko zati konikoa porotsua eta goialdeko zati zilindrikoa hodi ez-porotsua (b) duen erdiko hodidun iturri ohandzeak (Nagashima et al., 2013).

Orain arte aipatu diren erdiko hodiaren eraginak, batez ere erdiko hodi ez-porotsuari dagozkie, baina erdiko hodi mota guztiek ez dituzte beti efektu berberak. Horrela, erdiko hodi ez-porotsuek gas-solido kontaktu eskasa ahalbidetzen dute, baina erdiko hodi porotsuek kontaktu hori hobetu egiten dute ez-porotsuen abantailak ere badituztela. Izan ere, erdiko hodi ez-porotsuak gasari eraztungunera pasatzen uzten ez dion bitartean, erdiko hodi porotsua iragazkorra da eta iturgunean zehar gasa eraztungunera pasatzea ahalbidetzen du. Tenperaturaren eraginari dagokionez, operazio tenperatura igotzeak iturritu daitekeen altuera maximoa murriztea dakar tenperatura altuan lan egiten duten erreaktoreen operagarritasuna mugatuz, baina sistema horretan erdiko hodi porotsua kokatzean iturritu daitekeen altuera maximoaren arazorik ez dago (Wu et al., 1987).

Hodi porotsuaren bibliografiari dagokionez, Pallai eta Nemeth (1972) izan ziren erdiko hodi porotsua ikerketetan erabili zituzten lehenengoak. Claflin eta Fane-k (1983, 1984) hodiaren barnetik gasak eraztungunera pasatzeko ahalmena ikertu zuten erdiko hodi porotsu moduan irekidura erlazio handia duen bahe zilindrikoa erabiliz. Hattori eta Nagai-k (1996) eta geroago Hattori et al.ek (1998) erdiko hodidun iturri ohandzearen ezaugarriak aztertu zituzten gas emari uniformea eta sarrerako zulo aldatua erabiliz. Ikerketa horietan, eraztungunean zehar doan gasaren emaria nabarmen handitzen zela ikusi zuten. Ishikura et al.ek (1996, 2003) iturri ohandzearen ezaugarriak aztertu zituzten erdiko hodi porotsua eta material moduan partikula handi eta finen nahaste bitarrak

erabiliz. Azken azterketa horretatik iturgunetik eraztungunera pasatzen zen gas emaria ohiko iturri ohandzeetan pasatzen zenaren %50-80 txikiagoa zela ondorioztatu zuten.

Atal honetan zehar, frogatua geratu da erdiko hodi-dun iturri ohandzeek ohiko iturri ohandzeekiko dituzten onurak. Gainera, zenbait material (adibidez, finak) erabiltzen diren kasuan, beharrezkoa da erdiko hodia erabiltzea erdiko hodi-rik gabe ohandzearen funtzionamendua ez bailitzake egokia izango. Olazar et al.ek (1992) erdiko hodi-rik gabeko iturri ohandze konikoetan era egonkorrean lan egiteko baldintza aurkitu zuten, zehazki gasaren sarrerako diametroaren eta partikula diametroaren arteko erlazioak 20-30 baino txikiagoa izan behar duela. Gasaren sarrerako diametroa erlazio horri dagokiona baino handiagoa bada, burbuila handiak igoko dira ohandzean zehar eta ez da iturgunerik eratuko eta iturburua ez da egonkorra izango. Kasu horietan, iturri ohandze erregimena lortzeko eta egonkor operatzeko, erdiko hodia sartu behar da halaberrez.

Gainera, erdiko hodia aukera interesgarria da iturri ohandzeen portaera hidrodinamikoak optimizatzeko, bereziki eskala handitzeko, sinplea eta kostu txikiak baita. Horretaz gain, erdiko hodiekin sistemen malgutasuna handitzen dute. Hala ere, iturri ohandzeari buruzko artikulua askotan eskala handitzeari aipamena egiten zaion arren, ez da zehazten prozedura eta, beraz, ez dago argi zein den iturri ohandzearen tamaina maximo erabilgarria (Epstein eta Grace, 2011).

Iturri anitzeko ohandzeak etorkizun handiko geometria izan daitezke eskala handitzearen erronkari ekiteko, baina oraindik fase esperimentalean daude. Lehen aipatu den bezala, CFD teknika egokia izan daiteke iturri ohandzea simulatzeko eta bereziki eskala handitzeko, batez ere lehen prototipoa diseinatzeko (Hosseini et al., 2014).

Eskala handitzean eman diren aurrerapenak ez dira gauzatu iturri ohandzeen portaera fluidodinamikoaren ulermen faltagatik. Arazo nagusia bi faseko gas-solido fluxu korapilatsua zehazki ebaluatzeko zailtasunean datza. Gainera, iturri ohandze handietarako proposatu diren ekuazio enpirikoak eta erdi-enpirikoak ez dituzte diseinu aldagai gehienak ondo aurreratu (Bettega et al., 2009). Horregatik, eskala handitzearen arazoa oraindik ez da konpondu eta, beraz, iturri ohandzea ia ez da aplikatu eskala handiko prozesu industrialetan.

1.2.2. Iturri ohandze fluidizatua

Iturri ohandze fluidizatua (ingelesez "spout fluid bed") gas-solido kontakturako eta nahasketarako hobekuntza nabaria da ohiko iturri ohandzeen aldean (Chatterjee, 1970; Madonna et al., 1983; Sutanto et al., 1985).

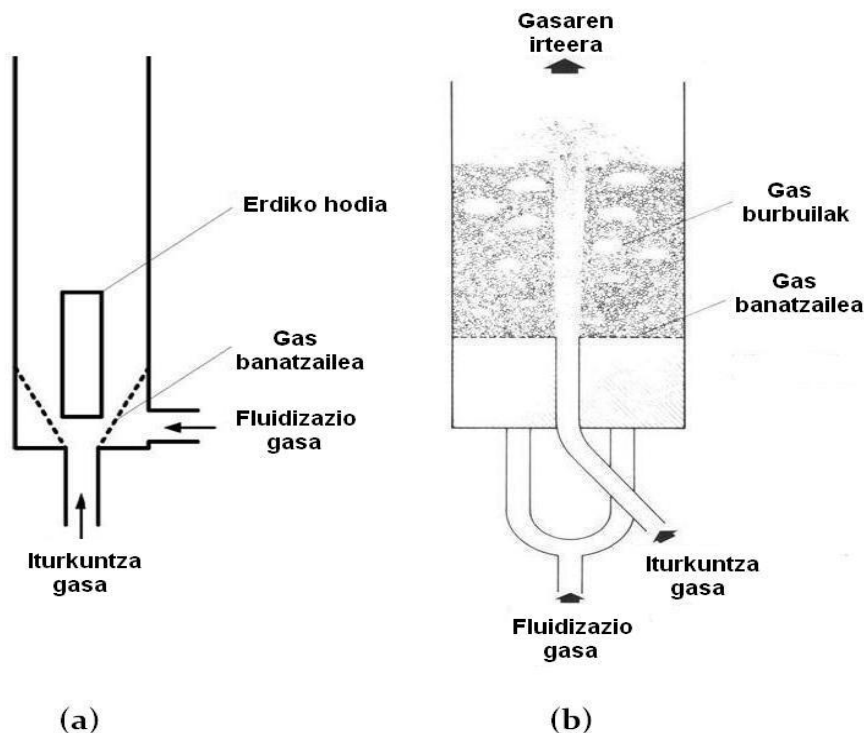
Teknika honen bibliografiari erreparatzen bazaio, iturri ohandze fluidizatua aspalditik aztertua da eta gaur egun ere maiz erabilia da. Teknika sortu zenetik gaur egun arte ikerketa teoriko eta esperimental asko egin dira iturri ohandze fluidizatuen ezaugarri hidrodinamikoak hobeto ezagutzeko asmoz. Heil eta Tels-ek (1983) iturri ohandze fluidizatuetako presio banaketa ikertu zuten. Vukovic et al.ek (1984), Sutanto et al.ek (1985) eta Zhao et al.ek (1987a) iturri ohandze fluidizatuen erregimenak ikertu zituzten. Anabtawi et al.ek (1992, 1993) iturkuntzarako abiadura minimoa eta iturkuntza-fluidizaziorako abiadura minimoa ikertu zituzten. He-k (1990) eta Pianarosa et al.ek (2000) iturri ohandze fluidizatuen porotasuna ikertu zuten.

Arestian aditzera eman diren zenbait autorek, urte berean ikerkuntza ugari egin zituzten. Hala, Sutanto et al.ek (1985), Pianarosa et al.ek (2000), Anabtawi et al.ek (1992) eta He et al.ek (1992) iturri ohandze fluidizatuetao partikulek duten abiadura ikertu zuten eta zerrendatutako lehenengo bi autoreek gas emaria ere aztertu zuten.

Aurreko paragrafoan aipatutako autoreek simulazioari ere ekin zioten urte berean, bereziki, He-k (1990) eta Pianarosa et al.ek (2000) iturburuaren ezaugarriak, Sutanto et al.ek (1985), He et al.ek (1992) eta Pianarosa et al.ek (2000) iturgunearen itxura eta diametroa, Waldie-k (1992) eta Xiao et al.ek (2002) partikulen mugimendua eta Yuan-ek (2000) iturri ohandze fluidizatuaren zenbakizko simulazioak egin zituen.

Iturri ohandze fluidizatueta iturkuntza eta fluidizazioa batera gertatzen diren gas-solido ohandze bakarra da. Teknika honen xedea, ohandze fluidizatueta eta iturri ohandzeek dituzten abantailak bateratzea eta euren mugak gaintzea da, hala nola, estratifikazioa edo "slugging" efektua, eraztunguneko solidoaren jario eskasa eta iturri ohandzearen ezegonkortasunak. Iturri ohandze fluidizatuaren teknika beste edozein gas-solido kontakturako teknikarekin erkatuz, solido eta gasaren zirkulazioa eta nahaste abiadura handiagoak ditu. Beraz, erabil daitekeen gas emariaren tartea zabalagoa izango da eta iturkuntzaren edo fluidizazioaren kontrol hobea (Chatterjee, 1970).

Iturri ohandze fluidizatueta, 1.9 Irudian ikus daitekeen bezala, oinarri konikoa (a) edo laua (b) duen zutabe zilindrikoa da. Kontaktorearen oinarrian, zehatz-mehatz erdian, iturkuntzarako gasaren sarrera dago eta honen inguruan era uniformean banaturiko zuloak dituen plaka banatzailea dago fluidizazioarako gasa eraztungunera sarrarazteko.



1.9. Irudia. Oinarri konikoa (a) eta laua (b) dituzten iturri ohandze fluidizatuaren eskemak.

Teknika honen lehenengo saiakuntzak 0.05 m-ko diametroa duen beirazko zutabearen egin ziren tamaina ezberdineko harea eta ikatza erabilita. Gainera, airea iturkuntza-

fluidizaziorako jariakin moduan erabili zen (Chatterjee, 1970). Saiakuntza horietan 0.00108 m-ko diametroa duen harea erabili zen, eta iturkuntza-fluidizaziorako behar den aire emaria iturkuntzarako behar dena baino %16 handiagoa dela eta fluidizaziorako behar dena baino %39 handiagoa dela ondorioztatu zen.

Iturri ohandze fluidizatuaren iturkuntza edo fluidizazioa eusteko behar den aire emari minimoa, ohandze guztia baldintza minimoetan iturritzeko edo fluidizatzeko baino txikiagoa da. Beste modu batera esanda, sortzen den erdiko gunea eraztungune fluidizatuan zeharreko jariakinaren fluxuaz lagundurik dago eta eraztungune fluidizatua, berriz, iturriko jariakinaren fluxu sekundarioz lagundurik dago. Iturri fluidizaziorako airearen abiadura minimo totala, iturkuntza abiadura minimoaren eta fluidizazio abiadura minimoaren batura baino %36 txikiagoa da sistema berdinerako (Chatterjee, 1970). Logikoki, ezin daiteke espero teknika honek iturkuntza eta fluidizazioaren ezaugarri berdinak edukitzea jariakinaren hornikuntza gehigarririk gabe. Hortaz, jariakinaren hornikuntza gehigarria konbinatzen diren bi tekniken abantailak lortzeko erabiltzen da, hots, solidoen eta jariakinaren nahaste abiadura handiagoa lortzeko. Horrela, diametro eta dentsitate ezberdinetako partikula nahasteetan ez da estratifikaziorik gertatzen iturri ohandze fluidizatuan. Ezaugarri hau garrantzitsua da partikula erreakzionatzaileekin lan egiten denean edota propietate fisikoak eta kimikoak aldatuz doazkien partikulekin lan egiten denean (tostazioan, errausketan eta gasifikazioan, esate baterako).

Iturri ohandze fluidizatua ohandze fluidizatuarekin alderatuz gero, zutabea diametro txikikoa izan arren (0.05 m), jariakinaren emari tarte handiagoan lan egin daiteke (Chatterjee, 1970). Ohantze fluidizatuan emari tartetik gora lan egitean "slugging" bezalako efektuak gertatzen diren bitartean, iturri ohandze fluidizatueta, aldiz, ez da horrelako efekturik agertzen edozein delarik ere erabiltzen den jariakinaren emaria. Horren ondorioz, emari tarte handiagoan lan egiteko iturri ohandze fluidizatua erabilgarriagoa da gasaren egoitza denbora txikiagoa delako eta gas-solido kontaktu handiagoa lortzen delako.

Ildo beretik, iturri ohandze fluidizatua ohiko iturri ohandzeekin konparatzean, gas-solido kontaktua hobea da, hau da, ohiko iturri ohandzeen desabantaila nagusia gainditzen da. Izan ere, eraztungunera sartzen den fluidizaziorako jariakinaren eraginez, murriztu egiten dira eraztunguneari gertatzen den solidoen paketamendua edo aglomerazioa, gune hilak eta kontaktorearen horman itsasteko probabilitatea (Lim et al., 1988; Pianarosa et al., 2000).

Azken urteetan iturri ohandzeen interesa gero eta handiagoa izan da petrokimika, kimika eta metalurgia industrietan (Arnold et al., 1992; Pianarosa et al., 2000; Zhong eta Zhang, 2005a). Hori dela eta, azkenengo hoge urteetan ikerkuntza esperimentera eta teoriko baliagarri ugari egin dira (Xiao et al., 2007; Link et al., 2005, 2007; Zhao et al., 1987a, b; Grbavcic et al., 1991; Zhong et al., 2006d). Ikerkuntza horien ondorioz, Kanadako British Columbia Unibertsitateko (UBC) taldeak paper adierazgarria izan du iturri ohandze fluidizatuaren ulermen eta aplikazioan (Lim et al., 1988; Pianarosa et al., 2000; Sutanto et al., 1985; Zhao et al., 1987a, b; He et al., 1992; Ye et al., 1992). Ikerkuntza horien beste adibide bat Txinako Southeast Unibertsitatea (SEU) da, non hainbat ikerkuntza egin diren iturri ohandze fluidizatuaren ezaugarri hidrodinamikoak eta erreakzio kimikoak aztertzeko (Xiao et al., 2002; Zhong eta Zhang, 2005a, b, c; Zhong et al., 2006a, b, c, 2008).

Bereziki, Zhong et al.ek (2006a) aztertu dute ohantzearen altuerak, partikulen propietateak, iturkuntzarako gasaren sarrerako diametroak eta fluidizaziorako gasaren abiadura karga galeran, iturkuntzarako karga galera maximoan, iturkuntza abiadura minimoan eta iturkuntza-fluidizaziorako abiadura minimoan duten eragina. Azken autore hauen arabera, ohantzearen altuera eta partikularen dentsitatea handiago direnean, iturri ohantzearen erregimena hasteko behar den iturkuntza karga galera maximoak gora egiten du, baina partikula diametroa, gasaren sarrerako diametroa eta fluidizaziorako gasaren abiadura handiago direnean, behera egiten du. Iturkuntza eta iturkuntza-fluidizaziorako abiadura minimoak, berriz, handiago dira ohantzearen altuera, partikula diametroa eta iturkuntzarako gasaren sarrerako diametroa handiago direnean. Autore berberak efektu hauek kontuan dituzten korrelazioak garatu zituzten iturkuntza-fluidizaziorako abiadura minimoa eta iturkuntza abiadura minimoa auresateko iturri ohantze fluidizatuetan.

Urte berean, Zhong et al.ek (2006b) iturri ohantze fluidizatuetan iturritu daitekeen ohantzearen altuera maximoa ere ikertu zuten. Horretarako, partikula tamainak, gasaren sarreraren tamainak eta fluidizaziorako gasaren emariak iturritu daitekeen ohantzearen altuera maximoan duen eragina aztertu zuten. Horrela, partikula tamaina eta gasaren sarrera tamaina handiagoa denean, iturritu daitekeen ohantzearen altuera maximoak behera egiten duela eta fluidizaziorako gasaren abiadura gora egiten duenean iturritu daitekeen ohantzearen altuera maximoak nabarmen behera egiten duela ondorioztatu zuten. Era berean, Txinako Southeast Unibertsitatean hainbat aplikazio garatu zituzten iturri ohantze fluidizatuetan, hala nola, desulfurizazioa, CO₂-aren bahiketa eta ikatz eta biomasaren errektantza eta gasifikazioa.

Erdiko hodiak iturri ohantzearen kasurako esan den bezala, sistema honetan ere erdiko hodia kokatuz iturritu daitekeen ohantzearen altuera maximoa gaintu egin daiteke. Horrela, Taskaev eta Kozhina-k (1965) erdiko hodiak iturri ohantze fluidizatua deskribatu zuten lehenengo aldiz, tenperatura baxuko ikatzaren karbonizaziorako. Ondoren, aplikazio asko eta oso ezberdinetarako erabili izan da aldaera hau, hala nola, ikatzaren gasifikazioan (Xiao et al., 2002), esekiduren lehorketan eta tratamendu termikoan (Arsenijevic et al., 2004; Osorio-Revilla et al., 2004; Marmo, 2007), produktu farmazeutiko eta nekazaritza produktuen enkapsulamenduan (Saadevandi eta Turton, 2004) eta aleketan (Epstein eta Grace, 1997), partikulen nahasketan (Park et al., 2006) eta erreakzio katalitiko heterogeneoetan (Follansbee et al., 2008).

Iturri ohantze fluidizatuan erdiko hodia erabiltzeak ohiko iturri ohantzeetan eragiten dituen antzeko abantailak ditu. Hala, Littman eta Morgan-ek (1986) iturritu daitekeen ohantzearen altuera maximoaren muga gaintuzten dela frogatu zuten. Izan ere, iturri ohantze fluidizatuan erdiko hodia erabiltzean, iturkuntza-fluidizaziorako abiadura minimoa txikiagoa da eta partikula guztiak iturgunera sartu aurretik eraztungunearen luzera guztia zeharkatzera behartzen dira. Ondorioz, partikulen egoitza denboraren banaketa estuagoa da.

Askoz geroago, Xu et al.ek (2009) erdiko hodiaren faktoreak eta operazio baldintzek iturri ohantze fluidizatuen iturkuntza abiadura minimoan duten eragina ikertu zuten eta iturkuntza abiadura minimoa kalkulatzeko korrelazioa proposatu zuten. Euren arabera, fluidizaziorako gas emari handiagoa erabiliz, iturkuntzarako abiadura minimo txikiagoa behar da. Oostera, iturkuntzarako gasaren sarrerako diametroa, hodiaren hanken luzera

eta ohandzearen altuera handiagoak direnean, iturkuntzarako abiadura handiagoak behar dira.

Dena den, iturri ohandze fluidizatuen ezaugarri hidrodinamikoaren erabateko ezagutza ezagatik, oraindik zail da teknika hau eskala handiko prozesu industrialetan aplikatzea. Horretaz gain, iturri ohandze fluidizatua ohandze fluidizatu eta iturri ohandze tekniken arteko konbinazioa denez, ezaugarri hidrodinamikoak bi teknika horiena baino konplexuagoak dira. Beraz, nahiz eta ikerketa asko egin diren, ez dira nahiko iturri ohandze fluidizatuen ezaugarri hidrodinamikoak guztiz ezagutzeko.

Azkenik, iturri ohandze fluidizatuaren eta iturri ohandzearen arteko ezberdintasun nagusienetarikoa hurrengo taulan bildu dira (Cui eta Grace, 2008).

1.1. Taula. Iturri ohandze fluidizatuaren eta iturri ohandzearen arteko ezberdintasunak (Cui eta Grace, 2008).

Aldagaiak	Iturri ohandze fluidizatua	Iturri ohandzea
Batez besteko partikula tamaina	~0.03-3 mm normalean <1 mm	~0.6-6 mm normalean >1 mm
Partikula tamaina distribuzio	Normalean zabala	Normalean estua
Presio karga galera/ ohandzearen altuera	Partikulak eusteko behar denaren %96-100	Partikulen pisua eusteko behar denaren ~%75 baino gutxiago
Zutabearen geometria	Normalean zutabe zilindrikoak	Normalean oinarri konikoa goialdean zati zilindrikoarekin edo zilindrikorik gabe
Zulo kopurua	Zulo asko	Normalean zulo bakarra
Zuloen orientazioa	Gehienetan horizontala	Beti gorantz begira
Partikulen segregazioa	Oso eskasa, baldin eta partikulak ondo fluidizatuta dauden	Adierazgarria, partikulen tamaina eta dentsitatearen arabera
Atrizioa	Normalean eskasa, zikloian eta erregimen diluituan izan ezik	Adierazgarria iturgunean eta iturburuan
Ohandze sakonera	Sakonera tarte zabala, adibidez, 0.1 m-tik 20 m-ra	Sakonera tarte mugatuagoa, normalean 0.2 m-tik 2 m-ra
Zeharkako sekzioaren gas abiadura	Tarte zabala, ohikoa $(u-u_{mf})= 0.2$ m/s-tik 10 m/s-ra	Sakonera tarte mugatuagoa, ohikoa $(1.1-1.8)u_{ms}$

1.2.3. Erdiko hodia duen alboko irteeradun iturri ohandzea

Iturri ohandzearen aldaera honi erdiko hodia duen alboko irteeradun iturri ohandzea deritza (ingelesez "side-outlet spouted bed with inner draft tube"). Hattori eta Takeda-k (1976, 1978) proposatu eta deskribatu zuten lehenengo aldiz iturri ohandzearen aldaera hau. Autore horien ustez, aldaera honek gasaren eta solidoaren arteko kontaktua hobetzen du eta gas eta solidoen prozesamendurako eraginkortasun handiagoa ahalbidetzen du.

Euren arabera, aldaera honek ere ohiko iturri ohantzeek duten antzeko ahalmena du partikula luze eta itsaskorrak prozesatzeko.

Hattori eta Takeda espero zuten bezala, aldaera honen onura nagusietariko bat lortzen den gas-solido kontaktu onean datza (Hattori et al., 1981). Horren azalpena alboko irteera ohantzearen maila baino beherago egotean datza, hau da, irten aurretik gas guztia eraztungunean zehar eta, beraz, partikulen artetik pasatzera behartzen baita. Hortaz, gas emariak egiten duen bide honek gas-solido kontaktua eraginkortasun handikoa izatea eragiten du. Ohiko iturri ohantzeetan, aldiz, gasaren zati batek soilik gurutzatzen du solidoen ohantzea eta, ondorioz, lortzen den gas-solido kontaktua ez da hain ona.

Iturri ohantzeetan bezala, aldaera honetan ere erdiko hodiak iturri ohantzearen erregimena lortzeko behar den karga galera murriztu egiten du, baita alboko irteeraren efektua hobetu ere, gas emariaren banaketa hobea baita eta solidoaren ziklo denboraren banaketa uniformeagoa, hots, eraztunguneko solidoek iturgunean bide laburrik ez egitea eragiten baita (Brereton et al., 1996).

Alboko irteeradun iturri ohantzeen beste abantailetakoa bat lehenengo ordenako erreakzio katalitikoetan gasaren konbertsio maila altuak lortzean datza (Takeda, 1976). Hattori eta Takeda-k (1978) frogatu zuten, tamaina txikiko katalizatzaile solidoekin lan egitean, iturri ohantzearen aldaera honekin erreakzio heterogeneoetan lortzen den gasaren konbertsio maila beste edozein iturri ohantzerekin lortzen dena baino handiagoa da. Gainera, erdiko hodirik gabeko erreakzio katalitikoetan lortzen den gasaren konbertsio maila txikiagoa dela frogatu zuten.

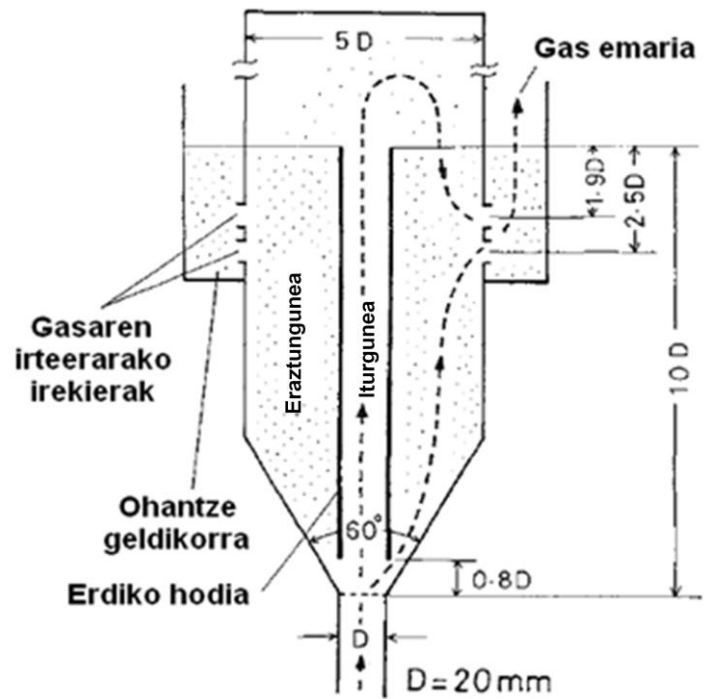
Ildo berean, aldaera honen beste alde on bat, partikula finak tratatzeko ahalmena da (Hattori eta Takeda, 1978). Izan ere, iturkuntza egonkorra lortu ahal izateko erabil daitekeen partikulen tamaina mugaturik dago ohiko iturri ohantzeetan (edo goiko irteera duten iturri ohantzeetan) edota erdiko hodirik gabeko alboko irteeradun iturri ohantzeetan (erabiltzen den solidoak milimetro batzuetakoa izan behar du).

Partikula finak erdiko hodirik gabe tratatzea zaila da iturria erraz buxatu egiten delako. Hori dela eta, arazo hori ekiditeko erdiko hodia erabiltzen da (Takeda eta Hattori, 1975). Lim eta Mathur-ek (1974), ordea, gas faseko erreakzio homogeneoetan partikula handiekin operatzean erdiko hodia erabiltzeak ekarpenik egiten ez zuela aditzera eman zuten. Horregatik, solidoaren partikula tamaina handietarako eta ohantze fluidizatuan bezain partikula txikiak erabili ahal izateko, erdiko hodia duen alboko irteeradun iturri ohantzea proposatu zuten Hattori eta Takeda-k. Hala ere, Hattori eta Takeda-k (1978) beirazko bolekin lan egitean, solidoaren zirkulazioa zaildu egiten zela frogatu zuten solidoaren partikula tamaina 0.00027 m baino txikiagoa zenean.

Teknika guztiak bezala, alboko irteeradun iturri ohantzea erdiko hodia hornituz, onuragarriak ez diren ezaugarriak ere baditu. Adibidez, material irregularrekin operatzean gune hilak sortzen dira.

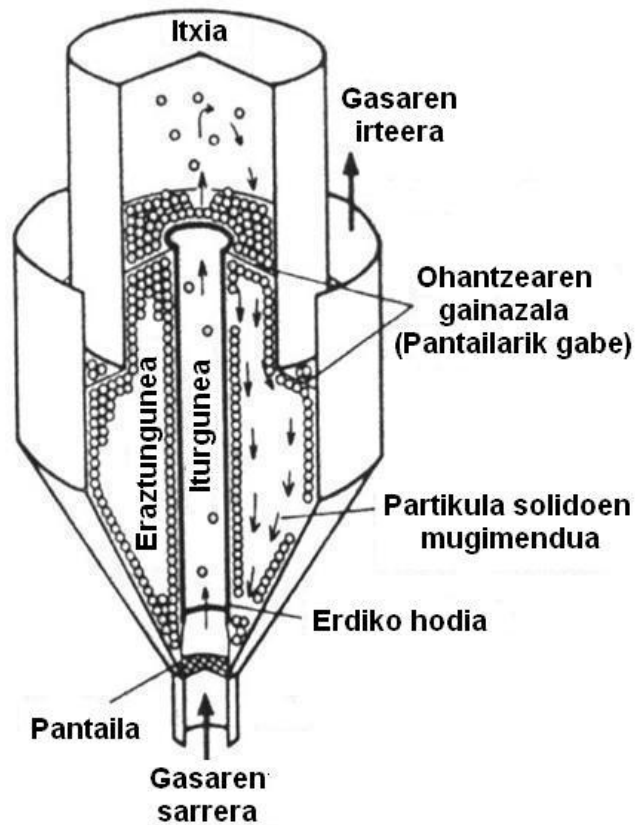
Desabantaila horien artean garrantzitsuena gasaren irteerako egiturari dagokio. Iturri ohantzeen aldaera honen lehenengo diseinuan, gasaren alboko irteeran pantaila fin moduko bat kokatu zen (Takeda eta Hattori, 1975, 1976; Hattori et al., 1981). Baina alboko irteeraren diseinu horrek partikula fin eta hauskorrekin lan egiterakoan arazoak ematen zituen, partikula hauek irteerako pantaila buxatu egiten baitzuten eta ondorioz,

karga galera berehala asko handitzen zen. Iturri ohantzearen aldaera hau operazio industrialetan erabiltzeko arazo hori konpondu beharra zegoen. Horregatik, Hattori eta Takeda-k (1978) partikula solidoen buxadura ekiditen zuen alboko irteeraren beste egitura bat proposatu zuten. Horretarako, 1.10 Irudian ikus daitekeenez, alboko irteeraren kanpoaldean solido geldikorrez osatutako ohantze bat kokatu zuten. Egitura horretan alboko irteeraren ez zegoen pantailarik eta, beraz, partikula solidoen buxadurarik ez zen gertatzen. Irteten zen airearen abiadura iturrikuntza abiadura minimoaren erdia izan zedin eta ondorioz, ohantze geldikorra mugitu gabe egon zedin, alboko irteeraren zirrikitua behar bezalako neurrikoa jarri zuten.



1.10. Irudia. Ohantze geldikorrez osaturiko alboko irteera duen iturri ohantzearen eskema.

Hattori et al.ek (1984) alboko irteeraren egitura hau ez zela nahi bezain desiragarria aditzera eman zuten, iturri ohantzearen ezaugarri garrantzitsuenetako bat, hots, partikula guztiak gailuaren barnean uneoro mugitzen aritzea zen eta kasu honetan, ez zen betetzen. Horregatik, pantailarik eta solido geldikoren ohantzerik ez zuen eta partikula guztiak gailuaren barnean mugitzen zeuden alboko irteeraren egitura berri bat proposatu zuten. 1.11 Irudian egitura berri honen eskema adierazten da.



1.11. Irudia. Alboko irteeradun iturri ohantzearen eskema erdiko hodiarekin.

1.11 Irudiari erreparatzen bazaio, zutabearen horma bi zatitan banatzen dela ikus daiteke, goiko zutabea eta behekoa. Beheko zutabearen diametroa goikoarena baino handiagoa da eta biak gainezarririk daude. Modu honetan, operatzean ohantzearen gainazala bi zatitan bananduko da, goiko zutabearen erdiko hodiaren goialdean eta goiko zutabearen beheko muturraren inguruan. Horrela, gasak irten aurretik bi zatia pasatu behar ditu.

Gainera, Hattori et al.ek (1984) 1.11 Irudian ikus daitekeen solidoen mugimendua frogatu zuten. Solidoak erdiko hodian zehar igotzen ziren, goiko zutabeko ohantzearen gainazalera erortzen ziren eta beherantz mugitzen ziren. Goiko zutabearen beheko muturrera iristean erradialki mugitzen ziren beheko zutabeko ohantzearen gainazal guztira iristen zirelarik. Azkenik, solidoek beherantz jarraitzen zuten zikloa osatu arte. Hortaz, alboko irteeraren egitura berriaren bidez solido partikulen buxaduraren arazoa eta partikula guztien zirkulazioaren arazoak ekidin ziren.

2. Kapituluia

2. ESPERIMENTALA

2.1. EKIPOEN DESKRIBAPENA

2.1.1. Emari ertainetarako ekipoa

2.1.1.1. Emari ertainetarako ekipoaren kontaktoreak, erdiko hodiak eta iturri bilgailuak

2.1.1.2. Emari ertainetarako ekipoan neurtutako aldagaiak

2.1.2. Emari handietarako ekipoa berria

2.1.2.1. Emari handietarako ekipoaren kontaktoreak, erdiko hodiak eta iturri bilgailuak

2.1.2.2. Emari handietarako ekipoan neurtutako aldagaiak

2.2. MATERIALEN KARAKTERIZAZIOA

2. ESPERIMENTALA

Atal honetan tesiko esperimentuak egiteko erabili diren ekipoak, datuak jasotzeko gailuak eta materialak deskribatuko dira xehetasunez. Horretaz gain, emaitzen lorpenerako erabili diren baldintza esperimentalak eta aldagaien inguruko berezitasunak aipatuko dira.

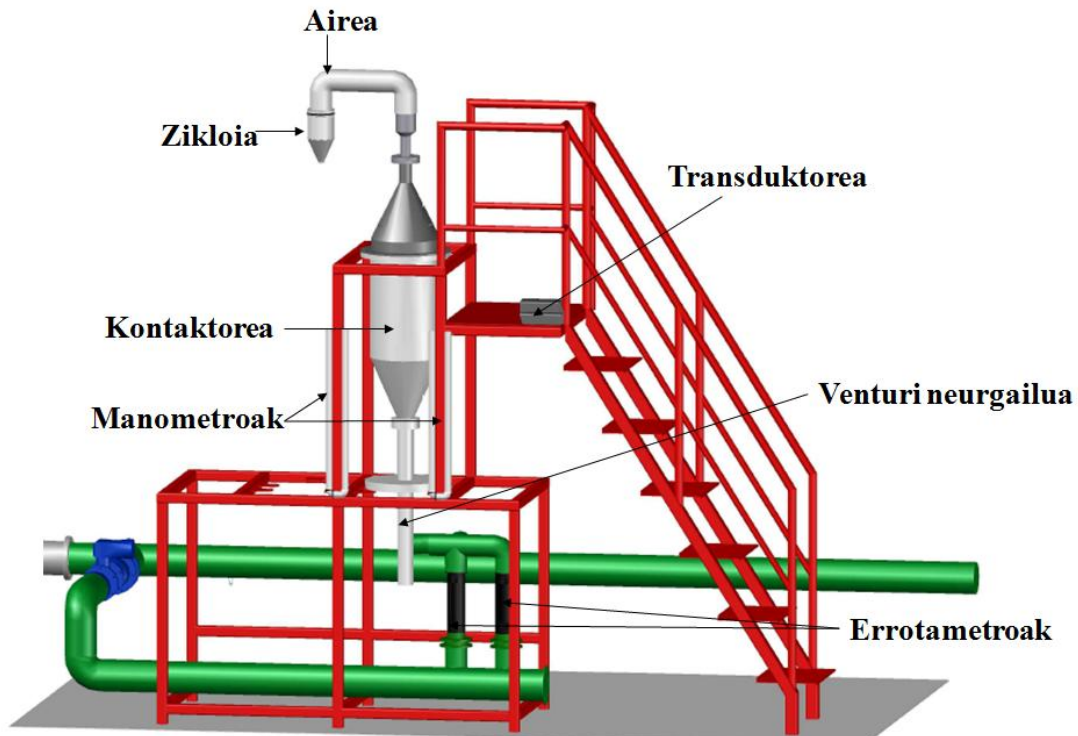
2.1. EKIPOEN DESKRIBAPENA

Tesi honetako esperimentu hidrodinamiko guztiak ez dira ekipo bakarrean egin ohiko planta pilotuak zenbait muga baititu. Hori dela eta, beste planta pilotu berri bat eraiki behar izan da. Horrela, planta pilotu bakoitzaren osagaiak deskribatuko dira atal honetan eta egin diren saiakuntzak zehaztuko dira. Ekipo bakoitzean saiakuntzak egiteko erabili diren aldagaien inguruko zehaztasunak ere azalduko dira.

2.1.1. Emari ertainetarako ekipoa

Esperimentu gehienak laborategian izan dugun emari ertainetarako planta batean egin dira. Bere abantailarik handiena polimetilmetakrilatoz (PMMA) egindako kontaktoreak erabiltzeko aukeran datza, metakrilatoaren gardentasunak kontaktorearen barnean gertatzen dena ikustea ahalbidetzen baitu, baita ziklo denborak begi-bistaz neurtzea eta lehorketan zehar gertatzen diren efektuak ikustea ere. Beraz, ziklo denborei eta lehorketari dagozkien esperimentu guztiak ekipo honetan egin dira.

Ekipo hau gure ikerkuntza taldeak 1985ean diseinatu zuen pilotu eskalan (Olazar et al., 1992), baina hobekuntzak etengabe egin zaizkio ordutik hona. Ekipo honek duen aldakortasunari esker, taldeko hainbat tesi (San José, 1991; Álvarez, 1997; Izquierdo, 1998; Morales, 2002; Alzibar, 2011; Saldarriaga, 2015; Díaz, 2016) egiteko erabili izan da eta gaur egun oraindik baliagarria da. 2.1 Irudian erakusten dira ekipoaren eskema orokorra eta osagai garrantzitsuenak.



2.1. Irudia. Emari ertainetarako ekipoen eskema orokorra.

Arestian emari ertainetarako ekipoa aldakorra dela esan da. Honen arrazoa, geometria ezberdineko kontaktoreekin lan egin ahal izatean datza baita ohantze finko eta fluidizatuaren ikerketa fluidodinamikoetarako erabili ahal izatean. Ekipo honetan kontaktorea erraz aldatzen da eta, beraz, mota ezberdinetako kontaktoreak, zehatz-mehatz, zilindrikoak eta konikoak, erabili dira urteetan zehar. Tesi honetan bereziki kontaktore konikoak erabili dira sarrera atalean azaldu diren abantailak dituztelako. Tesian erabili diren kontaktoreek ere aldakortasun handia dute, gasaren sarrerako diametro ezberdinekin eta era jarraituan lan egitea ahalbidetzen dutelako. Era jarraituan operatzeko kontaktoreek solidoa ateratzeko irteera ezberdinak dituzte. Hala ere, tesi honetako esperimenduak era ez-jarraituan egin dira.

2.1 Irudian ikus daitekeenez, ekipoa osagai ezberdinez osatuta dago eta ekipoen funtzionamendua ulertarazteko asmoz osagai bakoitzaren funtzioa azalduko da. Ekipoa kontrol panel baten bidez operatzen da eta beraren osagai nagusienak puzgailuak (2.1 Irudian ez dira puzgailuak agertzen beheko solairuan kokatuta daudelako), zikloia eta kontaktoreak dira eta hurrengo paragrafoetan sakonago deskribatuko dira. Dena den, hiru osagai horietaz gain, hurrengo osagaiak ere baditu: aire emaria neurtzeko errotametroak, kontaktorearen sarreraren eta irteeraren arteko karga galera (presio diferentzia) neurtzeko manometroak (merkurioz beterik karga galera handiak neurtzekoa eta urez karga galera txikiak neurtzekoa) eta ohantzearen presio galera eta aire emaria ordenagailu bidez neurtzeko transduktoreak. Transduktoreak 4 mA-tik 20 mA-ko seinalea bidaltzen du datu hartzaile batera. Datu hartzailea ordenagailuari konektatuta dago seinalea prozesatu eta bildu egiten duen kontrol softwarearen bidez. Transduktoreen funtzionamendua hurrengo atalean azalduko da sakonago.

Puzgailuaren funtzioa kontaktorean lan egiteko beharrezkoa den airea (esperimendu bakoitzaren arabera ezberdina) kontaktorearen sarreraraino bidaltzea da. Bi puzgailu daude, paraleloan jarrita eta beheko solairuan kokatuta. Puzgailu bakoitzak potentzia

ezberdinean egin dezake lan, batak 3 kW-ko potentzia du eta besteak 4 kW-koa. Puzgailuei iragazki bana jarri behar zaie kanpotik hartzen den airearen zikinkeriak errodetea marruskaduraz kaltetu ez dezan.

Puzgailuek aire emari konstantez hornitzen dute kontaktorea eta $300 \text{ m}^3\text{N h}^{-1}$ -ko emari maximoa eman dezakete $1500 \text{ H}_2\text{O mm}$ -ko presioan. Kontaktorera sartzen den aire emaria neurtzeko bi errotametro daude (fluxu masiko neurgailuak) seriean kokatuta, batak $0\text{-}30 \text{ m}^3\text{N h}^{-1}$ -ko tartean neurtzen du eta besteak, $30\text{-}300 \text{ m}^3\text{N h}^{-1}$ -koan. Azpimagarria da, hodiariaren barnean dagoen ordenagailuz kontrolaturiko venturi neurgailuak ere neurtu dezakeela emaria.

Ekipoak duen kontrol panelaren bidez abiarazten dira puzgailuak. Nahiz eta bi puzgailu dituen ekipoak, beti ez da puzgailu biek lan egin behar, saiakuntzaren arabera kontrol panelean puzgailu batekin edo biek lan egitea aukera daiteke. Kontrol panelean lanerako erabili nahi den aire emaria ere hauta daiteke. Horretarako, kontrol panelaren bidez puzgailuek bidaltzen duten airearen hodian dagoen bypass balbulari eragiten zaio eta aire soberakina kanpora desbideratzen da balbula ireki edo itxiz, hots, zenbat eta balbula itxiago egon kontaktorera gero eta aire gehiago bideratuko da. Kontrol panelak lan egiteko bi aukera ezberdin (eskuzkoa eta automatikoa) dituen arren, lan honetan eskuzkoa soilik erabili da aire emaria puntu interesgarrietan hobeto kontrola zitekeelako.

Puzgailuak ondo funtzionatu behar dute kontaktorera elikatzen duten aire emaria prozesuaren operazio baldintza garrantzitsuenetakoa baita iturri-ohantze erregimena ziurtatzeko. Puzgailuek bidalitako airea errotametroetatik igaro ondoren kontaktorean sartzen da eta ohantzea zeharkatzen du. Aire emaria iturkuntzarako behar den aire emari minimoa baino handiagoa bada, gasaren eta solidoaren arteko kontaktua iturri ohantze erregimenarena da.

2.1 Irudian nabaria denez, kontaktorearen irteeran zikloia dago eta bere funtzioa aireak ohantzetik arrastatu dituen finak jasotzea da. Horrela, aireak ohantzea zeharkatu ostean, kontaktorearen irteeran dagoen zikloia gurutzatu behar du kanpora irten aurretik. Zikloiaren erabilera tamaina txikiko solidoekin eta material hauskorrekin lan egiten denean beharrezkoa da.

Kontaktorea erreakzioak edo prozesu fisikoak gertatzen diren lekua da, hots, planta pilotuaren elementu nagusia da. 2.1 Irudian ikus daitekeenez, kontaktorea ekipoaren goialdean kokatzen da eta beheko tutueriara lotuta dago kontaktorearen behealdeko hariztatze brida baten bidez. Kontaktorearen oinarrian metalezko sarea dago (gutxi gorabehera 0.0007 m -koa) partikulak airearen sarrerako tutuerian ez erortzeko. Sare horren gainean diafragma bat jartzen da gasaren sarrerako diametroa (D_0) ezartzeko. Diafragma 0.003 m lodierako kautxuzko xafla zirkularra da eta gasaren sarrerako diametroaren neurriko zuloa du erdian.

Tesi honetan erabili diren kontaktoreak mota eta tamaina ezberdinetako erdiko hodiak sartzeko diseinatuak daude. Erdiko hodiaren funtzioa sistemari egonkortasuna ematea da, zenbait materialekin lan egitean (tamaina oso txikiko materialekin, material hauskorrekin, eta abarrekin) ez baita behar bezalako iturri ohantze erregimenik sortzen. Horretaz gain, erdiko hodiak airea ohantzearen erditik igotzea ahalbidetzen dute. Erdiko hodiak kontaktorearen barruan kokatzen dira eta kontaktorearen sarrerari eutsita daude.

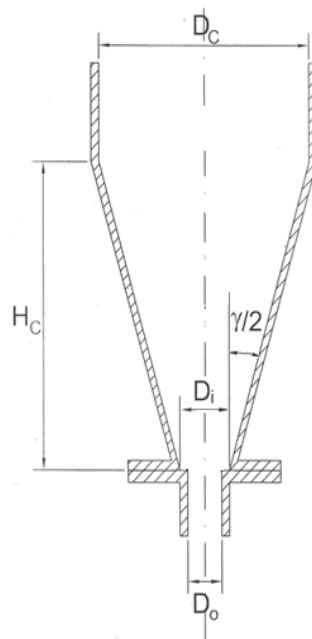
Erdiko hodian kokapena ekipoaren eskema orokorrean ez da antzematen baina ondorengo ataleko 2.3 Irudian argi erakutsiko da. Kontaktoreen eta erdiko hodian faktore geometrikoak eta erabili diren kontaktore eta erdiko hodi tamaina ezberdinak hurrengo atalean zehaztuko dira.

Azpimagarria da, azken urteetan deskribatutako ekipoan zenbait aldaketa egin behar izan direla. Alde batetik, tutueria aldatu egin da junturen artean ihesak zeudelako eta, bestetik, puzgailu bi erabili beharrean 10.5 kW-ko bat erabiltzea erabaki da emari ertainetarako funtzionamendua ez zelako egokia eta esperimenduak egiteko potentzia handiagoa behar zelako. Hortaz, ekipoan aipatutako aldaketak egin arren, ekipoaren eskema orokorra berdin mantentzen da eta bere funtzionamendua ere bai.

Aipatu behar da ziklo denboren neurketa ekipoa aldatu baino lehen egin direla, baina lehorketa saiakuntzak ekipoa aldatu ondoren egin dira. Beraz, lehorketa atalean esaten den bezala, Alzibar-en tesian (2011) egindako lehorketak eta tesi honetan egindakoak ez dira zuzen konparagarriak, hau da, konparazioak kontu handiz egin behar dira ekipoan aldaketak egin ostean neurtutako emariak eta presioak ezberdinak baitira.

2.1.1.1. Emari ertainetarako ekipoaren kontaktoreak, erdiko hodiak eta iturri bilgailuak

Aurreko atalean ekipoa deskribatzerakoan kontaktore ezberdinekin lan egin dela aipatu da. Horrela, tesian zehar hiru kontaktore koniko, zehazki, 28°, 36° eta 45°-koak erabili dira. Lehen esan den bezala, ekipo honetan erabili diren kontaktoreak metakrilatozkoak dira eta material honen aukera hurrengo arrazoengatik egin da. Alde batetik, gardena delako, hots, barruan gertatzen dena ikusi ahal denez, ziklo denborak neurtzeko orduan oso baliagarria da, baita lehorketa prozesuan ere. Beste aldetik, gogorra delako eta, beraz, ohantzeek sortzen duten presioa jasateko gai delako. 2.2 Irudian erakusten dira erabilitako kontaktoreen faktore geometrikoak.



2.2. Irudia. Kontaktore konikoaren faktore geometrikoak.

2.2 Irudian adierazten diren faktoreak zati zilindrikoaren diametroa (D_C), kontaktorearen zati konikoaren altuera (H_C), kontaktorearen angelua (γ), kontaktorearen oinarriaren diametroa (D_i) eta gasaren sarrerako diametroa (D_0) dira. Goiko zutabearen diametroa eta kontaktorearen diametroa konstanteak izan dira esperimentu guztietarako, 0.36 eta 0.0062 m, hurrenez hurren. Tesiaren saiakuntzak egiteko erabili diren metakrilatozko kontaktoreen faktore geometrikoen balioak 2.1 Taulan bildu dira.

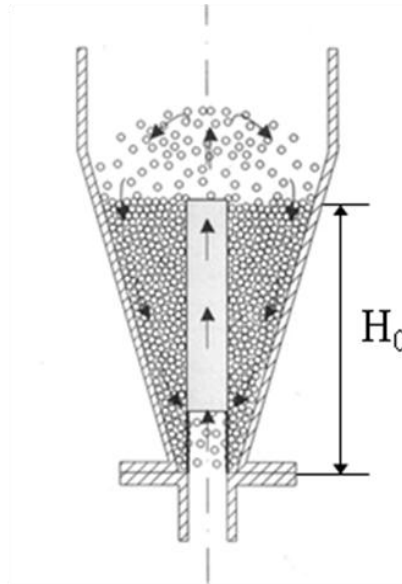
2.1. Taula. Metakrilatozko kontaktore konikoen dimentsioak.

Faktore geometrikoak	1 kontaktorea	2 kontaktorea	3 kontaktorea
γ (°)	28	36	45
H_C (m)	0.58	0.45	0.35
D_0 (m)	0.03, 0.04, 0.05, 0.06	0.03, 0.04, 0.05, 0.06	0.03, 0.04, 0.05, 0.06

2.1 Taulan erakusten denez, gasaren sarrerako diametro ezberdinak erabil daitezke kontaktore bakoitzean. Horrela, 2.1 Taulan agertzen diren lau gasaren sarrerako diametro ezberdinak konbinatu dira esperimentuetan.

Sistemaren aldagaiei dagokionez, esperimentuetan 0.05 eta 0.27 m arteko ohantzearen altuera (H_0) ezberdinak erabili dira. Ohantzearen altuera aukeratzeko kriterioak aldakorak dira. Batzuetan, beste aldagai baten eragina aztertu nahi izan da eta horretarako ohantzearen altuera egokia aukeratu behar izan da, eta beste batzuetan, ohantzearen altuera beraren eragina aztertu nahi izan da, eta orduan operazio egonkorreko altuera tarte erabili da. Dena den, normalean sistema egonkorra izan dadin, sarreran esan den legez, ohantzearen altuera eta erdiko hodiaren altuera antzekoak izatea komeni da.

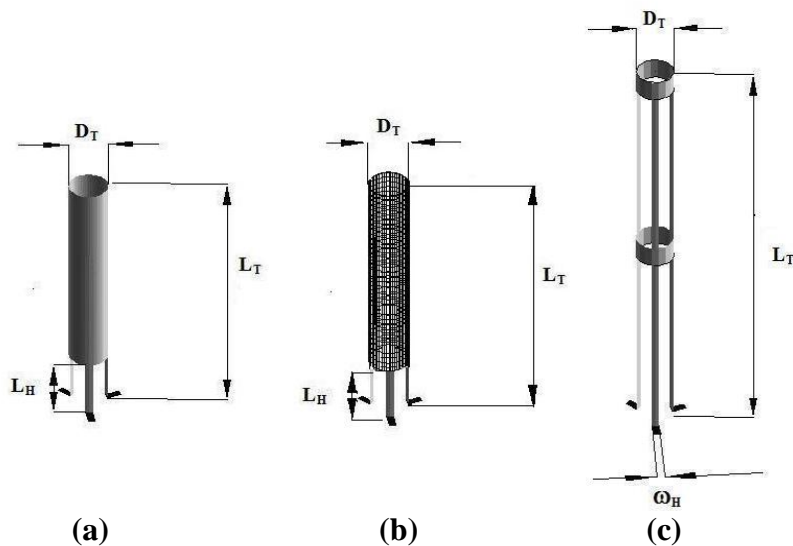
Erdiko hodie erreparatuz, lehen esan den moduan, iturri ohantze konikoei aldakortasun handia duten arren, zenbait egoeratan sortzen den ezegonkortasunaren ondorioz, ezin da iturri ohantze erregimenean lan egin edota lortzen den gas-solidoaren arteko kontaktua ez da nahi den bezalakoa. Kasu horietan kontaktorean erdiko hodia kokatu behar da sistemak egonkor funtziona dezan. 2.3 Irudian erdiko hodiaren kontaktore baten eskema agertzen da.



2.3. Irudia. Erdiko hodiaren kontaktorearen eskema.

2.3 Irudiko kontaktorean erdiko hodiaren kokapena ikus daiteke. Aurreko atalean azalduenez, erdiko hodiak kontaktorearen barruan kokatzen dira eta kontaktorearen sarrerari eutsita daude. Horretarako, erdiko hodiak kontaktorearen behealdetik sartu behar dira eta erdiko hodiak dituzten hankei esker eta diafragmari esker, kontaktorearen sarrerari eutsita geratzen dira.

Sarrera atalean azaldu den bezala, tesi honetan hiru erdiko hodi mota ezberdin erabili dira, zehatz-mehatz, hodi ez-porotsua, hodi porotsua eta irekiduradun hodia. Erdiko hodi mota guztiak altzairu herdoilgaitzez eginda daude. 2.4 Irudian erdiko hodi mota ezberdinen eskemak erakusten dira eta erdiko hodiaren faktore geometrikoak adierazten dira.



2.4. Irudia. Erdiko hodi ez-porotsuen (a), hodi porotsuen (b) eta irekiduradun hodiaren eskemak eta euren faktore geometrikoak.

2.4 Irudian nabaria da erdiko hodi mota bakoitza besteekiko fisikoki ezberdina dela. Hori dela eta, erdiko hodi mota bakoitzaren ezaugarri fisikoak deskribatuko dira, sarrera atalean eman den erdiko hodi bakoitzaren definizioa zabalduz.

Hodi ez-porotsuak goialdeko partean solidoak dira, baina behealdeko partean hankak dituzte, hau da, hiru irekidura dituzte. Hodi ez-porotsuetan aldakorrak diren dimentsioak 2.4 Irudiko (a) eskeman agertzen dira, hots, erdiko hodiaren diametroa (D_T), erdiko hodiaren luzera totala (L_T) eta erdiko hodian hanken luzera (L_H).

Hodi porotsuek zulodun metalezko sarea dute horma gisa airea pasatzen uzteko. Horregatik, sareko zuloen diametroa solidoarena baino txikiagoa izan behar da. Dena den, sareko zuloen diametroek ez dute oso txikiak izan behar, airea erraz pasa dadin, bestela presio galera oso handia baita. Era honetan, sare argia gutxi gorabehera 0.0007 m-koa da eta hodi porotsuen irekidura portzentajea %80koa da. Hodi porotsuetan sare argia aldatzeaz gain, 2.4 Irudiko (b) eskeman adierazten diren faktore geometrikoak aldatu ahal dira. Azken faktore geometrikoak hodi ez-porotsuetarako aldakorrak diren berberak dira.

Irekiduradun hodiak gorputz zilindriko osoan zehar partzialki irekita daude, goialdeko eta erdialdeko partean izan ezik. Hodiaren goialdean eta erdialdean eraztun bana dago hodia tente mantentzeko. Esan beharra dago, irekiduradun hodi guztiak ez daudela berdin irekita, irekidura portzentaje ezberdina baitute. Hala, irekiduradun hodiak oso irekita badaude, erdiko hodiak gabeko sistemen antzeko portaera izango dute eta gutxi irekita badaude erdiko hodi ez-porotsuena. Gainera, beste hodian kasuan bezalaxe, irekiduradun hodian parametro aldakorrak 2.4 Irudiko (c) eskeman erakusten dira. Kasu honetan erdiko hodiaren diametroa (D_T) eta erdiko hodiaren luzera (L_T) aldatzea posiblea izateaz gain, aipatu den irekidura portzentajea (IP) edo beste modura esanda, erdiko hodian hanken zabalera (W_H) aldatzea posiblea da.

Azpimagarria da, erdiko hodi mota bakoitzak iturri ohantzeari portaera ezberdina ematen diola. Erdiko hodi mota bakoitzaren dimentsioek ere iturri ohantzeen portaeran eragin handia dute. Horretaz gain, erdiko hodiak gabeko iturri ohantzeekin alderatuz, erdiko hodiak sortzen duen portaera hidrodinamikoa ezberdina da. Horregatik, sistemak erdiko hodiak gabeko esperimenduak ahalbidetu dituzte, egin dira erdiko hodiaren esperimenduetan konparatzeko.

2.4 Irudian ikus daiteke erdiko hodi ezberdinen faktore geometriko komunak, hala nola, erdiko hodiaren diametroa (D_T) eta erdiko hodiaren luzera (L_T). Hodi ez-porotsuei eta hodi porotsuei dagokien faktore geometrikoak hanken luzera (L_H) da. Irekiduradun hodie dagokien faktore geometrikoak, aldiz, hanken zabalera (W_H) edo beste modu batera esanda irekidura portzentajea da. Arestian azalduenez, erdiko hodi mota bakoitzak hiru faktore geometriko (2.4 Irudia) aldagarri ditu. 2.2 Taulan esperimenduetan erabili diren hiru erdiko hodi moten faktore geometrikoen balioak bildu dira erdiko hodi mota bakoitzaren arabera sailkatuta.

2.2. Taula. Esperimentuen erdiko hodiaren dimentsioak.

Faktore geometrikoak	Hodi ez-porotsuak	Hodi porotsuak	Irekiduradun hodiak
L_T (m)	0.17, 0.22, 0.27	0.17	0.50
D_T (m)	0.04, 0.05	0.04	0.04, 0.05
W_H (m)	—	—	0.010, 0.018, 0.025
L_H (m)	0.035, 0.07, 0.10, 0.15	0.02	—

2.2 Taulan ikus daitekeenez, hodi porotsu bakarra erabili da eta hodi ez-porotsu eta irekiduradun hodi ezberdin erabili dira. Hodi ez-porotsuetan posible diren faktore geometriko guztiak aldatu dira, irekiduradun hodiaren, aldiz, hodiaren luzera (L_T) konstante mantendu da. Diametro bereko irekiduradun hodiak irekidura portzentajearen edo beste modu batera esanda, hanken zabaleran ezberdinu dira. Hiru irekidura portzentaje desberdineko hodiak erabili dira, zehatz-mehatz, %79ko irekidura portzentaje duena ($W_H= 0.010$ m-ko nerbioei dagokiena), %57ko irekidura portzentaje duena ($W_H= 0.018$ m-ko nerbioei dagokiena) eta %42ko irekidura portzentaje duena ($W_H= 0.025$ m-ko nerbioei dagokiena). 2.2 Taulako irekiduradun hodiaren luzera erabiltzearen arrazoia aurretik egin diren saiakuntzen (Altzibar, 2004) ondorio izan da, hodiaren luzera ohantzearen luzera baino handiagoa denean, iturburuak motzagoak eta dentsuagoak lortzen baitira. Alabaina, geroagoko ikerkuntzan (Amasorrain, 2005) luzera ezberdineko erdiko hodiak eraikuntza materialak lehertzerakoan arazoak ematen dituztela ondorioztatu da eta orduan, handik aurrera, posible denean (laborategian altuera guztietako erdiko hodiak ez daudelako) ohantzearen altueraren antzeko altuera duten erdiko hodiak erabili dira.

Lehorketan, gero azalduko den moduan, sei erdiko hodi ezberdinekin lan egin da erdiko hodi mota bakoitzaren eragina aztertu ahal izateko. Hala ere, esan beharra dago, lehorketan erabilitako hodi irekiduradunen eta ez-porotsuen diseinua ez dela ziklo denboretan erabilitako berbera. Hodi porotsuen diseinua, aldiz, ez da berritu. Ondorengo atalean, erdiko hodi berrien diseinua azaltzerakoan, beren dimentsioak zehaztuko dira.

Bestalde, emari ertainetarako ekipa honetan, iturri bilgailuak lehorketarako soilik erabili dira. Kontuan izanda Altzibar-en tesian (2011) egin zela iturri bilgailuen ikerketa hidrodinamikoa, kasu honetan bilgailua erabiltzeak edo ez erabiltzea operazioaren duen eragina aztertu da. Horregatik, iturri bilgailu bera erabili da lehorketa guztietarako, hau da, aurreko tesian (Altzibar, 2011) egokiena zela aukeratu zenean. Iturri bilgailua metakrilatoz eginda dago bere barnean gertatzen dena ikusi ahal izateko. Iturri bilgailuan faktore geometriko nagusienak 2.5 Irudiko eskeman erakusten dira.

pneumatikoaren eraginez deformatu egiten dena (jasandako deformazioa %0-100 bitartean kuantifikatzen du). Transduktoreak, bere diafragmak jasandako deformazioaren arabera seinale elektrikoa igortzen dio Alhborn Almeno datu hartzaileari, 4–20 mA bitarteko seinaleen bidez. Datu hartzailea ordenagailuari konektaturik dago eta jasotzen dituen seinaleak bertara bidaltzen ditu. Ordenagailuak AMR-Control softwarearen bidez seinaleak emari eta presio balio bihurtzen ditu seinaleak eta lortu nahi den aldagaia erlazionatzen dituen adierazpen matematikoen bidez. Horrela, emariaren eta karga galeraren balioak uneoro eskura daitezke eta karga galeraren bilakaera emariarekiko irudika daiteke.

Aipatutako adierazpen matematikoa lortzeko (ordenagailuak aire emaria neurtu ahal izateko ezinbestekoa) kalibraketa egin behar da. Aire emariaren kasuan, jakina da emariaren karratuaren eta seinale elektrikoaren arteko erlazioa proportzionala dela eta beraz, hurrengo ekuazioaren moduko adierazpen matematikoa lortu behar da.

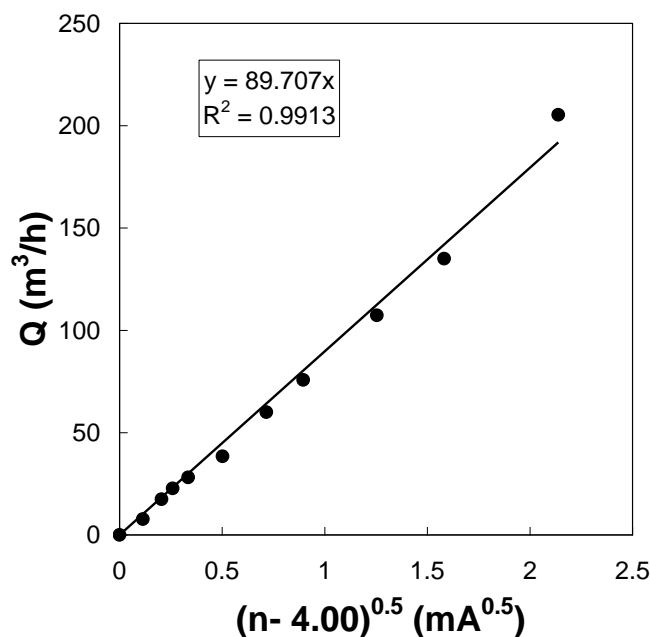
$$Q = k_1 \cdot (n - 4.00)^{0.5} \quad (2.1)$$

non n transduktoreak bidaltzen duen seinale elektrikoaren balioa den eta k_1 proportzionaltasun konstantea. Helburua konstante hau lortzea da eta horretarako, seinale elektrikoaren eta emariaren datu bikoteak behar dira. Datu hauek erdiesteko, errotametroan irakurritako emariaren balio bakoitzararako dagokion seinale elektrikoaren balioa jaso da, 2.3 Taulan erakusten direlarik lorturiko datuak.

2.3. Taula. Seinale elektriko bakoitzari dagokion emaria.

Seinalea (mA)	4.00	4.03	4.06	4.08	4.13	4.27	4.53	4.82	5.59	6.52	8.59
Q (m³/h)	0	7.8	17.4	22.8	28.1	38.4	60.0	75.8	107	135	205

Neurgailuak emandako datuei, emaria zero deneko seinalearen balioa kendu behar zaie (4.00 mA). Modu honetan, emariaren balioak seinale zuzenduaren emaitzen erroaren aurrean irudikatuz (2.6 Irudia), k_1 proportzionaltasun konstantearen balioa izango da zuzenaren malda.



2.6. Irudia. Aire emaria eta seinale elektrikoaren arteko proportzionaltasuna.

Saiakuntza hau hiru aldiz errepikatu da eta lorturiko k_1 konstantearen datuak 2.4 Taulan erakusten dira.

2.4. Taula. Aire emarirako proportzionaltasun konstantearen balio ezberdinak.

	1. Saiakuntza	2. Saiakuntza	3. Saiakuntza
k_1 (m ³ /(h·mA ^{0.5}))	89.6	91.6	92.5

2.4 Taulako hiru datuen batez bestekoa eginez 2.1 Ekuazioan ordezkatzeko k_1 parametroaren balioa erdietsi da.

$$k_1 = 91.3 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{mA}^{0.5})$$

Hortaz, eskuratutako proportzionaltasun konstantea (2.1) Ekuazioan ordezkatzuz softwarean aire emariaren kalkulurako erabili behar den adierazpen matematikoa lortu da.

$$Q = 91.3 \cdot (n - 4.00)^{0.5} \quad (2.2)$$

Presioaren neurketa

Presioa neurtzeko bi bide erabili dira tesi honetan, hots, datuak zuzenean merkurio edo ur manometroan eta ordenagailuak ematen dituen datuak hartuz. Ordenagailuen bidezko datuak lortzeko aire emariaren neurketarako erabili den transduttore bera erabili da, hau da, datuak jasotzeko prozedura berbera erabili da baina aire emari datuen ordez presio datuak hartu dira. Datuen trataera ordenagailuaren bidez egiteko aire emarirako erabilitako software bera erabili da. Presioa neurtzeko aldatzen dena softwarearen

adierazpen matematikoa da kasu honetan presioa eta seinale elektrikoaren erlazioa behar dituelako. Horregatik, kalibraketa berria egin behar izan da presioaren eta seinale elektrikoaren arteko erlazioa proportzionala izanik lehengo moduan. Ondorioz, seinale elektrikoaren eta presioaren erlazioa dituen hurrengo ekuazioaren moduko adierazpen matematikoa lortu behar da.

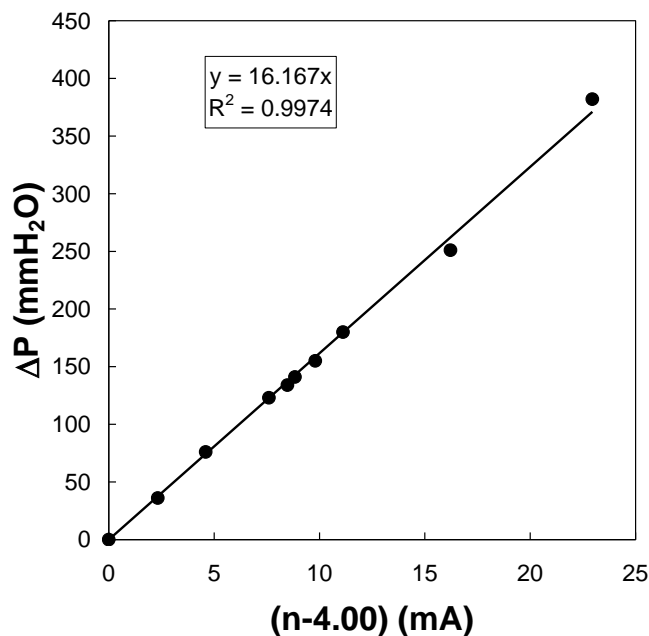
$$\Delta P = k_2 \cdot (n - 4.00) \quad (2.3)$$

non n transduktoreak bidaltzen duen seinale elektrikoaren balioa den eta k_2 proportzionaltasun konstantea. Helburua, berriro ere, konstante hori erdiestea da. Horretarako, seinale elektriko bakoitzari dagokion presioaren datua (manometroan begiratu) bildu da. Lorturiko datuak 2.5 Taulan erakusten dira.

2.5. Taula. Seinale elektriko bakoitzari dagokion presio galeraren balioa.

Seinalea (mA)	0	6.3	8.6	11.6	15.1	20.2	27.0	13.8	12.8	12.5
ΔP (mmH₂O)	0	36	76	123	180	251	382	155	141	134

Era honetan, transduktoreak bidaltzen duen seinalea eta presioa zero deneko seinalearen arteko kenketaren erroa presioarekiko irudikatzean (2.7 Irudia) lortutako zuzenaren malda, k_2 proportzionaltasun konstantea da.



2.7. Irudia. Presioaren eta seinale elektrikoaren arteko proportzionaltasuna.

Aire emarirako egin den bezala, jasotako datuak doitu eta k_2 parametroa kalkulatu da hiru saiakuntza ezberdinetarako. Lorturiko balioak 2.6 Taulan erakusten dira.

2.6. Taula. Presiorako proportzionaltasun konstantea.

	1. Saiakuntza	2. Saiakuntza	3. Saiakuntza
k_2 (mmH ₂ O/mA)	16.2	15.5	15.8

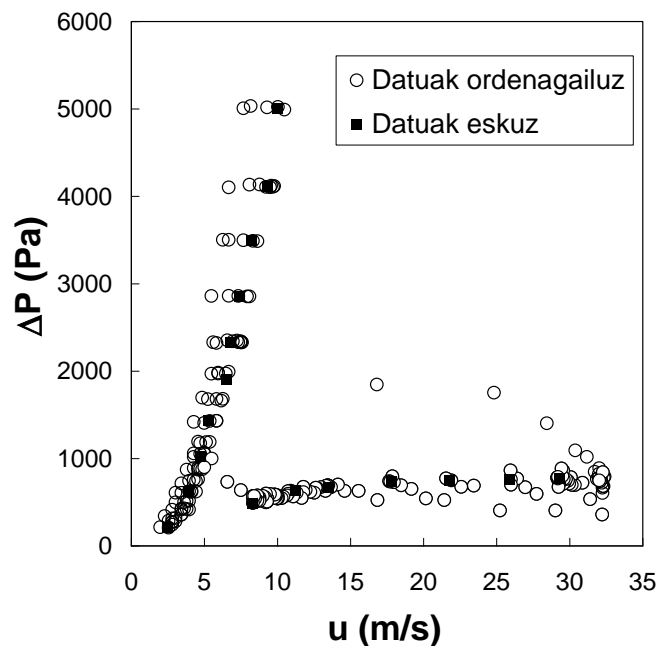
2.6 Taulako datuen batez bestekoa eginez, k_2 parametroaren balioa lortu da.

$$k_2 = 15.8 \text{ mm H}_2\text{O/mA}$$

Lortutako proportzionaltasun konstantea (2.3) Ekuazioan ordezkatzuz softwarean presioaren kalkulurako erabili behar den adierazpen matematikoa lortu da.

$$\Delta P = 15.8 \cdot (n - 4.00) \quad (2.4)$$

Aire emariaren eta presioaren datuak ordenagailuaren bidez hartzeko lortu diren adierazpen matematikoen fidagarritasuna frogatzeko zenbait saiakuntza egin dira eta 2.8 Irudian ikus daiteke eskuz eta ordenagailu bidez jasotako datuen erkaketa.



2.8. Irudia. Ordenagailuz eta eskuz hartutako datuen konparaketa.

2.8 Irudian nabaria da eskuz eta ordenagailuz jasotako datuak bata bestetik oso hurbil daudela, batzuetan gainjarrita ere bai. Beraz, egiaztatuta geratzen da datuak ordenagailu bidez hartzeko ezarritako adierazpen matematikoak eta jarraitutako prozedura egokiak direla. Kontuan izan behar da datu hartzea ordenagailu bidez egitean datu gehiago eta zehatzagoak lortu ahal direla.

Karga galeraren neurketa

Bibliografian argitaratu diren iturri ohantzeen karga galera aztertzeke saiakuntzetan, seinale pneumatikoa jasotzen duten hodian kokapenaren inguruan zalantzak nabariak izan dira, ikerlariak ez direlako ados jarri sarrerako presioa neurtzeko punturik egokiena zein den. Batzuk, gasaren sarreraren aurretik kokatzen dute puntua (Mathur eta Gishler, 1955b; Lefroy eta Davidson, 1969; Mathur eta Epstein, 1974a) eta beste batzuk, aldiz, puntua gasaren sarreraren gainean kokatzen dute (Chaterjee, 1970; Van Velzen et al., 1974; Lim eta Mathur, 1978). Saiakuntza hutsean egiten denean, hau da, ohantzerik gabe, hodia sarreraren aurretik kokatzeak karga galera positiboa eragiten duen bitartean, hodia gasaren sarreraren gainean kokatzeak karga galera negatiboa eragiten du. Honen arrazoa, sortzen den Venturi efektuan dago (Mathur eta Gishler, 1955b; Takahashi eta Yanai, 1973).

Ekipo honetan, sistemaren presio galera neurtzeko hodia kokatzen den puntua gasa ohantzera sartu aurretik denez, manometroetan neurtzen den karga galera (ekipoaren karga galera edo karga galera totala ere deitua) ohantzearen karga galera gehi kontaktorea hutsik dagoenean sortzen den karga galera da. Esperimentuak egiterakoan ohantzearen karga galera (ΔP_o) lortu nahi denez, neurtzen den karga galera totalari (ΔP_T) kontaktorea hutsik dagoenean sortzen dena (ΔP_h) kendu behar zaio, hurrengo ekuazioak adierazten duen moduan.

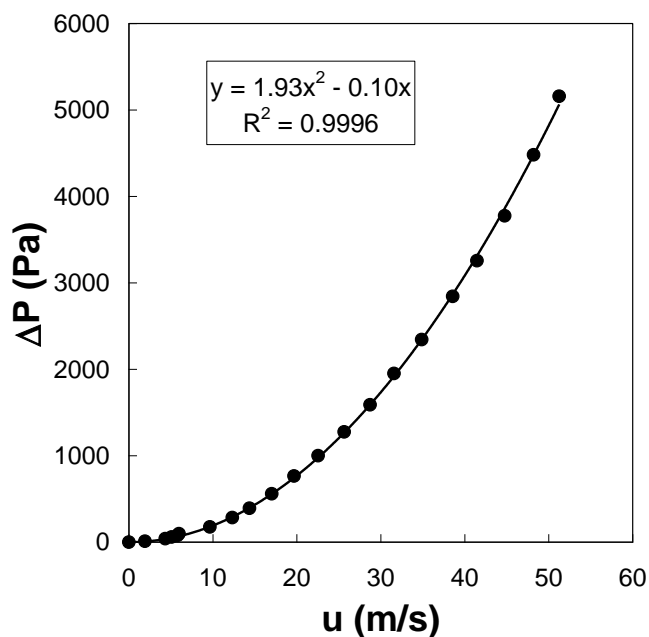
$$\Delta P_o = \Delta P_T - \Delta P_h \quad (2.5)$$

Ohantze gabeko karga galera neurtzeko kontaktorea erabat hustu da eta gainontzeko baldintzak ohiko saiakuntzetan bezala mantendu dira. Horrela, aireak ekipo osoa zeharkatzeagatik jasaten duen karga galera kalkulatu ahal izan da aire emari ezberdinetarako. Nabarmentzekoa da, kontaktore hutseko karga galera kontaktorearen angeluaren (γ), gasaren sarrerako diametroaren (D_0) eta abiaduraren (u) arabera ezberdina izango dela. Beraz, sistema bakoitzean sortzen den karga galera kalkulatzeko, aireak ohantzerik gabeko kontaktorea zeharkatzean jasaten duen karga galera jakin behar da abiadura ezberdinetarako.

Aireak abiadura ezberdinetan jasaten duen karga galeraren bilakaera irudikatzen bada, kontaktore hutsari dagokion karga galeraren balioa abiaduraren funtzioko bigarren mailako polinomioa da eta (2.6) Ekuazioan erakusten den bezalako itxurako ekuazioak lortuko dira sistema bakoitzerako.

$$\Delta P_h = k_1 \cdot u_0^2 - k_2 \cdot u_0 \quad (2.6)$$

Adibide gisa, 2.9 Irudian erakusten da $\gamma = 45^\circ$ eta $D_0 = 0.04$ m den kasurako aireak abiadura ezberdinetan jasaten duen karga galeraren bilakaera.



2.9. Irudia. Ohantze hutsaren karga galera $\gamma = 45^\circ$ eta $D_0 = 0.04$ m den kasurako.

2.7. Taula. Ziklo denboren datuak lortzeko erabili diren sistematarako kontaktore hutsak duen presio galeraren kalkulurako parametroak.

Sistema esperimentalak		Ekuazioen konstanteak		
γ (°)	D_0 (m)	k_1 (Pa·s ² /m ²)	k_2 (Pa·s/m)	R^2
28	0.03	2.18	7.90	0.996
	0.04	2.33	12.97	0.994
	0.05	1.89	4.67	0.998
	0.06	1.42	1.77	0.998
36	0.03	1.84	9.64	0.999
	0.04	1.62	-4.24	0.995
	0.05	2.02	2.82	0.998
	0.06	1.54	-1.44	0.998
45	0.03	2.99	38.28	0.995
	0.04	1.93	0.10	0.999
	0.05	1.89	0.03	0.998
	0.06	1.42	-1.71	0.999

Kontaktorearen angelu eta gasaren sarrerako diametro ezberdinak erabiliz egindako saiakuntzetan, prozedura berberari jarraitu zaio sistema bakoitzari dagokion ekuazioa lortzeko. Ziklo denboren datuak lortzeko erabilitako sistemetarako, 2.7 Taulan biltzen dira karga galeraren kalkulurako parametroak.

Lehen esan den bezala, tutueriak eta puzgailua aldatu ostean egin ziren lehorketa operazioak. Hori dela eta, ziklo denboren esperimentera dagozkien kontaktore hutsaren karga galerak eta lehorketa esperimentera dagozkienak ez dira berdinak. Beraz, kontaktore hutsarako karga galeraren ekuazio berriak kalkulatu behar izan dira lehorketarako eta 2.8 Taulan adierazi dira balio horiek.

2.8. Taula. Lehorketarako erabili den kontaktore hutsaren karga galera determinatzeko ekuazioen parametroak.

Sistema esperimentalak		Ekuazioen konstanteak		
γ (°)	D_0 (m)	k_1 (Pa·s ² /m ²)	k_2 (Pa·s/m)	R^2
36	0.04	1.77	-4.14	0.995
	0.05	2.11	-3.30	0.994

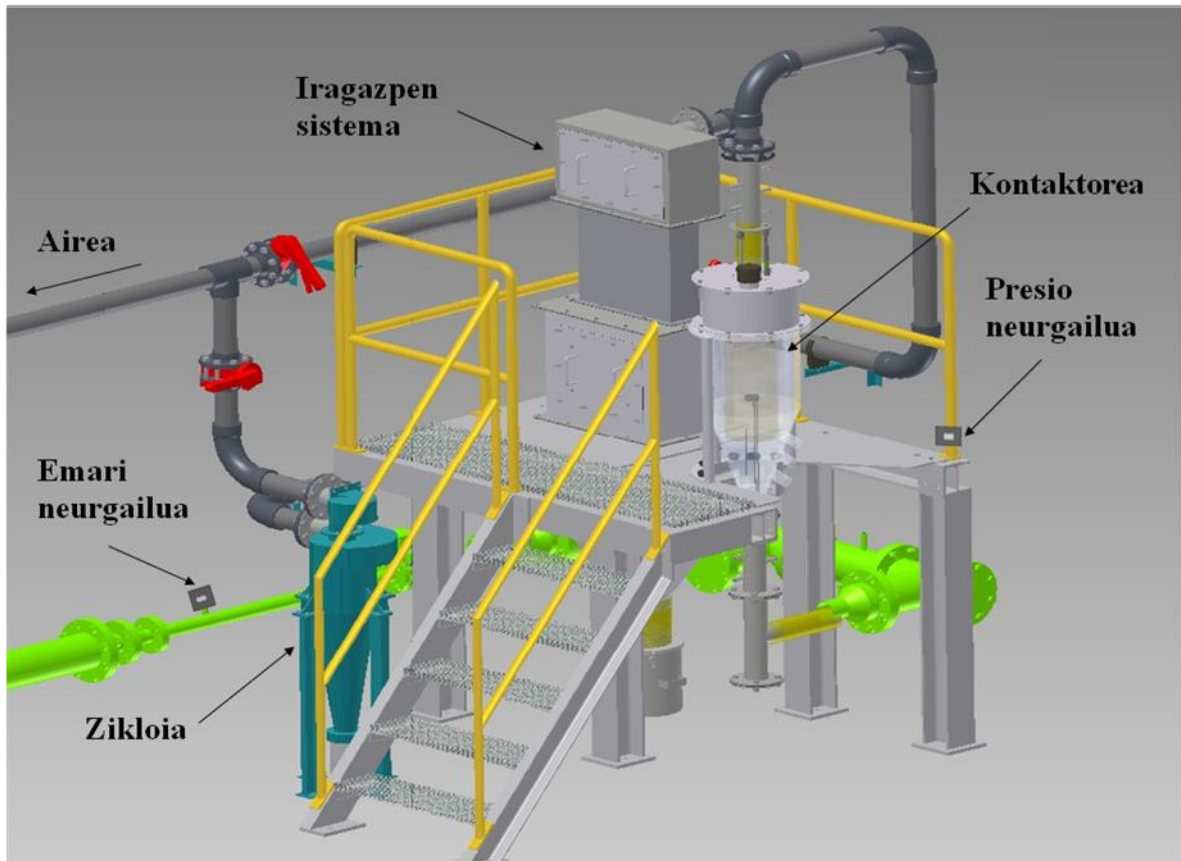
2.8 Taulan ikus daitekeenez, lehorketarako erabili den kontaktore hutsaren karga galera kalkulatzeko bi ekuazio baino ez dira behar, esperimentera guztietarako kontaktore bera erabili baita bi gasaren sarrerako diametro ezberdinekin.

Hezetasunaren neurketa

Lehorketak egiterakoan esperimentera bakoitzean airearen hezetasuna neurtzeko zikloaren ondoren dagoen tutuerian zunda bat kokatuko da. Zunda hau, lehen komentatu den Alhborn Almeno datu hartzaileari konektatuta dago eta datu hartzaile hau ordenagailuari konektatuta dago. Horrela, zundak datu hartzaileari seinale elektrikoak bidaltzen dizkio eta datu hartzaileak ordenagailuari. Modu honetan, AMR-Control softwarearen bidez seinale horiek hezetasun balio bihurtzen dira. Era honetan, airearen hezetasuna denboran zehar ikus daiteke ordenagailuan.

2.1.2. Emari handietarako ekipo berria

Tesi honetako esperimentera guztiak ezin izan ziren lehen azaldutako ekipoan egin, alde batetik, puzgailuek ohantzeak zabaltzeko indar nahikorik ez zutelako eta, bestetik, esperimentera batzuetarako beharrezkoa zen hermetikotasuna lortzea ezinezkoa zelako. Adibidez, arraste esperimentera guztiak ezin izan ziren lehen deskribaturiko ekipoan egin. Honen guztiaren ondorioz, planta pilotu berria eraiki zen 2015ean, aurreko ekipoan oinarrituz, baina etorkizunean egin nahi izango ziren esperimentera kontuan hartuz. Beraz, tesi honetan zehazten diren arraste esperimentera dira ekipo berrian egin diren lehenengoak. 2.10 Irudian erakusten da ekipo berriaren eskema orokorra eta osagai nagusiak.



2.10. Irudia. Emari handietarako ekipo berriaren eskema orokorra.

2.10 Irudian ikus daitekeenez, ekipo berriaren osagai nagusienak emari eta presio neurgailuak, zikloia, kontaktorea eta iragazpen sistema dira. Osagai guztiek aurretik azaldutako ekipoa egiten dituzten funtzio berberak betetzen dituzte. 2.10 Irudian ez da puzgailua agertzen beheko solairuan kokatuta dagoelako. Ekipo berri honetan, 5.5 kW-ko puzgailua dago bakarrik.

Ekipo berri hau ere kontrol panel baten bidez manipulatu da. Kontrol panelak programatutako zenbait ukipen-pantaila ditu eta euren bidez ekipoa piztu eta itzali egin daiteke, balbulan eta puzgailuaren motoreak duen maiztasun bariadorean ihardun daiteke eta lan egiteko modua ere hauta daiteke. Operatzeko moduak eskuz begizta itxian, eskuz begizta irekian eta automatikoa dira. Ekipoak hartzen dituen parametroak erakusten dituzte pantaila horiek, hala nola, kontaktorearen sarrera eta irteeraren karga galera, sarrerako emaria eta sarreran dagoen abiadura.

Emari neurgailua termikoa da eta bere funtzionamendua neurgailuaren barneko erresistentzia elektriko baten tenperatura aldaketaren neurketan oinarritzen da. Emari neurgailua airea sartzen den tutuerian kokatuta dago eta pantaila bat du neurria bertan ikusteko. Planta pilotu berri honen emaria koadro elektrikoan instalatutako maiztasun bariadorea erabiliz ere erregula daiteke. Izan ere, ekipo berriaren bariadore bat jarri zen balbulen aldaketak txikiagoak izan daitezela.

Presio neurgailuak bi puntu arteko presio diferentzia neurtzen du. Kasu honetan, ohantzeak kontaktorearen sortzen duen karga galera neurtzen denez, sentsoarek ohantzearen behealdean (airearen sarreran) eta kontaktorearen goialdean (airearen irteeran) daude. Presio neurgailu honek pantaila bat du eta presio neurriak zuzenean

ikus daitezke bertan. Presio neurgailuaren funtzionamendua aurreko atalean azaldutako transduktoreen berbera da.

Kontuan izan behar da ekipo berri honetan irteerako airea ondo araztu behar dela arrastatutako partikula solidoak ez daitezen kanpora joan. Horretarako, airea pasaztzen den lerro bi daude. Alde batetik, emari txikietarako ($< 300 \text{ m}^3/\text{h}$) finen lerroa, non manga iragazkia dagoen eta, bestetik, emari altuetarako ($> 300 \text{ m}^3/\text{h}$) handien lerroa, non efikazia handiko zikloia dagoen. Lerro bat edo bestea aukeratzeko orduan arrastatutako partikulen tamainak ez du eragina, parametro kritikoa emaria da. Hala ere, zikloa ez da eraginkorra emari altuekin eta partikula oso finekin ($< 50 \mu\text{m}$) lan egitean. Filtroak $5 \mu\text{m}$ -ko partikulak atxikitze osagaia du. Lerro bataren edo bestearen aukera eskuz egiten da mozketak balbulen bidez. Banandutako solidoak ontzi hermetikoetan biltzen dira eta airea purga lerrora bideratzen da. Filtroa eta zikloia altzairuz eginda daude.

Ekipo berri honetan arrastearen saiakuntzak soilik egin direnez, eta saiakuntza horietarako emari altuak behar direnez, airea arazteko zikloia baino ez da erabili.

Aurreko ekipoan transduktoreen seinaleak datu hartzaile batera bidaltzen ziren eta hortik ordenagailura. Ekipo honetan, emari eta presio neurgailutik seinalea zuzenean kontrol panelera doa, non kontroladore logiko programagarria dagoen (PLCa, ingelesezko "Programmable Logic Controller" hitzen laburdura) eta emari ertainetarako ekipoan ordenagailuak betetzen zuen funtzioa betetzen du. Beraz, lehen esan den bezala, ekipo berrian kontrol panelean zuzenean presio eta emari datuak hartu ahal dira.

Emari handietarako ekipo berria aurrekoa bezala aldakorra da, kontaktore, iturri bilgailu, erdiko hodi eta gasaren sarrerako diametro ezberdinekin lan egitea ahalbidetzen baitu.

2.1.2.1. Emari handietarako ekipoaren kontaktoreak, erdiko hodiak eta iturri bilgailuak

Kontaktoreak, erdiko hodiak eta iturri bilgailuak dagoeneko azaldu direnez emari ertainetarako ekipoan, atal honetan ezberdintasunak soilik emango dira aditzera.

Ekipo berrian material ezberdinetako kontaktoreak erabili ahal dira. Hasieran, metakrilatozko kontaktoreak erabili ziren partikulen arrastea neurtzeko, baina zenbait esperimenteren ondoren kontaktorean pitzadurak agertu ziren. Orduan, kontaktoreak beste material batez egin behar zirela ondorioztatu zen. Material berri honek metakrilatoaren gardentasuna mantendu behar zuen, baina gogorragoa izan behar zen. Horretaz gain, material berriak partikulen frikzioa eta ekipo berriaren bibrazioak jasateko gai izan behar zuen. Honen guztiaren ondorioz, arraste esperimenterarako kontaktoreak polietilen tereftalatoz (PET) egitea erabaki zen.

Kontaktoreen faktore geometrikoei dagokienez, ekipo berrian kontaktorearen angelu (γ), kontaktorearen zati konikoaren altuera (H_C), gasaren sarrerako diametro (D_0), zati zilindrikoaren diametro (D_C) eta konoaren oinarriaren diametro (D_i) ezberdinak erabili ahal dira. Alabaina, arraste esperimenterarako kontaktore bakarra erabili da ikerketaren xede nagusia iturri bilgailuaren eragina aztertzea izan baita eta ez azterketa hidrodinamiko egitea. Ekipo berrian, arraste saiakuntzak egiteko erabilitako kontaktorearen dimentsioak 2.9 Taulan biltzen dira.

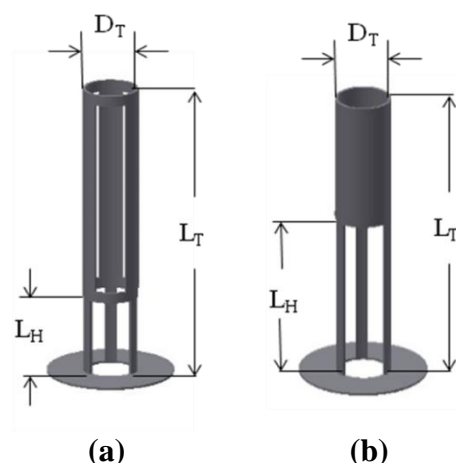
2.9. Taula. Arraste saiakuntzak egiteko erabili den kontaktorearen faktore geometrikoak eta euren mailak.

FAKTOREAK	MAILAK
γ (°)	45
H_C (m)	0.35
D_C (m)	0.36
D_i (m)	0.0062
D_0 (m)	0.04
H_0 (m)	0.27

Bestalde, nahiz eta emari ertainetarako ekipoan erabili diren erdiko hodiak ekipo berrian ere erabil daitezkeen, erdiko hodi berriak diseinatu dira esperimenduetan ikusitako zenbait arazo konpontzeko. Esate baterako, askotan erdiko hodi zaharren erdiko eraztunak iturriaren sorrera eragozten zuen. Gainera, lehorketa esperimenduak lehenengoz erdiko hodi zaharrak erabiliz egin ziren, baina harea hezea erdiko hodian hanketan buxatuta geratzen zen eta ez zen lehortzen. Beraz, erdiko hodi berriez baliatuz egin da lehorketa. Laburbilduz, arrastea ekipo berrian egin da erdiko hodi berriak erabiliz eta lehorketa emari ertainetarako ekipoan baina erdiko hodi berriak erabiliz.

Erdiko hodi berriek emari ertainetarako ekipoan deskribatutako erdiko hodian funtzio berbera betetzen dute, beren kokapena kontaktorearen barnean berdina da eta material berberaz (altzairu herdoilgaitzez) eginda daude. Aipagarria da, erdiko hodi berriak bi motatakoak bakarrik egin direla, irekiduradunak eta hodi ez-porotsuak. Erdiko hodi mota hauen diseinua aldatu den arren, erdiko hodi mota bakoitzaren propietateak berdinak dira.

Erdiko hodi berriek hankak dituzte baina oinarriari (zirkularra eta laua dena) bat eginda daude eta eraztuna oinarritik 0.07 m-tara daukate ohantzearen zirkulazioari eragozpen gutxien eragiten duen posizioa horixe dela frogatu baita. Erdiko hodi berrien oinarri zirkularrak hodiak sisteman zentratuta egotea ahalbidetzen du eta hori oso garrantzitsua da airea erditik zuzen igotzeko. Ohiko hodietan, aldiz, denborarekin hankak okertu egiten zirenez, erdiko hodia ez zen ondo zentratuta geratzen eta airea alboetatik desbideratzen zen. Erdiko hodi berrien eskemak bai irekiduradun hodiatarako bai erdiko hodi ez-porotsuetarako 2.11 Irudian erakusten dira.



2.11. Irudia. Irekiduradun erdiko hodi berriaren eskema (a) eta erdiko hodi ez-porotsuarena (b).

2.11 Irudian ikus daiteke nola erdiko hodiaren faktore geometrikoak ohiko erdiko hodiaren berberak diren, hau da, erdiko hodiaren diametroa (D_T), luzera (L_T) eta hanken luzera (L_H). Esan beharra dago, irekiduradun erdiko hodi berrietarako hanken zabalera (W_H) benetan ez dela hanken zabalera, baizik eta nerbioen zabalera. Izan ere, erdiko hodi berri guztien (bai irekiduradun bai hodi ez-porotsuetarako) hanken zabalera berbera da. Irekiduradun hodiak sailkatzeko hanken zabalaren nomenklatura mantendu daitekeen arren, egokiagoa da irekidura portzentajearen (IP) arabera sailkatzea. Arraste eta lehorketa esperimentuetan erabilitako erdiko hodiaren dimentsioak 2.10 Taulan biltzen dira.

2.10. Taula. Arraste eta lehorketa esperimentuetan erabilitako erdiko hodiaren dimentsioak.

Faktore geometrikoak	Hodi ez-porotsuak	Irekiduradun hodiak
L_T (m)	0.22, 0.27	0.22, 0.27
D_T (m)	0.04	0.04
L_H (m)	0.07, 0.15	—
IP (%)	—	42, 57, 79

2.10 Taulan antzematen denez, arraste eta lehorketa esperimentuetan hanken zabalaren ezberdintzen diren erdiko hodi ez-porotsu eta irekidura portzentajearen ezberdintzen diren irekiduradun hodi erabili dira. Irekiduradun eta hodi ez-porotsuen erdiko hodi berriak erabili dira lehorketan, baina emari ertainetarako ekipoaren hodi porotsu berbera. Izan ere, lehen esan den bezala, ez dira diseinatu diren erdiko hodi guztiak erabili, ikerketaren helburua iturri bilgailuaren eragina aztertzea izan delako eta ez ikerketa hidrodinamiko egitea. Nabarmentzekoa da arraste eta lehorketa esperimentuetarako erdiko hodiak ohantzearen altuera berbera dutela Amasorrain-ek (2005) lortutako ondorioa betez.

Azkenik, kontuan izan behar da lehorketarako erabilitako iturri bilgailua ez dela arraste esperimentuak egiteko erabili den berbera, mantentzen den ezaugarri bakarra materiala izanik, hau da, biak metakrilatoz eginda daude. Arraste esperimentuetan erabili diren iturri bilgailuen dimentsioak 2.11 Taulan biltzen dira.

2.11. Taula. Arraste esperimentuetan erabili diren iturri bilgailuen faktore geometrikoak eta euren mailak.

FAKTOREAK	MAILAK
D_G (m)	0.15, 0.20
L_B (m)	0.5
H_B (m)	0-0.014

2.11 Taulan ikus daitekeenez, bi iturri bilgailu ezberdin erabili dira zeintzuek diametroan ezberdintzen diren. Dena den, esperimentuetan gehien aldatu den aldagaia H_B izan da, hots, ohantzearen gainazalaren eta iturri bilgailuaren arteko distantzia.

2.1.2.2. Emari handietarako ekipoen neurtutako aldagaiak

Kasu honetan ez da behar aire emariaren eta presioaren neurketa egiteko emari ertainetarako ekipoen egin den prozedura, adierazpen matematikorik ez baita lortu behar, hau da, lehen esan den moduan, kontrol panelean zuzenean ikus daitezke aire emari eta presio balioak.

Karga galeraren neurketari erreparatuz, emari ertainetarako ekipoen eman den karga galerari buruzko azalpena ekipoen honetarako ere betetzen da, baina kontaktore hutsaren karga galera kalkulatzeko ekuazioak dira desberdinak. 2.12 Taulan, arrasterako saiakuntzetan erabilitako kontaktore hutsaren karga galeraren ekuazioa adierazten da.

2.12. Taula. Arrasterako saiakuntzetan erabili den kontaktore hutsaren karga galeraren ekuazioa

Sistema esperimentalak		Ekuazioen konstanteak		
γ (°)	D_0 (m)	k_1 (Pa·s ² /m ²)	k_2 (Pa·s/m)	R^2
45	0.04	2.66	-59.03	0.998

2.12 Taulan, kontaktore hutsaren karga galera kalkulatzeko ekuazio bakarra dago arraste esperimentu guztiak kontaktore berean egin direlako eta gasaren sarrerako diametroa ez delako aldatu.

2.2. MATERIALEN KARAKTERIZAZIOA

Tesi honen esperimentuetan material ezberdinak erabili dira eta atal honetan material horien ezaugarriak azalduko dira.

Tesi honen lehenengo esperimentuak beirazko partikulak erabiliz egin ziren. Izan ere, beira tamaina ezberdineko partikulekin lan egiteko eredu egokia da; beiraren dentsitatea beste material askoren antzekoa da, eta beraz, esperimentuetatik lortzen diren emaitzak eta ondorioak beste material ezberdinekin egindakoekin konpara daitezke. Gainera, beraren ezaugarri nagusia portaera ideala izatean datza. Ondoren, hain idealak ez diren solidoak erabiliz egin dira esperimentuak, hala nola, harea, ogi arrailatua, garbantzuak eta ilar haziak.

Era honetan, ziklo denborak egiteko garbantzuak, ilar haziak, eta partikula diametro ezberdineko beirazko bolak ($d_p = 0.004$ eta 0.006 m) erabili dira. Material hauek aukeratu dira gure ikerkuntza taldeko aurreko tesietako ziklo denboren azterketak osatzeko eta koloreztatutako partikularen begi bistako jarraipena egiteko egokiak direlako.

Partikulak iturrian biltzeko metodoan erabilitako materiala harea izan da. Hala ere, metodo honen balioztapena egiteko beirazko bolak ($d_p = 0.004$ m) erabili dira, beren portaera idealak erreferentziako materiala izatea eragiten duelako.

Arraste esperimentuak ogi arrailatua eta beirazko bolak ($d_p = 0.002$ m) erabiliz egin dira. Lehortu den materiala partikulak iturrian hartzeko metodoaren balioztapenean erabilitako harea berbera izan da.

Solidoaren tamaina mugatzeko orduan, 0.001 m baino partikula diametro txikiagoa duten solidoak partikula fin gisa hartu diren bitartean, 0.001 m baino handiagoak direnak partikula handi gisa hartu dira. Beraz, tesi honetako esperimentuak partikula fin (harea eta ogi arrailatua) eta handiak (beira, garbantzuak eta ilar haziak) erabiliz egin dira.

Ondoren esperimentuetan erabilitako material bakoitzaren deskribapen zehatzagoa egingo da.

Beirazko bolak

Beirazko bolak lehen eman diren ezaugarriak dituztenez, iturri ohantzeetan erabiltzeko ezin hobeak dira. Beira tesi honetan gehien erabili den materiala izan da, baina beti ez da partikula diametro berdina erabili. Arestian aditzera eman denez, esperimentu mota bakoitzerako beirazko bolen partikula diametro egokiena erabili da. Horrela, 0.002 , 0.004 eta 0.006 m-ko beirazko bolak erabili dira.

Beirazko bolak itxura erregularra eta partikula tamaina homogenea dutenez, euren dentsitatearen kalkulua masaren eta bolumenaren arteko zatiketaren datza. Hala, beirazko bolen dentsitatea 2420 kg/m^3 da. Beirazko bolen ohantzearen dentsitatea (ρ_b) ere esperimentalki neurtu da. Era honetan, 0.002 m-ko beirazko bolen ohantzearen dentsitatea 1537 kg/m^3 da, 0.004 m-koena 1470 kg/m^3 da eta 0.006 m-koena 1410 kg/m^3 da.

Geldart-en sailkapenaren arabera, esperimentuetan erabilitako partikula diametro ezberdineko beirazko bolak D taldekoak dira, hau da, iturri ohantzerako ezaugarri onak dituzten partikulak.

Beirazko bolak partikula handiak direnez eta iturri ohantze egonkorak sortzen dituztenez, esperimentuetan ez da erdiko hodirik erabili behar. Dena den, beirazko bolekin erdiko hodi ezberdinekin ere lan egin da tesi honetan, erdiko hodiekin iturkuntza egonkorreko funtzionamendua hobetzeaz gain, operaziorako behar den aire emaria eta sortzen duten karga galera txikiagoak baitira.

Harea

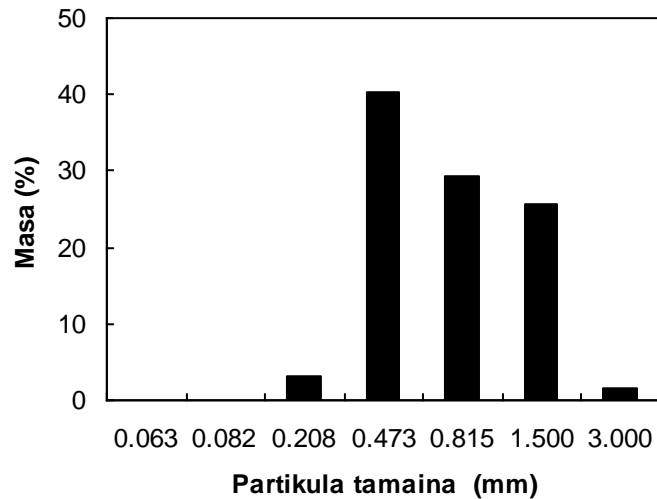
Tesi honetan sarri erabili den beste materiala zuzenean harrobitik ekarritako eraikuntzarako harea izan da. Harrobitik heltzen denean, hareak %7 eta %10 bitarteko hezetasuna du eta, beraz, esperimentuak egin aurretik espezifikazioen arabera lehortu behar da, hots, 0.0005 kg ur/ kg solido lehor izan arte.

Hareak tamaina banaketa zabal samarra du, hau ohantze fluidizatuertarako arazo nagusia den bitartean, iturri ohantzeartarako ez da arazoa. Harearen tamaina banaketa xehetasunez neurtzeko, harearen banaketa granulometrikoa egin da. Horretarako, bibraziozko bahegailua eta ISO arauaz estandarizaturiko bahe ezberdinak erabili dira. Horrela, 2.13 Taulan erakusten diren emaitzak lortu dira.

2.13. Taula. Harearen banaketa granulometrikoa.

Tamaina tartekak, mm	Masa, %
<0.063	0
0.063-0.15	0
0.15-0.315	3.19
0.315-0.63	40.36
0.63-1	29.22
1-2	25.53
2-4	1.70

2.12 Irudian harearen banaketa granulometrikoaren irudikapena agertzen da.



2.12. Irudia. Harearen banaketa granulometrikoa.

2.12 Irudian nabaria denez, erabilitako harea diametro ezberdineko partikulaz osatuta dago.

Partikularen gainazal/bolumenean oinarrituriko batez besteko diametroa 2.13 Taulako balioak erabiliz eta hurrengo ekuazioa aplikatuz kalkulatu da.

$$\bar{d}_p = \frac{1}{\left[\sum \left(\frac{x_i}{d_{p_i}} \right) \right]} \quad (2.7)$$

(2.7) Ekuazioaren bidez kalkulaturiko diametroari Sauter-en batez besteko diametroa ere baderitzo eta ekuazio horren bidez lortu den harearen batez besteko tamaina 0.0006 m da. Partikularen batez besteko diametroa 0.001 m baino txikiagoa izateak ohiko iturri ohantzeen operazioa zaildu egiten du.

Tamaina banaketa duen harea erabiliz egin diren esperimenteren emaitzak osatzeko harea bi frakzioetan banatu da, 0.0002-0.0006 eta 0.0007-0.001 m tartean, hain zuzen ere.

Harearen dentsitate erreala eta gainazal azalera Micromeritics-en ASAP ekipo bolumetrikoan kalkulatu dira. Horrela, harearen dentsitate erreala 2358 kg/m³ da eta gainazal azalera 65 m²/kg.

Hareazko ohantzearen dentsitatea aurretik beirazko bolena kalkulatu den bezala lortu da, zehatz-mehatz, 1518 kg/m³ delarik.

Geldart-en sailkapenaren arabera, aipatu den partikula diametroak eta dentsitateak dituen harea, Geldart-en B taldeko materiala da, nahiz eta D taldetik hurbil dagoen. Teoria atalean esan den bezala, B taldea harearen antzeko materialek osatzen dute. Talde honetako partikulak ondo fluidizatzen dira, baina ohantzean zehar aire burbuilak eratzen dituzte. Berdina gertatzen da harea iturri ohantzeetan erabiltzen bada. Material

finaz, ez da iturri ohandzeen funtzionamendu egokia lortzen. Hala ere, kontaktorearen diseinu egokia eta erdiko hodiak erabiliz, harea iturri ohandzeetan era egokian funtzionaraztea lor daiteke. Nabarmenezkoa da partikula finekin lan egiteko erdiko hodia erabili behar dela nahitaez.

Harearen porotasuna Micromeritics AUTOPORE ekipoa erabiliz erdietsi da. Ekipo honek merkurioaren barneraketaren bidez solidoaren egitura porotsua nolakoa den adierazten du. Barneraketa hau presio baxuan egiten da 360 μm baino handiagoak diren poroak daudenean eta presio altuan (400 MPa) 30 \AA baino handiagoak diren poroak daudenean.

Saiaturiko laginen heterogeneotasunaren ondorioz, esperimentuak bikoiztu egin dira balio egokiak eskura ahal izateko. Era honetan, harearen barrura sartu den merkurio kantitatearen balioak 0.005 ml/g ingurukoak dira eta harearen poroen banaketa 10 eta 100 μm artekoa da. Tesian erabili den harearen porotasuna 0.41 da.

Garbantzukak

Ziklo denborak egiteko erabili diren materialen artean garbantzukak ere badaude. Garbantzukak biomasa gisa hartzen diren materialen barnean daude. Garbantzuen partikula diametroa gutxi gorabehera 0.010 m-koa da. Garbantzuen dentsitatea beirazko boletarako erabili den prozedura berberari jarraituz neurtu da, eta 1210.9 kg/m^3 da. Ohandzearen dentsitatea neurtzeko ere prozedura bera erabili da eta 624 kg/m^3 da.

Garbantzukak Geldart-en sailkapenaren D multzoaren barnean daude. Dena den, garbantzuen portaera ez da ideala, partikula irregular samarrak direlako. Hori dela eta, partikulen antolamenduaren arabera, batzuetan "slugging" efektua gertatzen da edo ohandze osoak gora egiten du eta guztiz geldi geratzen da airea ez delako gai garbantzuen artean iturria irekitzeko. Kasu horietan, esperimentuak ez dira baliogarriak, ohandzeko partikula guztiak ez direlako mugimendu zirkularrarekin mugitzen.

Ilar haziak

Ilar haziak deituriko solidoak, zehazki ilar beltz haziak dira. Ilar haziak, garbantzukak bezala, ziklo denborak neurtzeko erabili dira eta biomasatzat hartzen dira. Ilar hazien itxura dilisten antzekoa da, baina borobilagoa eta euren partikula diametroa 0.0034 m-koa da. Ilar hazien dentsitatea, aurrekoak bezala neurtu da eta 1230 kg/m^3 da, eta ohandzearena 832 kg/m^3 . Geldart-en sailkapenaren arabera, ilar haziak (beirazko bolak eta garbantzukak bezala) D taldekoak dira.

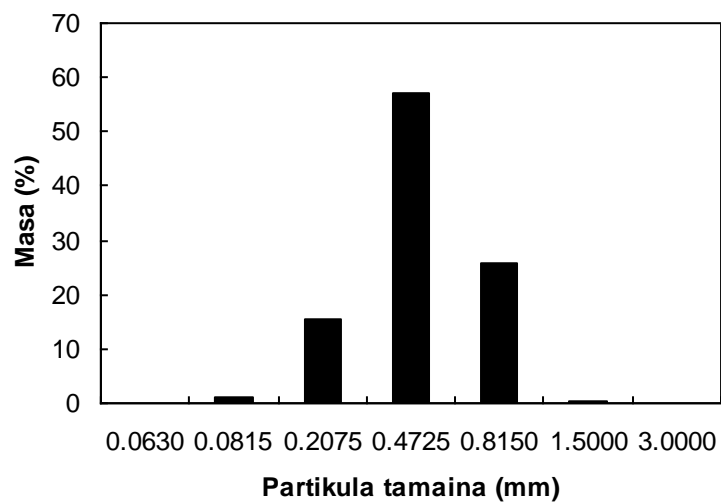
Ogi arrailatua

Ogi arrailatua arraste saiakuntzetan erabili da. Ogi arrailatuaren partikula dentsitatea 1038 kg/m^3 da eta ohandzearena 536 kg/m^3 , besteak bezala esperimentalki neurtuak direlarik.

Ogi arrailatuak partikula banaketa duenez, partikula diametroa kalkulatzeko harearen kasurako egin diren banaketa granulometrikoa egin behar izan da. 2.14 Taulan eta 2.13 Irudian erakusten dira banaketa granulometrikoaren balioak.

2.14. Taula. Ogi arrailatuaren banaketa granulometrikoaren balioak.

Tamaina tartekak, mm	Masa, %
<0.063	0
0.063-0.15	1.04
0.15-0.315	15.42
0.315-0.63	57.24
0.63-1	25.71
1-2	0.24
2-4	0.02



2.13. Irudia. Ogi arrailatuaren banaketa granulometrikoa.

2.14 Taulako balioak (2.7) Ekuazioan ordezkatzuz, ogi arrailatuaren batez besteko partikula diametroa 0.00041 m-koa dela kalkulatu da. Ogi arrailatuaren partikula diametroa eta dentsitatea kontuan izanik, Geldart-en sailkapenaren B multzoari dagokio.

3. Kapitulu

3. SOLIDOAREN ZIKLO DENBORAREN AZTERKETA

3.1. SOLIDOAREN ZIKLO DENBORAK

3.2. SOLIDOAREN ZIKLO DENBORAREN AZTERKETA HIDRODINAMIKA

3.2.1. Partikula trazatuaren jarraipen metodoa: prozedura esperimental

3.2.2. Partikula trazatuaren bidezko ziklo denboren emaitzak

3.2.2.1. Faktoreen eraginaren azterketa estatistikoa

3.2.2.2. Faktoreen eraginaren azterketa kuantitatiboa

3.2.2.3. Solidoaren ziklo denboren sistemen arteko konparazioa

3.2.2.4. Ziklo denbora eta zirkulazio emariaren tartekak

3.2.3. Ziklo denborak neurtzeko partikulak iturrian biltzeko metodoa

3.2.3.1. Partikulak iturrian biltzeko metodoaren prozedura
esperimental

3.2.3.2. Partikulak iturrian biltzeko metodoaren balioztapena

3.2.3.3. Partikulak iturrian biltzeko metodoaren emaitzak

3.3. KORRELAZIO ENPIRIKOAK

3.3.1. Korrelazio enpirikoen proposamenerako prozedura esperimental

3.3.2. Korrelazio enpirikoen emaitzak

3.4. SARE NEURONALAK

3.4.1. Sare neuronalen prozedura esperimental

3.4.2. Sare neuronalen emaitzak

3.5. SARE NEURONALEN ETA KORRELAZIO ENPIRIKOEN ARTEKO KONPARAZIOA BATEZ BESTEKO ZIKLO DENBORAK ESTIMATZEKO

3. SOLIDOAREN ZIKLO DENBORAREN AZTERKETA

Tesi honen helburu nagusienetariko bat solidoaren ziklo denboren ikerketa sakona egitea da. Horretarako, material, erdiko hodi mota eta kontaktore ezberdinak erabiliko dira eta azken hauen faktore geometrikoak aldatuko dira. Dena den, lehenengo ziklo denborak zer diren, zertarako baliagarriak diren eta nola kalkulatu diren azalduko da. Horretaz gain, ziklo denboren azterketa bibliografiko zabala egingo da, lehen aldiz argitaratu zenetik gaur egun arte. Amaitzeko, solidoaren ziklo denborak bi teknika ezberdin erabiliz lortuko dira, horietako bat gure ikerkuntza taldean garatutako metodo berria izanik.

3.1. SOLIDOAREN ZIKLO DENBORAK

Iturri ohandeen ezaugarri bereizgarrietako bat partikulen zirkulazio edo mugimendu ziklikoa da. Iturri ohandeen portaera ona dela kontsideratzen da ohiko aplikazioetan (lehorketa, aleketa eta estalketa) partikulen mugimendu ziklikoarekin erlazionatuta dauden propietateei esker.

Iturri ohandeen diseinuan kontuan izan beharreko punturik garrantzitsuenetariko bat solidoaren eta gasaren traiektoriarik hoberena ezartzean datza. Gainera, solidoak ohandean duen mugimendua jakitea oso garrantzitsua da iturri ohandeen aplikaziorako, energia eta masa transferentziak erregulatzen dituelako eta, beraz, erreakzio kimikoetan eragiten duelako. Horretaz aparte, solidoaren ziklo denbora jakitea ia ezinbestekoa da zenbait aplikaziotarako operazio baldintzarik egokiena finkatzea ahalbidetuko baitu.

Bestalde, iturri ohandeetako gas-solido ukipenaren eraginkortasuna ebaluatzeko eta ohandeen funtzionamendua aurrerako faktorerik kritikoenetakoa da solidoen zirkulazioa neurtzea eta kuantifikatzea. Gainera, zirkulazio emaria jakinik, operazio jakinerako kontaktoreak tratatu ahal duen solido kantitatea, hots, kontaktorearen bolumena determinatu ahal da.

Bibliografian, euren artean erlazionatuta dauden parametro ezberdinez deskribatu da partikulen zirkulazioa modu kuantitatiboan. Parametro horien artean zirkulazio emaria (Thorley et al., 1959), partikulen zikloen maiztasuna (Van Velzen et al., 1974), partikulen abiadura iturgunean eta eraztungunean (Suciu eta Patrascu, 1977) eta partikulen ziklo denboren banaketa (Mann eta Crosby, 1975) daude. Horretaz gain, egoitza denboraren banaketa ingeniariak kimikoan askotan erabili den kontzeptua da, eta Marreto et al.ek (2007) adierazi zuten zutenez Dankwerts (1953) izan zen kontzeptu hori lehendabizikoz ezarri zuena.

Lehenik eta behin, ziklo denbora eta zirkulazio emaria definituko dira, tesi honetan partikulen zirkulazioa deskribatzeko erabili diren parametro garrantzitsuenak baitira. Ziklo denbora (t_c) partikula batek ohandearen edo eraztungunearen gainazaletik kontaktorean beherantz jaitsi, iturgunera sartu eta berriz ere ohandearen gainazalera heltzeko behar duen denbora da. Ildo beretik, zirkulazio emaria (W_s) denbora unitateko kontaktorean zirkulatzen duen solido kantitatea da. Hortaz, solidoaren zirkulazio emaria ohandeko solidoaren pisua eta solidoaren batez besteko ziklo denboraren arteko zatiketaren ondorio da honako ekuazioaren arabera:

$$W_s = \frac{M_s}{t_c} \quad (3.1)$$

non M_s ohantzeko solidoaren pisua (kg-tan adierazita), eta t_c solidoaren batez besteko ziklo denbora (s-tan adierazita) diren.

Mathur eta Gishler-ek (1955a) eraztunguneko solidoaren fluxua neurtu zuten zutabearen horman behera doan partikula bakarraren abiadura neurtuz.

Bibliografian, ziklo denbora partikulak eraztungunean igarotzen duen denbora bezala hartzen da, izan ere partikulak iturgunean gora igaroten duen denbora oso txikia baita. Horrela, Thorley et al.ek (1959) partikulen fluxu lerroetatik abiatuz denbora zikloen banaketa neurtu zuten. Gero, Becker-ek (1961) ziko denbora maximoa neurtu zuen markatutako partikula bat hormaren kontrako posizio batean utziz eta eraztungunearen goikaldeko gainazalean berriro agertu arte igaro den denbora neurtuz.

Mann eta Crosby-ren (1973) arabera, iturri ohantzeak ziklo denbora banaketan arabera aztertu daitezke. Hau da, ziklo denboren banaketa sistema itxien ezaugarria da egoitza denboren banaketa sistema jarraituen bereizgarria den bezalaxe. Geroago, Mann eta Crosby-k (1975) erdiko hodiak dituzten iturri ohantzeen ziklo denboren neurketa deskribatu zuten. Autore horiek ziklo denboren banaketa neurtzeko magnetizatutako partikula bat erabili zuten. Partikulak erdiko hodiaren goialdean zegoen hari elektromagnetikoa aktibatzen zuen, partikularen ibilbidea grabatzeko.

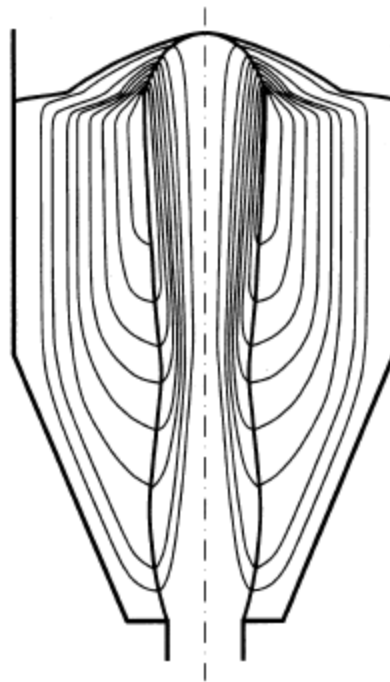
Robinson eta Waldie-k (1978) tamaina ezberdinetako ohantzeen partikulen ziklo denborak neurtu zituzten bai kronometroz baita filmazioz ere. Neurketa horietatik ondorioztatu zutenez, partikula diametroa txikiago denean ziklo denbora handiago da. Zehazki, partikula diametroa erdira txikitzen denean ziklo denbora %60an handitzen da. Honen zergatia partikula tamainaren eta ibilbidearen arteko loturan datza. Hau da, tamaina txikiko partikulek horma kontrari zehar egiten dute behera eta ondorioz ibilbide luzeagoak egiten dituzte iturgunean sartu baino lehen. Gertaera honen berri Piccinini et al.ek (1977) eman zuten eta baita Thorley et al.ek (1959) ere. Ildo beretik, Robinson eta Waldie-k (1978) hurrengo behaketa egin zuten: partikulak ziklo denbora laburra egin badu, hurrengo zikloa ere berriro laburra izango da seguruen. Honen arrazoia da, ziklo denbora laburra egin duen partikulak, ohantzean behera jaistean distantzia laburra egingo duelako iturgunean sartu baino lehen. Ondoren, iturgunean gora egiten du interfasetik hurbil eta iturburua zeharkatu ondoren iturgunetik hurbil erortzen da berriro behera egiteko.

Dena den, ziklo denboraren laburtze hori eta Chatterjee-k (1970) neurri beretsuko partikulaz osatutako ohantzeen zirkulazio emaria ez datoz bat. Autore honek proposatu zuen adierazpenaren arabera zirkulazio emaria $d_p^{-0.73}$ -ren proportzionala da. Robinson eta Waldie-k (1978) kontraesan hau partikulen portaera ezberdinei esleitu zioten, ez baita berdina partikulen portaera ohantze uniformeetan edo tamaina ezberdinen nahastez osatutako ohantzeetan.

Roy et al.ek (1994), ziklo denboren banaketak neurtu zituzten erradioaktiboki trazatuta zegoen partikula baten jarraipenaren bidez. Autore hauek ondorioztatu zutenez, batez besteko ziklo denbora ez da ohantzearen altueraren menpekoa.

Morales-ek (2002) ohantzeko solidoen tamaina eta dentsitate berbera zuen partikula margotua erabili zuen partikulen jarraipenerako. Hala, ziklo denborak irudien tratamendurako sistemaz neurtu zituen, hots, iturburutik atera, eraztungunean sartu eta berriro iturburuan agertu arte igarotako denbora. Modu honetan, fotogramen kopuruaren arabera eta fotogramen arteko denbora $1/25$ s-koa dela kontuan izanik, trazatutako partikularen ziklo denborak kalkulatu zituen.

Morales-ek (2002) egindako esperimentuetan ikusi zenez, partikulak ziklo denbora luzeagoak ditu iturburutik kontaktorearen hormaren ondoan jauzi egiten duenean. Honen azalpena, hormatik hurbilago dauden ibilbideak deskribatzean datza, 3.1. Irudian ikus daitekeen bezala.



3.1. Irudia. Partikulen fluxuaren ibilbideak (San José et al., 2004).

Zenbait ikerlarik solidoaren ibilbideak esperimentalki ikertu dituzte (Thorley et al., 1959; Van Velzen et al., 1974; Robinson eta Waldie, 1978), eta beste batzuk eredu teorikoak proposatu dituzte eraztungunean solidoaren ibilbideak auresateko (Lim eta Mathur, 1978; Sullivan et al., 1987; Benkrid eta Caram, 1989; Hook et al., 1992). Lehenengoan artean, fase solidoaren ziklo denborak kalkulatzeko hurbilketa ezberdinak egin dituzte. Adibidez, San José et al.en arabera (2004) partikula bat bigarren aldiz iturburuan agertzeko behar den denbora eta Seiler et al.ek (2008) partikula iturburutik beherantz doanean eraztungunea zeharkatzeko behar duen denbora. Berriki, Luo et al.ek (2015) partikularen ziklo denbora hiru gunek zeharkatzeko behar duen denboraren batura dela adierazi zuten.

Ziklo denboren ikerketetatik, baldintza esperimentalek duten eragina antzeman da. Horrela, argi dago kontaktorearen angeluak (Thorley et al., 1959), partikula diametroak (Chatterjee, 1970), ohantzearen altuerak eta gasaren sarrerako diametroak (Waldie eta Wilkinson, 1986) ziklo denboran eragina dutela.

Aurreko lerroetan aipatu den moduan, bibliografian ikerketa ugari aurki daitezke ohiko iturri ohantzeetan solidoak duen zirkulazio emariari buruz, baina gutxi dira ohantze

konikoetan egin direnak. Gaur egun arte, iturri ohantze zilindrikoetako solidoaren zirkulazio abiadura ikertu dituztenen artean hauexek daude: Mathur eta Gishler, 1955a; Thorley et al., 1959; Chatterjee, 1970; Van Velzen et al., 1974; Lim eta Mathur, 1978; Waldie eta Wilkinson, 1986; Randelman et al., 1987; Benkrid eta Caram, 1989; Kim eta Cho, 1991; He et al., 1994; Roy et al., 1994; Cassanello et al., 1999; Liu et al., 2008. Erdiko hodidun iturri ohantzei buruzko ziklo denbora neurketen informazioa ere eskasa da.

Partikulen zirkulazioa determinatzeko metodoen artean erabilienetako bat partikularen jarraipen teknikak erabiliz solidoen ibilbideak ikertzean datza (Takeuchi et al., 2005). Urteetan zehar, partikularen jarraipen teknika ezberdinak garatu dira solidoaren mugimendua ikertzeko. Teknika horien konfigurazioa kasu bakoitzean ezberdina izan daitekeen arren, bi talde nagusitan bana daitezke erabilitako sentsorearen posizioaren eta izaeraren arabera, metodo barruragarriak eta metodo barruraezinak deituak.

Metodo barruragarriak erresistentzian, induktantzian, inpedantzian eta zunda piezoelektriko edo termikoan oinarritzen diren bitartean, metodo barruraezinak xurgatze erradiazioan eta argazkigintzan oinarritzen dira besteak beste (Busciglio et al., 2008).

Metodo barruraezinen artean, partikularen abiadura neurtzeko prozedurarik erabilienetakoa kontaktorearen horma gardenean zehar trazatzailearen zirkulazioa begi bistaz behatzean datza. Neurketa hau egiteko kontaktorean barrura sartu behar diren beste hainbat gailu ere erabili dira, hala nola, adierazle edo trazadore erradioaktiboaren jarraipen teknika (Van Velzen et al., 1974), magnetikoki markaturiko partikularen metodoa (Mann eta Crosby, 1972; Waldie eta Wilkinson, 1986), X-izpien bidezko partikularen jarraipen teknika (Roy et al., 1994), partikulen abiadura-irudien teknika (Liu et al., 2008) eta Doppler laser anemometriaren teknika (Boulos eta Waldie, 1986).

Bestalde, kontaktorearen horma gardenetik trazatzailearen begi bistazko behaketaz ezin denez iturgunean gertatzen dena ikusi, zenbait kasutan horma laua duen iturri ohantze erdi-zilindrikoak erabili dira, mota honetako kontaktoreek gune ezberdinetako funtzionamendua, iturgunekoa bereziki, hobeto ikustea ahalbidetzen baitute. Hala, partikularen abiadura neurtu daiteke abiadura handiko kamera erabiliz iturgunean edo eraztungunean partikulak distantzia jakin bat egiteko behar duen denbora kronometraturaz (Mathur eta Gishler, 1955a; Thorley et al., 1959; Lefroy eta Davidson, 1969; Suci eta Patrascu, 1977; Whiting eta Geldart, 1980; Caflin eta Fane, 1983; Day et al., 1987; Sullivan et al., 1987; Kim eta Cho, 1991; Grbavcic et al., 1992; Saadevandi eta Turton, 1998; Ji et al., 1998; Ishikura et al., 2003; Subramanian et al., 2003).

Aipagarria da, eztabaida ugari izan direla kontaktore erdi-zilindriko eta zilindrikoen portaerari buruz. Zenbait ikertzailek bi sistemen artean diferentzia handirik ez dagoela adierazi duten bitartean (Thorley et al., 1959; Mikhailik, 1966; Mamuro eta Hattori, 1968; Whiting eta Geldart, 1980), beste batzuen arabera zalantzak daude lortzen diren emaitzen balioei dagokionez (Boulos eta Waldie, 1986; Randelman et al., 1987; Benkrid eta Caram, 1989; He et al., 1994, 1998). Ikertzaile hauen arabera, kontaktore erdi-zilindrikoak ez dira zutabe osoko iturri ohantzearen errepresentazio egokia, kontaktorea erdibitzen duen hormak partikulen bideari eragiten diolako.

Partikulen abiaduraren ikerketarako ere iturri ohantze koniko erdiak erabili izan dira. Boulos eta Waldie-k (1986) Doppler laser anemometroaren bidez neurtu zituzten

partikularen abiadurak kontaktore koniko erdian. Wang et al.ek ere (2009) kontaktore koniko erdian partikularen abiadura eta solidoek betetako frakzioak ikertu zituzten eta ondoren kontaktore osoko emaitzekin alderatu zituzten zuntz optikoaren bidezko metodoa erabiliz. Kasu honetan, kontaktore zilindrikoetan ez bezala, lortzen diren emaitzak antzekoak dira kontaktore erdietan eta osoetan. Dena den, Boulos eta Waldieck (1986) kontaktore erdien teknikaren desabantaila nagusia emaitzak lortzeko behar den denbora handia dela adierazi zuten.

Metodo barruragarrien artean, ohikoena zuntz optikoaren bidezko metodoa da. Metodo hau partikularen abiadura neurtzeko lehendabizikoz ohantze fluidizatueta erabili zen arren, Randelman et al.ek (1978) erabili zuten lehendabizikoz iturri ohantzeetan. Honelako metodoak askotan erabili diren arren, desabantailak dituzte. Nagusiena gailuak ohantze fluidizatuaren hidrodinamikan perturbazioak eragitean datza (Gajewski, 1985).

Zuntz optikoaren bidezko metodoa erabiliz, gure ikerketa taldean lan ugari egin dira partikularen jarraipena egiteko, bai iturri ohantze zilindrikoetan (Olazar et al., 2001b; San José et al., 2004, 2007b) baita iturri ohantze konikoetan ere (Olazar et al., 1995, 1998; San José et al., 1998b, 2006). Hala, zuntz optikoaren bidez, partikula abiaduren banaketa (Olazar et al., 1995, 1998; San José et al., 1998b), iturgunera doan solidoaren jarioa (Olazar et al., 2001b) eta ohantzeko porotasunaren banaketa eta iturgunearen geometria (Olazar et al., 1995, 1998; San José et al., 1998a) neurtu dira iturri ohantzeetan. Gainera, geometria ezberdinetako iturri ohantze konikoak (γ , D_0) eta operazio baldintza ezberdinak erabiliz, (d_p , H_0 , u) partikula abiaduraren osagai bertikala lortu da bai iturgunean baita eraztungunean ere (Olazar et al., 1998). San José et al.ek (1998b) berriz, partikula abiaduraren osagai horizontala kalkulatu dute iturri ohantze konikoetan masaren kontserbazio ekuazioa ebatziz iturgunean eta eraztungunean. Lan horretan, iturgunean zeharreko partikularen abiadura eta eraztungunetik iturgunera pasatzen diren solidoen jarioaren neurketak egin ziren. Geroago, San José et al.ek (2004), iturri ohantze zilindrikoetan partikularen ziklo denboraren banaketak kalkulatu zituzten partikulen bideari jarraituz, eta batez besteko ziklo denbora kalkulatzeko korrelazioak garatu zituzten faktore geometriko eta baldintza esperimental ezberdinetarako.

Gure ikerketa taldeaz gain, beste ikerlari batzuk ere erabili dute zuntz optikoa partikularen jarraipena egiteko (Benkrid eta Caram, 1989; Randelman et al., 1987; He et al., 1994; Pianarosa et al., 2000; Ishikura et al., 2003; Zhao et al., 2006; Wang et al., 2009).

Beste metodoekin alderatuz, zuntz optikoaren neurketa teknika erabilera errazekoa eta kostu txikikoa da. Aldiz, metodo barruragarria denez, neurketa ekipoaren barnean egin behar da, honek tokiko solidoaren jarioa eragozten duelarik. Beste desabantaila bat, partikulen jarioa oso dentsua den kasuetan neurketarik egin ezin izatea eta partikulen jarraipen osoa ezin neurtu izatea dira, zuntz optikoaren tamaina dela eta, emaitza ezegokiak ematen baititu.

Metodo hau hobetzeko ikerketak egin ziren, zuntz optikoaren diseinu egokiena lortzeko. Izan ere, Liu et al.en arabera (2003), zuntz optikoaren puntak eta kalibraketa prozedurek emaitzetan eragiten dute, eta errore sistematikoa sar dezakete porotasunaren eta partikulen abiaduraren neurketan. Wang et al.ek ere (2009) bide beretik jarraitu dute,

zuntz optikoa kalibratzeko prozedura berri bat diseinatu dute eta lortzen diren emaitzak egokienak izan daitezen zuntz optikoa kokatu behar den puntua ikertu zuten.

Lehen aipatu den bezala, solidoaren zirkulazio abiaduraren inguruan, askoz ikerketa gutxiago egin dira iturri ohantze konikoetan iturri ohantze zilindrikoetan baino. Gainera, beirazko bolak erabiliz gure ikerketa taldean frogatu denez (Olazar et al., 1998), iturri ohantze konikoetan partikulak egiten duen bidea iturri ohantze zilindrikoetan egiten duenarekin ez dator bat. Partikularen bidea ezberdina izateaz gain, iturri ohantze konikoetan eraztungunetik iturgunera doan solidoaren jarioa ohantzearen oinarrian eta posizio longitudinal ezberdinetan gertatzen da. Aldiz, iturri ohantze zilindrikoetan solido jarioa eraztungunetik iturgunera kontaktorearen oinarriko sekzio konikoan pasatzen da batez ere, eta ondorioz solidoak bide luzeak deskribatzen ditu, operazio baldintzek nekez aldatzen dutelarik bide hau. Beraz, iturri ohantze zilindrikoekin alderatuz, iturgune-eraztungune fasearte guztian zehar iturgunera pasatzen den solido kantitatea nabarmen handiagoa da iturri ohantze konikoetan.

Iturri ohantze konikoetan partikularen abiadura neurtzen lehenengoak Gorshtein eta Mukhlenov (1967) izan ziren. Metodo piezoelektrikoa erabiliz (metodo barneragarria) iturri ohantze konikoetan partikularen abiadura bertikala neurtu zuten iturgunear. Ondoren, aurretik azaldu den moduan, ikerketa sakona egin zuen gure ikerketa taldeak iturri ohantze konikoetan zuntz optikoa erabiliz. Wang et al.ek ere (2009), lehen aipatu den bezala kontaktore koniko erdia eta osoa erabiliz partikularen abiadurak eta solidoak betetako frakzioak ikertu zituzten ondoren euren alderaketa egiteko.

Iturri ohantzeen aldaera den erdiko hodiun ohantzeetarako bibliografian aurki daitezkeen ikerketak oraindik eta murrizagoak dira. Partikularen abiaduraren azterketarako erdiko hodiun iturri ohantze zilindriko eta iturri ohantze fluidizatuekin egindako ikerketak aurki daitezke soilik.

Aurretik azaldu den bezala, erdiko hodiak iturri ohantzearen hidrodinamikari eta solidoaren zirkulazio abiadurari eragiten dio. Ohantzearen beheko zatiaren portaera ezberdina da erdiko hodia erabiltzen denean, eta ohantzearen geometria, partikula tamaina, erdiko hodiaren kokapena (edo hanken luzera), hodiaren diametroa eta operazio baldintzen arabera da (Grbavcic et al., 1992; Yang eta Keairns, 1982; Fan et al., 1987; Berruti et al., 1988; Muir et al., 1990; Hattori et al., 1998, 2004; Ijichi et al., 1998; Ji et al., 1998; Ishikura et al., 2003; Zhao et al., 2006; Saadevandi eta Turton, 2004; Neto et al., 2008; Nagashima et al., 2009; Kmiec et al., 2009). Erdiko hodiak erabili diren ikerketak beraz, solidoaren zirkulazio abiaduran eragiten duten operazio faktoreen ikerketara zuzendurik daude.

Saadevandi eta Turton-ek (2004) ordenagailu bidezko bideo teknikak erabiliz, erdiko hodiun iturri ohantze erdian (zilindro erdian) partikulak duen abiadura neurtu zuten, baina erdiko hodian soilik. Erdiko hodiun iturri ohantze zilindrikoan ohikoa denez, eraztungunea era uniformean mugitzen den ohantze bezala kontsideratzen da. Ondoren, Zhao et al.ek (2006) iturri ohantze zilindrikoan zuntz optikoaren bidez partikularen abiadurak neurtu zituzten bai eraztungunearn baita iturgunearn ere, erdiko hodiarekin eta hodiarekin gabe dauden ezberdintasunak aztertzeke. Gasaren abiadurak, hodiaren diametroak eta hanken luzerak kontaktore hauetan duen eragina aztertzeari ere ekin zioten. Ikusi zutenenez, batez besteko solidoaren zirkulazio abiadura txikiagoa da erdiko hodia erabiltzen den kasuetan, nahiz eta hodiaren hanken inguruan nahiko antzekoak

diren bi sistemen abiadurak. Erdiko hodiak sistemak sarrerako gune efikazena duela eta gune honekin jokatuz ohantzea egonkortu egin daitekeela ondorioztatu zuten. Beraz, erdiko hodiaren diametroa eta hanken luzera bi faktore garrantzitsu dira solidoaren zirkulazio abiadura optimizatzeko.

Ondoren, Nagashima et al.ek (2009) erdiko hodi porotsua eta ez-porotsua erabili zituzten, eta ondorioztatu zuten gasaren eta solidoaren kontaktuaren efikazia eta ohantzeko solidoaren zirkulazio abiadura nabarmen hobetzen direla hodi porotsua erabiliz.

Bestalde, Zhong et al.ek (2010) partikulen jarraipena egiteko metodo berritzaile bat garatu zuten mikro-uhin labe bidezko beroketa eta irudi termografia infragorria konbinatuz, oinarri laua duen iturri ohantze fluidizatuan. Modu berean, Qian et al.ek (2013) zuntz optikozko endoskopiaari abiadura handiko kamera ezarri zioten, solido edukiaren bolumen frakzioa neurtzeko hiru dimentsioko iturri ohantze batean. Azken autore hauek erabili zuten teknika berbera erabiliz, Chen et al.ek (2013) partikulen abiaduren banaketa kalkulatu zuten iturri ohantze koniko-zilindrikoan.

Van Buijtenen et al.ek (2011) partikulen egoitza denborei buruzko informazio gehiago eskuratzeko aleketarako erabiltzen diren iturri ohantze fluidizatu mota ezberdinak erabili zituzten. Agarwal et al.ek (2012) irudien bidezko partikulen abiaduren neurketaren bidez, solidoaren zirkulazio emaria kalkulatu zuten iturri anitzeko ohantze fluidizatu diluituan. Osorio-Revilla et al.ek (2012) maltodextrina soluzioaren lehorketan solidoak duen egoitza denboren banaketa lortu zuten. San José et al.ek (2012) batez besteko ziklo denboran eragina duten parametroen analisi estatistikoa egin zuten erdiko hodiak duen iturri ohantze konikoan oinarrituriko lehorgailuan. Azken autore horiek 2013an papergintzatik eratorritako lokatzen ziklo denborak ikertu zituzten erdiko hodiak duen iturri ohantze konikoan oinarrituriko lehorgailuan. Altzibar et al.ek (2013) partikulen ziklo denborak eta solidoaren zirkulazio emariak neurtzeaz gain, kontaktore eta erdiko hodiaren faktoreen aldagai esanguratsuak aztertu zituzten konfigurazio ezberdinetako iturri ohantze konikoetan. Li et al.ek (2015) positroi igorpenaren bidezko partikulen jarraipen teknika erabiliz, partikulen ziklo eta egoitza denboraren banaketa ikertu zuten Wurster ohantze fluidizatuan. Kulah et al.ek (2016) zirkoniozko partikulen abiadura neurtu zuten iturri ohantzeetan.

2012an iturri ohantze konikoaren eskala handitzeko aurrerapen nabarmena egin zen Makibar et al.ek (2012) 25 kg/h-ko planta pilotua eratu zutenean biomasaren pirolisi azkarrerako. Guk dakigula bibliografian erdiko hodiak duen iturri ohantze konikoan zirkulazio emaria hurbildu duten bakarrak dira. Autore hauek ohantze erdi konikoa eta begi bidezko behaketa erabili zuten egurrezko pelleten ziklo denborak harezko ohantzean determinatzeko. Erdiko hodiak ziklo denbora kontrolatzea ahalbidetzen duela ondorioztatu zuten. Hori dela eta, biomasa partikulen batez besteko egoitza denboren balio desiragarria lortzea posiblea da hodi ez-porotsuen hanken luzera (L_H) aldatuz.

Ikerketa teorikoei dagokionez, Yang et al.ek (2014) eredu teoriko bat proposatu zuten hiru dimentsioko iturri ohantze fluidizatuan solidoaren sakabanatzeari eta egoitzari dagozkion ezaugarriak ikertzeko. Ildo beretik, Luo et al.ek (2015) fase solidoaren ezaugarriak denboran zehar duten bilakaeraren zenbakizko simulazioa egin zuten hiru dimentsioko iturri ohantze fluidizatuan. Spreutels et al.ek (2015) gasaren egoitza denbora banaketen azterketa egin zuten trazatzaile erradioaktiboaren jarraipen

metodoaren bidez iturri ohantze konikoan eta ondoren, eraztungunearen eta iturgunearen arteko gasaren banaketarako eredu berritzaile bat garatu zuten. Bukatzeko, bi eratara lortutako emaitza esperimentalak konparatu zituzten.

Azkenik, gure ikerketa taldean Estiati et al.ek (2014) beira erabilia, erdiko hodiekin eta kontaktorearen faktore ezberdinek partikulen ziklo denboratan duten eragina aztertu zuten iturri ohantze konikoetan. Modu berean, Estiati et al.ek (2015) antzeko ikerketa hidrodinamikoa egin zuten garbantzuak erabiliz. Biomasaarekin jarraituz, Saldarriaga et al.ek (2015a) zerrauts partikulen ziklo denborak neurtu zituzten partikula trazatuaren jarraipen metodoaren bidez iturri ohantze konikoan. Bertan ikusi zen nola biomasaarekin lan egitean krater handiak eratzten ziren, eta ondorioz, bi ziklo denbora ezberdin agertzen ziren. Alde batetik, ohiko zikloak ematen ziren, eta bestalde, oso ziklo luzeak, zeintzuak hormaren ondotik igarotzen ziren partikulei dagozkien. Biomasaari buruzko ikerketa hau Saldarriaga-k (2015) bere tesian bildua izan da.

Atal honetan erakutsi den bezala ziklo denboren informazioa funtsezkoa da bai ohantzearen portaera hidrodinamikoa aurreratzeko, baita ohantze hauek era eraginkorrean aplikatu ahal izateko. Bestalde, partikulen tamaina handi samarra denean (milimetro batzuk), ziklo denbora ikertzeko metodorik eraginkorrena begi bidezko partikularen jarraipena da, kontaktore gardenak horretarako duen aukeraz baliatuz. Hala, erdiko hodidun iturri ohantze konikoen ikerketa sakona egin ahal izan da, eta solidoak sistema esperimental ezberdinetan duen zirkulazio emaria eta ziklo denboren berri izan ahal da.

3.2. SOLIDOAREN ZIKLO DENBORAREN AZTERKETA HIDRODINAMIKOA

Tesi honetako sarrera atalean ziklo denborei buruzko teoria eta bibliografia azaldu da. Bertan, partikularen zirkulazioaren ezagutza oso garrantzitsua dela iturri ohantzeen aplikazioan eta zirkulazio abiadura iturri ohantzeen funtzionamendua aurreratzeko faktorerik kritikoenetakoa dela aditzera eman da.

Atal honetan, partikula handien eta partikula finen ziklo denborak neurtzeko erabiliriko bideak deskribatuko dira. Azken urteotan, gure ikerketa taldean ziklo denborak neurtzeko begi bidezko partikularen jarraipen metodoa erabili da (partikula trazatuaren jarraipen metodoa). Ostera, material finen kasuan partikularen jarraipena begi bistaz egitea oso zaila edo ezinezkoa da, partikula koloreztatuta egon arren txikiegia baita beste partikuletatik bereizteko. Ondorioz, material finen ziklo denborak neurtu ahal izateko metodo berri bat abiarazi behar izan da. Partikulak iturritik ohantzearen gainazalera erortzean biltzen dituen hiruki itxurako gailua diseinatu eta metodologia abiarazi da (partikula iturrian biltzeko metodoa deitua). Metodo berri hau hurrengo atalean zehatzago deskribatuko da. Aurretik, partikula trazatuaren jarraipen metodoa azalduko da (tesi honetan ohiko metodoa ere deitua), eta metodo hori erabiliz lortu diren emaitzak erakutsiko dira.

3.2.1. Partikula trazatuaren jarraipen metodoa: prozedura esperimentalak

Solidoen zirkulazio emaria lortzeko solidoaren batez besteko ziklo denbora jakitea ezinbestekoa da. Zirkulazio emaria eta batez besteko ziklo denbora alderantziz proportzionalak dira, hau da, aurkako joera dute. Horrela, zirkulazio emaria handiago

denean, partikulak bizkorrago zirkulatzen dute eta, beraz, denbora gutxiago behar dute zikloa egiteko (eraztungunean zehar behera jaitsi, iturgunetik gora igo eta iturritik erori). Hortaz, egin diren saiakuntzak solidoen batez besteko denborak ateratzeko diseinatuko dira.

Sistema esperimentaletan, zirkulazio emariaz eta batez besteko ziklo denboraz gain beste bi parametro hidrodinamiko ere kontuan hartu dira, hots, ziklo denbora maximoa eta ziklo denbora minimoa. Beraiek adierazten duten moduan, ziklo denbora maximoa esperimentu bakoitzean hartutako ziklo denboren artean balio handiena da, eta ziklo denbora minimoa berriz, esperimentu bakoitzean hartutako ziklo denboren artean baliorik txikiena. Iturri ohantze konikoetan, ziklo denbora maximoa partikulak ohantzea zeharkatzeko egin ditzakeen ibilbide ezberdinen artean partikula kontaktorearen hormaren ondotik jaisten den kasuetan gertatzen da, eta ziklo denbora minimoa erdiko hodiaren ondotik jaisten den kasuetan. Hala, iturri ohantze konikoetan ziklo denbora maximoa eskuratzeko partikula bat hormaren ondoan utzi da eta ohantzea zeharkatzeko behar duen denbora begi behaketaz (horman zehar) neurtu da. Lorturiko ziklo denbora maximoaren balioa adierazgarria izan dadin, neurketa gutxienez sei aldiz errepikatu da.

Zenbait kasutan gerta daiteke neurketa egiteko orduan partikula iturritik eraztungunera erori eta ez behatzea. Normalean ikusteko arazorik ez dagoen arren, hau gertatzen denean partikulak ziklo bat baino gehiago egin ditu, eta beraz neurtutako ziklo denbora ohikoa baino handiagoa da. Horregatik, neurtutako denborak egokiak diren ala ez jakiteko partikularen ziklo denbora maximoa neurtu da, eta denbora hau gainditzen duten ziklo denborak baztertu egiten dira ziklo bat baino gehiago egin dutelako partikulek. Izan ere, partikulak iturgunean igarotzen duen denbora eraztungunean igarotzen duenaren aldean oso txikia denez, partikularen ziklo denbora eraztungunean solidoak jarraitzen duen norabidearen arabera da (Mathur eta Epstein, 1974a; Epstein eta Grace, 2011).

Hala, sistema esperimental bakoitzean solidoen batez besteko ziklo denbora, ziklo denbora maximoa eta ziklo denbora minimoaren balioak lortu dira. Datu hauetan oinarrituta, ziklo denboren banaketa irudika daiteke eta sistema bakoitzaren joera jakin.

Datu hauetatik abiatuz, (3.1) Ekuazioaren arabera sistema bakoitzaren zirkulazio emaria atera daiteke ohantzearen masa zati batez besteko ziklo denbora eginez. Zirkulazio emaria solidoaren batez besteko ziklo denboratik lortzen denez, lehenengo solidoaren denbora zikloen azterketa egin da eta ondoren zirkulazio emariarena.

Eginiko esperimentu guztietan, iturkuntza abiadura minimoari dagokion aire emaria eta karga galera ere neurtu dira. Datu hauek sistemen portaeraren adierazgarri dira eta emaitzen analisia egiterakoan lagungarri dira.

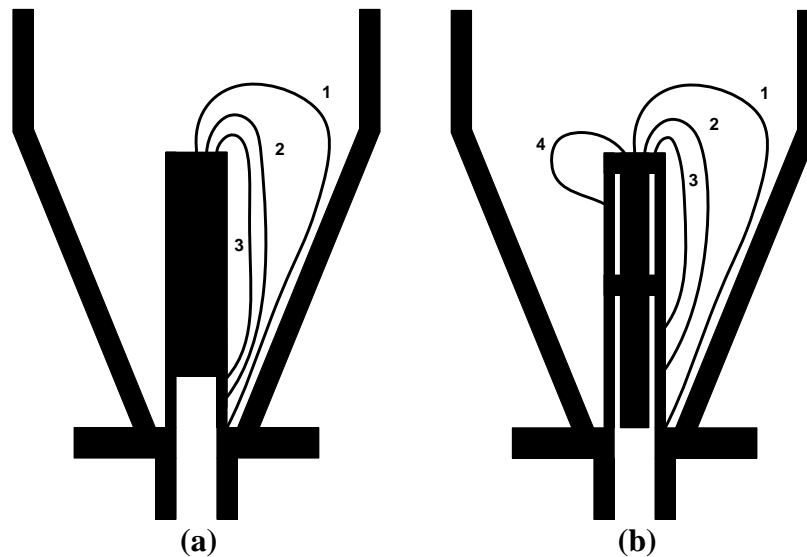
Oro har, ziklo denborek nahiko balio tarte zabala dute. Izan ere, ziklo bakoitza egiteko partikulak behar duen denbora partikula ohantzean jaisten den posizio erradialaren eta iturgunera sartzen den ohantzeko altueraren arabera da. Sistemaren egonkortasunak ere badu eragina ziklo denboran, iturriaren ezegonkortasunak eta simetria faltak ez baitu ohantzearen gainazaleko gune ezberdinetara berdin banatzen solidoa, eta beraz solido kantitate handiagoa erortzen den gunean solidoaren ziklo denbora laburragoa izango da.

Hala, partikulak deskribatuko duen ibilbiderik luzeena iturritik eraztungunearen gainazaleko hormaren kontrara erortzen denean eta iturgunera kontaktorearen oinarrian sartzen denean izango da. Aldiz, partikula iturgunearen ondotik jaisten bada eta iturgunera kontaktorean oinarrian barik gorago sartzen bada zikloa egiteko beharko duen denbora laburragoa izango da. Beraz, aipatu den bezala sistema esperimental berdinerako solidoaren ziklo denboraren balioak oso ezberdinak izan daitezke.

Ohiko erdiko hodia (hodi ez-porotsua) erabiliz, solidoa iturgunera sartzen deneko altuerak ziklo denboran duen eragina murriztu egiten da partikula guztiak hodiaren hanketaraino jaitea behartzen baitira. Gainera, erdiko hodiak sistema egonkortu egiten du eta iturriaren ezegonkortasuna murriztu (Altzibar et al., 2008). Beraz, ziklo denboren arteko diferentzia ere murriztu egiten da. Aipatu den hodiaren eragin hau hodi ez-porotsuen kasuari dagokio gehienbat, nahiz eta irekiduradun hodiekin ere sistema egonkortzen duten. Baina irekiduradun hodiekin ez dute galarazten partikula iturgunera ohantzearen altuera guztian sartzea, nahiz eta hodiaren gabeko sistemetan baino partikula gutxiagori uzten zaion iturgunera sartzen (irekidura portzentajearen arabera).

Beraz, partikulek egiten dituzten bideak oso ezberdinak dira iturritik ohantzerara jaisten diren posizio erradialaren eta iturgunera sartzen diren altueraren arabera. Diferentziak are nabarmenagoak dira erdiko hodiaren gabe edo hodia erabilita lan egiten denean, baita erdiko hodi motaren arabera. Hortaz, sistema bakoitzaren arabera solidoaren ziklo denboraren banaketa ezberdinak espero dira.

Hodidun sistemetarako, 3.2 Irudiko (a) eskeman erakusten den bezala, hodi ez-porotsuak erabiltzen direnean partikulek hiru bide ezberdin egiten dituzte: bide laburrena (irudian 3. bidea), partikulak iturritik hodiaren ondora erortzen dira eta zuzen beherantz egiten dute hodi solidoaren hanketatik iturgunera berehala sartuz eta iturriaren ohantzearen gainazalera itzuliz; tarteko bidea (2. bidea), iturriko partikulak ohantzearen gainazalaren erdira jaisten dira eta eraztungunea zeharkatzen dute hodi solidoaren hanketatik iturgunera sartuz eta berriz ohantzearen gainazalera itzuliz; bide luzeena (1. bidea), partikulak iturritik kontaktorearen hormaren ondoan erortzen dira eta beherantz egiten dute hodi solidoaren hanken behelalderaino, eta bertan iturgunera sartzen dira eta ohantzearen gainazalera itzuli berriro. Irekiduradun hodiekin lan egiten denean (3.2 Irudiko (b) eskeman), partikulek hodi ez-porotsuarekin egiten dituzten bideez gain beste bat ere egiten dute (4. bidea): iturritik ohantzearen gainazalera erortzen dira eta beherantz bidean berehala hodiaren goikaldeko irekiduratik iturgunera sartzen dira, berriz ohantzearen iturrira itzuliz.



3.2. Irudia. Partikulek deskribatzen dituzten ohiko bideak hodi ez-porotsua (a) eta irekiduraduna (b) erabiltzen denean.

Erdiko hodirik gabeko sistemetan, solidoaren ziklo denboraren balioak are ezberdinagoak dira partikulak egin ditzakeen bideak ugariak baitira. Hala ere, irekiduradun hodietan azaldu diren lau bide ezberdinak erabiliz azaldu daitezke hodirik gabeko sistemetan partikulek egiten dituzten ibilbideak.

Bestalde, saiakuntzetan erabili den ohantzearen altueraren eta erdiko hodiaren altueraren arabera ere partikularen zirkulazioa ezberdina da. Hala, irekiduradun erdiko hodiaren altuera ohantzearen altueraren berdina edota handiagoa den kasuetan, iturri minimoan lan egiten denean krater efektua gertatzen da, hots, ohantzean aldapa sortzen da kontaktorearen hormaren kontran hodiaren hormaren kontran baino altuera handiagoa duelarik ohantzeak. Ondorioz, solidoak bi ziklo (osoa eta goikaldekoa) ezberdin egiten ditu. Ziklo osoan, partikulak iturburutik atera eta ohantzea zeharkatzen du eraztungunean zehar, ohantzearen behekaldera iristean erdiko hodiaren hanketatik sartzen da eta iturgunean zehar gora egiten du berriro iturburura heldu arte. Goikaldeko zikloan berriz, partikulak ohantzearen gainera erortzen denean aldapa aurkitzen duenez, ohantze osoa zeharkatu beharrean gainazalean egiten du zikloa.

Gainera, kontuan izan behar da iturburuko solidoa ez dela beti ohantzearen gainazaleko posizio erradial berdineran erortzen. Hala, solidoak iturburuan duen abiaduraren arabera, bereziki abiadurak duen osagai erradialaren arabera, erdiko hoditik hurbilago edo urrunago erortzen da ohantzearen gainazalera, ziklo laburragoak edo luzeagoak dituelarik.

Solidoaren zirkulazioaren ikerketa hau aurrera eramateko erabili diren materialak, garbantzuak ($d_p = 0.010$ m), ilar haziak ($d_p = 0.0034$ m), eta beirazko bolak ($d_p = 0.004$ eta 0.006 m) izan dira. Material hauek aukeratzearen helburua bikoitza izan da. Alde batetik, ikerketa taldeak aurreko lanetan egin duen ziklo denboren ikerketa osatzea (Altzibar et al., 2013), eta bestetik, koloreztatutako partikularen begi bistako jarraipena egiteko egokiak izatea. Aipatu behar da beiraren dentsitatea 2420 kg/m^3 dela eta garbantzuen eta ilar hazien dentsitateak 1210.9 kg/m^3 eta 1230 kg/m^3 , hurrenez hurren. Sistema esperimental ezberdinetan aztertu diren faktoreak honako hauek dira:

kontaktorearen angelua (γ), ohantzearen altuera (H_0), gasaren sarrerako diametroa (D_0), irekiduradun hodian hanken zabalera (W_H), erdiko hodi ez-porotsuen hanken luzera (L_H), erdiko hodi ez-porotsuen luzera totala (L_T) eta erdiko hodiaren diametroa (D_T). Erabilitako faktore zehatzak 2.1.1.1 Atalean erakutsi dira. Aipagarria da, esperimentuak 2.1.1 Atal esperimentalean deskribatu den emari ertainetarako ekipoa egin direla.

Ikerketa honen helburua beraz, erdiko hodidun iturri ohantze konikoetan kontaktorearen eta erdiko hodiaren geometria ezberdinek (γ , D_0 , L_H , W_H) eta operazio baldintza ezberdinek (H_0 , ρ_s) solidoaren ziklo denboran eta zirkulazio emarian duten eragina aztertzea izan da. Nahiz eta erdiko hodidun iturri ohantzeak izan diren tesi honen ardatz nagusia, erdiko hodirik gabeko sistemak ere aztertu dira erdiko hodia duten sistemekin alderatu ahal izateko. Hala, aplikazio bakoitzerako egokienak lirakeen geometria eta operazio baldintzak finkatu ahal izango dira.

Hasteko, solidoen ziklo denborak neurtzeko azken urteotan ikerketa taldean erabili den prozedura deskribatuko da labur. Behin sistema esperimental prestaturik dagoelarik, iturri ohantze erregimena lortzen da. Aurretik aipatu bezala, iturkuntza abiadura minimoaren inguruan egin da lan eta abiadura minimoari dagozkion emari eta presio galera datuak hartu dira. Behin iturkuntza erregimena ezarrita dagoenean, ohantzea osatzen duten partikulen berdina den koloreztaturiko partikula sartu da eta ohantzean zikloak egiteko behar duen denbora neurtu da. Hala, partikula koloreztatua ohantzearen iturrian dagoenean edo gainazalera erortzen den unean hasten da ziklo denbora neurketa, eta berriz iturrira heltzen denean edo gainazalera erortzen denean amaitzen da ziklo horri dagokion denbora. Prozedura hau gutxienez hogeita hamar aldiz errepikatu da, emaitza estatistikoki adierazgarria izan dadin.

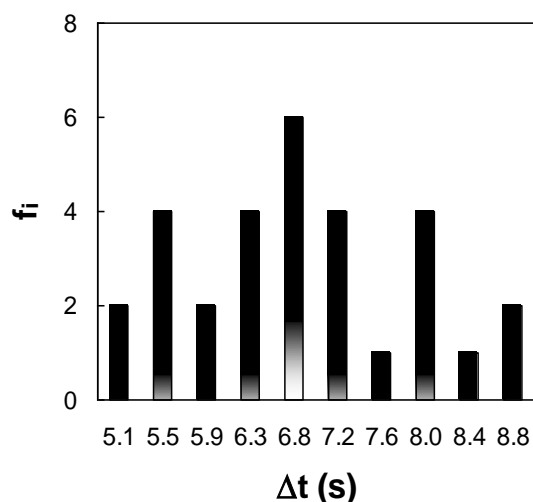
Ondoren, ziklo denbora maximoari dagokion denbora neurtu da, hots, kontaktorearen horman zehar jaisteko behar duen denbora. Horretarako, hormaren ondoan erori den partikularen jarraipena egin da, eta ohantzearen gainazaletik behealderaino heltzeko behar duen denbora neurtu. Neurriak hormako posizio ezberdinetan egin direnez (gutxienez sei), ohantzearen funtzionamendu uniforme ziurtatzeko ere balio izan du prozedura honek.

Adibide batekin erakutsiko dira datuak lantzeko egindako pausuak. Ondoren, prozedura bera erabili da gainontzeko sistemen esperimentu guztietarako. Hala, 3.1 Taulan erakusten dira sistema esperimental batean lorturiko ziklo denboren balioak, eta horman neurturiko ziklo denbora maximoaren balioak.

3.1. Taula. Ziklo denboren balioak. Sistema: $\gamma=28^\circ$; $D_0=0.04$ m; $L_H=0.15$ m; $D_T=0.05$ m; $H_0=0.27$ m; $\rho_s=2420$ kg/m³.

t_c (s)	t_c (s)	t_c (s)	t_{cmax} (s)
6.7	8.4	6.5	11.2
4.9	8.0	6.2	12.4
6.5	6.7	7.0	9.7
7.3	6.3	7.3	9.3
5.5	6.1	5.6	11.6
8.1	5.1	5.7	9.9
6.7	11.1	6.1	—
6.8	7.7	6.6	—
9.0	8.8	9.8	—
6.7	5.3	7.3	—

Behin aztertu den sistema esperimentalari dagozkion ziklo denboren neurketak amaitu ondoren, ziklo denboren banaketa irudikatu da maiztasun grafikoa erabiliz. 3.3 Irudian erakusten da sistema honi dagokion banaketa edo denbora tarte bakoitzari dagokion maiztasuna. Zutabe bakoitzak solidoaren bide ezberdin bat adierazten du.



3.3. Irudia. Aurreko adibidearen ziklo denboraren banaketaren irudikapena.

3.3 Irudian ikus daitekeenez, ziklo denboren banaketa simetrikoa dela esan daiteke, erdi inguruan dagoen batez besteko balioaren inguruan banatzen baitira. Beraz, batez besteko balioa sistema honen balio adierazgarria da. Hortaz, banaketan oinarrituta batez besteko balioa atera daiteke. Kasu honetan, 6.8 s da. Gainera, ziklo denbora minimoa edo partikularen ibilbide laburrena adierazten duena ere atera daiteke. 3.1 Taulan ikus daitekeenez, 4.9 s da. Bestalde, ziklo denbora luzeena ateratzeko, hormaren kontrako balioen batez besteko da egokiena. 3.1 Taulako balioetan oinarrituz, 12.4 s da.

Beraz, sistema esperimental bakoitzerako ziklo denboren banaketa, batez besteko ziklo denbora eta ziklo denbora minimoa eta maximoa lortu dira. Azkenik, behin batez besteko ziklo denbora jakinda, solidoaren zirkulazio emaria kalkulatu da, ohantzearen masa eta batez besteko ziklo denboraren arteko zatiketa eginez. Ohantzearen masaren balioa ezaguna da esperimentu bakoitzean pisatzen delako. Hala, aztertu den adibide honen kasuan lortu den solidoaren zirkulazio emaria 0.46 kg/s da.

Modu honetan, aztertu den sistema esperimentalaren kasuan egin den prozedura bera errepikatu da ikertu diren beste sistema esperimental guztietan.

3.2.2. Partikula trazatuaren bidezko ziklo denboren emaitzak

Sarreran azpimarratu den bezala, iturri ohantze konikoaren funtzionamenduari buruz dagoen bibliografiarik gehiena geure ikerketa taldearena da, eta bereziki, partikulen ziklo denboren inguruan oso gutxi argitaratu da. Beraz, gai honen inguruan dagoen hutsunea betetzeko asmoz, partikula ezberdinen ziklo denborak neurtzeko saiakuntzak egin dira.

Jarraian, 2.1.1.1 Atal esperimentalean aipatu diren kontaktore eta erdiko hodiaren faktoreen eta operazio baldintzen arteko konbinazioz lorturiko sistema esperimental ezberdinen emaitzak aztertuko dira.

Prozedura esperimentalean aipatu diren pausuak erabili dira sistema esperimental guztietan. Erdiko hodi mota bakoitzaren faktoreak ez direnez berdinak, emaitzak eta azterketak erdiko hodi motaren arabera banatu dira.

Jarraian, emaitza esperimentaletatik abiatuz, aztertu diren faktoreek (γ , D_0 , L_H , W_H , H_0 , ρ_s) batez besteko ziklo denboran, ziklo denbora minimoan eta maximoan, eta zirkulazio emarian sortzen dituzten aldaketak aipatuko dira modu laburrean, aurrerago eraginen atalean zehatzago ikusi eta azalduko baitira.

Oro har, lortu diren emaitzetatik atera daitezkeen joera nagusiak ikerketa taldean aurreko lan batean lorturiko antzekoak dira (Altzibar et al., 2013): kontaktorearen angelua (γ), ohantzearen altuera (H_0) eta irekiduradun hodian hanken zabalera (W_H) handiago egiten direnean ziklo denbora guztien balioak ere handiago egiten dira, hau da, partikularen abiadura ohantzean motelagoa izango da. Aldiz, solidoaren zirkulazio emaria txikiago egingo da. Emaitza hauek logikoak dira, izan ere kontaktorearen angelua handitzen denean solido kantitate handiagoa dago ohantzean, eta angelua zabalagoa denean partikulak zikloa egiteko egin behar duen bidea luzeagoa da. Berdin gertatzen da ohantzearen altuera handitzen denean, ohantzea altuagoa denez partikulak bide luzeagoa egin behar baitu. Hanken zabalera handitzen denean berriz, partikula gutxiago sar daiteke eraztungunetik iturgunera, eta beraz partikulak batez besteko bide luzeagoa egin behar du. Hau guztia dela eta, solidoen ziklo denborak handiagoak dira faktore hau handitzean.

Bestalde, solidoaren dentsitatea (ρ_s), gasaren sarrerako diametroa (D_0) eta hodi ezporotsuen hanken luzera (L_H) handitzean, ziklo denbora guztien balioak txikiago egiten dira. Solidoaren zirkulazio emaria berriz, handiago egiten da. Kasu honetan, solidoaren dentsitatea handitzean, iturkuntza abiadura minimoaren inguruan modu egonkorrean operatzeko beharrezkoa den aire emaria handiagoa da, eta horrek iturri ohantze

erregimenaren mugimendu indartsuagoa sortzen du. Hala, solidoen zirkulazioa azkarragoa da eta ziklo denborak laburragoak. Gasaren sarrerako diametroa handitzean berriz, sarrerako emaria handiagoa da, eta diametro txikiko sarreraren kasuan baino aire gehiago igotzen da eraztungunetik. Beraz, ohanzearen porotasuna handiagoa da eta solidoen zirkulazioa azkarragoa. Azkenik, hanken luzera handitzean solidoaren zirkulazioa azkartzea bi arrazoiri egotzi dakieke, hala nola, (i) beharrezkoa den aire emaria handiagoa eta eraztungunetik igotzen den aire kantitatea ere handiagoa delako ikerketa hidrodinamikoan ikusi den bezala eta (ii) solidoa eraztungunetik iturgunera posizio altuagoetan sartzen delako solidoa eta, beraz, egin behar duen bidea ere laburragoa delako.

3.2.2.1. Faktoreen eraginaren azterketa estatistikoa

Aurretik aipatu den bezala, ikerketa honen helburua kontaktorearen eta erdiko hodiaren geometria ezberdinek (γ , D_0 , L_H , W_H) eta operazio baldintza ezberdinek (H_0 , ρ_s) solidoaren ziklo denboran eta zirkulazio emarian duten eragina aztertzea da. Beraz, emaitzen joerak xehetasunez ateratzeko, esperimentuen bidez lorturiko datuen analisi estatistikoa egin da. Horretarako, SPSS 22.0 programa informatikoa erabili da. Programa honek, aztertu diren parametroen artean esanguratsuenak diren faktoreak jakitea ahalbidetzen du bariantzaren analisiaren bidez.

Analisi estatistikoaren funtsa erudian agertzen diren faktoreei dagozkien karratuen baturak bereiztean datza. Modu honetan, karratuen batura totala hurrengo ekuazioaren arabera da (Dobson, 1991).

$$SS_T = SS_E + SS_F \quad (3.2)$$

non SS_T karratuen batura totala den, SS_E errorearen karratuen batura eta SS_F faktore bakoitzari dagokion karratuen batura.

Baina kasu honetan bezala, faktore bat baino gehiago dagoenean, adibidez, a eta b maila kopurua dituzten A eta B faktoreen kasurako, AB elkarrekintzari dagokion terminoa (SS_{IAB}) kontuan hartu behar da. Hala, karratuen batura horrela definituta geratzen da:

$$SS_T = SS_{FA} + SS_{FB} + SS_{IAB} + SS_E \quad (3.3)$$

Jarraian, ikerketa estatistikoa egiteko jarraitu den prozedura azaltzeari ekingo zaio. Analisi estatistikoaren hainbat saio egin dira emaitzen taulan kontuan hartu diren aldagai guztietatik aldagai esanguratsuenak soilik geratu arte. Aldagaien bazterketa %95eko konfiantza mailarekin egin denez, lehenengo saioan 0.05 esangura baino gehiago duten aldagaiak ez dira hurrengo analisi estatistikoan sartu, eta horrela jarraitu da (kasu bakoitzaren arabera egin beharreko saio kopurua ezberdina izan da) azkenean, emaitzen taulan esangura duten aldagaiak soilik gelditu arte.

Emaitzen tauletatik aldagai esanguratsuenen ordena, F (Fisher-Snedecor) banaketaren eta esanguraren arabera ateratzen da. Esanguraren balioa zero baliotik hurbilago dagoenean aldagai edo elkarrekintza hori esanguratsua dela esan nahi du. Esanguraren balio berbera duten aldagai edo elkarrekintzak, F banaketaren balio altuenaren arabera antolatzen dira, F banaketa handiagoa izatean aldagai edo elkarrekintzaren eragina garrantzitsuagoa delako.

Azterketa estatistikoa egiteko kontuan hartu diren faktoreak azterketa kualitatiborako erabili diren berberak izan dira, erdiko hodiaren diametroa izan ezik. Izan ere, erdiko hodiaren diametroak sarrerako diametroa baldintzatzen du, hau da, erdiko hodiaren diametroak sarrerako diametroaren berdina edo zertxobait handiagoa izan behar du. Beraz, bataren balioa jakinda bestearena finkatua dago.

Hala, azterketa estatistikoak erdiko hodi motaren arabera banatu dira, nahiz eta amaieran azterketa estatistiko bateratua ere egin den erdiko hodiekin duten eragina ikertzeko. Bestalde, ziklo denboren neurketak material ezberdinekin egin direnez (garbantzuekin, ilar haziekin eta beirazko bolekin), analisi estatistikoak erabili diren material guztien emaitzak bateraturik ere egin dira.

3.2 Taulan erakusten dira laburbildurik irekiduradun hodia eta hodi ez-porotsua erabilia, eta hodirik gabe lan eginez lorturiko emaitzak. Taula horretan, faktoreek batez besteko ziklo denboran, ziklo denbora maximoan, ziklo denbora minimoan eta solidoaren zirkulazio emarian duten eragina erakusten da esangura handienetik txikienera ordenatuta.

Gainera, aldagai bakoitzak bakarka duen eragina ikertzeaz gain, bi aldagaien arteko elkarrekintzek duten eragina ere aztertu da. %95 konfidantza tarterako esanguratsuak diren faktore nagusi eta bitarrak erakusten dira.

3.2. Taula. Sistema ezberdinen azterketan lorturiko aldagai eta elkarrekintza esanguratsuen ordena.

Sistema	Menpeko aldagaia	Esangura ordena
Hodirik gabe	\bar{t}_c	$\gamma > \gamma \times \rho_s$
	t_{cmax}	$\gamma > \gamma \times \rho_s$
	t_{cmin}	$\gamma > \gamma \times \rho_s$
	W_S	$\gamma \times d_p > \gamma$
Irekiduradun hodiak	\bar{t}_c	$\gamma > W_H > \gamma \times \rho_s > D_0 > D_0 \times \rho_s > W_H \times \rho_s$
	t_{cmax}	$\gamma > W_H > \gamma \times \rho_s > D_0 > D_0 \times \rho_s > H_0 > \gamma \times W_H$
	t_{cmin}	$W_H > H_0 > \gamma > H_0 \times W_H > \gamma \times \rho_s > d_p > \gamma \times H_0$
	W_S	$\gamma \times d_p > \gamma > W_H > H_0 > D_0 > W_H \times \rho_s$
Hodi ez-porotsuak	\bar{t}_c	$L_H > \gamma > H_0$
	t_{cmax}	$L_H > \gamma$
	t_{cmin}	$L_H > \gamma > H_0$
	W_S	$L_H > d_p > H_0 > \gamma > \gamma \times d_p$

3.2 Taulan ikus daitekeen bezala, ondorio orokor bezala esan daiteke analisi guztietan kontaktorearen angelua eta erdiko hodiaren hanken faktoreak direla aldagai esanguratsuenetakoak. Kontaktorearen angeluaren garrantzia dagoeneko frogatuta geratu da Altzibar et al.ek (2013) beira eta ilar haziak erabilita egindako azterketa estatistikoan eta Saldarriaga et al.ek (2015a) biomasa erabilita egindakoan.

Erdiko hodiaren sistemari erreparatuz, hodi ez-porotsudun sistemetan menpeko aldagai guztietarako esanguratsuenak diren aldagaiak antzekoak diren bitartean, irekiduradun hodiaren joera hau ez da hain garbia. 3.2 Taulan ikus daitekeenez, hodi ez-porotsudun sistemetan menpeko aldagai guztietan erdiko hodiaren hanken luzera da garrantzi gehien duen aldagaia, ondoren kontaktorearen angelua (zirkulazio emarian izan ezik, bertan partikula diametroa baita) eta jarraian ohantzearen altuera. Irekiduradun hodiaren sistemetan berriz, aldagaiak eta elkarrekintzak berdinak diren arren esangura ordena aldatu egiten da menpeko aldagaien arabera. 3.2 Taulan ikus daitekeen bezala, kontaktorearen angelua, erdiko hodiaren hanken zabalera, ohantzearen altuera eta gasaren sarrerako diametroa dira esangura handiena duten aldagaiak. Azpimarratzekoa da kontaktorearen angeluaren eta dentsitatearen arteko elkarrekintzak ziklo denbora guztietan duela esangura.

Hodirik gabeko sistemei dagokienez, hiru ziklo denboren esangura ordena berbera da, kontaktorearen angelua delarik esanguratsuen eta, jarraian, kontaktorearen angeluaren eta dentsitatearen arteko elkarrekintza. Zirkulazio emariaren kasuan aldiz, kontaktorearen angeluaren eta partikula diametroaren arteko elkarrekintza da esanguratsuen, kontaktorearen angelua delarik hurrengoa. Aipagarria da, kontaktorearen angeluaren eta partikula diametroaren arteko elkarrekintza hiru sistemen zirkulazio emariaren aldagai esanguratsuen artekoa dela.

Analisi estatistiko hauek egiteko datuak lortzeko saiakuntzetan, hiru dentsitate eta bost partikula diametro ezberdineko solidoak, eta zortzi ohantzearen altuera ezberdin erabili dira. Gainera, analisia hasiera batean material bakoitzarekin saiakuntza kopuru berbera egiteko prestatu zen, baina praktikan ezin izan dira proposaturiko saiakuntza guztiak gauzatu. Hala, batzuetan materialak ez zuen fluidizatzen behar den moduan eta besteetan planta pilotua ez zen gai iturri ohantze erregimenean operatzeko behar den besteko aire emaria emateko. Horregatik, material bakoitzarekin egin den saiakuntza kopurua ezberdina izan da, hots, diseinu faktorial osoari dagozkion konbinazio guztiak ez dira egin, beraz, diseinu ez balantzatua egin da.

Hala eta guztiz ere, 3.2 Taulan adierazi den analisi estatistikotik zenbait ondorio atera daitezke. Lehenik eta behin, kontaktorearen angelua aldagai nagusienetariko bat da saiakuntzetan gasaren sarrerako diametroaren eta ohantzearen altueraren diferentziak txikiak direlako. Irekiduradun hodiak erabili diren saiakuntzetan, ziklo denbora minimoari gehien eragiten dion aldagaia irekiduradun hodian hanken zabalera da, partikulak hodiaren altueran zehar sartu ahal direlako eta orduan, solidoek egiten dituzten zikloak ezberdinak dira. Horretaz gain, irekiduradun hodian irekidura portzentajea aldatzean, partikulak egin ahal dituzten ziklo denbora ezberdinak oraindik eta zabalagoak dira. Hodi ez-porotsuak erabili diren saiakuntzetan zirkulazio emarirako partikula diametroak garrantzia izateak sistema horietan bereizketa egon dela esan nahi du.

Aurreko lanetan ikusi den bezala (Altzibar et al., 2008, 2013, 2014), irekiduradun hodiak sistemak hodi gabekoen eta hodi ez-porotsua duten sistemen arteko portaera hidrodinamikoa dute. Tesi honetan erabilitako irekiduradun hodian irekidura portzentajeak handi samarrak direnez (% 42, 57 eta 79), irekiduradun hodiak sistemen portaera hodorik gabeko sistemen antzekoagoa da hodi ez-porotsudun sistemena baino. Horregatik, hodorik gabeko eta irekiduradun hodian sistemetan eragin handiena duen faktorea kontaktorearen angelua da ziklo denboretarako (irekiduradun hodian ziklo denbora minimoan ezik), eta kontaktorearen angeluaren eta partikula diametroaren arteko elkarrekintza zirkulazio emarirako.

Orain arte egin den sistemen taldekako azterketan argi ikusi da oso desberdina dela hodi barik, edo hodi ez-porotsua edo irekiduradun hodia erabilia lan egitea. Hala ere, eragin hori konfirmatzeko datu guztiak batera aztertu dira ohantzearen konfigurazioa KF (hodi barik, hodi ez-porotsua, irekiduradun hodia) faktore moduan hartuta. Azken azterketa estatistiko bateratu honen bidez lortu diren faktore esanguratsuenak eta euren garrantziaren ordenak 3.3 Taulan erakusten dira laburbildurik.

3.3. Taula. Sistema ezberdinen azterketa bateratuan lorturiko aldagai eta elkarrekintza esanguratsuen ordena.

Sistema	Menpeko aldagaia	Esangura ordena
	\bar{t}_c	$KF > \gamma > H_0 > \gamma \times d_p$
3 Sistemak bateraturik	t_{cmax}	$KF > \gamma > H_0 > \gamma \times \rho_s$
	t_{cmin}	$KF > \gamma \times \rho_s > H_0 \times KF > H_0$
	W_s	$KF > \gamma \times d_p > \rho_s \times KF > d_p > D_0 \times \rho_s$

3.3 Taulan ikus daitekeen bezala, konfigurazioa (KF) da ziklo denboretan eta zirkulazio emarian eragin handiena duen faktorea. Gainera, batez besteko ziklo denboran eta ziklo denbora maximoan aldagaien esangura ordena antzekoa da konfigurazioaren ondoren eragingarrienak kontaktorearen angelua eta ohantzearen altuera direlarik, hurrenez hurren. Gainera, aipatzekoa da kontaktorearen angeluaren eragina desberdina dela diametroaren arabera (batez besteko ziklo denboran) eta dentsitatearen arabera (ziklo denbora maximoan). Ildo beretik, ziklo denbora minimoan eta zirkulazio emarian eragiten duten aldagaien ordena antzekoa da, esanguratsuen konfigurazioa izanik eta ondoren kontaktorearen angeluarekin eta konfigurazioarekin erlazionatuta dauden elkarrekintzak.

Beraz, espero zen bezala, konfigurazioak parametro hidrodinamikoetan eragin nabarmena duela erakusten du ikerketa honek.

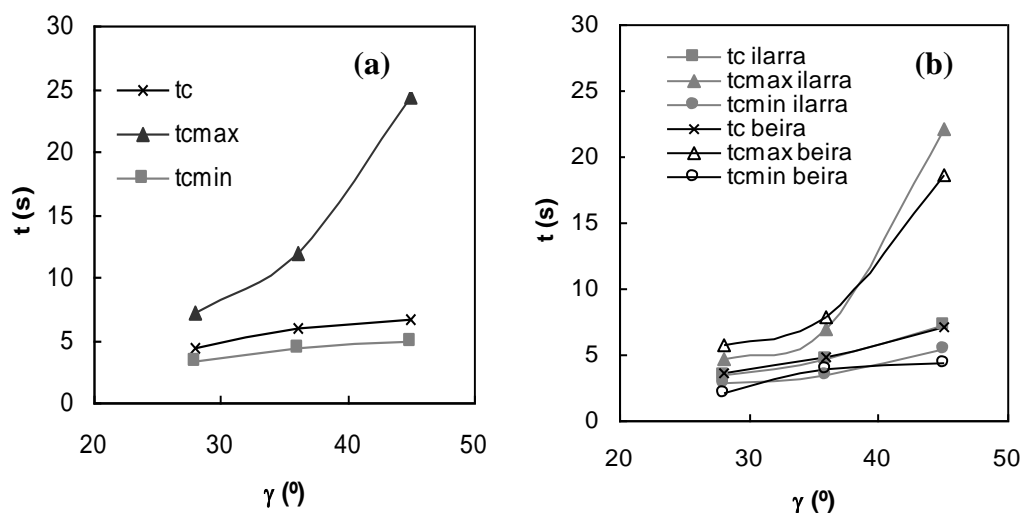
3.2.2.2. Faktoreen eraginaren azterketa kuantitatiboa

Jarraian, faktore esanguratsuenek batez besteko ziklo denboran, ziklo denbora maximoan eta minimoan, eta zirkulazio emarian duten eragina aztertuko da era kuantitatiboan.

Aldagaien maila aldatzean menpeko aldagaietan sortzen dituzten aldaketak ikusteko eta kuantifikatzeko menpeko aldagaiak aldagai esanguratsuenekiko irudikatuko dira. Irudikapen hauek esperimenduetan erabili den erdiko hodiaren arabera sailkatu dira. Hala ere, posible izan denean sistema ezberdinen zenbait grafika bateratu egin dira bertatik ondorio gehiago ateratzeko asmoz. Aipagarria da, atala luzeegia izan ez dadin lehenengo hiru aldagai esanguratsuenen irudikapenak erakutsiko direla soilik.

➤ Hodirik gabe

Erdiko hodirik gabeko sistemetan ziklo denboran eragin handiena duten aldagaiak kontaktorearen angelua eta kontaktorearen angeluaren eta dentsitatearen arteko elkarrekintza dira. 3.4 Irudiko grafikoetan erakusten dira bi aldagai esanguratsu hauek batez besteko ziklo denboran, ziklo denbora minimoan eta ziklo denbora maximoan nola eragiten duten. Aipatu behar da elkarrekintzaren eragina irudikatzeko ilar haziak eta beira soilik erabili direla material moduan, garbantzua erabiltzean ez delako baldintza berberak betetzen dituen daturik lortu.



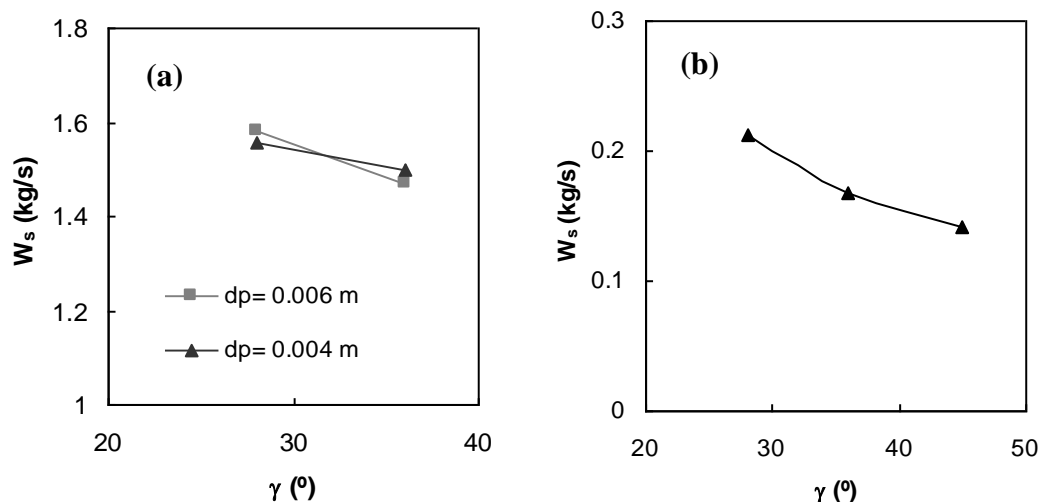
3.4. Irudia. Kontaktorearen angeluak (a) eta kontaktorearen angeluaren eta dentsitatearen (materialaren) arteko elkarrekintzak (b) ziklo denboretan sortzen dituzten aldaketak. (a) sistema: $D_0=0.04$ m; $H_0=0.27$ m; ilarrak. (b) sistema: $D_0=0.05$ m; $H_0=0.27$ m.

3.4 Irudiko (a) grafikoari erreparatuz, kontaktorearen angelua handitzean hiru ziklo denborak handitu egiten direla ikus daiteke. Honen arrazoia kontaktorearen angelua handitzean solido gehiago egotean datza (45° -ko kontaktorean 28° -koan baino %70 inguru gehiago dago). Beraz, partikulak zikloa amaitzeko egin behar duen bidea luzeagoa da, eta ziklo denborak handiagoak. Beira eta ilar hazietarako Altzibar et al.ek (2013) ondorio berbera erdietsi zuten. Grafiko berean ikus daitekeenez, kontaktorearen angelua handitzean ziklo denbora maximoan sortzen den aldaketa handiagoa da zenbat eta angelua handiagoa den. Hala, 45° -ko kontaktorearen ziklo denbora maximoaren balioa 28° -ko kontaktorearen bikoitza baino handiagoa da. Izan ere, ziklo denbora maximoa partikulak kontaktorearen horma ondotik jaisteko behar duen denbora denez, partikulen bidea nabarmen handitzen da kontaktorearen angelua handitzean. Horregatik, 45° -ko kontaktorean beste kontaktoreetan baino diferentzia handiagoa dago ziklo denbora maximoaren eta minimoaren artean.

Bestalde, 3.4 Irudiko (b) grafikoan ikus daitekeenez, kontaktorearen angelua handitzean ziklo denbora guztiak handitzen dira bi materialetarako, aurretik deskribatu den joera errepikatuz. Azpimarratzekoa da bi materialen dentsitatea oso ezberdina izan arren (beiraren dentsitatea ia ilar hazien bikoitza da), beraien ziklo denborak antzekoak direla. Ezberdintasun nabarmenak ziklo denbora maximoan eta batez ere 45° -ko kontaktorean gertatzen dira. Honekin batera, aipagarria da 3.4 (b) grafikoan bi material ezberdinen ziklo denboren kurbak elkar gurutzatu egiten direla, gertaera hori kontaktorearen angeluaren eta dentsitatearen arteko elkarrekintzaren adierazle izanik.

Zirkulazio emariaren joerei dagokienez, definizioz, ziklo denboraren joeren aurkakoak izan beharko liriateke, aurretik azaldu den bezala bi parametroak alderantziz proportzionalak baitira.

Zirkulazio emarian aldagai garrantzitsuena kontaktorearen angeluaren eta partikula diametroaren arteko elkarrekintza da, eta kontaktorearen angelua ondoren. Hurrengo grafikoetan bi aldagai horiek zirkulazio emarian duten eragina erakusten da.



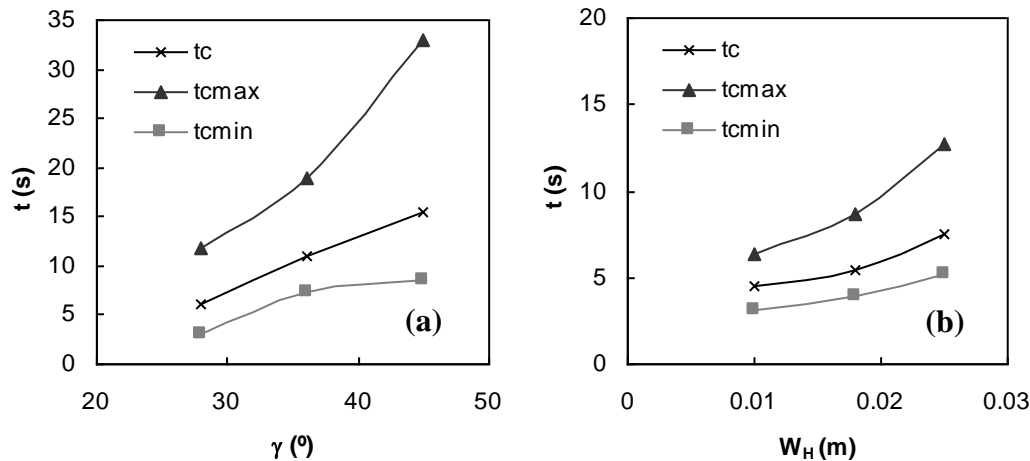
3.5. Irudia. Kontaktorearen angeluaren eta partikula diametroaren arteko elkarrekintzak (a) eta kontaktorearen angeluak (b) zirkulazio emarian sortzen duten eragina. (a) sistema: $D_0=0.05$ m; $H_0=0.27$ m; beira. (b) sistema: $D_0=0.06$ m; $H_0=0.1$ m; garbantzua.

3.5 Irudiko (a) grafikoan ikus daiteke zirkulazio emaria txikitu egiten dela kontaktorearen angelua eta partikula diametroa txikitzen direnean. Izan ere, 3.4 (a) grafikoan azaldu den bezala, kontaktorearen angelua handitzean partikulen ziklo denborak handiagoak dira, eta ondorioz zirkulazio emaria txikitu egingo da. Bestalde, grafiko berean ikus daiteke nola kontaktorearen angelu txikiarako partikula diametroa handitzerakoan zirkulazio emaria handitu egiten den. Honen azalpena, besteak beste, partikula handien abiadura minimoa txikiena baino handiagoa izatean datza. 3.5 Irudiko (b) grafikoan kontaktorearen angelua handitzean zirkulazio emaria txikitu egiten dela ikus daiteke, lehen ziklo denboren kasuan aipatu diren arrazoiengatik.

➤ Irekiduradun hodiak

Irekiduradun hodia duten sistemekin egindako analisi estatistikoan ikusi denez, batez besteko ziklo denboran eta ziklo denbora maximoan eragin handiena duten hiru aldagaiak eta esangura ordenak berberak dira: kontaktorearen angelua, erdiko hodiaren hanken zabalera, eta kontaktorearen angeluaren eta solidoaren dentsitatearen arteko elkarrekintza, hurrenez hurren. Bestalde, ziklo denbora minimoan eragin handiena duten aldagaiak erdiko hodiaren hanken zabalera, ohantzearen altuera eta kontaktorearen angelua dira (esangura handienetik txikienera).

3.6 Irudian erakusten dira aldagai esanguratsuenek (kontaktorearen angelua eta erdiko hodiaren hanken zabalera) batez besteko ziklo denboran eta ziklo denbora maximoan eta minimoan sortzen dituzten aldaketak. Kontuan izan behar da %79ko irekidura portzentajea (IP) 0.010 m-ko erdiko hodiaren hanken zabalerrari dagokiola, %57ko irekidura 0.018 m-ko hanken zabalerrari dagokiola eta %42ko irekidura 0.025 m-ko hanken zabalerrari dagokiola.

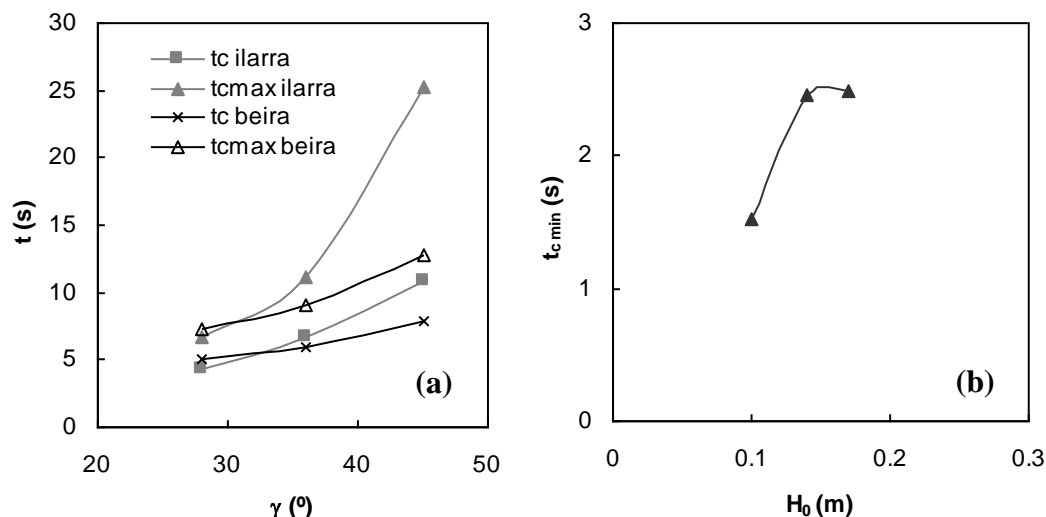


3.6. Irudia. Kontaktorearen angeluak (a) eta erdiko hodiaren hanken zabalerak (b) ziklo denboretan sortzen dituzten aldaketak. (a) sistema: $D_0=0.04$ m; $H_0=0.27$ m; $W_H=0.018$ m edo $IP=57\%$; $D_T=0.04$ m; ilarrak. (b) sistema: $\gamma=28^\circ$; $D_0=0.05$ m; $H_0=0.24$ m; $D_T=0.05$ m; ilarrak.

3.6 Irudiko grafikoek erakusten duten moduan, kontaktorearen angeluak ziklo denboretan sortzen dituzten aldaketak hanken zabalerak sortzen dituztenak baino nabarmenagoak dira. 3.6 Irudiko (a) grafikoan ikus daitekeenez, hodirik gabeko sistemetan 3.4 Irudiko (a) grafikoan ikusi den joera errepikatzen da, hots, kontaktorearen angelua handitzean ziklo denbora guztiak handitu egiten dira aurretik aipaturiko arrazoi berdinengatik. Azken joera hau biomasan ere ematen zela frogatu zen (Saldarriaga et al., 2015a).

Bestalde, Altzibar et al.ek (2013) lortutako joera berretsiz, 3.6 Irudiko (b) grafikoan ikus daiteke erdiko hodiaren hanken zabalera handitzean ziklo denbora guztiak handitzen direla. Honen arrazoa, hanken zabalera handitzean hodiaren irekidura portzentajea jaitsi egitean datza, hots, partikula gutxiago sartzen da eraztungunetik iturgunera eta beraz partikulak batez beste bide luzeagoa egin behar du zikloa egiteko.

Jarraian, ziklo denboran eragiten duten lehenengo hiru aldagai esanguratsuenen artean agertzen diren bi faktoreak erakusten dira, hala nola, kontaktorearen angeluaren eta dentsitatearen (solidoaren) arteko elkarrekintza batez besteko ziklo denboran eta maximoan, 3.7 (a) Irudia, eta ohantzearen altuera ziklo denbora minimoan, 3.7 (b) Irudia.

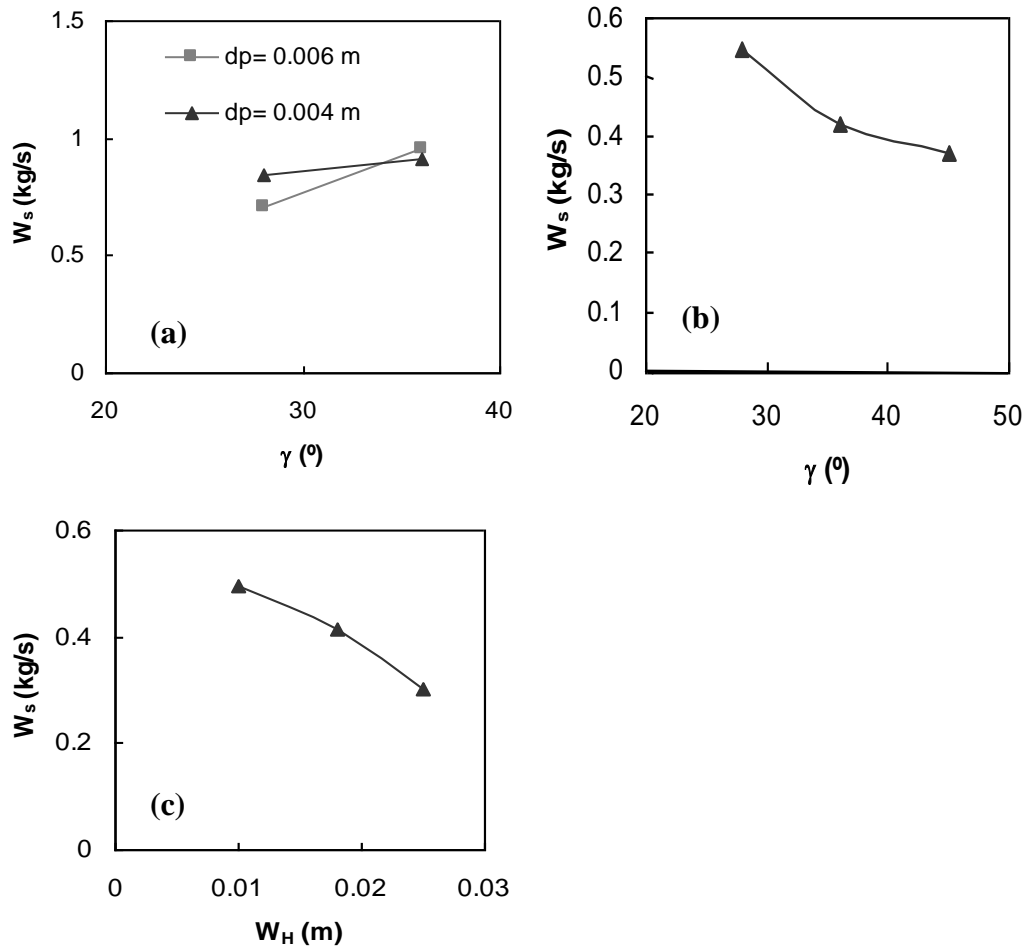


3.7. Irudia. Kontaktorearen angeluaren eta dentsitatearen (materialaren) arteko elkarrekintzak ziklo denboran (batez bestekoan eta maximoan) (a) eta ohantzearen altuerak ziklo denbora minimoan (b) sortzen dituzten aldaketak. (a) sistema: $D_0=0.05$ m; $H_0=0.27$ m; $W_H=0.01$ m edo $IP=79\%$; $D_T=0.05$ m. (b) sistema: $\gamma=28^\circ$; $D_0=0.06$ m; $W_H=0.01$ m edo $IP=79\%$; $D_T=0.04$ m; garbantzua.

3.7 Irudiko (a) grafikoan ikus daitekeenez, bi aldagaien elkarrekintza esanguratsua da ziklo denboretan, izan ere solidoaren arabera (dentsitatearen arabera) angeluak eragiten duen aldaketa ez baita berdina.

Bestalde, 3.7 Irudiko (b) grafikoan ikus daiteke ohantzearen altuera handitzean ziklo denbora minimoa handiagoa dela. Izan ere, ohantzearen altuera handiagoa denean solido kantitate handiagoa dago ohantzean eta, ondorioz, partikula bide luzeagoa egitera behartuta dago.

Zirkulazio emariari dagokionez, 3.8 Irudian erakusten dira irekiduradun hodia duten sistemetan esanguratsuenak diren hiru aldagaien eraginak. Aldagaiak kontaktorearen angeluaren eta partikula diametroaren arteko elkarrekintza, kontaktorearen angelua eta erdiko hodien hanken zabalera (W_H) dira, hurrenez hurren.



3.8. Irudia. Kontaktorearen angeluaren eta partikula diametroaren arteko elkarrekintza (a), kontaktorearen angelua (b) eta erdiko hodian hanken zabalera (c) faktoreak duten eragina zirkulazio emarian. (a) sistema: $D_0=0.05$ m; $H_0=0.27$ m; $W_H=0.025$ m edo $IP=42\%$; $D_T=0.04$ m; beira. (b) sistema: $D_0=0.04$ m; $H_0=0.27$ m; $W_H=0.018$ m edo $IP=57\%$; $D_T=0.04$ m; ilarrak. (c) sistema: $\gamma=28^\circ$; $D_0=0.05$ m; $H_0=0.24$ m; $D_T=0.05$ m; ilarrak.

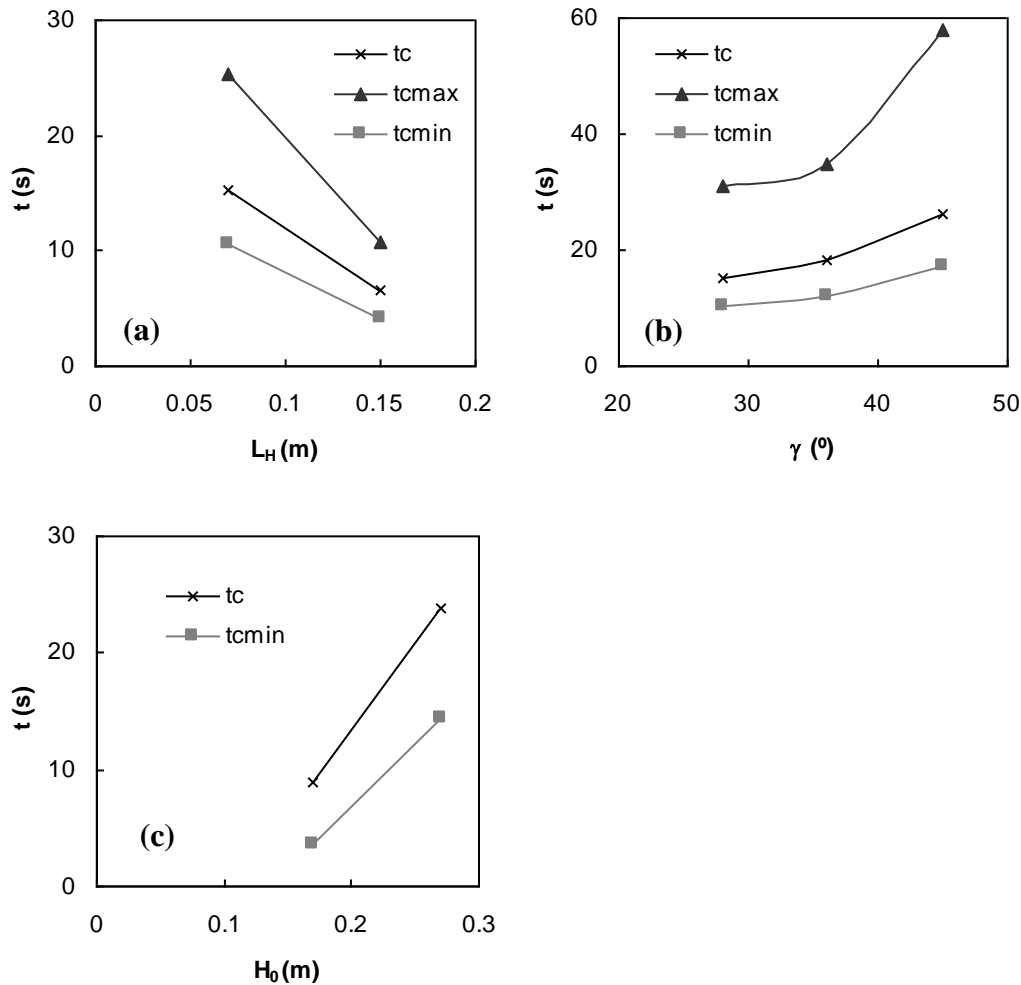
3.8 Irudiko (a) grafikoak adierazten duen moduan kontaktorearen angeluaren eta partikula diametroaren arteko elkarrekintza esanguratsua da, eta zenbat eta angelua handiagoa den zirkulazioa ere handiagoa da. Joera hau 3.5 Irudiko (a) grafikoan ikusi den joeraren aurkakoa da, baina ez da kontraesana, joera bakoitzak bere azalpena baitu. Kasu honetan, aurreko irudian bezala, kontaktorearen angelua handiagoa denean ziklo denbora ere handiagoa da, baina ziklo denboraren handitze hau angelu handiagoari dagokion masa gehikuntza baino txikiagoa da. Ondorioz, zirkulazio emaria ohantzearen masa eta batez besteko ziklo denboraren arteko zatiketa denez, ohantzearen masa (zenbakitzailea) handiagoa bada, zirkulazio emaria (zaticidura) ere handiagoa izango da ziklo denbora bera denean. Era berean, kontaktorearen angelu txikietarako partikula diametroa handitzean, zirkulazio emaria txikitu egiten da eta ez da handitzen 3.5 Irudiko (a) grafikoan hoderik gabeko sistemetan gertatzen den moduan. Hala ere, partikula diametroa handitzean batez besteko ziklo denbora luzeagoa da eta gehikuntza hau ohantzearen masarena baino handiagoa da. Ondorioz, zirkulazio emariaren definizioaren arabera, batez besteko ziklo denboraren gehikuntza (izendatzailea) ohantzearen

masarena (zenbakitzailea) baino handiagoa bada, zirkulazio emaria (zatidura) txikiagoa izango da.

3.8 Irudiko (b) grafikoari dagokionez aurretik 3.5 Irudiko (b) grafikoan hoderik gabeko sistemetan eman den joera berbera errepikatzen da aipatu diren arrazoi berberengatik. 3.8 Irudiko (c) grafikoan ikus daitekeenez berriz, erdiko hodian hanken zabalera handitzean zirkulazio emaria txikitu egiten da. Azken efektu hau dagoeneko Alzibar-en tesian (2011) ikusi zen. Gogoratu behar da %79ko irekidura portzentajea (IP) $W_H=0.010$ m-ko nerbioei dagokiela, %57ko irekidura $W_H=0.018$ m-ko nerbioei dagokiela eta %42ko irekidura $W_H=0.025$ m-ko nerbioei dagokiela. Lehen esan den moduan, erdiko hodian hanken zabalera handitzean irekiduradun hodiaren irekidura portzentajea txikitu egiten da, eta eraztungunetik iturgunera partikula gutxiago sartuko da. Hori dela eta, partikulak bide luzeagoa egin behar du zikloa egiteko eta aireak arrastatuko duen solido kantitatea txikiagoa izango da eta zirkulazio emaria txikiagoa.

➤ **Hodi ez-porotsuak**

Hodi ez-porotsua duten sistemetan berriz, ziklo denborarengan eragin handiena duten faktoreak hodiaren hanken luzera, kontaktorearen angelua eta ohanzearen altuera dira nagusiki. 3.9 Irudian erakusten dira aldagai hauen adierazpen grafikoak.



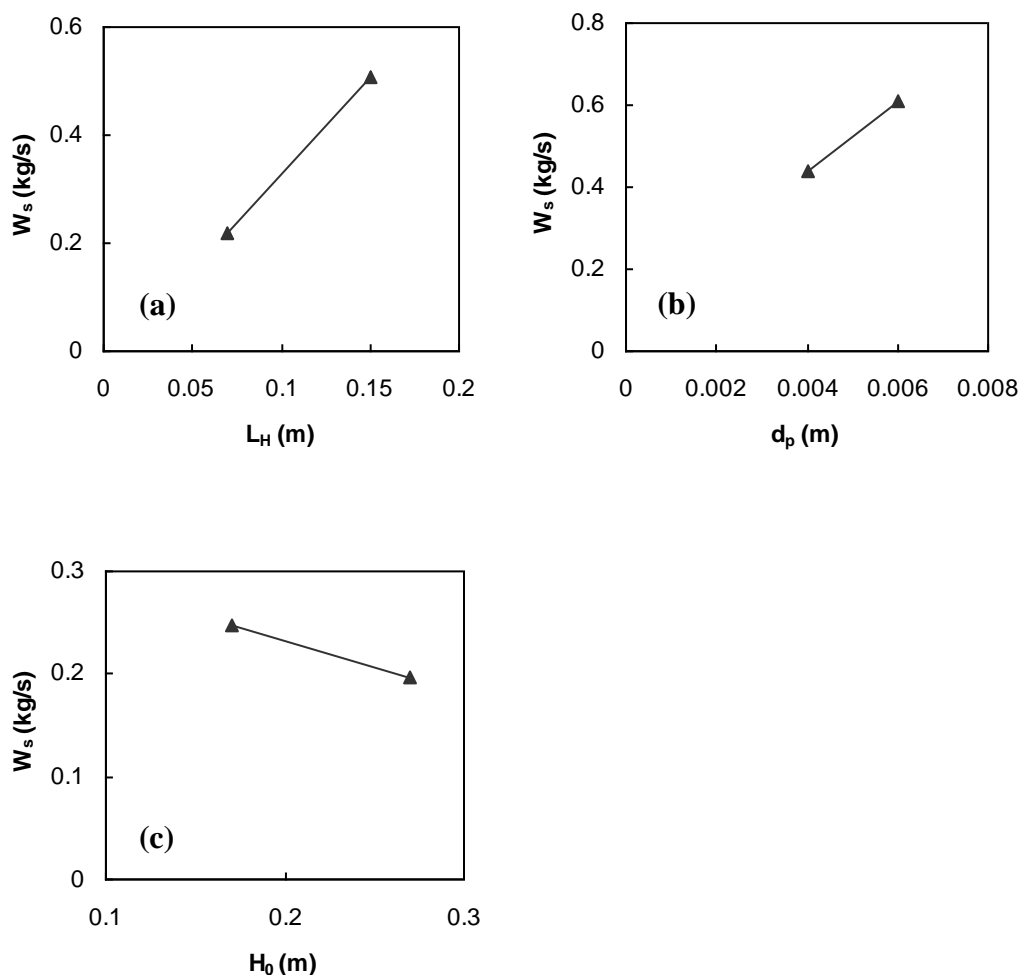
3.9. Irudia. Erdiko hodian hanken luzerak (a), kontaktorearen angeluak (b) eta ohantzearen altuerak (c) ziklo denboretan eragiten dituzten aldaketak. (a) sistema: $\gamma=28^\circ$; $D_0=0.04$ m; $H_0=0.27$ m; $D_T=0.04$ m; ilarrak. (b) sistema: $D_0=0.04$ m; $H_0=0.27$ m; $D_T=0.04$ m; $L_H=0.07$ m; $d_p=0.006$ m; beira. (c) sistema: $\gamma=36^\circ$; $D_0=0.06$ m; $L_H=0.07$ m; $D_T=0.05$ m, garbantzuak.

3.9 Irudiko (a) grafikoan ikus daitekeenez, hodiaren hanken luzera handitzean batez besteko ziklo denbora, eta ziklo denbora maximoaren eta minimoaren balioak txikitu egiten dira. Izan ere, hanken luzera handiekin iturri ohantze erregimenean modu egonkorrean operatzeko behar den aire emaria hanka laburrekin behar dena baino handiagoa da. Hanken luzera handitzean solido kantitate handiagoa sartzen denez eraztungunetik iturgunera, iturgunean solido kantitate handiagoak egingo du gora eta beraz solidoaren zirkulazioa azkartu egiten da (Zhao et al., 2006; Neto et al., 2008; Da Rosa eta Freire, 2009; Cunha et al., 2009; Wang et al., 2010a). Gainera, ohantzea mugitzeko behar den aire emaria handiagoa denez eta gasa eraztungunera pasatzeko tarte zabalagoa dagoenez, eraztungunetik igoko den aire kantitatea ere handiagoa izango da, hots, ohantzeak askeago edo soltuago eta mugimendu indartsuagoz zirkulatuko du. Partikulek egin behar duten bidea ere laburragoa izango da, eraztungunean jaitsei eta iturgunera maila altuagoan pasa daitezkeelako. Arrazoi hauek direla eta hanken luzera handitzean ziklo denbora murriztu egiten da.

Kontaktorearen angeluari dagokionez, 3.9 Irudiko (b) grafikoan ikus daiteke angelua handitzean solidoak zikloa egiteko behar duen denbora handitu egiten dela. Gainera angeluaren eragina nabarmenagoa da ziklo denbora maximoan, hormatik jaisten diren solidoak egiten duelako bide luzeena. Joera berak aurkitu dira irekiduradun hodiak dituzten sistemetan eginiko azterketan, eta joera hauen arrazoiak irekiduradunen kasuan aipaturiko berak dira. Azken joera hau zerrautsa erabilita ere betetzen zela ondorioztatu zen (Saldarriaga et al., 2015a).

3.9 Irudiko (c) grafikoan ikus daitekeenez, irekiduradun hodieta ohantzearen altuera handitzean gertatzen den efektu berbera gertatzen da ziklo denbora minimoan eta batez besteko ziklo denboran. Bertan ikus daitekeenez, ohantzearen altuera handitzean ziklo denborak handiagoak dira, izan ere ohantzean solido kantitate gehiago dagoenez partikulak bide luzeagoa egin beharko baitu zikloa egiteko.

Azkenik, aurretik aipatutako erdiko hodi ez-porotsuen aldagai esanguratsuenak zirkulazio emarian sortzen dituzten aldaketak irudikatuko dira.



3.10. Irudia. Erdiko hodian hanken luzeraren (a), partikula diametroaren (b) eta ohantzearen altueraren (c) eragina zirkulazio emarian. (a) sistema: $\gamma = 28^\circ$; $D_0 = 0.04$ m; $H_0 = 0.27$ m; $D_T = 0.04$ m; ilarrak. (b) sistema: $\gamma = 36^\circ$; $D_0 = 0.04$ m; $H_0 = 0.27$ m; $D_T = 0.05$ m; $L_H = 0.07$ m; beira. (c) sistema: $\gamma = 36^\circ$; $D_0 = 0.06$ m; $L_H = 0.07$ m; $D_T = 0.05$ m, garbantzuak.

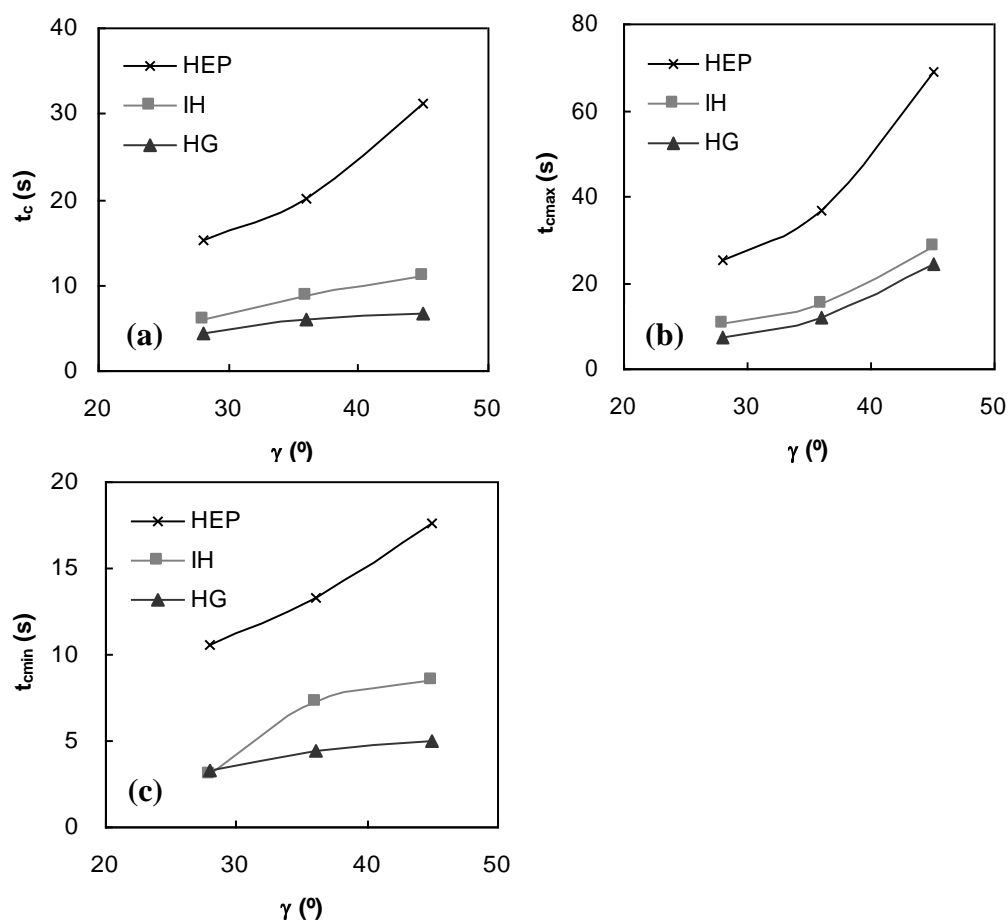
3.10 Irudiko (a) grafikoan ikus daitekeenez, erdiko hodian hanken luzera handitzean zirkulazio emaria ere handitu egiten da, irekiduradun hodian ziklo denboren azterketan aipaturiko arrazoi berdinegatik. Joera bera aurki daiteke bibliografian. Ishikura et al.ek (2003) erdiko hodi porotsudun iturri ohantze zilindrikoan operatzean ikusi zutenenez, hanken luzera handitzean solidoaren zirkulazio emaria ere handitu egiten da. Ji et al.ek (1998), Zhou et al.ek (2004) eta Zhao et al.ek (2006) ere joera bera ikusi zuten hodi ez-porotsuekin iturri ohantze zilindrikoetan operatzean, eta Cheong et al.ek (1986) ere antzeko ondorioa atera zuten iturri ohantze xaflatuan (ingelesez "slotted spouted bed") solidoaren zirkulazioaren ikerketa egin zutenean.

3.10 Irudiko (b) grafikoan ikus daitekeenez, partikula diametroa handitzean zirkulazio emaria ere handitu egiten da. 3.10 Irudiko (c) grafikoan berriz, ohantzearen masa handitzean zirkulazio emaria txikitu egiten dela ikus daiteke. Honen arrazoa, ohantzearen masa handitzean ohantzean solido partikula kantitate handiagoa egotean datza, partikulek bide luzeagoa egin beharko baitute ziklo bat osatzeko. Definizioz ziklo denbora eta zirkulazio emaria alderantziz proportzionalak direnez, ziklo denbora handitzean zirkulazio emaria murriztu egingo da.

3.2.2.3. Solidoaren ziklo denboren sistemen arteko konparazioa

Jarraian, irekiduradun hodian (IH), hodi ez-porotsuen (HEP) eta hodi gabeko (HG) sistemen batez besteko ziklo denboran, ziklo denbora maximoan eta minimoan eta zirkulazio emarian esanguratsuenak diren faktoreen adierazpen grafikoak erakutsiko dira bateraturik. Aurreko atalean ikusi denez, batez besteko ziklo denboraren, ziklo denbora maximoaren eta ziklo denbora minimoaren kasuan aldagai esanguratsuenen artean kontaktorearen angelua dago.

3.11 Irudian erakusten dira kontaktorearen angeluak batez besteko ziklo denboran, ziklo denbora minimoan eta ziklo denbora maximoan sortzen dituzten aldaketak sistema guztietarako.



3.11. Irudia. Kontaktorearen angeluaren eragina batez besteko ziklo denboran (a), ziklo denbora maximoan (b) eta ziklo denbora minimoan (c) irekiduradun hodia (IH) eta hodi ez-porotsua (HEP) duten sistematarako eta hodirik gabekoetarako (HG). a, b eta c) sistemak: $\gamma=28^\circ$; $D_0=0.04$ m; $H_0=0.27$ m; $D_T=0.04$ m; $L_H=0.07$ m; $W_H=0.01$ m edo $IP=\%79$; ilarrak.

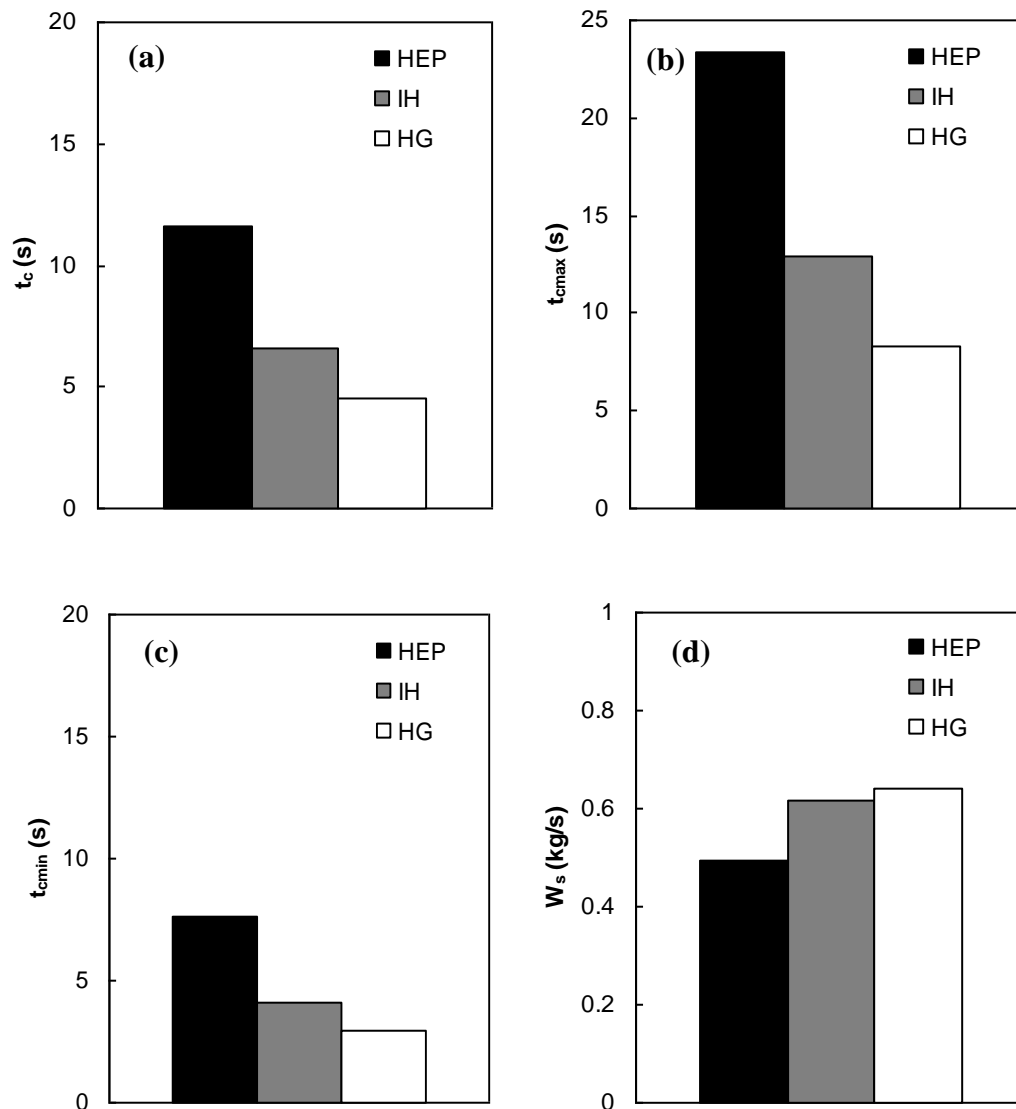
3.11 Irudian erakusten denez, kasu guztietan joera bera errepikatzen da, hots, kontaktorearen angelua handitzerakoan hiru ziklo denborak handitu egiten dira. Joera hau sistemak banaka aztertzerakoan ikusi den bera da eta baita Altzibar-en tesian (2011) ikusitakoa. Izan ere, arestian aditzera eman den moduan, kontaktorearen angelua handitzen denean solido kantitate handiago egongo da ohantzean, eta angelua zabalagoa denez partikulak zikloa egiteko egin behar duen bidea luzeagoa izango da.

Konfigurazio ezberdinak elkarren artean konparatzen badira, 3.11 (a) grafikoan ikus daiteke batez besteko ziklo denboraren balio txikienak hodirik gabeko sistemek dituzten bitartean, hodi ez-porotsua duten sistemak dira baliorik handienak dituztenak (ia hiru aldiz ziklo denbora handiagoa). Aldiz, irekiduradun hodidun sistemek tarteko balioak dituzte. Honen arrazoiatariko bat, aurretik aipatu izan den bezala, hodirik gabeko sistemetan iturkuntza egonkorrean operatzeko beharrezkoa den aire emarian egon daiteke, hodidun sistemetan baino handiagoa baita, eta honek iturri ohantzeari funtzionamendu indartsuagoa (baina ezegonkorragoa) ematen diolarik. Hala, ohantzearen mugimendu indartsuak solidoaren mugimendua azkarragoa izatea eragiten du eta beraz ziklo denborak laburragoak. Hodi ez-porotsudun sistemetan aldiz, iturkuntza egonkorrean operatzeko hodirik gabeko sistemetan baino askoz aire emari

txikiagoa behar da. Ondorioz, ohandzearen mugimendua ez da batere indartsua, eta beraz solidoaren ziklo denborak luzeagoak dira. Irekiduradun hodidun sistemen kasuan berriz, funtzionamendua hodirik gabeko sistemen eta hodi ez-porotsudunen artekoa denez, batez besteko ziklo denboraren balioak ere tartekoak dira.

Antzeko portaerak antzeman daitezke 3.11 Irudiko (b) eta (c) grafikoan erakusten diren ziklo denbora maximo eta minimoaren ikerketetan. Hiru sistemen joerak antzekoak dira, eta ziklo denbora maximoaren balioetan dauden ezberdintasunak batez besteko ziklo denboraren kasuan aipaturiko beretsuak dira.

Bestalde, sistemen arteko konparaketa osatzeko, sistema bakoitzak hidrodinamikan duen eragina ikertuko da. Horretarako, irekiduradun hodidun (IH), hodi ez-porotsudun (HEP) eta erdiko hodirik gabeko (HG) sistemen ziklo denboren eta zirkulazio emariaren batez besteko balioak irudikatuko dira.



3.12. Irudia. Sistema ezberdinen batez besteko ziklo denboraren (a), ziklo denbora maximoaren (b), ziklo denbora minimoaren (c) eta zirkulazio emariaren (d) batez besteko balioak.

3.12 Irudiko (a), (b) eta (c) grafikoetan ikus daitekeenez, aurretik ikusi izan den bezala, batez besteko ziklo denbora, ziklo denbora maximoa eta ziklo denbora minimoen batez besteko balioen joerak oso antzekoak dira. Ziklo denboren batez besteko baliorik handienak hodi ez-porotsudun sistemen kasuan lortzen diren bitartean, hodirik gabeko sistemekin lortzen dira baliorik txikienak. Irekiduradun hodiaren kasuan, balioak hodirik gabeko sistemen kasuari dagozkion balioetatik hurbilago daude hodi ez-porotsudun sistemetatik baino.

Izan ere, iturkuntza abiadura minimoaren balio handia duten sistemetan (irekiduradun hodiaren eta hodirik gabeko sistemetan) sortzen den karga galera nabarmenagoa da, eta honek ohantzearen mugimenduari zurrumbilatasuna ematen dio eta, ondorioz, solidoak zikloa egiteko beharko duen denbora laburragoa da. Hodi ez-porotsudun ziklo denborak hodirik gabekoak baino askoz handiagoak izatea dagoeneko bibliografian ikusi da bai beirarako (Altzibar et al., 2013) bai zerrautserako (Saldarriaga et al., 2015a).

Zirkulazio emariari dagokionez, 3.12 Irudiko (d) grafikoan ikus daitezke sistema ezberdinen artean dauden ezberdintasunak. Hodirik gabeko sistemetan solidoaren zirkulazio emaria hodiaren sistemari dagokiena baino handiagoa da. Honen arrazoia, solidoaren ziklo denboren kasuan aipatu den bera da, hau da, operazio egonkorreko behar den aire emaria hodiaren sistemetan baino nabarmen handiagoa denez, ohantzeak funtzionamendu ezegonkorra bezain zurrumbilotsua izango du. Ondorioz zirkulazio emaria handiagoa izango da. Hala ere, irekiduradun hodiaren sistemen zirkulazio emariaren balioak hodirik gabeko sistemari dagozkienetik hurbilago daude, ziklo denboretan gertatzen zen bezala.

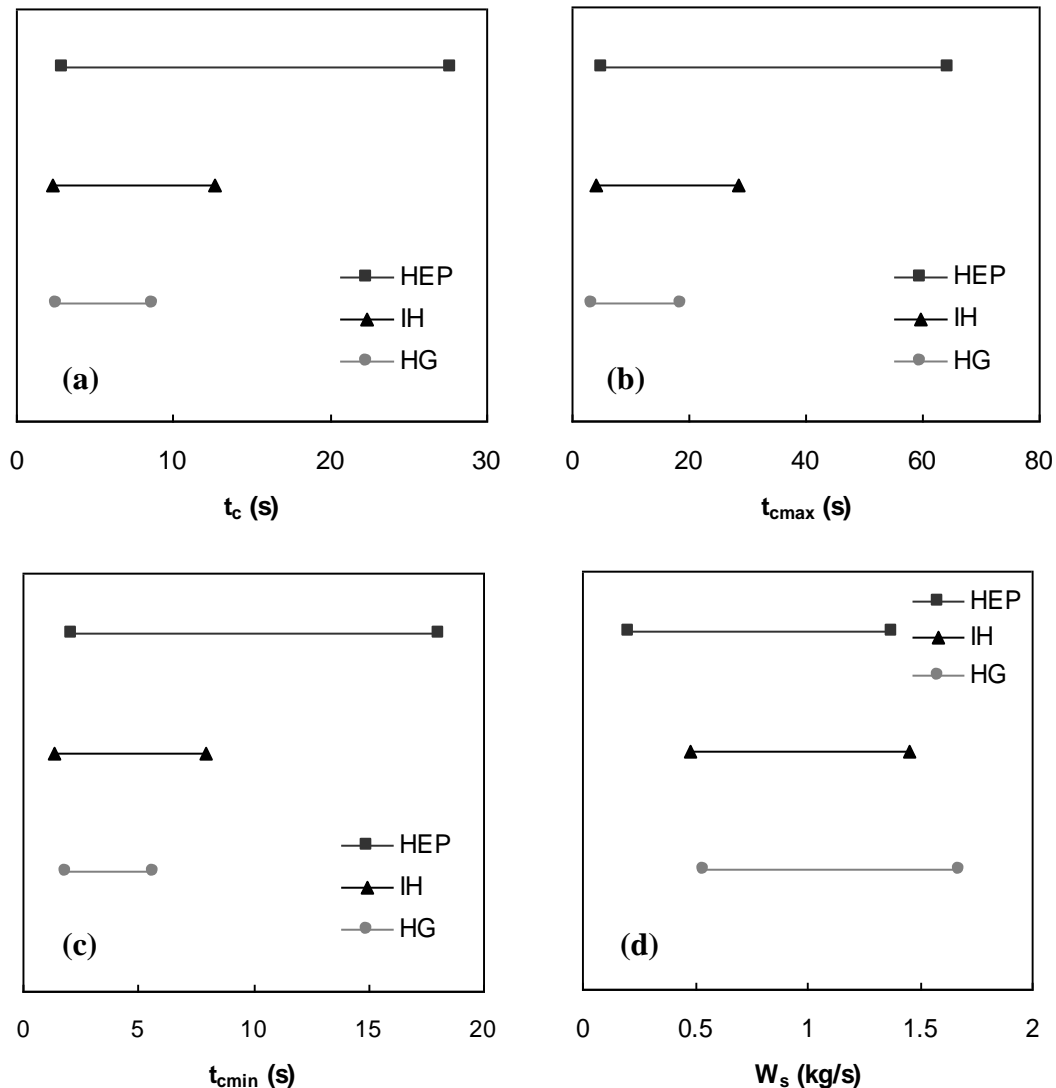
Kasu honetan, irekiduradun hodiaren sistemari dagokien zirkulazio emariaren balioa hodi gabeko sistemari dagokienaren balioa baino %20 inguru txikiagoa den bitartean, hodi ez-porotsudun sistemen zirkulazio emariaren balioa hodi gabeko sistemen ia erdia da. Hodiaren sistemen artean berriz, irekiduradun hodiaren sistemen balioa hodi ez-porotsudun sistemena baino %60 handiagoa da. Ondorioz, hodi ez-porotsudun sistemek dute zirkulazio emari baxuena, ohantzean ematen den airearen banaketa beste sistemekiko eskasena delako. Izan ere, hodi ez-porotsudun ohantzetan airea gehienbat hoditik igotzen da, eta eraztungunetik igotzen den aire frakzioa txikia da (Hattori et al., 1996; Ishikura et al., 2003; Wang et al., 2010a).

3.2.2.4. Ziklo denbora eta zirkulazio emariaren tartekak

Hodidun eta hodi gabeko sistemen kasurako, ziklo denboretan eta zirkulazio emariaren esangura handiena duten faktoreen eraginak aztertu ondoren, sistema ezberdinetarako ziklo denbora eta zirkulazio emariaren tartekak irudikatuko dira sistema ezberdinen malgutasunaz ondorioak ateratzeko asmoz. Modu honetan, hodi ezberdin eta hodirik gabeko sistemetan solidoak zikloa egiteko behar duen denborarik luzeena (biderik luzeenari dagokiona) eta laburrena (biderik laburrenari dagokiona) irudikatuko dira. Hala, iturri ohantzeen aplikazio desberdinetarako egokienak diren ziklo denborak aukeratu ahal izango dira. Ondoren berdina egin da zirkulazio emariaren kasurako.

Hala, 3.13 Irudiko (a), (b) eta (c) grafikoetan erakusten dira erdiko hodiez ezberdintzen diren sistemetan partikulek zikloa egiteko behar duten batez besteko ziklo denbora, ziklo denbora maximoa eta minimoaren denbora tarteen irudikapenak, hurrenez hurren.

Tarteen hasierako eta bukaerako puntuak batez besteko balioak dira. Adibidez, hodi ez-porotsuaren hasierako puntua, hodi mota hau duten sistemetan atera diren balio minimo guztien batez bestekoa da eta bukaerako puntua berdintsu balio maximoen kasurako.



3.13. Irudia. Hodi ez-porotsuaz (HEP), irekiduradun hodia (IH) eta hodorik gabe (HG) lan eginez lorturiko batez besteko ziklo denboraren (a), ziklo denbora maximoaren (b), ziklo denbora minimoaren (c), eta zirkulazio emariaren (d) tartea.

3.13 Irudian ikus daitekeenez, erabiltzen den sistemaren arabera ziklo denboren tartea ezberdina da. Hala, ziklo denbora tarterik zabalena hodi ez-porotsua (HEP) duten sistemek dituzte, (a), (b) eta (c) grafikoetan ikus daitekeen bezala. Aldiz, irekiduradun hodia (IH) duten sistemek eta hodorik gabeko (HG) sistemek askoz tarte estuagoa dute, hodorik gabeko sistemak direlarik tarte estuena eta ziklo denborarik laburrenak dituztenak. Hala ere, hiru sistemen artean tarteen balio txikienean dagoen diferentzia ez da oso handia.

Irekiduradun hodia duten sistemen denbora tartea beste sistema bien tartekoak dira. Horrela, aurreko tesi batean (Altzibar, 2011) lortu zen ondorioa berretsi da, irekiduradun hodiekin hodi ez-porotsua eta hodorik gabeko sistemen tarteko portaera dutela.

Ziklo denboren balioei erreparatzen bazaie, batez besteko ziklo denboraren kasuan, 3.13 Irudiko (a) grafikoan ikus daitekeen bezala, hodirik gabeko sistemen denbora tarte 3 eta 9 s inguru artekoa den bitartean irekiduradun hodian kasuan 2 eta 13 s artekoa da eta hodi ez-porotsuen kasuan 3 eta 28 s artekoa. Ziklo denbora maximo eta minimoen denbora tarteetan ere antzeko joera ikus daiteke 3.13 Irudiko (b) eta (c) grafikoetan, denbora tarteak hirukoiztu egiten direlarik hodirik gabeko sistemetatik hodi ez-porotsua duten sistemetara pasatzean. Tarteetan ezberdintasuna beraz, erdiko hodian faktoreen malgutasunean datza, batez ere hodi ez-porotsuen kasuan. Ondorioz, ziklo denborak kontrolatzeko malgutasun handiagoa dute hodi ez-porotsuek.

Hodi ez-porotsua duten sistemek tarte zabalena izateak adierazten du ziklo denboren balioetan hodi ez-porotsuen faktoreek irekiduradun hodian faktoreek baino aldakortasun handiagoa eragiten dutela. Hau dela eta, faktore egokiak aukeratuz erdiko hodian iturri ohantzearen aplikazio bakoitzerako interesatzen den partikularen ziklo denborak lortu daitezke, ondoren erakutsiko diren irudietan ikusiko den bezala. Izan ere, aurreko tesi batean (Altzibar, 2011) egindako ikerketa hidrodinamikoan frogatuta geratu zen bezala, hodi ez-porotsuen faktoreak aldatzean iturri ohantze erregimenaren funtzionamendua asko aldatzen da, batik bat hodian hanken luzera aldatzen denean. Hala, hanken luzera handiekin lortzen den operazioa indartsua eta ohantzearen zirkulazio azkarrekoa den bitartean (iturkuntza abiadura minimoa, presio galera egonkorra eta presio galera maximoaren balioak altuak dira), hanken luzera laburrekin operazioa mantsoago eta ohantzearen zirkulazioa geldoagoa da (baina kasu honetan iturkuntza abiadura minimoa, presio galera egonkorra eta presio galera maximoaren balioak txikiagoak dira). Horregatik, erabiltzen den hodi ez-porotsuaren konfigurazioaren arabera ziklo denboren tarte ezberdinak lortuko dira.

Irekiduradun hodie dagokienez, hodi ez-porotsua duten sistemen eta hodirik gabeko sistemen tarteko portaera dute. Kasu honetan, irekiduradun hodian faktoreek aldakortasun txikiagoa dute ziklo denboretan, baina orokorrean partikulak azkarrago zirkulatzen du ohantzean. Izan ere, irekiduradun hodian faktoreak aldatzean ziklo denboren tarteetan ezberdintasun txikiago dago, partikulak egiten duen bidea gutxiago aldatzen delarik. Irekiduradun hodian kasuan faktoreak aldatzean ez da hodi ez-porotsuen kasuan bezain besteko ezberdintasunik iturri ohantze erregimenaren funtzionamenduan, kasu guztietan operazioa zurrunbilotsuagoa eta uniformeagoa delarik.

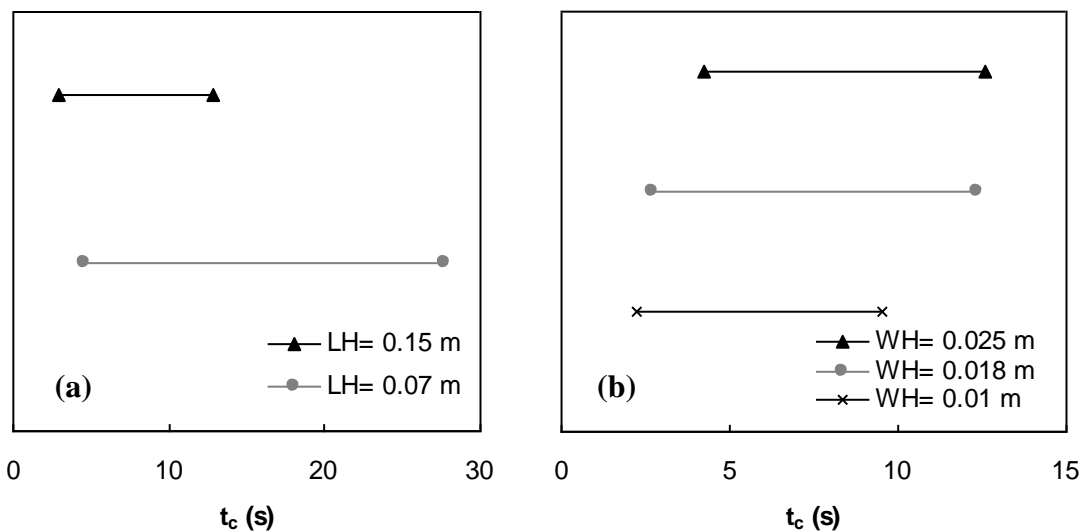
Aldiz, hodirik gabeko sistemek dituzte ziklo denboren tarte estuenak. Izan ere, kontaktorearen faktoreak baino ezin dira aldatu erdiko hodirik gabe lan egiten denean, eta beraz ziklo denboretan sortzen duten aldakortasuna txikiagoa da. 3.13 Irudian ikus daitekeenez, ziklo denboren balio txikiak hodirik gabeko sistemekin lortzen dira. Izan ere, hodirik gabeko sistemekin operatzeko behar den aire emaria handiagoa da eta, funtzionamendua oro har beste sistemekin baino ezegonkorragoa den arren, lortzen den ohantzearen mugimendua indartsuagoa da, ziklo denborak ondorioz laburragoak direlarik.

Bestalde, 3.13 Irudiko (b) eta (c) grafikoak konparatzen badira, ezberdintasun handia dago ziklo denbora maximoa eta minimoaren artean hiru sistemen kasuan. Hala, tarteetan balio txikienean ezberdintasun handiak ez dauden bitartean, tarte bakoitzeko balio handiena hirukoiztu edo lauhoiztu egiten da. Honek adierazten du partikula ohantzean jaisten den posizioaren arabera lortzen diren ziklo denborak oso ezberdinak direla, ziklo

denborarik laburrenak ohantzean iturgunearen ondotik jaistean lortuko diren bitartean ziklo denbora handienak kontaktorearen hormatik jaistean lortuko dira.

3.13 Irudiko (d) grafikoan berriz, hiru sistemen zirkulazio emarien tartekak irudikatu dira. Jakinaenez, zirkulazio emaria ohantzearen masa eta partikularen batez besteko ziklo denboraren arteko zatiketarik lortzen da, eta beraz, eraginen atalean ikusi den bezala, ziklo denboren kontrako joera du. Hala, zirkulazio emariaren tartekak aztertzen badira, ez da ziklo denboretan bezain besteko diferentziarik antzematen tarteen zabaleran. 3.13 Irudiko (d) grafikoak ziklo denboren ikerketan ikusitakoa berresten du, hau da, hodiрик gabeko sistemek dituzte zirkulazio emariaren baliorik handienak, nahiz eta hodiien konfigurazio egokiarekin balio horietara hurbiltzea lor daitekeen. Hodiрик gabeko sistemen kasuan zirkulazio emariaren tartea 0.5 eta 1.7 kg/s artekoa den bitartean, irekiduradun hodiien kasuan 0.5 eta 1.5 kg/s artekoa da eta hodi ez-porotsuen kasuan 0.2 eta 1.4 kg/s artekoa. Beraz diferentzia nabarmenak aurki daitezke zirkulazio emarian erabiltzen den sistemaren arabera.

Irekiduradun hodia eta batik bat hodi ez-porotsua duten sistemek ziklo denboretan duten aldakortasuna dela eta, erdiko hodiun sistemak banaka ikertu dira. Modu honetan, sistema bakoitzean erdiko hodiaren faktoreen (L_H , W_H) araberako batez besteko ziklo denboraren tartekak irudikatu dira. Kasu honetan, batez besteko ziklo denboren tartekak ikertuko dira soilik, beste parametroen joerak antzekoak direlako. 3.14 Irudiko (a) eta (b) grafikoetan ikus daitezke hodiaren hanken faktoreen (L_H , W_H) maila bakoitzerako lortzen diren batez besteko ziklo denboren tartekak.



3.14. Irudia. Hodi ez-porotsua (a) eta irekiduraduna (b) duten sistemek sortarazten dituzten batez besteko ziklo denbora tartekak hodiaren hanken luzeraren eta zabaleraren arabera, hurrenez hurren.

3.14 Irudiko grafikoak aztertuz, esperimenduetan erabiltzen den erdiko hodi ez-porotsuaren eta irekiduradun hodiaren konfigurazioaren arabera ziklo denboren tartekak ezberdinak dira.

3.14 Irudiko (a) grafikoan erakusten dira hodi ez-porotsuen kasuan batez besteko ziklo denboraren tartekak hodi hau erabili den datu guztietarako (batez bestekoa), eta hanken altuera bakoitzerako banaturik ($L_H = 0.15$ m eta $L_H = 0.07$ m). Ikus daitezkeenez, aurretik

hiru sistemen arteko konparaketan aipatu den bezala, hodi ez-porotsuen kasuan lortzen den ziklo denbora tarte zabala hodiaren faktoreek duten portaera ezberdinagatik lortzen da. Hala, hodiaren hanken luzera 0.15 m den kasuetan ohantzeak duen funtzionamendua zurrumbilotsuagoa da eta partikularen ziklo denborak txikiagoak dira. Aldiz, hodiaren hanken luzera 0.07 m den kasuetan iturri ohantze erregimenaren funtzionamendua egokia den arren ohantzearen zirkulazioa geldoagoa da. Hau modu egonkorrean operatzeko beharrezkoa den aire emaria 0.15 m-ko hanken luzera duen hodiarekin nabarmen handiagoa delako gertatzen da. Hala, eraztungunetik aire gehiago igotzen denez, ohantzea solteago dago eta iturgunera solido gehiago pasa daiteke, solidoaren zirkulazioa azkartu egiten delarik. Hau dela eta, 3.14 Irudiko (a) grafikoan ikus daitekeen bezala, hodiaren hanken luzera 0.15 m den kasuan batez besteko ziklo denboren balio txikiagoak lortzen diren bitartean (3 eta 13 s artean), hanken luzera 0.07 m den kasuan balio handiagoak lortzen dira (5 eta 28 s artean).

Irekiduradun hodia duten sistema esperimentalen emaitzak hodiaren hanken zabalaren arabera banatzen badira eta kasu bakoitzean batez besteko ziklo denboren tarteak irudikatzen badira, 3.14 Irudiko (b) grafikoan ikus daitekeen moduko grafikoa lortzen da. Bertan ikus daitekeenez, hodiaren hanken zabalera ezberdinen artean dagoen diferentzia hodi ez-porotsuen kasuan baino txikiagoa da sistema hauek kasu guztietan azkarrago dabilzalako. Hala ere, hanken zabalera 0.01 m den kasuan denbora tarte beste kasuetan baino txikiagoa dela ikus daiteke (2 eta 10 s artean $W_H = 0.01$ m edo irekidura portzentajea %79 den kasuan, 3 eta 12 s artean $W_H = 0.018$ m edo irekidura portzentajea %57 den kasuan eta 4 eta 13 s artean $W_H = 0.025$ m edo irekidura portzentajea %42 den kasuan). Izan ere, hanken zabalera hain estua den kasuetan hodiaren irekidura portzentajea oso altua (%79) denez, hodorik gabeko sistemaren portaera antzekoa izango dute. Hala, hodorik gabeko sistemetan bezala hanken zabalera 0.01 m den kasuan denbora tarte estuak lortzen dira.

Beraz, erdiko hodidun iturri ohantzeek, eta batik bat hodi ez-porotsua duten sistemek, hodorik gabeko sistemekin alderatuz, batez besteko ziklo denboraren tarte zabala dutela ondoriozta daiteke. Gainera, denbora tarte balio txikienak nahiko antzekoak dira hiru sistemetan, nahiz eta txikienak hodorik gabe lortzen diren. Honek malgutasuna ematen du iturri ohantze konikoei eman nahi zaion aplikazioaren arabera erdiko hodiaren konfigurazio egokia aukeratzeko orduan, erdiko hodiaren konfigurazioaren arabera solidoaren batez besteko ziklo denboren tarte ezberdina delarik. Ondorioz, erdiko hodiaren erabilerak solidoaren ziklo denboraren kontrol zehatzagoa eta diseinurako malgutasun handiagoa eskaintzen du. Ezaugarri hauek oso desiragarriak dira aplikazio batzuetarako. Ondorio berdinerira iritsi ziren Claflin eta Fane (1983, 1984) erdiko hodi porotsuarekin iturri ohantze zilindrikoekin operatzean. Zhao et al.ek (2006) hodi ez-porotsuekin iturri ohantze zilindrikoetan operatzean ikusi zutenenez, hodiaren faktoreak, hanken altuera eta diametroa, solidoaren zirkulazio abiadura optimizatzeko faktore eraginkorrak dira. Azkenik, hodi ez-porotsuekin iturri ohantze fluidizatuan operatzean Yang eta Keairns-ek (1982), Berruti et al.ek (1988), Grbavcic et al.ek (1992) eta Xiao et al.ek (2002) ere ikusi zuten erdiko hodiaren diseinu egokiarekin solidoaren zirkulazio abiadura modu errazean kontrola daitekeela.

Hala ere, edozein aplikaziotarako interesatzen den solidoaren batez besteko ziklo denbora lortuko den erdiko hodiaren konfigurazioa aukeratzeko orduan, Altzibar-ek (2011) tesian aipatu bezala, komenigarria izango litzateke beste parametro hidrodinamikoei erreparatzea ere, diseinu egokia egiteko orduan parametro

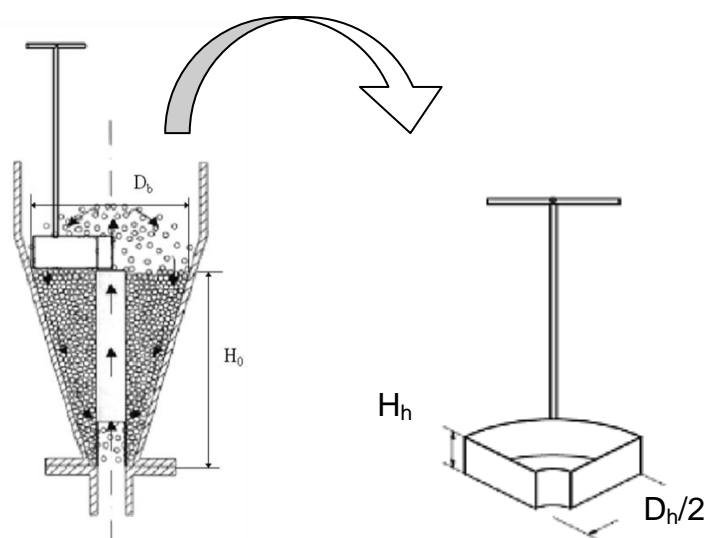
garrantzitsuak baitira iturkuntza abiadura minimoa, karga galera egonkorra eta karga galera maximoa ere.

3.2.3. Ziklo denborak neurtzeko partikulak iturrian biltzeko metodoa

3.2.3.1. Partikulak iturrian biltzeko metodoaren prozedura esperimental

Atal honen helburua ziklo denborak neurtzeko partikulak iturrian biltzeko metodoaren deskribapena egitea da. Aurretik aipatu den bezala, material finen ziklo denborak neurtzeko metodo berri bat diseinatzeko premiaz ohartu ginen ikerketa taldean, orain arte erabili denak (partikula trazatuaren jarraipen metodoa) ez baitu partikula finen jarraipenerako balio. Izan ere, material finen kasuan partikularen jarraipena begi bistaz egitea oso zaila edo ezinezkoa da, nahiz eta partikula koloreztatuta egon txikiegia baita beste partikuletatik bereizteko. Garatu den metodoa partikulak iturritik ohantzearen gainazalera erortzean biltzeko gailu bat erabiltzean datza.

Partikulak iturrian biltzeko metodoa garatzeko, laginak biltzeko gailua diseinatu behar izan da, honek denbora jakin batean zirkulatzen ari den partikula kantitatea neurtzea ahalbidetu beharko duelarik. Gailuarekin bildutako laginak ohantze guztiaren adierazle izan behar du, eta beraz denbora batez iturritik erortzen den solido guztia bildu behar du. Ostera, iturritik erortzen den solido guztia gailuan biltzen bada, ohantzean geroago eta solido gutxiago egongo da, eta ondorioz ohantzearen hidrodinamika aldatuz joango da denboran zehar. Hau dela eta, iturritik ohantzearen gainazalera erortzen den solido guztia bildu beharrean, ohantzearen gainazala zati berdinetan banatu da eta geometria hori duen gailua sartu da ohantzean neurketa egiteko (ohantzearen gainazalaren erdia, laurdena, edo zortzirena, 3.15 Irudia), eta ondoren ohantzearen gainazal osorako bihurtzea egin da. Era honetan ez da aldatzen sistemaren hidrodinamika, eta neurketa baldintza errealetan egin ahal da. Hala ere, ohantzearen gainazal osoko laginak izateko, partikula finekin sortzen den iturriaren uniformetasun eza dela eta, ez da partikula kantitate bera biltzen ohantzearen gainazaleko puntu guztietan. Beraz, gailuarekin neurketak ohantzearen gainazaleko puntu ezberdinetan egin dira eta ondoren batez bestekoa kalkulatu da.



3.15. Irudia. Eratutako gailuaren marrazkia.

Hala ere, neurketak egiteko bi aukera daude. Lehenengoa, gailua ohantzearen gainazalean kokatu eta betetzeko behar den denbora neurtzea da. Bigarrena aldiz, gailua ohantzearen gainazalean kokatu eta denbora jakinean sartzen den solido kantitatea determinatzean datza. Ikerketa honetan bigarren aukera erabili da, lehenengoarekin egiten den errorea handiagoa baita, gailua betea noiz dagoen zehaztea zailagoa delako.

Beraz, esperimentu bakoitzetik lorturiko datuetatik abiatuz, sistema bakoitzerako zirkulazio emaria kalkulatu daiteke hurrengo ekuazioaren bidez:

$$W_{Sh} = \frac{M_h}{t_h} \quad (3.4)$$

non M_h gailuarekin hartutako laginen batez besteko masa den, eta t_h laginak hartzeko ezarri den denbora.

Behin zirkulazio emaria kalkulatu, ohantzearen masa totala (M_s) jakina denez, aztertzen ari den sistemaren ziklo denbora determinatu daiteke hurrengo ekuazioa erabiliz:

$$t_c = \frac{M_s}{W_{Sh}} \quad (3.5)$$

Hala, lehenengo frogak ohantzearen gainazalaren zortziren bati dagokion geometria duen gailuarekin egin ziren, baina zenbait sistematarako txikiegia zen. Adibidez, kontaktorearen angelu estuetarako, edo solidoaren zirkulazioa oso azkarra den sistemetan esperimentuaren iraupena oso txikia zen (1-3 s artean) eta, beraz, errore esperimentala handiegia. Ondorioz, kasu horietan zortzi laginen orde lau lagin edo bi hartuko dira, esperimentuaren iraupena gutxienez hiru segundokoa izan dadin, eta errorea beraz onargarria. Esperimentuaren iraupena ikerketa ezberdinen ondorioz finkatu da.

Beraz, 3.15 Irudian ikus daitekeen moduan, metodo berri honetan erabiltzen den gailuak hiruki edo segmentu zirkular baten itxura geometrikoa du (hormatik doazen partikulak ere jaso ahal izateko). Aurretik aipatu bezala, gailuak duen azalera ohantzearen gainazalaren zortzirena, laurdena edo erdia izango da, erabiltzen den sistemaren arabera. Gailua polipropilenoaz eginda dago eta erpina moztua du (iturrian gora doazen partikulekin talkarik ez izateko). Gailuaren hormaren altuera, H_h (gailuaren sakonera) solido kantitate egokia hartzeko optimizatu da. Izan ere, gailuaren sakonera faktore oso garrantzitsua da, hots, zenbat eta sakonera handiagoa laginak denbora luzeagoan har daitezke, eta honek errore esperimentala txikitzea dakar. Ostera, gailuaren barruan solido kantitate handiegia hartzen bada, solido horiek ez dute zirkulatzen ohantzean zehar eta horrek zirkulazio emarian eragina izan dezake. Egin diren esperimentuetarako, zenbait proba egin ostean, 0.03 m-ko altuera zehaztu da zortzi lagin hartzen diren sistemetan, eta 0.05 m-ko altuera lau lagin hartzen direnetan.

Saiakuntzetan gailua ohantzearen gainazalean kokatu ahal izateko, altzairuzko makila bati lotzen zaio eta oinarri bat ezarri ohantzea zeharkatzen duen airearekin ez mugitzeko.

Gailuaren diseinua egiteko orduan, hirukiak izan behar duen diametroa (D_h) mugatzeko ohantzearen gainazaleko diametroa (D_b) kalkulatu da (3.7) Ekuazioaren bidez, eta honi erabiliko den erdiko hodiaren diametroa (D_T) kendu, (3.6) Ekuazioak adierazten duen moduan. Hala, (3.7) Ekuazioa kontaktorearen angeluaren (γ), ohantzearen altueraren (H_0) eta erdiko hodiaren diametroaren (D_T) arabera denez, aldagai hauetariko bat aldatzean den sistematarako gailu ezberdin bat diseinatu beharko da. Esperimentalki erabiliko diren kontaktore guztietan, ohantzearen oinarriaren diametroa (D_i) bera denez, hirukiak diseinatzerakoan balio konstante bezala hartu da.

$$D_h = D_b - D_T \quad (3.6)$$

$$D_b = 2 \operatorname{tg} \left(\frac{\gamma}{2} \right) H_0 + D_i \quad (3.7)$$

Saiakuntzetan laginak pisatzeko moduari dagokionez, aukera ezberdinen artean fidagarriena lagina hartu ahala pisatzea eta materiala berriro ohantzera isurtzea dela onetsi da. Lagin guztiak hartu eta amaieran pisatzen badira, lagin bakoitza hartu ostean ohantzean solido kantitate txikiagoa egongo da, eta ondorioz ohantzeko solido kantitatea geroago eta txikiago izango da, eta ohantzearen hidrodinamika aldatuz joango da.

Aurretik aipatu den bezala, laginak hartzeko denbora zenbat eta luzeagoa izan orduan eta errore esperimental txikiagoa da. Beraz, laginak hartzeko denbora ahalik eta luzeena izatea komeni da. Saiakuntzetan laginak hartzeko denbora finkatu aurretik saio bat egin da gailua erabat bete arte zenbat denbora behar den jakiteko. Saioa ohantzeko posizio ezberdinetan egin da, eta neurtutako denbora guztien artean txikiena aukeratu da.

Jarraian, gailu berriarekin ziklo denborak neurtzeko prozedura azalduko da. Behin sistema esperimental prestaturik dagoelarik, iturri ohantze erregimena lortu da. Saiakuntza hauetan iturkuntzarako abiadura minimoan eta abiadura minimoa baino %10-50 abiadura handiagoz egin da lan. Operazioan iturkuntzarako abiadura minimoa lortu denean emariaren eta karga galeraren datuak hartu dira. Ondoren, ziklo denbora maximoaren erreferentzia izateko, kontaktorearen horman zehar jaisteko partikulak behar duen denbora hartu da. Horretarako, hormaren ondoan erortzen den materialaren partikula bati so egin eta ohantzearen gainazaletik behekalderaino heltzeko behar duen denbora neurtu da. Neurriak hormako posizio ezberdinetan hartu dira (gutxienez sei), iturriaren uniformetasun ezagatik hormako posizio bakoitzean ohantzearen zirkulazioa ezberdina izan baitaiteke. Ziklo denbora maximoaren erreferentzia ezinbesteko balioa da, saiakuntzetatik lortzen diren balioen goiko muga adierazten baitu. Behin hau eginda, laginak hartzeko denbora determinatu da. Amaitzeko, gailua erabiliz ohantzearen gainazaleko posizio ezberdinetan laginak hartu eta pisatu egin dira.

Saiakuntza hauetan erdiko hodidun kontaktorearen eta erdiko hodiaren geometria ezberdinek (γ , D_0 , L_H , W_H) eta operazio baldintza ezberdinek (H_0 , ρ_s) solidoaren ziklo denboran eta zirkulazio emarian duten eragina aztertu da iturri ohantze konikoetan. Hala ere, erdiko hodirik gabeko sistemak ere aztertu dira erdiko hodiekin egindako sistemekin konparaketak egin ahal izateko. Modu honetan, aplikazio bakoitzerako geometria eta operazio baldintza egokienak finkatzea posible izango da. Saiakuntzetan

erabilitako aldagaien balioak 2.1.1.1 Atal esperimentalean zehaztu dira, material bezala 0.0006 m-ko partikula diametroa duen harea erabili delarik.

Atal honi bukaera emateko, aurretik azaldu den prozedura ulertarazteko asmoz, saiakuntza baten datuak eta bertatik emaitzak lortzeko jarraitu diren urratsak erakutsiko dira. Hala, 3.4 Taulan esperimentu batean jaso diren laginen masak eta hormako denborak bildu dira.

3.4. Taula. Laginen masak eta hormako denborak. Sistema: $\gamma=28^\circ$; $D_0=0.03$ m; $L_H=0.035$ m; $D_T=0.04$ m; $H_0=0.22$ m; $\rho_s=2358$ kg/m³.

M_h (kg)	t_{cmax} (s)
0.0989	26.5
0.1249	25.2
0.1532	25.0
0.1404	22.3
—	17.9
—	26.8
—	28.2
—	23.5
—	24.8
—	22.2

Saiakuntza hau ohantzearen gainazalaren laurdena den gailua erabiliz egin da, neurketarako ezarritako denbora 6 s-koa izan delarik. Honela, gailuarekin neurtutako laginen masen batez bestekoa egin ondoren (3.4) Ekuazioa aplikatuz zirkulazio emaria kalkulatu daiteke, kasu honetan 0.1576 kg/s-ko delarik. Jarraian, ohantzearen masa pisatuz eta zirkulazio emaria dagoeneko jakina izanik, esperimentuaren ziklo denbora kalkulatu da (3.5) Ekuazioa erabiliz, kasu honetan 17.4 s delarik.

3.2.3.2. Partikulak iturrian biltzeko metodoaren balioztapena

Ziklo denborak neurtzeko garatu den metodo berria zuzenean praktikan jarri baino lehen, bere metodoaren fidagarritasuna balioztatu da material eta metodo ezberdinak erabiliz.

Metodo berriaren balioztapenerako partikula handiekin egindako esperimentuak

Partikulak iturrian biltzeko metodoaren bidez neurketak ziurtasunez egiten direla frogatzeko, ohiko metodoa (partikula trazatuaren jarraipen metodoa) eta metodo berria alderatu dira partikula handiz osoturiko ohantzeak erabiliz. Bi metodoekin lorturiko emaitzak antzekoak badira (errore esperimentala gora behera), metodo berria egokia dela frogaturik geratuko da. Erabilitako ohantzeak 0.004 m-ko beirazko bolaz osotutak izan dira eta partikula trazatua 0.004 m-ko beirazko bola gorria izan da.

Aurretik zehaztu diren bi metodoen prozedurak jarraituz, 3.5 eta 3.6 Tauletan hodi ez-porotsua eta irekiduradun hodia erabiliz esperimentalki lorturiko balioak erakusten dira, hurrenez hurren. Kontuan hartu behar da tauletan jarri diren balioak bost saiakuntzen batez bestekoak direla. Azken zutabeen bi metodoen bidez (W_{Sh} gailuarekin eta W_S trazatzailearekin) lorturiko emaitzen diferentzia erakusten da ehunekotan adierazia.

3.5. Taula. Metodo berriaren balioztapenerako hodi ez-porotsuarekin egindako esperimentuak.

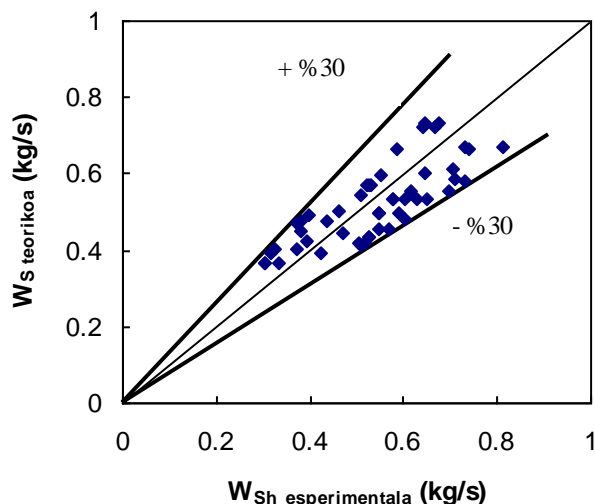
γ (°)	D_0 (m)	D_T (m)	L_H (m)	H_0 (m)	W_S (kg/s)	W_{Sh} (kg/s)	%
45	0.04	0.04	0.07	0.27	0.436	0.528	21
45	0.04	0.05	0.07	0.27	0.499	0.549	10
45	0.05	0.04	0.07	0.27	0.420	0.535	27
45	0.05	0.05	0.07	0.27	0.532	0.578	9

3.6. Taula. Metodo berriaren balioztapenerako irekiduradun hodiarekin egindako esperimentuak.

γ (°)	D_0 (m)	D_T (m)	W_H (m)	H_0 (m)	W_S (kg/s)	W_{Sh} (kg/s)	%
36	0.03	0.04	0.018	0.22	0.734	0.647	12
36	0.04	0.04	0.018	0.22	0.667	0.586	12
36	0.05	0.04	0.018	0.22	0.556	0.688	26
36	0.04	0.05	0.018	0.22	0.725	0.641	12
36	0.05	0.05	0.018	0.22	0.672	0.813	21

3.5 eta 3.6 Tauletan ikus daitekeenez, kontaktorearen angelua, gasaren sarrerako diametroa, erdiko hodiaren diametroa eta ohantzearen altuera aldatu dira egindako esperimentuetan. Aldiz, irekiduradun hodian hanken zabalera eta hodi ez-porotsuen hanken luzera konstante mantendu dira.

Taulekin batera saiakuntza guztiak biltzen dituen grafikoa (3.16 Irudia) aurkeztea erabaki da erakusteko nola ohiko metodoa eta partikulak iturrian biltzeko metodoaren bidez kalkulaturako zirkulazio emarien arteko errorea kasu guztietan errore esperimentalak baino txikiagoa den.



3.16. Irudia. Partikula finekin lortutako zirkulazio emariaren balio teorikoak eta esperimentalak.

3.5 eta 3.6 Tauletan eta 3.16 Irudian bi metodoen bidez lorturiko zirkulazio emarien arteko diferentzia (errorea) aztertzen bada, ikus daiteke nola ohiko metodoa eta metodo berriaren bidez kalkulatoriko zirkulazio emarien arteko errorea kasu gehienetan %20 baino txikiagoa dela. Ondorioz, bi metodoen artean ikusi den ezberdintasuna onargarritzat hartu da eta metodo berria egokia dela ondorioztatu da.

Aipagarria da egindako saiakuntzetan gasaren sarrerako diametroa erdiko hodiaren diametroa baino handiago den kasuetan zirkulazio emarien arteko diferentzia %30 ingurukoa dela. Izan ere, gasaren sarrerako diametroa erdiko hodiaren diametroa baino handiagoa denean, eraztungunetik igotzen den aire emaria handiagoa da eta honek ziklo denboren neurketak aldatzen ditu, eraztungunean burbuilak eta iturri txikiak sortzen direlarik gailuaren azpian. Honek eragiten du neurketak egiterakoan errore handiak egitea. Beraz, baldintza hauetan sortzen den erregimena ez da erabat iturri ohantze erregimena. Efektu hau nabariagoa da irekiduradun hodieta hodi ez-porotsuetan baino, irekiduradun hodiaren barnetik doan airea eraztungunera ere sartzen delako hodiaren edozein altueratan, eraztunguneko partikulak gorantz arrastatzen direlarik.

Metodo berriaren balioztapenerako partikula finekin egindako esperimentuak

Jarraian partikulak iturrian biltzeko metodoaren baliogarrtasuna frogatuko da partikula finekin, aurreko atalean partikula handiekin egin den prozedura bera erabiliz. Lehen aipatu bezala, partikula finekin ezin da partikula trazatuaren jarraipen metodoa erabili materialaren partikula diametroa oso txikia delako. Izan ere, harea partikula bat koloreztatu arren ez da ohantzean besteetatik ezberdintzen, eta beraz ezin da bere jarraipena egin. Arazo hau konpontzeko, harez osatutako ohantzean begi bistaz bereiztu ahal den materialezko partikula erabiltzea pentsatu da. Kontuan izan behar da partikula trazatuaren jarraipen metodoa erabiliz ziklo denborak neurtzeko erabiliko den partikula ezin dela edozein materialez osatuta izan. Izan ere, erabiltzen den partikulak ohantzea osatzen duen materialaren (harea) antzeko portaera izan behar du, hau da, ohantzeko partikulen arraste abiadura berbera izan behar du. Beraz, partikula trazatzaileak baldintza hauek bete behar ditu lortuko diren emaitzak adierazgarriak izan daitezen.

Trazatzailearen funtzioa behar bezala betetzen duen materiala aukeratzeko, partikula isodromikoak erabiltzea erabaki da. Partikula isodromikoak itxura, tamaina eta dentsitate ezberdineko partikulak dira, baina jariakin baten barnean arraste abiadura berdinarekin mugitzen dira. Abiadura berdinean jaisten diren partikulen diametroen erlazioari isodromia koefizientea deritzo. Jariakin batean A eta B partikulak aurkitzen badira eta hauek isodromikoak badira, orduan hurrengo ekuazioa (Falcón et al., 2000) betetzen da:

$$\frac{D_{pA}^2}{D_{pB}^2} = \frac{\rho_B - \rho_L}{\rho_A - \rho_L} \quad (3.8)$$

non, D_{pA}^2 A partikularen diametroa, D_{pB}^2 B partikularen diametroa, ρ_B B partikularen dentsitatea, ρ_L jariakinaren dentsitatea eta ρ_A A partikularen dentsitatea diren.

Partikula isodromiko bezala poliestireno hedatua ($\rho_{\text{poliestirenoa}} = 22.5 \text{ kg/m}^3$) hautatu da, material merkea eta nahi den tamaina zein itxura ezberdinetara erraz moldatu daitekeelako. Harearen, poliestirenoaren eta jariakinaren (kasu honetan airea) dentsitateak eta harearen partikula diametroa jakinak direnez, (3.8) Ekuazioan datu horiek ordezkatzuz, poliestirenoak harearekiko isodromikoa izateko izan behar duen diametroa kalkulatu da, zehazki, 0.0063 m delarik. Kalkulatutako partikula diametroa duen poliestirenozko trazatzailea lortzeko, poliestirenozko zati handi bat hartu da eta eskuz moldatu da 0.0063 m-ko bola bat egin arte. Ondoren partikula gorritz margotu da ohantzean errazago bereizteko.

Saiakuntzak egiteko lehen azaldutako prozedura berari jarraitu zaio. Horretarako, zenbait esperimentu ohiko metodoaren bidez egin dira, poliestirenozko partikula trazatzaile bezala erabilita, eta jarraian beste horrenbeste egin da partikulak iturrian biltzeko metodoaren bidez. Ondoren, bi metodo ezberdinekin lorturiko emaitzak alderatu dira metodo berriaren balioztapenerako, eta ikusi da antzeko balioak lortu direla (errore esperimentalaren barnean).

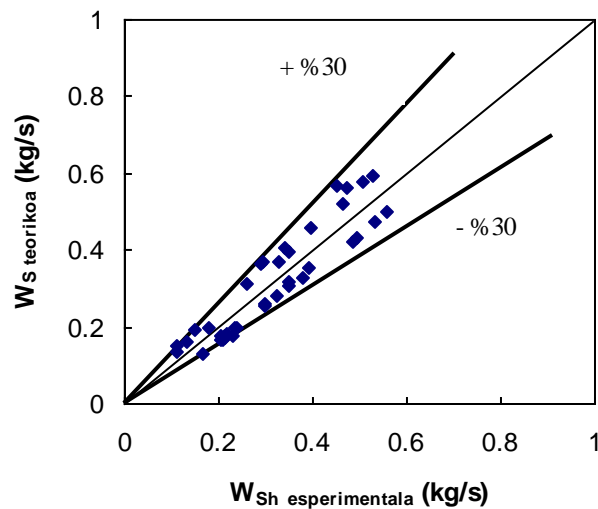
Hurrengo taulan partikula isodromikoa trazatzaile bezala erabiliz lortutako balioak bildu dira. Berriro ere aintzat hartu behar da tauletan agertzen diren balioak bost saiakuntzen batez bestekoak direla. Bertan saiakuntzak erdiko hodi ez-porotsuekin egin dira, erdiko hodian hanken luzera desberdinak erakusten duen bezala. Gasaren sarrerako diametro ezberdinak ere erabili dira, baina kontaktorearen angelua, erdiko hodiaren diametroa eta ohantzearen altuera konstante mantendu dira.

3.7. Taula. Poliestirenoa partikula trazatzaile bezala egindako esperimentuak.

γ (°)	D_0 (m)	D_T (m)	L_H (m)	H_0 (m)	W_S (kg/s)	W_{Sh} (kg/s)	%
36	0.04	0.04	0.035	0.22	0.138	0.109	22
36	0.04	0.04	0.07	0.22	0.197	0.235	19
36	0.04	0.04	0.010	0.22	0.149	0.112	25
45	0.04	0.04	0.035	0.22	0.199	0.177	11
45	0.04	0.04	0.07	0.22	0.194	0.150	23
45	0.05	0.04	0.035	0.22	0.161	0.132	18
45	0.05	0.04	0.07	0.22	0.131	0.165	26
45	0.05	0.04	0.010	0.22	0.179	0.228	27

Saiakuntzak egiterako orduan, poliestirenoak harearen jaitsiera abiadura berbera duen egiaztatu da lehenengo. Horretarako, poliestirenozko partikula bat kontaktorearen hormatik gertu kokatu da eta begi bistaz poliestirenozko partikula jarraitu da (kontaktorearen gardentasunaz baliatuz). Saiakuntza hauetan argi ikusi da poliestirenozko partikula ohantzearen gainazaletik harearekin batera desagertzen dela eta harearekin batera jaisten dela ohantzean zehar. Gainera, saiakuntzetan ikusienez, poliestirenoa iturgunetik ateratzerakoan iturriarekin batera igotzen da goraino.

Lehen egin den bezala, taula aurkezteaz gain, 3.17 Irudian poliestirenoa partikula trazatzaile bezala erabiliz lortu diren balioak irudikatuko dira ikusteko ohiko metodoa eta partikulak iturrian biltzeko metodoaren bidez kalkulaturako zirkulazio emarien arteko errorea saiakuntza guztietan errore esperimental bano txikiagoa den.



3.17. Irudia. Partikula finekin lortutako zirkulazio emariaren balio teorikoak eta esperimentalak.

3.7 Taulan eta 3.17 Irudian erakusten diren bi metodo ezberdinekin kalkulaturako zirkulazio emarien errorei erreparatuz, kasu gehienetan errorea %30 baino txikiagoa dela ikus daiteke, eta ondorioz, errore esperimentalaren barnean dago. Beraz, partikulak iturrian biltzeko metodoa fidagarria dela esan daiteke.

Aipagarria da erdiko hodiaren hanken luzera 0.035 m duten hodiekin egin diren esperimentuak izan direla poliestirenozko trazatzailea jarraitzeko hoberenak, solido emaria txikia delako eta beraz sortzen den iturria txikia da, poliestirenozko partikula ikustea erraztuz. Erdiko hodiaren hanken luzera 0.010 m-koa izan deneko saiakuntzetan, sortu den iturria altuagoa izan da eta poliestirenozko partikula jarraitzea zailagoa izan da. Dena den, arazo garrantzitsuenak 45°ko kontaktorea eta erdiko hodiaren hanken luzera 0.07 m-koa izan denean sortu dira. Kasu horietan, poliestirenozko partikula ohantzearen gainazalean erdiko hodiaren kontra geldirik geratu da. Arazo hori ekiditeko, esperimentu bera 36°ko kontaktorean egin da, bibliografian (Olazar et al., 1992) kontaktore egonkorrena dela ondorioztatu baita, eta saiakuntza ondo egin da.

Bestalde, aipatu behar da poliestirenoa trazatzaile bezala egindako esperimentuetan ezinezkoa izan dela irekiduradun hodiekin emaitza egokiak eskuratzea. Izan ere saiakuntza hauetan poliestirenozko partikula iturritik ohantzearen gainazalera erori eta

hondoratzen hasten denean hodiaren irekiduretatik irteten den airearekin topo egiten du, eta ohantzearen gainazalera arrastatzen da. Honen ondorioz, lorturiko ziklo denboren neurketak oso gutxi izan dira eta ezin izan da metodo berria balioztatu sistema honetarako.

3.2.3.3. Partikulak iturrian biltzeko metodoaren emaitzak

Atal honetan, saiakuntzetan lorturiko emaitzak aurkezteaz gain, euren balioen esanahia eta emaitzen joeren arrazoia azalduko da material finen ziklo denborak neurtu ahal izateko garatu den gailu berria hobetzeko asmoz. Saiakuntza guztietan atal esperimentalean azaldu den prozedura jarraitu da.

Partikula finen ziklo denboren azterketa egingo da metodo berria erabiliz. Horretarako, iturri ohantzeen aldagai nagusienek eta geometria ezberdineko kontaktore koniko eta erdiko hodiekin solidoaren batez besteko ziklo denboran, zirkulazio emarian eta ziklo denbora maximoan duten eragina ikertuko da. Erdiko hodiaren iturri ohantzeetan aldagai nagusienak, kontaktorearen angelua (γ), ohantzearen altuera (H_0), irekiduradun hodiaren hanken zabalera (W_H), hodi ez-porotsuen hanken luzera (L_H), airearen sarrerako diametroa (D_0) eta erdiko hodiaren diametroa (D_T) dira.

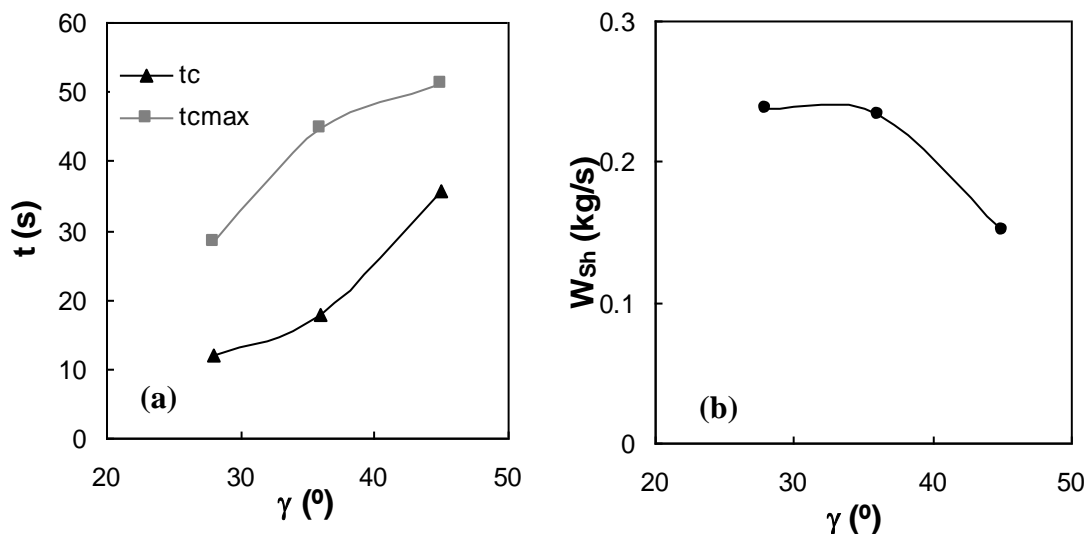
Aldagai bakoitzaren eragina aztertzeko, aldagai bat aldatu eta gainontzekoak konstante mantendu dira. Hau egin ahal izateko, aldagai bakoitzari balio estandar bat esleitu zaio. Balio estandar hori hautatzeko erabili den irizpidea egonkortasuna izan da. Hortaz, beirazko partikulekin eginiko saiakuntzetan iturria egonkorrena izatea ahalbidetzen duten balioak erabili dira.

Aire emariak solidoen zirkulazioan duen eragina aztertzeko asmoz, zenbait saiakuntzetan esperimentu bakoitza bi emari ezberdinetan egin da (iturria sortzeko beharrezko emari minimoa eta emari minimoa baino %10-20 handiagoa). Hala ere, batzuetan ez da posible izan emaria handitzea iturria oso altua sortzen delako, eta beraz kontaktorearen altuera gainditzen delako.

Jarraian, aurreko paragrafoan izendutako aldagaien eraginak banaka azalduko dira.

Kontaktorearen angelua

Kontaktorearen angeluaren eragina aztertzeko, hiru angelu ezberdineko kontaktoreak eta erdiko hodi ez-porotsuak erabili dira. Esperimentu hauetan, kontaktorearen angelua soilik aldatu da, gainontzeko aldagaiak konstante mantenduz. Aipatu behar da aldagai bakoitzaren eragina aztertzeko grafika bakarra jarriko dela. Ondorengo grafikoan erdiko hodi ez-porotsudun sistemetan kontaktorearen angeluak ziklo denboran duen eragina irudikatu da.



3.18. Irudia. Kontaktorearen angeluak ziklo denboretan (a) eta zirkulazio emarian (b) sortzen duten aldaketak. a eta b) sistemak: $D_0 = 0.04$ m; $D_T = 0.04$ m; $L_H = 0.07$ m; $L_T = 0.27$ m; $H_0 = 0.22$ m.

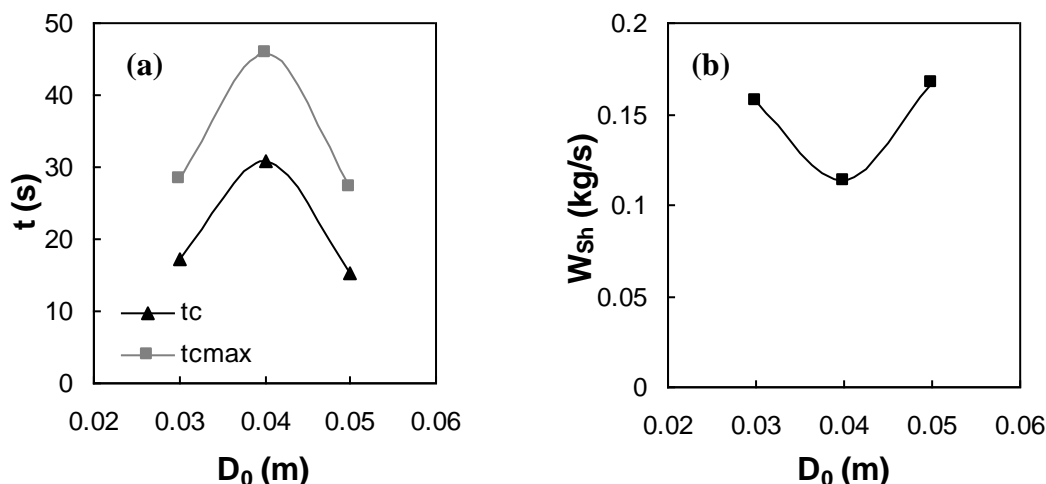
3.18 Irudiko (a) grafikoan erakusten den bezala kontaktorearen angelua handitzean ziklo denborak handitu egiten dira. 3.18 Irudiko (b) grafikoko zirkulazio emaria aldiz (ziklo denboren alderantziz proportzionala), txikiago egiten da denbora zikloa luzeagoa denean. Joera hau bibliografian (Altzibar et al., 2013) aurkitutako joerarekin bat dator. Izan ere, angelua zabaltzerakoan ohandean dagoen solido kantitatea handiagoa da (kasu honetan 45° -ko kontaktorearen solido kantitatea 28° -koaren bikoitza da), eta ondorioz solidoak ziklo osoa osatzeko egin beharreko bidea luzeagoa da. 3.18 Irudiko (a) grafikoan ikus daitekeen bezala, 45° -ko kontaktorean solido partikulek ziklo bat osatzeko behar duten denbora 28° -ko kontaktorean behar dutena baino ia hiru aldiz handiagoa da.

Airearen sarrerako diametroa

Airearen sarrerako diametroaren azterketa egiteko, hiru diametro ezberdin erabili dira. Saiakuntza hauetan erdiko hodi ez-porotsuekin zein irekiduradun hodiekin egin da lan. Kasu honetan airearen sarrerako diametroa aldatzeaz gain erdiko hodiaren diametroa ere aldatu da biak batera baitoaz.

Lehendabizi, airearen sarrerako diametroak solidoen ziklo denboran, zirkulazio emarian eta ziklo denbora maximoan duen eragina ikertuko da erdiko hodi mota bakoitzerako, eta ondoren, erdiko hodiaren diametroa aldatzeak sortzen duen eragina ikertuko da.

Hala, jarraian airearen sarrerako diametroak solidoen ziklo denboran, zirkulazio emarian eta ziklo denbora maximoan duen eragina irudikatu da.

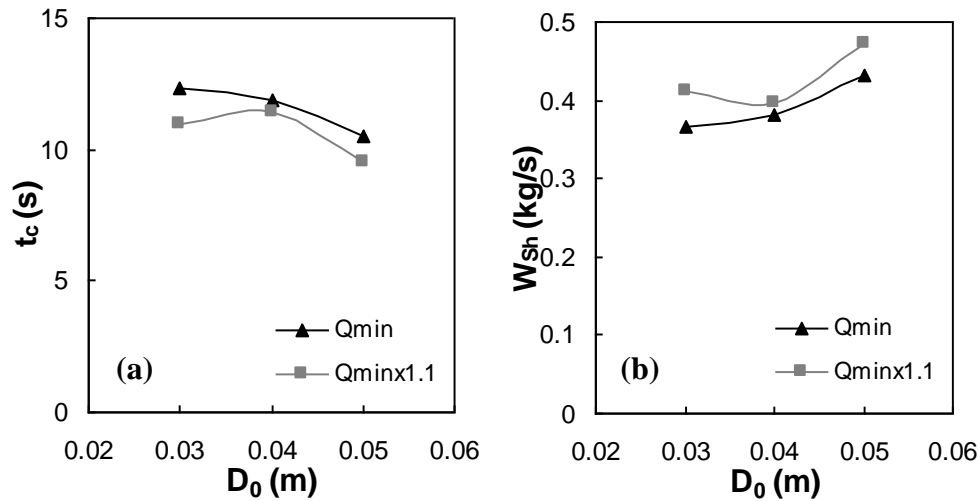


3.19. Irudia. Airearen sarrerako diametroaren eragina solidoen ziklo denboretan (a) eta zirkulazio emarian (b) erdiko hodi ez-porotsuak erabiliz. a eta b) sistemak: $\gamma = 28^\circ$; $D_T = 0.04$ m; $L_H = 0.035$ m; $L_T = 0.27$ m; $H_0 = 0.22$ m.

3.19 Irudiko (a) grafikoari erreparatuz, kurba bakoitzak maximoa duela ikus daiteke. Maximo hau airearen sarrerako diametroa 0.03 m-tik 0.04 m-ra aldatzean ziklo denbora handitu egiten delako eta airearen sarrerako diametroa 0.04 m-tik 0.05 m-ra aldatzean ziklo denbora txikitu egiten delako gertatzen da. Efektu hau ulertzeko kontaktorerara sartzen den airearen abiadura eta emaria kontuan izan behar dira. Hala, airearen sarrerako diametroa 0.03 m-koa denean, airearen abiadura beste bi diametroei dagokiena baino handiagoa da baina emaria txikiagoa da sekzioa txikiagoa delako. Ondorioz, ziklo denborarik luzeena 0.04 m-ko sarrera diametroari dagokio.

Arrazoi berberengatik, 3.19 Irudiko (b) grafikoko kurbak minimo bat deskribatzen du, zirkulazio emaria eta solidoen ziklo denborak alderantziz proportzionalak baitira.

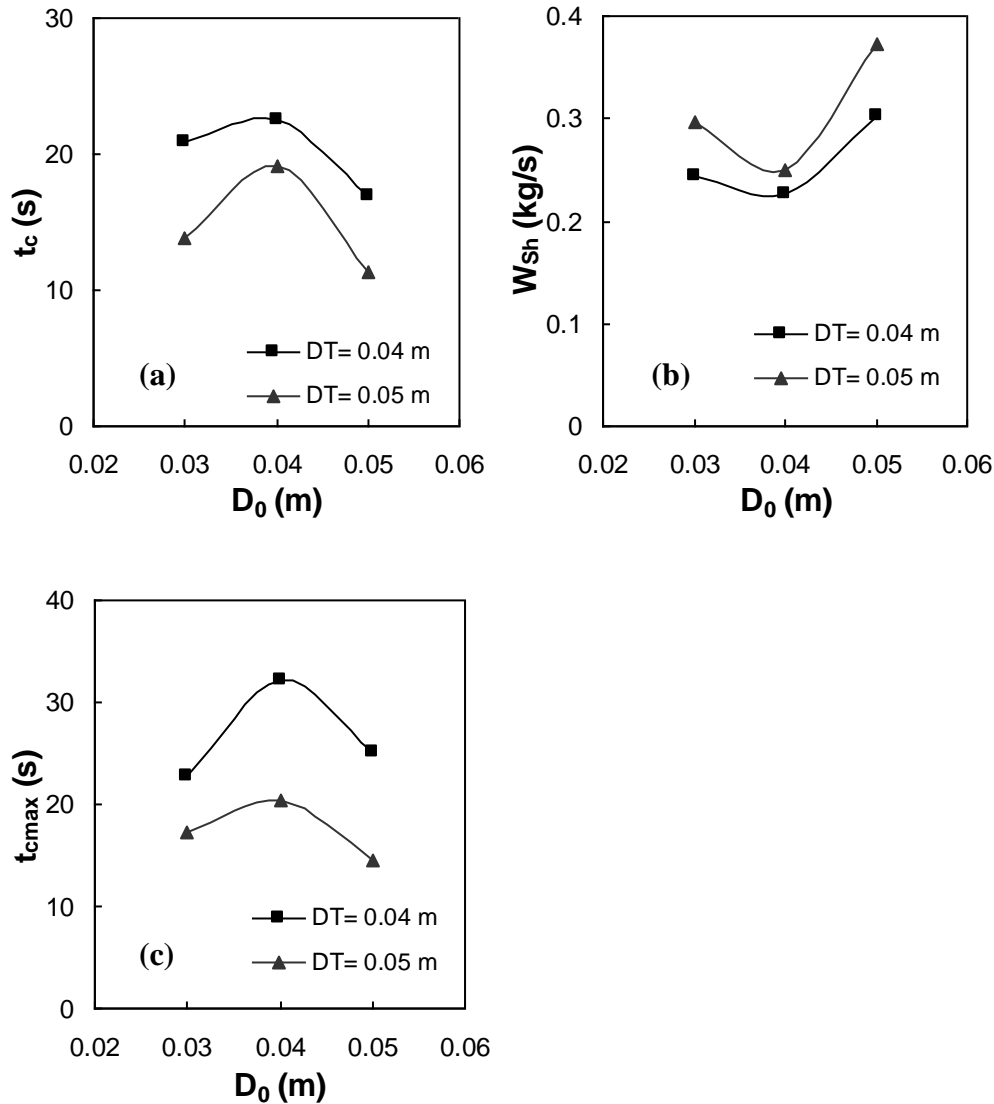
Jarraian, azterketa bera egin da irekiduradun hodiekin eta abiadura minimoa baino %10 handiagoan denean operazio abiadura. Hala, airearen sarrerako diametroak solidoen ziklo denboran eta zirkulazio emarian duen eragina biltzen dituzten grafikoak erakusten dira.



3.20. Irudia. Airearen sarrerako diametroaren eragina solidoen ziklo denboratan (a) eta zirkulazio emarian (b) irekiduradun hodiak erabiliz. a eta b) sistemak: $\gamma = 36^\circ$; $D_1 = 0.05$ m; $W_H = 0.018$ m edo $IP = \%79$; $H_0 = 0.22$ m.

3.20 Irudian ikus daiteke abiadura handiagoko kurbek 3.19 Irudiko kurben joera berbera deskribatzen dutela, aurretik aipaturiko arrazoi berdinetatik. Dena den, aipagarria da abiadura minimoko kurbek ohiko joerak jarraitzen dituztela, hau da, airearen sarrerako diametro handitzerakoan zirkulazio emaria handitu egiten dela, eta beraz solidoen ziklo denbora txikitu. Izan ere, airearen sarrerako diametroa handitzerakoan airearen zati bat eraztungunera sartzen da eta honek ohantzea askatu egiten du eta, beraz, zirkulazioa azkartu.

Bestaldetik, airearen sarrerako diametroak ziklo denboran, zirkulazio emarian eta ziklo denbora maximoan duen eragina aztertu da erdiko hodiaren diametro desberdinetarako. Ikerketa hori 0.004 m-ko beirazko partikulak eta erdiko hodi ez-porotsuak erabiliz egin da.



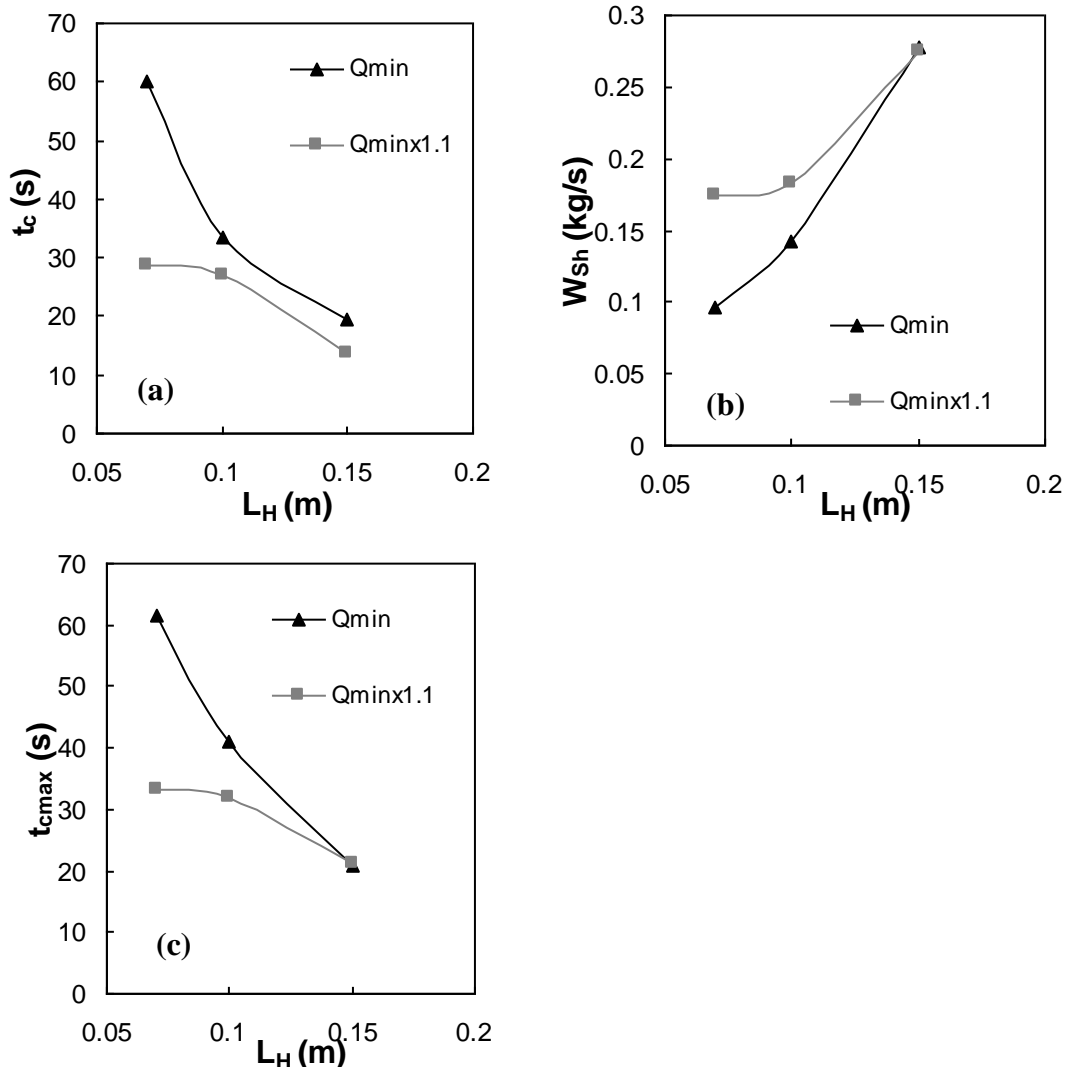
3.21. Irudia. Airearen sarrerako diametroaren eragina solidoen ziklo denboran (a), zirkulazio emarian (b) eta ziklo denbora maximoan (c) erdiko hodi ez-porotsuaren diametroa aldatzerakoan. a, b eta c) sistemak: $\gamma = 36^\circ$; $L_H = 0.07$ m; $L_T = 0.22$ m; $H_0 = 0.22$ m.

3.21 Irudiko grafikoetan erakusten den bezala, erdiko hodiaren diametroa handitzerakoan solidoen ziklo denborak txikitu egiten dira. Hau gertatzearen arrazoia erdiko hodia handiagoa izaterakoan iturgunera sartzen den solido kantitatea handiagoa delako da, eta ondorioz zirkulazioa handiagoa da eta ziklo denborak txikiagoak.

Hodi ez-porotsuen hanken luzera

Hodi ez-porotsuen hanken luzera aztertzeko lau luzera ezberdin erabili dira. Azterketari hasiera emateko hodi ez-porotsuen hanken luzerak solidoen ziklo denboran, zirkulazio emarian eta ziklo denbora maximoan duen eragina ikertu da, eta ondoren airearen emaria eta gasaren sarrerako diametroa aldatzeak sortzen duten eragina azalduko da.

Jarraian erakusten diren grafikoetan hodi ez-porotsuen hanken luzerak solidoen ziklo denboran, zirkulazio emarian eta ziklo denbora maximoan duen eraginak irudikatu dira bai iturkuntza emari minimorako bai abiadura minimoa baino %10 handiagoan denean operazio abiadura.



3.22. Irudia. Hodi ez-porotsuaren hanken luzeraren eragina solidoen ziklo denboran (a), zirkulazio emarian (b) eta ziklo denbora maximoan (c) airearen emari ezberdinetan. a, b eta c) sistemak: $\gamma = 45^\circ$; $D_0 = 0.04$ m; $D_T = 0.04$ m; $L_T = 0.27$ m; $H_0 = 0.22$ m.

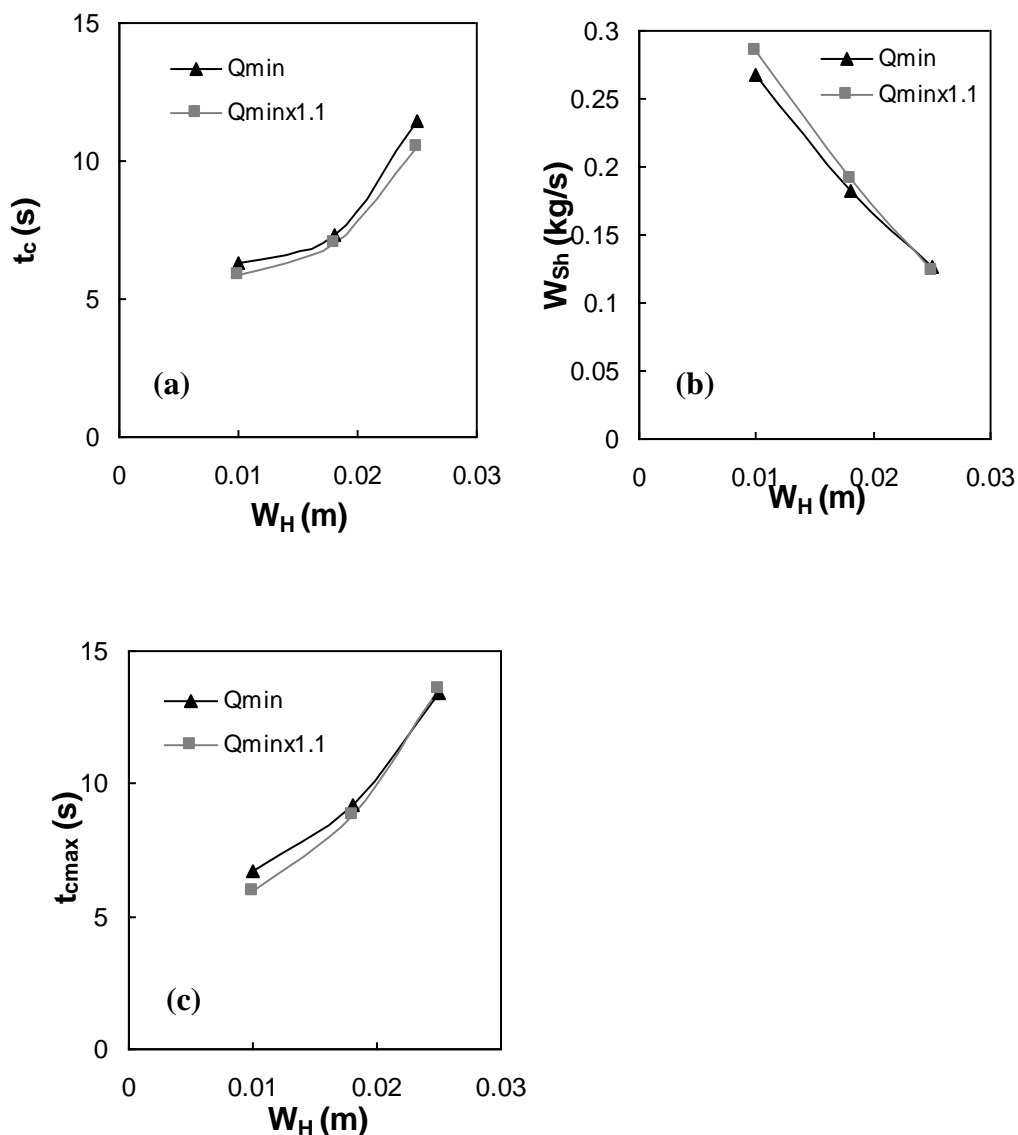
3.22 Irudiko grafikoetan ikus daiteke nola bi airearen abiadura ezberdinetan hodi ez-porotsuen hanken luzera handitzerakoan solidoen ziklo denbora txikitu eta zirkulazio emaria handitu egiten diren, bibliografian aurkitzen diren joerak berresten direlarik (Altzibar et al., 2013). Efektu hau gertatzen da hodi ez-porotsuen hanken luzera handitzerakoan eraztungunetik iturgunera solido kantitate gehiago sartzen delako, eta ondorioz aireak solido kantitate gehiago arrastatzen du.

3.22 Irudiko (a) grafikoan ikus daitekeen bezala, hodi ez-porotsuen hanken luzera handitzerakoan solidoen ziklo denbora maximoa hanken luzera guztietarako txikitzen da. Izan ere, ohandza mugitzeko behar den aire emaria handiagoa denez eta gasak sarreran eraztungunera pasatzeko tarte zabalagoa duenez, eraztungunetik igoko den aire

kantitatea handiagoa izango da eta ohantzea askeago egongo da. Beraz, partikulek kontaktorearen hormatik jaisteko behar duten denbora txikiagoa izango da.

Irekiduradun hodian hanken zabalera

Irekiduradun hodian hanken zabalaren azterketa egiteko hanken hiru zabalera ezberdin erabili dira, zehazki, $W_H = 0.010$ m-koa (%79ko irekidura portzentajea), $W_H = 0.018$ m-koa (%57ko irekidura portzentajea) eta $W_H = 0.025$ m-koa (%42ko irekidura portzentajea). Azterketa honetan irekiduradun hodian hanken zabalarak solidoen ziklo denboran, zirkulazio emarian eta ziklo denbora maximoan duen eragina aztertu da, airearen emari minimoan eta emari minimoa baino %10 handiagoan lan eginez. Hurrengo grafikoetan erakusten dira eraginak.



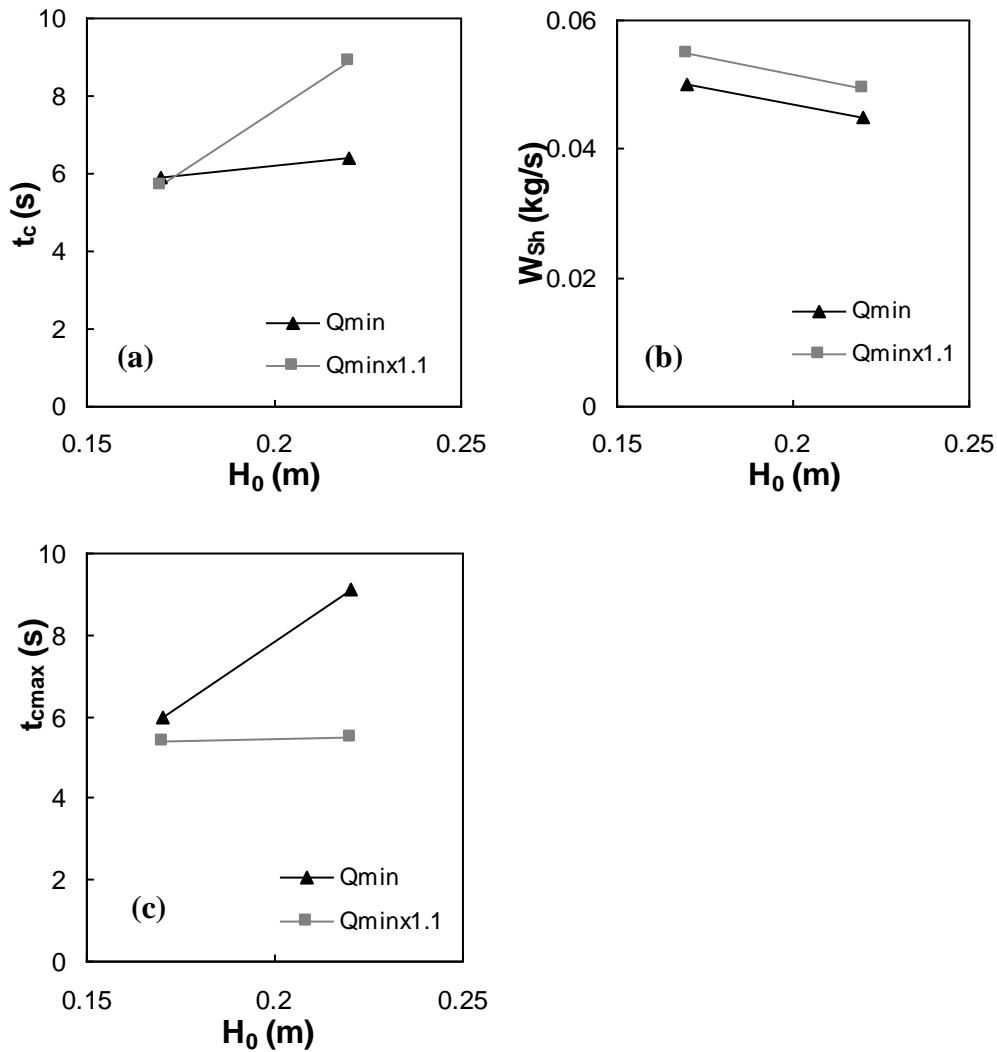
3.23. Irudia. Irekiduradun hodian hanken zabalarak solidoen ziklo denboran (a), zirkulazio emarian (b) eta ziklo denbora maximoan (c) duen eragina airearen emari ezberdinetarako. a, b eta c) sistemak: $\gamma = 36^\circ$; $D_0 = 0.04$ m; $D_T = 0.04$ m; $H_0 = 0.14$ m.

3.23 Irudiko grafikoei erreparatur ikus daitekeenez, irekiduradun hodian hanken zabalera handitzean solidoen ziklo denbora handitu egiten da. Alzibar et al.ek (2013) joera berbera ikusi zuten. Izan ere, irekiduradun hodian hanken zabalera handitzean irekiduradun hodiaren irekidura portzentajea txikitu egiten da. Hori dela eta, eraztungunetik iturgunera partikula gutxiago sartuko dira eta ondorioz, partikulak bide luzeagoa egin beharko du zikloa egiteko. Aireak arrastatuko duen solido kantitatea txikiagoa izango da, zirkulazio emaria txikitu egingo delarik. Gainera, 3.23 Irudiko grafikoetan antzeman daitekeenez, abiadura minimoan nahiz abiadura minimoa baino %10 abiadura handiagoan lan eginez, ziklo denbora eta zirkulazio emariaren joerak oso antzekoak dira.

Ohantzearen altuera

Ohantzearen altueraren azterketa egiteko bi altuera ezberdin eta irekiduradun hodiak erabili dira. Ikerketan ohantzearen altuerak solidoen ziklo denboran, zirkulazio emarian eta ziklo denbora maximoan duen eragina aztertu da, bai airearen emari minimoan baita emari minimoa baino %10 handiagoan lan egitean.

Jarraian, ohantzearen altuerak solidoen ziklo denboran, zirkulazio emarian eta ziklo denbora maximoan duen eragina irudikatu da.



3.24. Irudia. Ohantzearen altuerak solidoen ziklo denboran (a), zirkulazio emarian (b) eta ziklo denbora maximoan (c) duen eragina airearen emari ezberdinetarako. a, b eta c) sistemak: $\gamma = 36^\circ$; $D_0 = 0.04$ m; $D_T = 0.04$ m; $W_H = 0.01$ m edo $IP = \%79$.

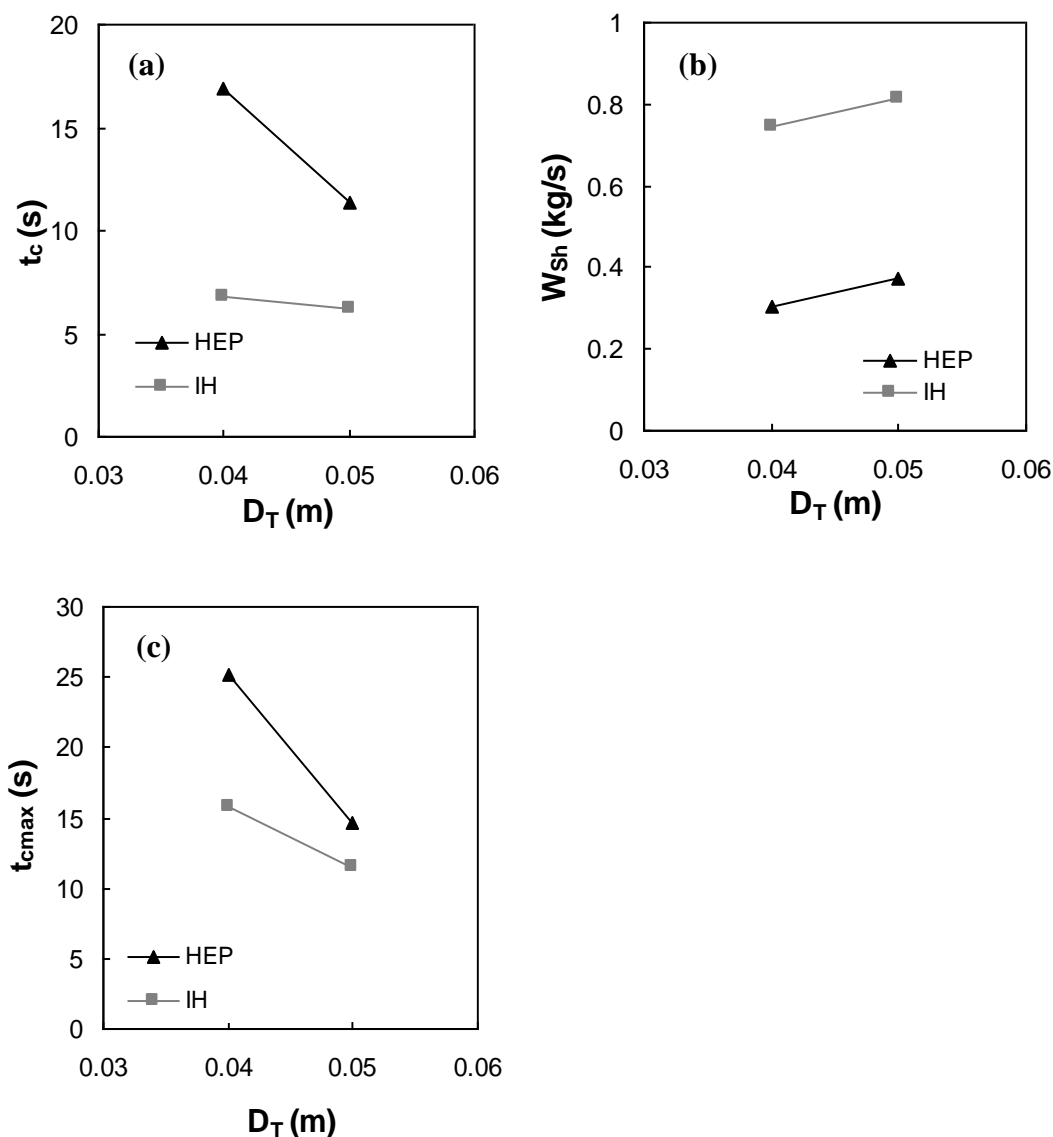
3.24 Irudiko (a) grafikoan erakusten den bezala, ohantzearen altuera handitzen denean, solidoen ziklo denborak handiagoak dira bi airearen abiadura ezberdinetarako, ohantzea altuagoa denez partikulak bide luzeagoa egin behar baitu. Arrazoi berberagatik, eta jakinik ziklo denbora eta zirkulazio emaria alderantziz proportzionalak direnez, 3.24 Irudiko (b) grafikoan ikus daitekeenez, ohantzearen altuera handitzean zirkulazio emaria txikitu egiten da. Modu berean, 3.24 Irudiko (c) grafikoan ohantzearen altuera handitzean ziklo denbora maximoa ere handiagoa dela ikus daiteke aurretik azaldu den arrazoi berberagatik.

Erdiko hodiaren diametroa

Erdiko hodiaren diametroaren eragina aztertzeko, partikulak iturrian biltzeko metodoaren balioztapenerako saiakuntzak erabili dira. Saiakuntzetan erabili den materiala beira izan da, airearen hiru sarrera diametro ezberdin erabili dira eta saiakuntzak erdiko hodi ez-porotsuekin zein irekiduradun hodiekin egin dira. Gainera, saiakuntzetan erdiko hodiaren diametroa aldatzeaz gain airearen sarrerako diametroa ere aldatu da.

Lehendabizi, erdiko hodiaren diametroak solidoen ziklo denboran eta zirkulazio emarian duen eragina aztertu da erdiko hodi mota bakoitzerako, eta ondoren erdiko hodiaren diametroaren eta airearen sarrerako diametroaren arteko elkarrekintzak duen eragina ikertu da.

Jarraian, irekiduradun hodian eta hodi ez-porotsuen diametroak solidoen ziklo denboran, zirkulazio emarian eta ziklo denbora maximoan duten eraginak irudikatu dira.



3.25. Irudia. Irekiduradun hodian eta hodi ez-porotsuen eragina solidoen ziklo denboran (a), zirkulazio emarian (b) eta ziklo denbora maximoan (c). a, b eta c) sistemak: $\gamma = 36^\circ$; $D_0 = 0.05$ m; $L_H = 0.07$ m; $L_T = 0.22$ m; $W_H = 0.018$ m edo $IP = 57\%$; $H_0 = 0.22$ m; $d_p = 0.004$ m; beira.

3.25 Irudiko (a) grafikoak erakusten duen moduan, erdiko hodi ez-porotsuen zein irekiduradun hodian diametroa handitzerakoan solidoen ziklo denbora txikitu egiten da. Izan ere, erdiko hodiaren diametroa handitzerakoan iturgunera aire emari handiagoa sartzen da eta, ondorioz, aireak partikula gehiago arrastatzen ditu iturrian. Beraz, solidoaren zirkulazio emaria handiagoa izango da, eta ziklo denborak laburragoak. Bi

hodi motek joera berdina erakusten duten arren, irekiduradun hodidun sisteman ziklo denborak hodi ez-porotsudun sisteman baino laburragoak dira, solidoa ohantzearen edozein altueratan eraztungunetik iturgunera sartu daitekeelako eta, beraz, bide laburragoak egin.

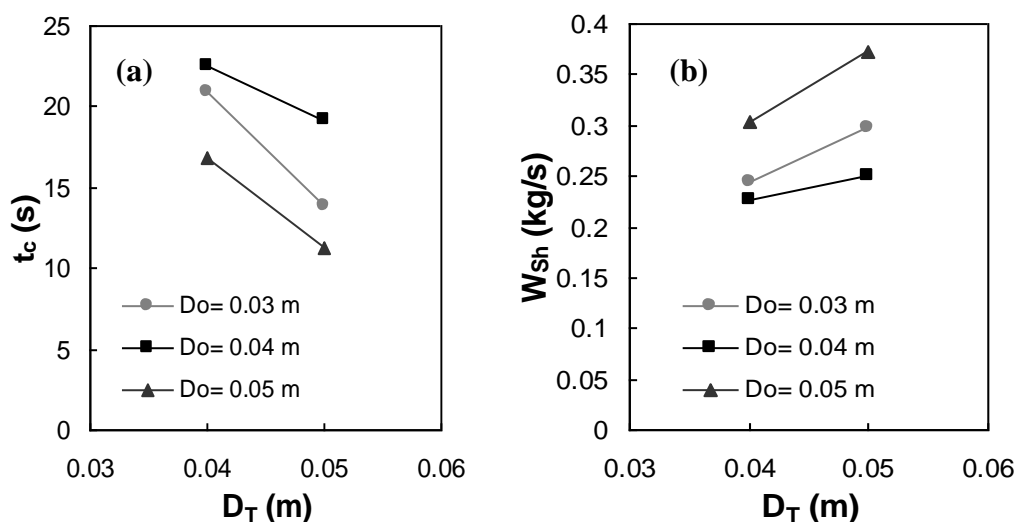
3.25 Irudiko (b) grafikoan, bi sistemetako zirkulazio emariaren joera berdina dela ere ikus daiteke, hots, irekiduradun hodidun sisteman hodi ez-porotsudun sisteman baino handiagoa izanik. Izan ere, airea hodiaren irekiduretan zehar iturgunetik eraztungunera sartzen da eta ohantzea askatuz zirkulazioa handiagoa lortzen da.

3.25 Irudiko (c) grafikoan ikus daiteke bai erdiko hodi ez-porotsuen baita irekiduradun hodiaren diametroa handitzerakoan solidoen ziklo denbora maximoak laburrago egiten direla, irekiduradun hodiaren ziklo denbora maximoak txikiagoak izanik. Eragin hauen arrazoa 3.25 Irudiko (a) grafikoan aipaturiko berbera da.

Saiakuntza hauekin ondoriozta daiteke erdiko hodi ez-porotsuarekin zein irekiduradun hodiarekin lan eginez erdiko hodiaren diametroa aldatzeak solidoaren ziklo denboran, zirkulazio emarian eta ziklo denbora maximoan duen eragina berbera dela.

Bestalde, erdiko hodiaren diametroaren eragina aztertu da airearen sarrerako diametro desberdinetarako. Horretako, hiru airearen sarrerako diametro ezberdin eta erdiko hodi ez-porotsuak zein irekiduradun hodiak erabili dira.

Hurrengo grafikoetan erakusten dira erdiko hodi ez-porotsuaren diametroak airearen sarrerako diametroa aldatzean batez besteko ziklo denboran eta zirkulazio emarian duen eragina.



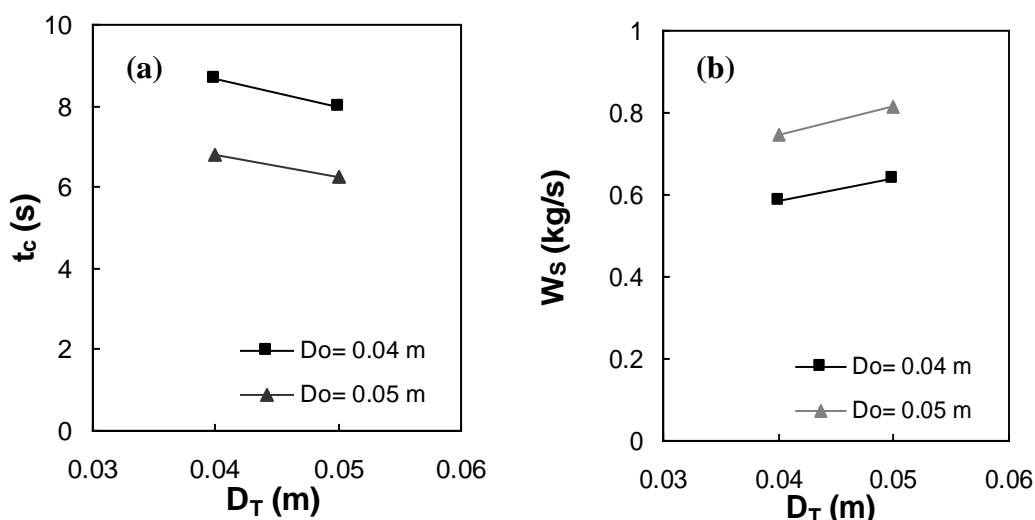
3.26. Irudia. Erdiko hodi ez-porotsuaren diametroaren eragina solidoen ziklo denboran (a) eta zirkulazio emarian (b) airearen sarrerako diametro aldatzean. a eta b) sistemak: $\gamma = 36^\circ$; $L_H = 0.07$ m; $L_T = 0.22$ m; $H_0 = 0.22$ m; $d_p = 0.004$ m; beira.

3.26 Irudiko (a) grafikoan ikus daitekeen moduan, hiru sarrerako diametroek joera beharokorra dute. Aipatu den bezala, honen azalpena erdiko hodiaren diametroa handitzean eraztungunetik iturgunera solido kantitate handiagoa pasatzean datza, hots,

solidoaren ziklo denbora txikiagoa izango da. Efektu horretaz gain, grafiko berean antzeman daiteke nola airearen sarrerako diametroa 0.03 m-tik 0.04 m-ra handitzean ziklo denbora ere handitu egiten den. Ostera, airearen sarrerako diametroa 0.04 m-tik 0.05 m-ra handitzean ziklo denborak nabarmen egiten du behera, sarreran eraztungunera airearen emari handiagoa sartzen delako, eta honek ohantzea askatu egiten du zirkulazio egonkorra eta azkarragoa lortzen delarik. Joera hauek bat datoz bibliografian (Altzibar et al., 2013) lortu diren emaitzekin, hau da, airearen sarrerako diametroa handitzerakoan zirkulazio emaria handitu egiten da, ziklo denborak txikituz. Izan ere, airearen sarrerako diametroa handiagoa denean, iturgunearen zeharkako-sekzio azalera handiagoa da, eta honek gune horretako gas emariaren gehikuntza eragiten du. Beraz, iturguneko goranzko solido emariaren gehikuntza ere eragiten du.

3.26 Irudiko (b) grafikoan ikus daiteke airearen sarrerako diametroa 0.03 m-tik 0.04 m-ra igotzean solidoaren zirkulazio abiadura txikiagoa dela. Aldiz, airearen sarrerako diametroa 0.04 m-tik 0.05 m-ra handitzean, zirkulazioa handiagoa da eraztungunera aire gehiago sartzeak ohantzea zurrunbilotsuago egiten baitu. Ildo beretik, analisi berbera egingo da irekiduradun hodiak erabiliz, baina soilik airearen sarrerako bi diametro ezberdin erabiliz.

Jarraian erakusten diren grafikoetan, irekiduradun hodiaren diametroak airearen sarrerako diametroa aldatzean solidoen ziklo denboran eta zirkulazio emarian duen eragina irudikatu da.

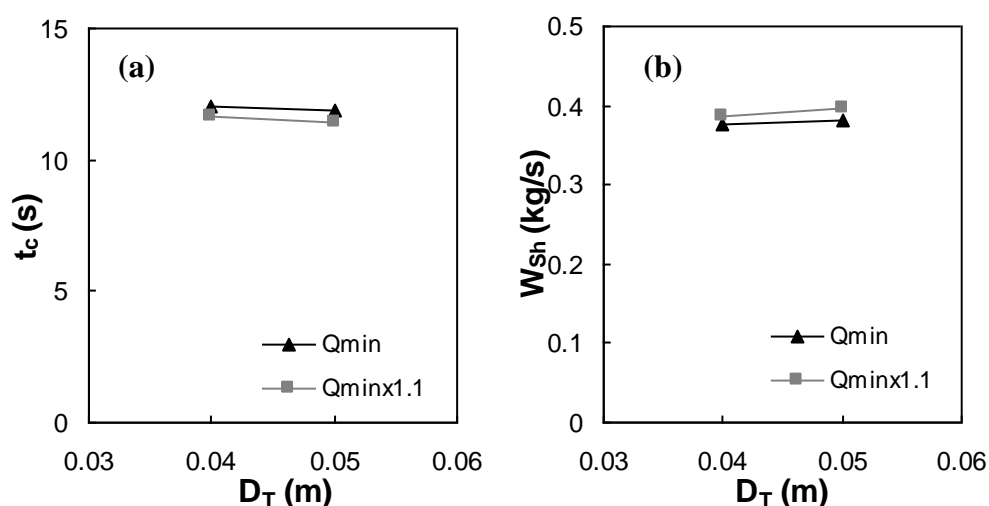


3.27. Irudia. Erdiko irekiduradun hodiaren diametroaren eragina solidoen ziklo denboran (a) eta zirkulazio emarian (b) airearen sarrerako diametroa aldatzean. a eta b) sistemak: $\gamma = 36^\circ$; $W_H = 0.018$ m edo $IP = \%57$; $H_0 = 0.22$ m; beira.

3.27 Irudiko grafikoetan aurretik azaldu diren joerak antzeman daitezke. Ikus daiteke airearen sarrerako diametroa handitzean ziklo denborak txikitu egiten direla. Izan ere, airearen zati bat iturgunetik eraztungunera pasatzen da ohantzearen altuera guztian, ohantzea askatuz, honek zirkulazio emaria handitzea eta ziklo denborak txikitzea dakarrelarik.

Saiakuntza hauetan berriro ere ondoriozta daiteke hodi ez-porotsuarekin eta irekiduradun hodiarekin lan eginez hodiaren diametroaren eragina berbera dela batez besteko ziklo denboran eta zirkulazio emarian airearen sarrerako diametro desberdinetarako.

Azkenik, erdiko hodiaren diametroaren eragina ikertu da abiadura minimoa baino %10 abiadura handiagoan lan egitean. Azterketa hori egiteko bi diametro ezberdin dituzten irekiduradun hodiak erabili dira. Aipatu behar da, saiakuntza horiek egiteko harea erabili dela.



3.28. Irudia. Erdiko hodiaren diametroaren eragina solidoen ziklo denboran (a) eta zirkulazio emarian (b). a eta b) sistematik: $\gamma = 36^\circ$; $D_0 = 0.04$ m; $W_H = 0.018$ m edo $IP = \%57$; $H_0 = 0.22$ m. Harea.

3.28 Irudiko grafikoek erakusten dute erdiko hodiaren diametroa handitzean zirkulazio emaria handitu egiten dela eta solidoen ziklo denbora txikiagoa dela bi airearen abiadura ezberdinetarako. Honen arrazoia aurretik azaldu den bezala, hodiaren diametroa handitzerakoan airearen emaria handiagoa dela da, hortaz, sortzen den solido zirkulazio emaria ere handiagoa dela eta ziklo denbora txikiagoa. Beraz, harearekin beirarekin lortutako joera berbera berresten da.

3.3. KORRELAZIO ENPIRIKOAK

Ziklo denbora esperimentalen (maximoa, minimoa eta batez bestekoa) azterketa egin ondoren, jarraian ziklo denborak teorikoki estimatzeko korrelazio enpirikoak proposatuko dira. Atal honetan aurretik aztertu diren ziklo denboren artean batez besteko ziklo denboraren (\bar{t}_c) estimaziorako korrelazio enpirikoak garatu dira. Batez besteko ziklo denbora estimatzeko korrelazioak lortzeko, doiketa metodoa erabiltzea erabaki da, modu azkar eta errazean lan egitea ahalbidetzen baitu.

Iturri ohandze konikorako eta erdiko hodia erabiltzen duten sistemen diseinurako bibliografian hutsune garrantzitsua dagoenez, modulu adimentsionalak eraikiz korrelazio enpirikoak proposatu dira. Hala ere, bibliografian dauden korrelazioen artean gure baldintza esperimentalera gehien hurbildu direnak hartu dira oinarri gisa.

3.3.1. Korrelazio enpirikoen proposamenerako prozedura esperimentalak

Atal honetan, batez besteko ziklo denboraren korrelazio enpirikoen lorpenean egin diren urratsak aditzera emango dira. Korrelazio enpirikoen garapenerako erabili diren datu esperimentalak 3.2.1 Atalean aurkeztu direnak izango dira. Aurretik ikusi den bezala, ziklo denboren emaitza esperimentalak erdiko hodirik gabeko, irekiduradun hodidun eta hodi ez-porotsudun sistemak erabiliz lortu direnez, korrelazio enpirikoak erdiko hodi mota bakoitzarentzat proposatuko dira.

Korrelazio enpiriko berriak garatzeko erabiliko den emaitza esperimentalen datu-basea material ezberdinak erabiliz lortua da, zehazki, garbantzua, ilar haziak eta tamaina ezberdineko beirazko bolak.

Bibliografian iturri ohandze konikoen ziklo denborak estimatzeko proposatu diren korrelazio enpirikoak eskasak dira. Bibliografian aurki daitekeen korrelazio enpiriko zaharrena iturri ohandze zilindriko baten batez besteko ziklo denbora (\bar{t}_c) estimatzeko proposatutakoa da (San José et al., 2004):

$$\bar{t}_c = 1.13 \left(\frac{d_p}{D_c} \right)^{-0.68} \left(\frac{D_0}{D_c} \right)^{1.70} \left(\frac{u}{u_{ms}} \right)^{-1.14} \left(\frac{H}{D_c} \right)^{-0.56} \gamma_b^{-0.29} \quad (3.9)$$

non d_p partikula diametroa, D_c zati zilindrikoaren diametroa, D_0 gasaren sarrerako diametroa, u airearen abiadura, u_{ms} iturkuntza abiadura minimoa, H hedatutako ohandzearen altuera eta γ_b oinarri konikodun kontaktore zilindrikoen oinarriko angelua diren.

Ildo beretik, gure ikerketa taldeko aurreko tesi batean (Morales, 2002) iturri ohandze koniko baten batez besteko ziklo denbora estimatzeko korrelazio enpiriko bat garatu zen:

$$\bar{t}_c = 0.85 \gamma^{0.48} \left(\frac{d_p}{D_i} \right)^{-0.68} \left(\frac{D_0}{D_i} \right)^{1.31} \left(\frac{u}{u_{ms}} \right)^{-1.14} \left(\frac{H_0}{D_i} \right)^{0.86} \left(\frac{\rho_s}{\rho_v} \right)^{-0.11} (\phi)^{-0.51} \quad (3.10)$$

non γ kontaktorearen angelua, D_i kontaktorearen oinarriaren diametroa, H_0 ohandzearen altuera, ρ_s solidoaren dentsitatea, ρ_v beirazko bolen dentsitatea eta ϕ esferikotasuna diren.

San José et al.ek (2012) batez besteko ziklo denbora kalkulatzeko korrelazio enpirikoa proposatu zuten erdiko hodidun iturri ohandze konikoan oinarrituriko lehorgailuan.

$$\bar{t}_c = 2.4 \gamma^{0.48} \left(\frac{d_p}{D_i} \right)^{-0.68} \left(\frac{D_0}{D_i} \right)^{1.31} \left(\frac{H_0 - l_d}{H_0} \right)^{-1.07} \left(\frac{H_0 - h_d}{H_0} \right)^{0.1} \quad (3.11)$$

non l_d erdiko hodiaren goiko aldearen luzera eta h_d hodi ez-porotsuen hanken altuera diren.

Aipatu bezala, korrelazio enpirikoa garatzeko erabiliko den datu-basea material ezberdinen nahastea denez, korrelazio orokor bat lortu behar da material guztietarako. Ondorioz, Morales-ek bere tesian (2002) eta San José et al.ek (2012) lortutako korrelazioak erabili orde (zehatzegiak direnez), bibliografiako (3.9) korrelazioa hartu da abiapuntu bezala korrelazio enpiriko berria garatzeko.

Lehen esan den moduan, korrelazio enpirikoa modulu adimentsionalak eraikiz lortuko da. Hortaz, korrelazio enpiriko berri bat eraikitzeke lehenengo urratsa bertan erabiliko diren moduluak erabakitzea da. Kasu honetan moduluak aukeratzeko hautatutako irizpidea 3.2.2.1 Atalean egin den analisi estatistikoa izan da. Bertan ondorioztatu da kontaktorearen angelua eta erdiko hodien faktoreak direla aldagai esanguratsuenak. Beraz, azken aldagai hauek korrelazio enpiriko berriaren parte izan behar dira.

Aipatu behar da (3.9) Ekuazioa datu-base esperimentalean aplikatu aurretik, saiakuntzetan erabilitako baldintza esperimentaletara moldatu beharra dagoela. Horretarako, korrelazio berrian zati zilindrikoaren diametroaren (D_c) lekuan, gasaren sarrerako diametroa (D_0) erabiliko da, kasu honetan kontaktoreak konikoak direlako (abiapuntuko korrelazioan zilindrikoak dira). Orduan, D_c aldagaia konstantea da eta ez du zentzurik modulu batean aldagai bat zati konstantea egotea. Era berean, hedatutako ohantzearen altuera (H) ohantzearen altueraz (H_0) ordezkatu da korrelazio berrietan, esperimentuetan neurtu den altuera izan baita.

Hodirik gabeko sistemen kasuan, (3.9) Ekuazioaren d_p/D_c , D_0/D_c eta u/u_{ms} moduluak erabili ohi dira. Kasu honetan, lehenengo moduluaren orde Arquimedes-en zenbaki adimentsionala, Ar , hartzea erabaki da partikula diametroaren eragina hobeto hartzen duelako kontuan. Bigarren moduluari dagokionez, aldatu egin da eta ohantzearen diametroaren orde ohantzeraren altuera hartu da, hots, H_0/D_0 . Hirugarren modulu eliminatu egin da ziklo denboren neurketa guztiak iturkuntza abiadura minimoan (u_{ms}) soilik egin direlako. Azkenik, kontaktorearen angeluaren modulu hartu da.

Jarraian, eratu diren moduluak baliogarriak diren edo ez ikusiko da. Horretarako, modulu bakoitzaren balio teoriko berdinetarako batez besteko ziklo denboraren balio esperimentalak ea antzekoak dituzten begiratu da. Adibidez, H_0/D_0 zatiduraren balio berdintsuetarako batez besteko ziklo denboraren datu esperimentalak parekoak direnez, moduluaren egokitasuna egiaztatuta da. Egiaztapen horietan modulu guztiak aproposak direla ondorioztatu da.

Honen guztiaren ondorioz, erdiko hodirik gabeko iturri ohantzerako proposaturiko ekuazioa hauxe da:

$$\bar{t}_c = a(Ar)^b \left(\frac{H_0}{D_0} \right)^c \tan(\gamma)^d \quad (3.12)$$

non Ar Arquimedes-en zenbaki adimentsionala den

$$Ar = \frac{g d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g)}{\mu_g^2} \quad (3.13)$$

Arquimedes-en zenbaki adimentsionalean partikularen ezaugarriak kontuan hartzen dira, hala nola, d_p partikula diametroa, ρ_g gasaren dentsitatea, ρ_s solidoaren dentsitatea eta μ_g gasaren biskositatea.

Ildo beretik, irekiduradun hodidun sistemaren kasuan beste korrelazio enpiriko berri bat proposatu da erdiko hodirik gabeko kasuan aditzera eman den prozedura bera jarraituz. Konfigurazio honetarako planteatutako ekuazio berria erdiko hodirik gabeko iturri ohantzerako garatu denaren moldaketa bat da, erdiko hodiaren hanken zabalera (W_H) kontuan hartzen duen modulua gaineratu zaiolarik. Irekiduradun hodidun sistemaren kasuan korrelazioan erdiko hodiaren hanken zabalera sartzeko beharra nabarmendu da, 3.2.2.1 Atalean egin den analisi estatistikoan aldagai esanguratsuenetariko bat delako. Hortaz, irekiduradun sistemetarako korrelazio enpirikoa ondorengo da.

$$\bar{t}_c = a(Ar)^b \left(\frac{H_0}{D_0} \right)^c \left(\frac{W_H}{D_0} \right)^d \tan(\gamma)^e \quad (3.14)$$

Azkenik, hodi ez-porotsudun sistemaren kasuan beste korrelazio enpiriko berri bat garatu da, beste konfigurazioetarako jarraitu diren urrats berberak emanaz. Hodi ez-porotsudun sistemaren kasuan korrelazioak irekiduradun hodia duen sistemarako eratu denaren oinarri berbera du, baina erdiko hodiaren hanken zabalera dagoen lekuan erdiko hodiaren hanken luzera kokatu da, 3.2.2.1 Atalean egin den analisi estatistikoan aldagai nagusia dela ondorioztatu baita. Beraz, hodi ez-porotsua duten sistemetarako korrelazio enpiriko berria horrela geratu da.

$$\bar{t}_c = a(Ar)^b \left(\frac{H_0}{D_0} \right)^c \left(\frac{L_H}{D_0} \right)^d \tan(\gamma)^e \quad (3.15)$$

3.3.2. Korrelazio enpirikoen emaitzak

Aurreko atalean, korrelazio enpirikoak lortzeko jarraitu den prozedura deskribatu da eta korrelazio enpiriko horietan parte hartzen duten moduluak eta euren osaera azaldu da. Oraingoan, proposatutako korrelazio enpirikoei doitu zaizkie datu esperimentalak Matlab-ean oinarrituriko programa informatikoaren bidez eta doiketa horietatik lortu diren emaitzak azaldu dira. Matlab programa informatikoa erabiliz, planteatutako ekuazioak doitzeko programa garatu da karratu txikiaren bidezko doikuntza-metodoan oinarrituta.

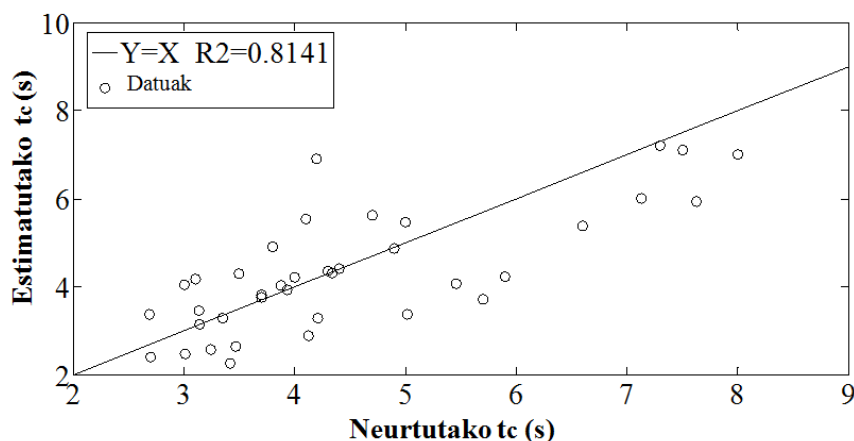
Modu honetan, erdiko hodirik gabeko sistemarako lortutako (3.12) Ekuazioaren doiketaz ateratako parametro multzo hoberena hurrengo da: $a= 33.5112$; $b= -0.1246$; $c= 0.1280$; $d= 0.7750$ eta beraz, korrelazio enpirikoa horrela geratu da.

$$\bar{t}_c = 33.51(Ar)^{-0.12} \left(\frac{H_0}{D_0} \right)^{0.13} \tan(\gamma)^{0.78} \quad (3.16)$$

Doiketa parametroei dagokionez, b parametroaren balio negatiboa izatea logikoa da, partikula diametroa handitzerakoan batez besteko ziklo denbora txikiago egiten delako.

Aldiz, c eta d parametroak positiboak dira ohandzearen altuera eta kontaktorearen angelua handitzean batez besteko ziklo denbora handiagoa delako.

Matlab programak eman dituen balio kalkulatuak eta era esperimentalean lortuak 3.29 Irudian alderatzen dira.



3.29. Irudia. Erdiko hodirik gabe (HG) batez besteko ziklo denborarako lortu diren datuen alderaketa.

3.29 Irudiko datuen doiketan lortu den erregresio koefizientea $R^2 = 0.8141$ da. Erregresio koefiziente hau onargarria den arren, ez da balio oso altua. Honen arrazoia, erdiko hodirik gabeko saiakuntza kopurua txikian datza. Konparazio zehatzagoak egiteko, multzo esperimentaletik zenbait datu hartuko dira zorizko eran eta kalkulatuokokin alderatuko dira. Hartu diren datu berberak sare neuronalen balioztapena egiteko ere erabiliko dira. Kasu honetan, datu multzoa txiki samarra denez, datu pare bat hartu dira konparaziorako, 3.8 Taula. Datu hauek lortzeko erabili diren baldintzak 3.9 Taulan erakusten dira. Ikus daitekeenez, (3.16) Ekuazioko estimazioen eta neurtutako balioen arteko erroreak errore esperimentalaren (%30 gehienez) barnean daude. Beraz, 3.29 Irudian eta 3.8 Taulan oinarrituz, erdiko hodirik gabeko sistematarako planteatutako korrelazio enpiriko berria datuak doitzeko egokia dela ondorioztatzen da.

3.8. Taula. Korrelazio enpirikoaren balioztapenerako emaitzak erdiko hodirik gabeko iturri ohandzerako.

Esperimentu zenbakia	Aldagaia	Neurtuta	Estimatuta	%
1	t_c (s)	8.70	6.77	22
2		3.93	3.69	6

3.9. Taula. Erdiko hodirik gabeko sistemen balioztapenerako esperimentuen baldintzak.

Esperimentu zenbakia	Angelua ($^\circ$)	D_0 (m)	H_0 (m)	d_p (m)	ρ_s (kg/m^3)
1	45	0.04	0.24	0.004	2420
2	45	0.06	0.05	0.0010	1210.9

Bestalde, irekiduradun hodia duten iturri ohandzerako proposatu den korrelazio enpiriko berriaren balioztapena egiteko erabili diren datuak 3.10 Taulan erakusten diren baldintzetan lortu dira.

3.10. Taula. Erdiko irekiduradun sistemen balioztapenerako esperimentuen baldintzak.

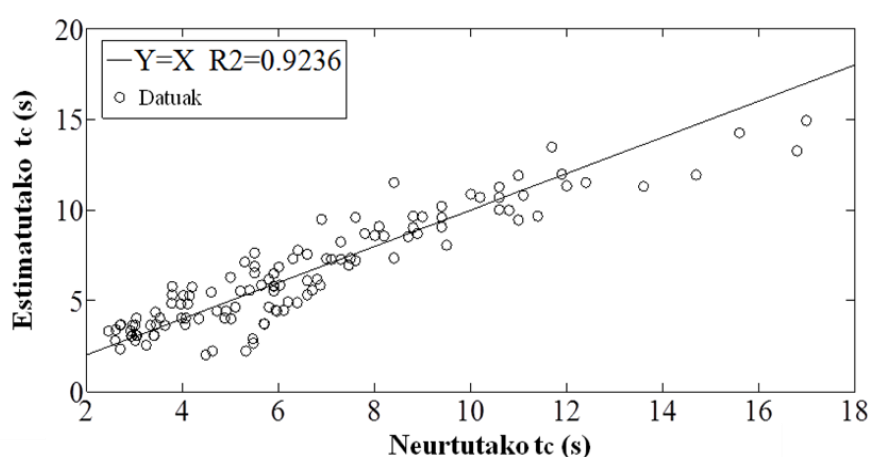
Esperimentu zenbakia	Angelua (°)	D_0 (m)	H_0 (m)	d_p (m)	W_H (m)	ρ_s (kg/m ³)
1	28	0.04	0.27	0.0034	0.018	1230
2	45	0.05	0.24	0.0034	0.025	1230
3	45	0.04	0.27	0.004	0.025	2420
4	45	0.04	0.27	0.004	0.025	2420
5	36	0.04	0.27	0.006	0.025	2420
6	45	0.04	0.17	0.01	0.018	1211

Irekiduradun hodian datuak (3.14) Ekuazioa doitzuz, honako parametro hoberenak eskuratu dira: $a= 101.8290$; $b= -0.1838$; $c= 0.4757$; $d= 0.3077$; $e= 0.8725$ eta beraz, korrelazio enpirikoa horrela geratu da.

$$\bar{t}_c = 101.83 (Ar)^{-0.18} \left(\frac{H_0}{D_0} \right)^{0.48} \left(\frac{W_H}{D_0} \right)^{0.31} \tan(\gamma)^{0.87} \quad (3.17)$$

Kasu honetan, erdiko hodirik gabeko sistemaren doiketa parametroen zeinuetarako eman diren arrazoi berberak betetzen dira. Esan beharra dago, irekiduradun sistemarako bereizgarria den moduluari dagokion d doiketa parametroa positiboa izatea egokia dela, erdiko hodiaren hanken zabalera handitzean batez besteko ziklo denboraren balioa handiagoa delako.

Irekiduradun hodiatarako garatutako ekuazioaren doiketa 3.30 Irudian erakusten da.



3.30. Irudia. Batez besteko ziklo denboren doiketa irekiduradun hodia (IH) duten sistemetarako.

3.30 Irudian ikus daitekeenez, erregresio koefizientea $R^2= 0.9236$ da eta beraz, irekiduradun hodia duten sistemen doiketa ona dela ondorioztatzen da. Azken doiketa

hau erdiko hodirik gabeko sistemarako lortu denarekin konparatuz ($R^2 = 0.8141$), irekiduradun hodiatarako planteatu den korrelazioari hobeto doitzen zaizkio datuak.

Irekiduradun hodiako egin den korrelazio enpirikoaren balioztapenerako zorizko eran aukeratu diren emaitzak 3.11 Taulan biltzen dira.

3.11. Taula. Korrelazio enpirikoaren balioztapenerako emaitzak irekiduradun hodia duten iturri ohandzerako.

Esperimentu zenbakia	Aldagaia	Neurtuta	Estimatuta	%
1	t_c (s)	6.10	7.62	25
2		13.40	12.53	6
3		12.60	12.74	1
4		12.10	12.74	5
5		7.64	7.71	1
6		4.00	5.03	26

3.11 Taulan ikus daitekeenez, estimazioek errore esperimental onargarriak dituzte. Irekiduradun hodia duten sistemekin lortutako estimazioak erdiko hodirik gabe lortutakoekin erkatzea zaila da, erdiko hodirik gabeko sistemarako bi datu baino ez baitira. Erroreei dagokienez, kasu bietan parekoak dira.

Azkenik, erdiko hodi ez-porotsua duen sistamarako diseinatutako korrelazio enpirikoa balioztatzeko erabili diren esperimentuak 3.12 Taulan erakusten dira.

3.12. Taula. Hodi ez-porotsudun sistemen balioztapenerako esperimentuen baldintzak.

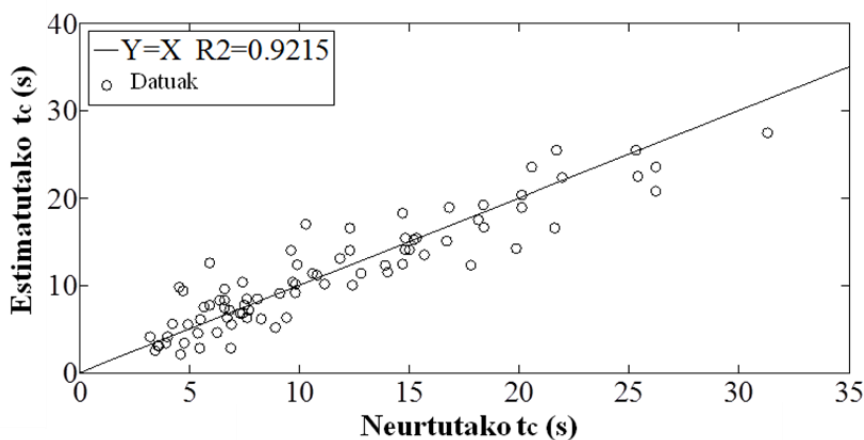
Esperimentu zenbakia	Angelua ($^\circ$)	D_0 (m)	H_0 (m)	d_p (m)	L_H (m)	ρ_s (kg/m^3)
1	36	0.05	0.24	0.0034	0.07	1230
2	28	0.05	0.27	0.006	0.15	2420
3	28	0.05	0.27	0.006	0.15	2420
4	36	0.04	0.17	0.01	0.07	1211

Hodi ez-porotsua duen sistamarako datuak (3.15) Ekuazioari doitzuz honako parametroak lortu dira: $a = 4.0847$; $b = -0.0638$; $c = 1.7062$; $d = -0.7889$; $e = 0.9373$ eta beraz, korrelazio enpirikoa horrela geratu da.

$$\bar{t}_c = 4.08 (Ar)^{-0.06} \left(\frac{H_0}{D_0} \right)^{1.71} \left(\frac{L_H}{D_0} \right)^{-0.79} \tan(\gamma)^{0.94} \quad (3.18)$$

Berrito ere, erdiko hodirik gabeko konfiguraziorako eman diren azalpen berberak dira baliozgarri, d parametroaren kasuan izan ezik. Hodi ez-porotsua erabiltzen den sistemetan, d parametroa negatiboa izateak badu zentzua, erdiko hodiaren hanken luzera handitzean batez besteko ziklo denborak laburrago baitira.

Hodi ez-porotsuak erabiliz lortu den korrelazio empiriko berriaren doiketa erakusten da 3.31 Irudian.



3.31. Irudia. Hodi ez-porotsuak (HEP) erabiliz lortu diren batez besteko ziklo denboren doiketa.

Kasu honetan, hodi ez-porotsuak erabiliz lorturiko erregresio koefizientea ($R^2 = 0.9215$) irekiduradun hodiatarako lortu denaren ($R^2 = 0.9236$) parekoa da.

Erdiko hodi ez-porotsudun konfiguraziorako estimazioak ondorengo taulan erakusten dira.

3.13. Taula. Korrelazio empirikoaren balioztapenerako emaitzak hodi ez-porotsudun iturri ohantzerako.

Esperimentu zenbakia	Aldagaia	Neurtuta	Estimatuta	%
1	t_c (s)	11.70	13.55	16
2		7.71	5.82	25
3		5.72	5.82	2
4		6.78	7.52	11

3.13 Taulan ikus daitekeenez, erroreak onargarriak dira.

Laburbilduz, doiketa hobereana irekiduradun hodia duen sistamarako proposatutako (3.17) Ekuazioak duen bitartean, txarrena (baina onargarria) erdiko hodirik gabeko sistemetarako garatu den (3.16) Ekuazioak du. Hodi ez-porotsuetarako (3.18) Ekuazioak tarteko estimazioak ahalbidetzen ditu.

3.4. SARE NEURONALAK

Atal honen xede nagusia iturri ohantze konikoan partikulen ziklo denbora minimoa, ziklo denbora maximoa, batez besteko ziklo denbora eta zirkulazioa emaria estimatzen dituzten sare neuronalak garatzea da. Gainera, sare neuronalek ziklo denborak eta zirkulazio emari berriak estimatzeko duten gaitasuna balioztatuko da. Horretarako, irteera bakarreko eta irteera anitzeko sare neuronalak diseinatuko dira, eta euren artean

gure datu-basea zeinek doitzen duen hobeto aztertuko da. Bestalde, sare neuronal horiek aurreko atalean proposatutako korrelazio enpirikoekin konparatuko dira.

Sare neuronalak aukera erraza eta baliagarria dira saiakuntza esperimentalak egin gabe iturri ohantzeen ziklo denboren eta zirkulazio emarien estimaziorako. Informazio hau erabakigarria da iturri ohantzeetan tratatzeko materiala hautatzeko orduan, ohantzearen zurruntbilotasunak, operazio baldintzak eta ohantzean tratatu ahal den solido kopurua auresatea baimentzen duelako.

Ziklo denborak eta zirkulazio emariak auresatea garrantzitsua den arren, zailtasunak sortzen dira horien hurbilketa guztiz mekanistikoak edo enpirikoak erabiltzean. Eredu teoriko onargarriaren baldintza, koefizienteen balioak estimatzeko gai izatean datza, baina barneko fenomeno garrantzitsuak ez dira sarri behar bezala kontuan hartzen. Orduan, sare neuronalak aukera eraginkorra izan ahal dira, prozesu ez linealak oso ondo adierazten dituztelako, sarrerako zarataren aurka nahiko malguak eta sendoak direlako, eta behin garatuta eta bere koefizienteak zehaztuta daudenean, emaitza azkarra eman ahal dutelako (Himmelblau, 2008).

Modu honetan, sare neuronalak diseinatzea erabaki da aldagai ezberdinak korrelazioan jartzeko eta irteera desiragarriak lortzeko gaitasuna dutelako. Horrela, saiakuntzak esperimentalki egin gabe, erdietsiko den erantzuna (errore esperimentalaren barnean) jakitea posible izango da. Ildo beretik, saiakuntzak estatistikoki diseinatuta egon ez arren, garatuko diren sare neuronalak estimazio nahiko zehatzak egiten dituztela erakutsiko da.

Lehen sare neuronalak, batez ere medikuntzarekin erlazionatuta zeuden arloetan erabiltzen ziren. Gaur egun, berriz, sare neuronalak ikerketa arlo ezberdinetan aplikatzen hasi dira. Modu honetan, sare neuronalen bibliografia oso zabala da, baina tesi honetan soilik iturri ohantzearen inguruko artikulak eta bereziki ziklo denborei buruzkoak kontuan izango dira. Guk dakigula bibliografian ez dira sare neuronalak diseinatu solidoen ziklo denborak estimatzeko, hori dela eta, sare neuronalen bibliografiari buruzko laburpen txikia egingo da, azken aldiak egin diren ikerketa esanguratsuenak eta gure gaiaren antza gehien dutenak aipatuz.

Azken urteotan, Freire et al.ek (2012a) sare neuronalak garatu zituzten lehorketaren fasearte akoplamendu terminoa deskribatzeko. Zhong et al.ek (2013) sare neuronalak iturkuntza abiadura minimoa auresateko erabili zituzten. Viera et al.ek (2015) esne osorako hezetasun edukia ondorioztatu zuten sare neuronalen bidez. Perazzini et al.ek (2015) sare neuronala proposatu zuten esne deskrematuaren karga galera maximoa eta iturkuntza abiadura minimoa auresateko. Estiati et al.ek (2016) sare neuronalak diseinatu zituzten biomasaren goi bero-ahalmena estimatzeko.

3.4.1. Sare neuronalen prozedura esperimentalak

Sare neuronalak ordenagailu bidezko doiketa metodoak dira, zeinetan giza garunaren loturak imitatzen diren. Hori dela eta, sareen barneko lotura unitateei neurona izena ematen zaie, zeintzuek euren arteko loturen bitartez datu-base bat korrelazioan jarri dezaketen.

Sare neuronalak Matlab (R2013a, Mathworks) programa informatikoaren bitartez garatu dira sarrera moduan esperimentalki egindako saiakuntzak biltzen dituen datu-basea erabiliz. Datu-base hori parametro ezberdinez osatuta dago, zehazki, batez besteko ziklo denboraz (\bar{t}_c), ziklo denbora minimoaz (t_{\min}), ziklo denbora maximoaz (t_{\max}) eta zirkulazio emariaz (W_S). Sare neuronalak diseinatzeko abiapuntu bezala erabili den datu-basea 3.2.1 Ataleko ziklo denboren esperimentu berberak dira. Hortaz, atal horretan aditzera eman den partikula trazatuaren jarraipen metodoaren prozedura esperimental eta ekipo berbera erabili dira. Aintzat hartu behar da, ziklo denboren esperimentu horiek erdiko hodirik gabe, irekiduradun hodiak eta hodi ez-porotsuak erabiliz egin direla eta ziklo denboren neurketa guztiak iturkuntza abiadura minimoan egin direla.

Esperimentuetan aldatu diren parametroak, hau da, sarrerako diseinu parametroak kontaktorearen angelua (γ), gasaren sarrerako diametroa (D_0), ohandzearen altuera (H_0), partikularen diametroa (d_p), solidoaren dentsitatea (ρ_s), irekiduradun hodian hanken zabalera (W_H) eta erdiko hodi ez-porotsuen hanken luzera (L_H) dira.

Sare neuronaletan sarrera aldagaiek izan dituzten balioak hurrengo tauletan erakutsi dira. Sistema bakoitzean faktore geometriko ezberdinak aztertu direnez, konfigurazio bakoitzean erabili diren esperimentuen aldagaiak taula ezberdinetan sailkatu dira. Hala, 3.14. Taulan erdiko hodirik gabe egin diren esperimentuen faktoreak eta euren mailak biltzen dira.

3.14. Taula. Erdiko hodirik gabeko faktoreak eta mailak.

Faktoreak	Mailak			
γ ($^\circ$)	28	36	45	
D_0 (m)	0.03	0.04	0.05	0.06
H_0 (m)	0.17	0.24	0.27	
d_p (m)	0.0034	0.004	0.006	0.008
ρ_s (kg/m^3)	1210.9	1230	2420	

Era berean, 3.15 Taulan irekiduradun erdiko hodiarekin egin diren saiakuntzen faktoreak eta mailak agertzen dira.

3.15. Taula. Irekiduradun erdiko hodiko faktoreak eta mailak.

Faktoreak	Mailak				
γ ($^\circ$)	28	36	45		
D_0 (m)	0.04	0.05	0.06		
H_0 (m)	0.14	0.17	0.24	0.27	
d_p (m)	0.0034	0.004	0.006	0.008	0.01
W_H (m)	0.01	0.018	0.025		
ρ_s (kg/m^3)	1210.9	1230	2420		

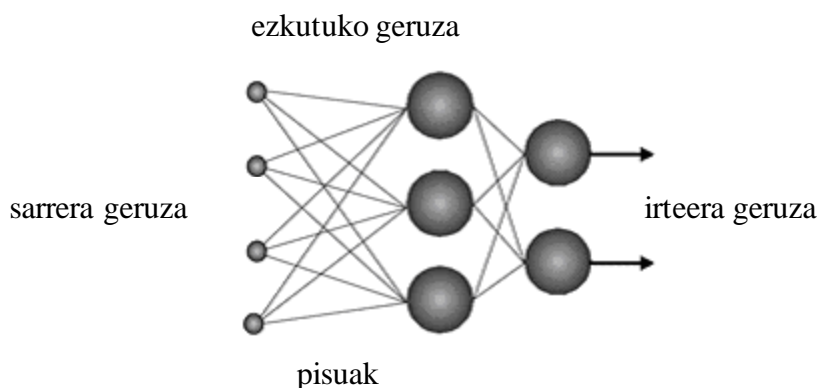
Azkenik, 3.16 Taulan erdiko hodi ez-porotsuarekin lan eginez erabili diren faktoreak eta euren mailak erakusten dira.

3.16. Taula. Erdiko hodi ez-porotsuko faktoreak eta mailak.

Faktoreak	Mailak				
γ (°)	28	36	45		
D_0 (m)	0.03	0.04	0.05	0.06	
H_0 (m)	0.17	0.24	0.27		
d_p (m)	0.0034	0.004	0.006	0.008	0.01
L_H (m)	0.07	0.15			
ρ_s (kg/m ³)	1210.9	1230	2420		

Materialei dagokionez, saiakuntzetan dentsitate eta partikula diametro ezberdineko solidoekin lan egin da, zehatz-mehatz, garbantzua, ilar haziak eta tamaina ezberdineko beirazko bolak erabili dira.

Jarraian, sare neuronalak diseinatzeko jarraitu diren urratsak eta aplikatu diren ekuazioak deskribatuko dira. Atal honen hasieran azaldu den bezala, sare neuronalak ordenagailu bidezko programazio metodoak dira eta datu-baseak korrelazionatzea da euren helburua. Hiru geruzako sare neuronalaren ohiko egitura 3.32 Irudian erakusten da.



3.32. Irudia. Hiru geruzako sare neuronalaren egitura.

Sare neuronala diseinatzeko lehenengo urratsa bere oinarritzko egitura hautatzea da, sarrera eta irteeraren arteko neurona eta ezkutuko geruza kopurua zehaztuz. Ohiko sare neuronalaren sarrera-irteera erlazioa hurrengo ekuazioaren bidez egiten da.

$$y = b_2 + LW \cdot \tan \text{sig}(b_1 + IW \cdot x) \quad (3.19)$$

non y irteera bektore bat, x sarrera bektore bat, LW ezkutututako geruzatik irteera geruzarako lotura matrizea, IW sarrerako geruzatik ezkutuko geruzarako lotura matrizea, b_1 ezkutuko geruzen bias (faktore eskala) bektorea eta b_2 irteerako geruzen bias (faktore eskala) bektorea diren.

Norabide bakarreko sare neuronaletan ezkutuko geruzatik jasotako seinalea irteerako geruzara zuzenean doa. Ezkutuko geruzaren unitate bakoitzak (y_j) pisua aplikaturiko sarrerak batzen ditu eta aktibazio funtzioa aplikatu ondoren irteerako seinalea sortzen du hurrengo ekuazioaren arabera.

$$Y_j = f_{act} \left(\sum_{i=1} W_{ij} X_i + b_j \right) \quad (3.20)$$

non W_{ij} i. sarrera eta ezkutuko geruzaren j. neuronaren arteko loturaren pisua eta b_j j unitatearen bias pisua diren.

Ikerketa honetan erabilitako aktibazio funtzioa (3.21) Ekuazioan erakusten den tan-sigmoidala da.

$$f_{act}(\chi) = \frac{1}{1 + e^{-\chi}} \quad (3.21)$$

y_j neuronaren emaitza irteera geruzaren unitate guztietara bidaltzen da. O_k irteera neurona bakoitzak jasotzen dituen sarrera guztiak batzen ditu eta ondoren aktibazio funtzio aplikatzen du (3.22) Ekuazioaren arabera.

$$O_k = f_{act} \left(\sum_{j=1} V_{jk} Y_j + b_k \right) \quad (3.22)$$

non V_{jk} ezkutututako geruzatik irteera geruzarako pisuak diren.

Neuronen arteko lotura bakoitzaren pisuak (W_{ij}) sarearen ikaskuntza prozesuan zehar zehaztu dira. Ikaskuntza algoritmoa optimizazio ez linealean oinarritzen da eta, edozein doiketarekin gertatzen den bezala, sare neuronalen gaitasuna muga dezakete datu basea urria edo desgokia denean.

Behin sarea entrenatuta dagoenean, kalkulu erraz batzuen bidez eman dezake erantzun bat. Ezaugarri hau sare neuronalak erabiltzearen abantailetakoa bat da.

Ikaskuntza prozesua hurrengo urratsetan oinarritzen da:

- 1) Aukeratutako sare neuronalaren arkitektura batentzat, pisuen balioak hastarazi behar dira behin eta berriro zorizko zenbakiak erabiliz.
- 2) Entrenamendu etapan sarrerak elikatzen dira eta ondoriozko irteerak kalkulatzen dira pisuak eta (3.19-3.22) Ekuazioak erabiliz.
- 3) Sareko irteeren eta balio esperimentalen arteko errorea kalkulatzen da.
- 4) Optimizazio algoritmoa abiarazten da eta helburu funtzioaren gradienteak pisu bakoitzerako kalkulatzen dira. Pisuak optimizazio helburuaren eta urratsaren luzeraren arabera aldatzen dira hurrengo puntuaren hasierako etapara heltzeko.
- 5) Prozedura bigarren urratsera itzuliko da.
- 6) Kalkulatutako errorea handitzen hasten denean minimoa aurkitu da eta programa gelditu egingo da.

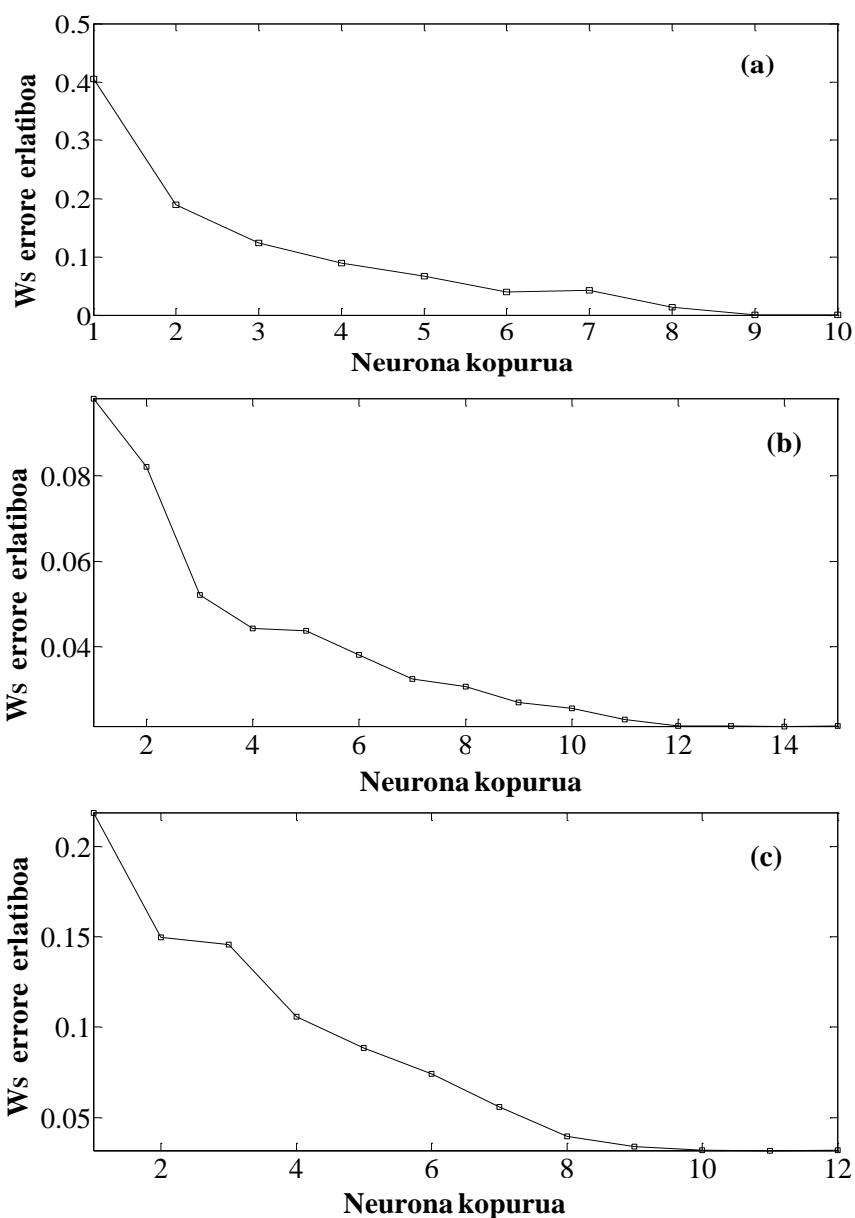
Ikaskuntza etapan kalkulatutako erroreak minimo lokal asko izan ditzake baita inklinazio guneak (sigmoidalaren ez linealtasunari esker) ere. Sare neuronalaren pisuak determinatzea optimizazioaren funtsezko zailtasuna da minimo lokal asko izan baititzake helburu funtzioak; hau da, sare neuronalak parametroak doitzeko zorizko puntuetatik hasten direnez, zenbait kasutan, beraien emaitzak minimo lokalak dira.

Edozein daturen doiketa teknika bezala, entrenatze datuak doitzeko eta entrenatze etapatik kanpo dauden datuak aurrerako duten gaitasunaren arabera ebaluatzen dira sare neuronalak. Interpolatzeko ahalmena dute sare neuronalek, baina ez dute estrapolatzeko ahalmenik. Horregatik, sare neuronalek esperimenduzko tartetik kanpo ez dute ondo aurreratu. Orokorrean, metodo estatistikoaren xedea erantzun baten aurrean aldagai bakoitzaren efektua jakitea da ereduaren osagaien koefizienteen arabera. Dena den, sare neuronalaren azken egitura prozesu fisiko baten osagai bezala interpretatzea zaila da. Sare neuronalak eredu empirikoak direnez, ereduaren egokitasuna aztertutako prozesuari eta erabilitako erabaki kriterioari lotuta dago. Sare neuronal egoki batek datu berrien aurrean orokortze eta errendimendu konputazional egokia erakutsi behar du. Errendimendu konputazional egokia izateak ondorengo esan nahi du: sarea zenbat eta txikiagoa izan, parametro eta datu gutxiago beharko direla eta identifikazio denbora laburragoa izango dela.

Sare neuronalaren diseinua Matlab programa informatikoaren “Neural Network Toolbox” deituriko funtzio multzoaren bidez egin da. Funtzio multzo horrek ereduaren sorkuntza eta balioztapen azkarra ahalbidetzen du. Sarea entrenatzeko “standard bayesian back-propagation” izeneko entrenatze algoritmoa erabili da. Entrenatze algoritmo honek alboko neuronen arteko pisuak berrikuntzen ditu Levenberg-Marquardt optimizazio algoritmoaren arabera. Levenberg-Marquardt optimizazio algoritmoak errore karratuak pisuz biderkatzerakoan lortzen den konbinazio lineala minimizatzen du datu esperimendualak hobeto doitzen dituen sarea emateko. Laburbilduz, karratu txikiaren bidezko doikuntza-metodoa erabili da.

Entrenatze etapak irteera asko dituen arren, sare neuronalak erabiliz ereduaren emaitzak hobetzea posiblea da sare osatutako etapa bat (bakoitza irteera batekin) erabiliz eta sare bakoitzerako sarrerako datu berbera erabiliz. Honek ereduaren aurreratu aldaketa nabarmen murriz dezake. Irteera guztiak dituen sare bakarra erabiltzean irteera aldagaiek sarrera aldagaiek duten menpekotasun maila antzekoa dutela onartzen da. Horregatik, irteera aldagai bakoitzerako sare bakarrekin lan egitea erabaki da. Ezkutuko geruzaren neurona kopurua proba eta errore metodologia aplikatuz aukeratu da. Horretarako, neurona batekin hasi da eta neuronak gehituz joan da sarearen aurreratu ahalmen egokia lortu arte. Helburu nagusienetarikoa bat ahalik eta neurona kopuru txikien duen sare neuronalaren diseinatzea da. Sarearen lotura zenbakia datu esperimendual kopuruaren berdina denean, erregresio koefizienteak 1 da. Hortaz, sarearen entrenamendua oso espezifiko bilakatzen da datu berrien aurreratu ahalmena txikia delarik. Horregatik, lotura kopurua ahalik eta txikien mantentzea komeni da.

Hurrengo grafikoetan, zirkulazio emariaren errore erresidual erlatiboa irudikatuko da entrenamendu etapen erabilitako neurona kopuruarekiko, erdiko hodi konfigurazio bakoitzerako.



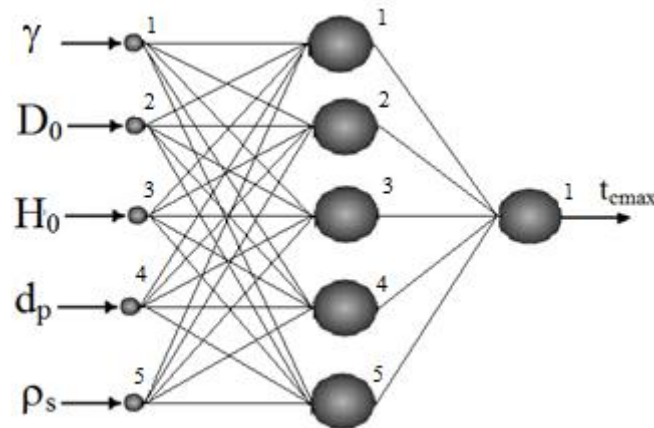
3.33. Irudia. Errore erresidual erlatiboa neurona kopuruarekiko (a) erdiko hodirik gabeko sistemetan (HG), eta (b) irekiduradun (IH) eta (c) hodi ez-porotsudun (HEP) iturri ohandzeetarako.

3.33 Irudian ikus daitekeenez, gure datu esperimentaletarako neurona kopurua 5-7 tartean mantentzea egokia da, nahiz eta zenbait kasuetarako zenbaki hau 10eraino igo behar izan den. Hala, zehazki, erdiko hodirik gabeko sistetarako 5 neurona erabili dira, irekiduradun hodia duen sistetarako 10 eta hodi ez-porotsua duen sistetarako 7. Erdiko hodi konfigurazio baten neurona kopurua handitzen da, konfigurazio horren gradu askeak handitzen direlako. Esate baterako, erdiko hodia duten sistemen sare neuronalek sarrera bat gehiago (L_H edo W_H) dute, eta ondorioz, neurona kopuru handiagoa behar dute.

3.33 Irudian aurkeztutako kasu guztietan erregresio koefizientea hobetu ahal den arren, errore erresidual erlatiboa 0.05 baino txikiagoa denean sarea entrenatze datuekiko oso espezifikoa da, eta ondorioz, ezin du datu berririk orokortu. Sare neuronalaren tamaina

aukeratzea erregresio koefizientearen eta datu ezezagun berriak aurreteko gaitasunaren arteko konpromisoa da onargarri diren neurona kopuru minimoa erabiliz.

Adibide gisa, 3.34 Irudiak hiru geruza eta bost neurona geruza ezkutuan dituen sare neuronalaren egituraren diagrama eskematikoa erakusten du. Egitura hori ziklo denbora maximoa estimatzeko erabili da erdiko hodirik gabeko iturri ohantze konikoaren kasurako.



3.34. Irudia.

Bost geruzetako sare neuronalaren diagrama eskematikoa.

Sare neuronala entrenatu ondoren, 3.34 Irudiko sare neuronalerako neuronen loturen arteko pisuak eta bias-ak hurrengoak dira, (3.19) Ekuazioan erakutsitako idazkeraren arabera:

$$B = \begin{bmatrix} -1.69406 & -1.59574 & -2.10694 & 1.409372 & 1.93335 \\ 0.568554 & 0.931329 & 1.545477 & 2.544775 & -1.85988 \\ 2.464366 & 1.774142 & 1.432082 & 3.503896 & -1.26926 \\ -0.59063 & 0.364995 & -2.03178 & -0.63512 & 0.109236 \\ -1.60395 & 0.647581 & -1.43123 & 1.749751 & -0.47952 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} -0.1533 \\ -1.3099 \\ 1.1358 \\ -0.6132 \\ 0.2349 \end{bmatrix} \quad b_h = \begin{bmatrix} 1.889059 \\ -1.20712 \\ 0.193998 \\ 1.781906 \\ -1.77597 \end{bmatrix} \quad b_o = -0.199800679$$

3.35. Irudia.

Neuronen loturen arteko pisuak eta bias-ak.

B matrizearen elementu bakoitza sarrera neurona bat ezkutuko geruzako beste batekin lotzen duen hastapen balioari dagokio. Era berean, C matrizeak ezkutuko geruzaren eta irteeraren arteko loturen pisuak batzen ditu.

3.4.2. Sare neuronalen emaitzak

Sare neuronalak definitu eta nola funtzionatzen duten deskribatu ondoren, atal honetan sare neuronalen erabilpenetik lortutako emaitzak eztabaidatuko dira. Lehenengo, irteera bakarrek sare neuronalen emaitzak aurkeztuko dira eta gero, irteera anitzekoak.

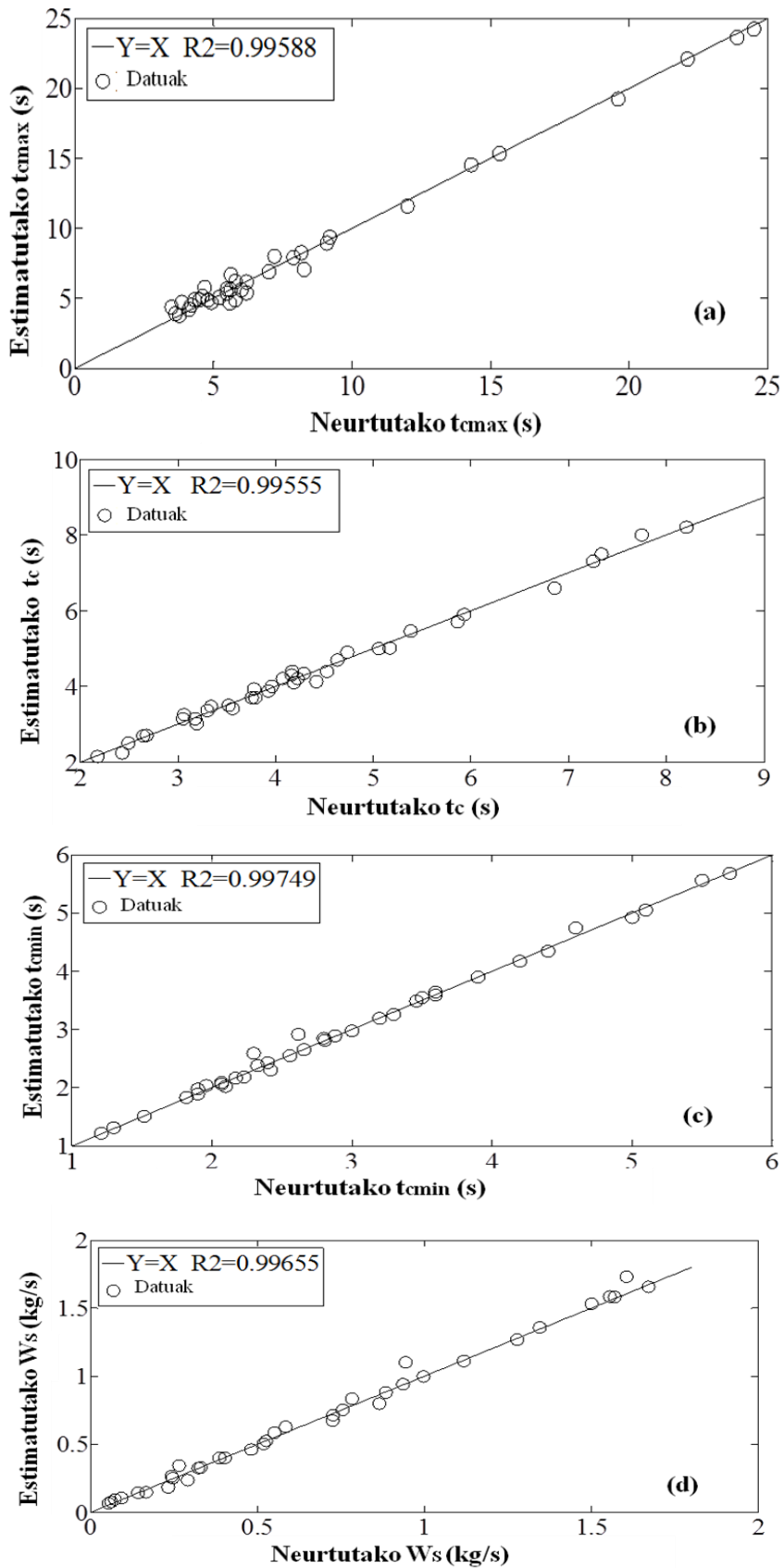
Horrela, sare mota ezberdinekin erdietsi diren estimazioak euren artean konparatuko dira, eta gure datu-basea hobeto doitzen duen sarea aukeratuko da.

Bi sare moten estimazioak konparatzeko orduan errazago izateko asmoz, bi sare ezberdinetarako irudikatuko diren grafikoak orden berbera jarraituko dute. Hala, hasteko erdiko hodirik gabeko sistemen estimazioak adieraziko dira, ondoren irekiduradun hodianak eta bukatzeko, hodi ez-porotsudun hodianak.

Sare neuronalen diseinua hasteko 300 esperimentu inguru dituen datu-basea erabili da. Datu-base horrekin hamabi sare neuronal (irteera aldagai eta iturri ohantze konfigurazio bana) entrenatu dira. Ondoren, ikaskuntza urratserako arazoak sortzen dituzten zenbait datu baztertu dira. Azkenik, erabilitako datu-basea 250 esperimentuz osatuta egon da.

- **Erdiko hodirik gabe**

Erdiko hodirik gabeko sistemarako 40 esperimentu erabili dira, 38 entrenatzeko eta 2 sare neuronalen orokortasun gaitasuna balioztatzeko. Azken bi esperimentu horiek 3.3.2 Atalean (3.16) korrelazio enpirikoa balioztatzeko (3.9 Taula) erabili diren saiakuntza berberak dira, zeinak datu-basetik zoriz hautatu eta ez dira erabili sarea entrenatzeko. 3.32 Irudian sare neuronalen doiketa ahalmena erakusten da.



3.36. Irudia. Erdiko hodirik gabeko (HG) irteera (a) ziklo denbora maximorako, (b) batez besteko ziklo denborarako, (c) ziklo denbora minimorako eta (d) zirkulazio emarirako.

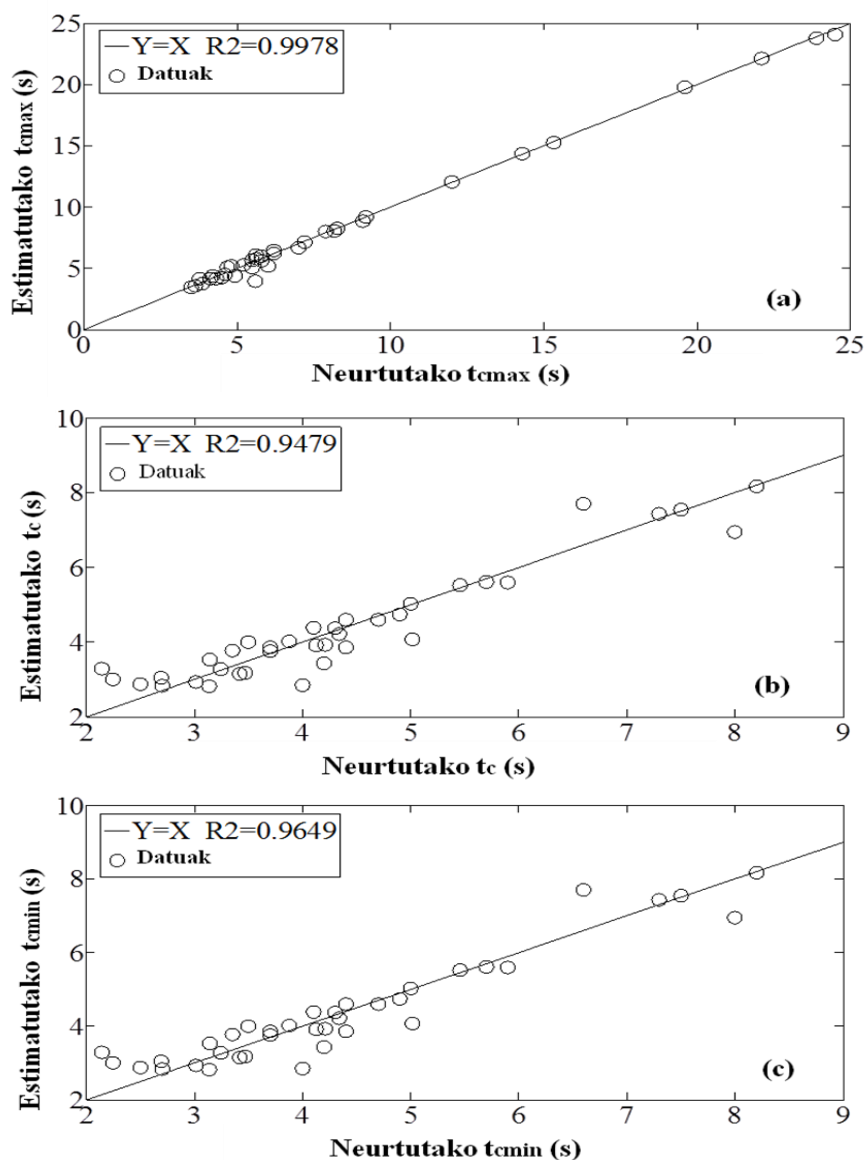
Sare neuronalak optimizaziorako iterazio kopuru zehatz baterako entrenatuak izan dira, gero gelditu egin dira eta eredu balioztapenerako datuekin probatu da. Honen zergatia gehiegizko doikuntza ekiditea da sareak ez baitira gehiegi entrenatu behar. Kontuan izanda datu-basea ez dela estatistikoki diseinatu, 3.36 Irudiko grafikoetan lortu den 0.99ko erregresio koefizientea balio onargarritzat har daiteke 5 neuronako sarerako. Sare neuronalak datuei ondo doitzen zaizkienean, sareak ematen dituen joerak datuenak izatea espero da. 3.17 Taulan lau sare neuronalen balioztapen urratsean lortutako emaitzak aurkezten dira.

3.17. Taula. Balioztapen emaitzak erdiko hodirik gabeko iturri ohantzerako.

Esperimentu zenbakia	Aldagaia	Neurtuta	Estimatuta	%
1	t_c (s)	8.70	8.35	4
2		3.93	3.59	9
1	t_{cmax} (s)	10.90	10.44	4
2		5.42	5.24	3
1	t_{cmin} (s)	5.10	5.53	8
2		2.34	2.41	3
1	W_s (kg/s)	0.81	0.85	5
2		0.06	0.06	6

3.17 Taulan antzeman daitekeenez, estimatutako balioetan errore guztiak %10 baino txikiagoak dira. Errore portzentaje hori neurketarekin erlazionatzen den errore esperimentalak baino askoz txikiagoa da. Kasu honetan, sare neuronalak irteerak estimatzen ikasteaz gain, neurketen zehaztugabetasuna ere gainditu egin du.

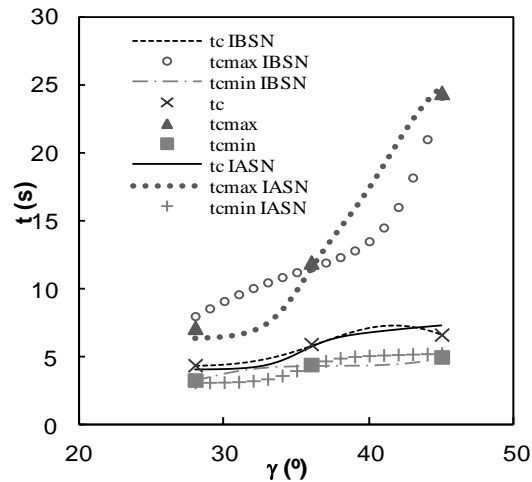
Irteera bakarrek sare neuronalak datu berriak estimatzeko oso onak direla frogatuz gero, interesgarria da eredu berri bat eratzea aldagai guztiak batera estimatzeko, adibidez, irteera anitzeko sare neuronalak. 3.37 Irudiak eredu berriaren irudikapen eskematikoa erakusten du hiru ziklo denboren (maximoa, minimoa eta batez bestekoa) aldiberean auresateko sarrera baldintza zehatzerako. 3.37 Irudiko irteera anitzeko sare neuronalaren diagrama eskematikoan ikus daitekeenez, irteerak ziklo denborak baino ez dira, aldeztu aurretik frogatu delako sare neuronalak hobeto estimatzen duela datu-basean zirkulazio emaria kontuan hartzen ez bada.



3.38. Irudia. Irteera anitzeko sarearen erdiko hodirik gabeko (HG) balioak (a) ziklo denbora maximorako, (b) batez besteko ziklo denborarako eta (c) ziklo denbora minimorako.

3.38 Irudian irteera anitzeko sare neuronalen doiketak onak ($R^2=0.94-0.99$ bitartekoak) direla antzematen da, baina irteera bakarreko sare neuronalen doiketen ($R^2=0.99$ ingurukoak) aldean irteera anitzeko sare neuronalek erregresio koefiziente txikiagoak dituzte, hots, estimazioak pobregokoak dira.

Bestalde, 3.2.2.1 Atalean aurkeztutako faktoreen eraginaren azterketa estatistikoan ikusienez, kontaktorearen angeluak eragin handia du erdiko hodirik gabeko iturri ohandzeen portaeran. Horregatik, sarrera hau zehatzago ikertu da. Horretarako, 3.39 Irudiak irteera bakarreko (IBSN) eta anitzeko (IASN) sare neuronalak erabiliz hiru ziklo denboren (maximoa, minimoa eta batez bestekoa) kalkulaturako balioak eta balio esperimentalak konparatzen ditu hurrengo sistemarako: D_0 , 0.04 m; H_0 , 0.27 m; d_p , 0.0034 m; materiala, ilar haziak.



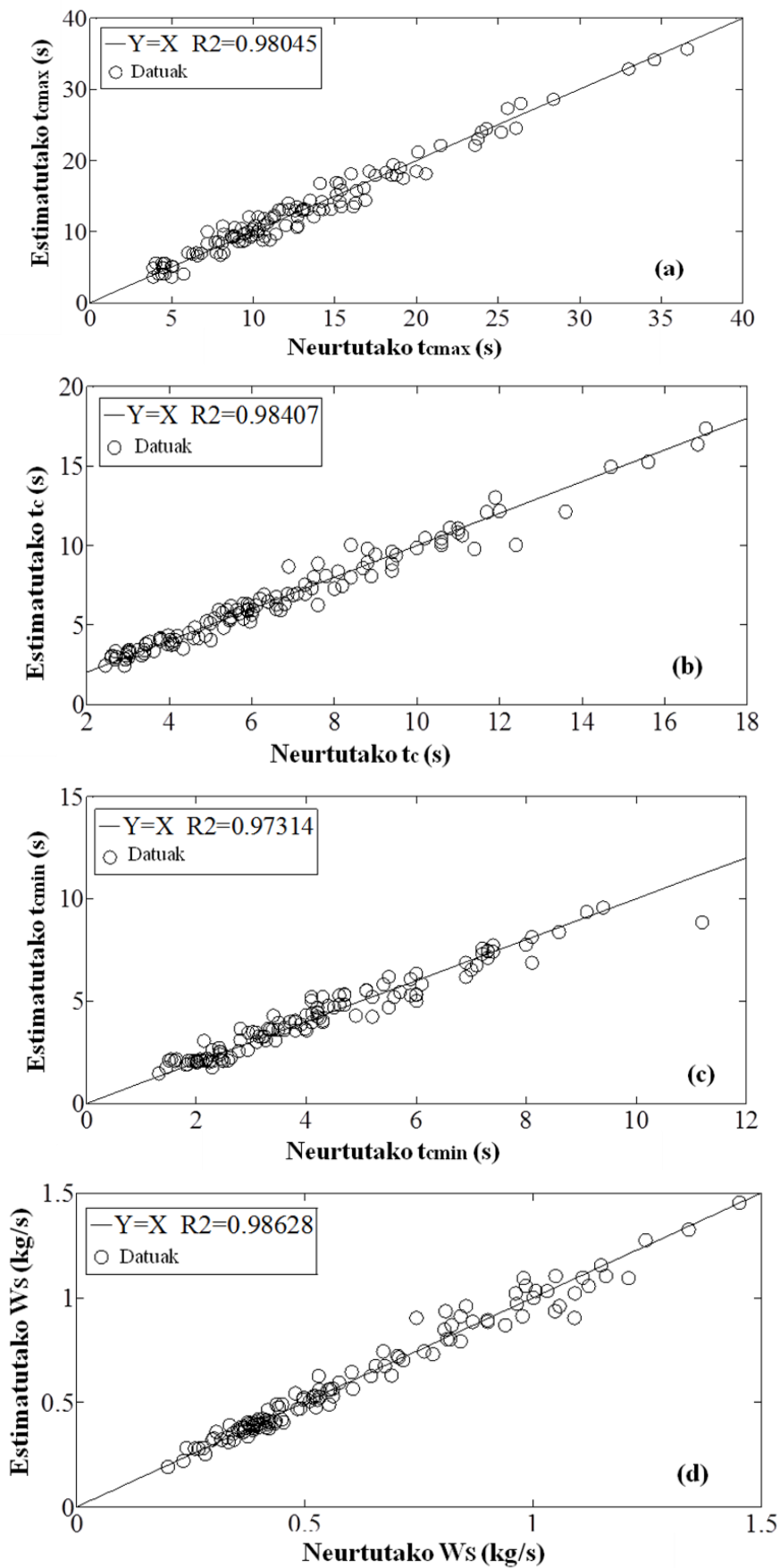
3.39. Irudia. Kontaktorearen angeluaren eragina ziklo denbora minimoan, maximoan eta batez bestekoan irteera bakarreko (IBSN) eta anitzeko (IASN) sare neuronalak erabiliz, erdiko hodirik gabeko (HG) iturri ohandzerako. Sistema: D_0 , 0.04 m; H_0 , 0.27 m; d_p , 0.0034 m; materiala, ilarrak.

3.39 Irudian argi ikusten da kontaktorearen angeluarekiko joerak hiru ziklo denboretarako sare neuronalek ondo ulertzen dituztela. Hala ere, 3.39 Irudiko joeretan sakonduz, nabari da irteera bakarreko sare neuronala irteera anitzekoa baino hobeto doitzen dela datu esperimentalera.

- **Irekiduradun erdiko hodia**

Jarraian, erdiko hodirik gabeko datuekin egin den prozedura berberari jarraituko zaio irekiduradun hodiko iturri ohandzerako. Datu-basea erdiko irekiduradun hodia duen sistemarako 120 datuz osatuta dago, zeinetatik 6 (%5a) datu egiaztapenerako erabili diren. Balioztapen datu horiek 3.3.2 Atalean korrelazio enpirikoetarako erabilitako sarrera berberak dira.

3.40 Irudian erdiko irekiduradun hodia duen iturri ohandzerako entrenatze datu-baserako korrelazio lerroak eta erregresio koefizienteak erakusten dira.



3.40. Irudia. Erdiko irekiduradun hodiko (IH) irteera (a) ziklo denbora maximorako, (b) batez besteko ziklo denborarako, (c) ziklo denbora minimorako eta (d) zirkulazio emarirako.

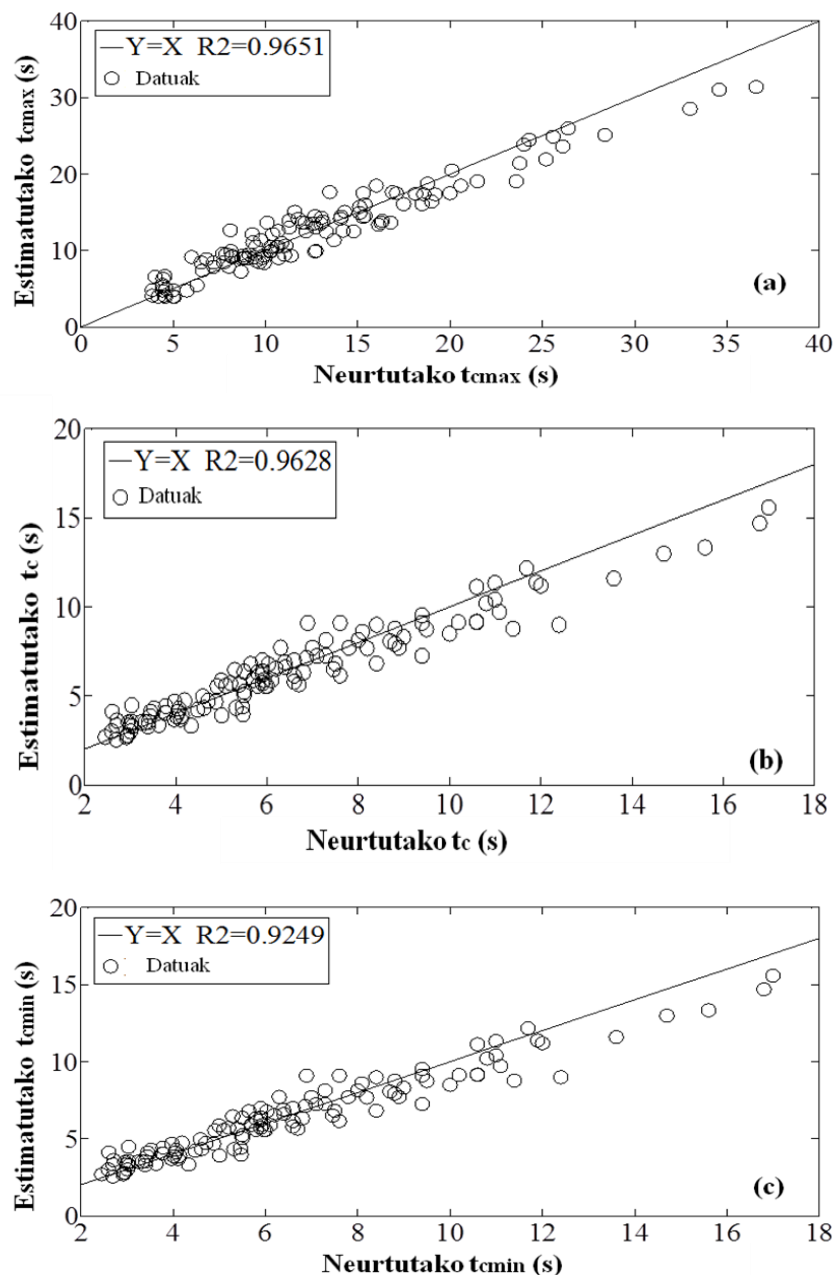
3.40 Irudian irekiduradun hodiekin lan eginez eskuratutako erregresio koefizienteak ($R^2 \sim 0.98$ ingurukoak) onargarriak izan arren, erdiko hodirik gabe lortutakoak ($R^2 \sim 0.99$ ingurukoak) baino pobregoak dira. Erregresioak onak baina ez bikainak izatea bat dator datu-basea hasieratik sei sarrera lau irterarekin korrelazioan jartzeko diseinatuta ez egotearen ideiarekin. 3.40 Irudian ikus daitekeenez, datuak aldagai bakoitzaren eremuan uniformeki banatuta daude. Gainera, sareak diseinatzeko zailtasun maila nahiko ezberdina da, agerian utziz datu-basea aldagai batzuetarako egokiagoa dela, baina ez aldagai guztietarako. Erregresio koefizienteak sareei neurona gehiago gehituz nabarmen hobetuko lirakeen arren, hobekuntza ez lirakeke estatistikoki adierazgarria izango. Lau sare neuronalen estimazioen emaitzak 3.19 Taulan adierazten dira.

3.19. Taula. Balioztapen emaitzak irekiduradun hodiko iturri ohandzerako.

Esperimentu zenbakia	Aldagaia	Neurtuta	Estimatuta	%
1	t_c (s)	6.10	6.38	5
2		13.40	13.83	3
3		12.60	12.15	4
4		12.10	12.15	0
5		7.64	7.45	3
6		4.00	4.06	1
1	t_{cmax} (s)	11.90	11.94	0
2		24.80	28.27	14
3		25.90	25.28	2
4		24.40	25.28	4
5		21.36	18.40	14
6		10.69	11.27	5
1	t_{cmin} (s)	3.10	3.18	3
2		8.60	8.18	5
3		6.30	6.29	0
4		6.60	6.29	5
5		4.00	3.78	5
6		2.37	2.17	9
1	W_s (kg/s)	0.55	0.52	5
2		0.33	0.32	3
3		0.73	0.72	2
4		0.76	0.72	6
5		1.12	1.05	6
6		0.68	0.70	4

3.19 Taulan, sare neuronalek irekiduradun hodiko sistemak ondo aurratsen dituztela ondorioztatzen da, estimazioen eta neurketa esperimentalen arteko erroreak errore esperimentala baino txikiagoak (guztiak %15etik behera) baitira. Hala eta guztiz ere, errore horiek erdiko hodirik gabeko sistemena baino handiagoak dira.

Irteera anitzeko sare neuronalak ere hiru ziklo denboretarako aplikatu da erdiko irekiduradun hodiko iturri ohanterako eta 3.41 Irudian bere doiketen ahalmena ikus daiteke.



3.41. Irudia. Irteera anitzeko sarearen erdiko irekiduradun (IH) hodiko irteera (a) ziklo denbora maximorako, (b) batez besteko ziklo denborarako eta (c) ziklo denbora minimorako.

Erdiko hodirik gabeko konfigurazioan gertatzen den bezala, irekiduradun hodietarako 3.41 Irudiko irteera anitzeko sare neuronalaren erregresio koefizienteak onargarriak ($R^2 \sim 0.96$ ingurukoak) izan arren, irteera bakarreko sare neuronalarekin lortutakoak ($R^2 \sim 0.98$ ingurukoak) baino txikiagoak dira. Hori dela eta, irteera bakarreko sare neuronalak gure datu-basea hobeto doitzen duela ondorioztatzen da.

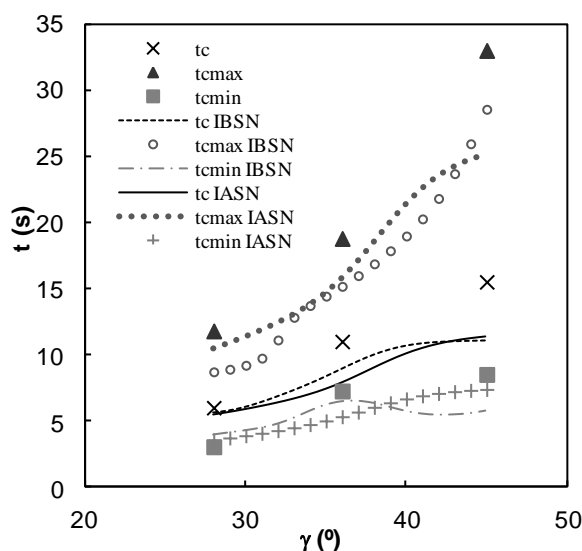
Hurrengo taulan irteera anitzeko sare neuronalen balioztapen emaitzak erakusten dira.

3.20.Taula. Irteera anitzeko sare neuronalaren balioztapen emaitzak irekiduradun hodiko iturri ohantzerako.

Esperimentu zenbakia	Aldagaia	Neurtuta	Estimatuta	%
1	t_c (s)	6.10	6.2686	3
2		13.40	13.3036	1
3		12.60	10.3616	18
4		12.10	10.3616	14
5		7.64	7.2227	5
6		4.00	4.5455	14
1	t_{cmax} (s)	11.90	11.9710	1
2		24.80	28.0758	13
3		25.90	19.7971	24
4		24.40	19.7971	19
5		21.36	16.0024	25
6		10.69	10.3840	3
1	t_{cmin} (s)	3.10	3.8879	25
2		8.60	8.1920	5
3		6.30	6.2893	0
4		6.60	6.2893	5
5		4.00	3.9618	1
6		2.37	2.5467	7

3.20 Taulako emaitzek adierazten duten moduan irekiduradun hodia duen sistemarako diseinatu den irteera anitzeko sare neuronalen estimazioen eta neurtutako balioen arteko errorea oraindik ere errore esperimental baina txikiagoa da. Honek irteera anitzeko sare neuronalak ondo estimatzen duela adierazten du. Dena den, irteera bakarreko sare neuronalen erroreen balioak %15 baino txikiagoak dira eta beraz, azken hauek hobeto estimatzen dituzte balio esperimentalak.

Irekiduradun hodia erabili diren sistemarako egindako analisi estatistikoak (3.2.2.1 Atalean) kontaktorearen angelua aldagaia esanguratsuena dela ondorioztatu du hiru ziklo denboretarako (maximoa, minimoa eta batez bestekoa). Hori dela eta, 3.42 Irudian irteera bakarreko (IBSN) eta anitzeko (IASN) sare neuronalak aplikatuz hiru ziklo denboren kalkulaturako balioak eta balio esperimentalak konparatuko dira hurrengo sistemarako: D_0 , 0.04 m; H_0 , 0.27 m; W_H , 0.018 m; D_T , 0.04 m; d_p , 0.0034 m; materiala, ilar haziak.



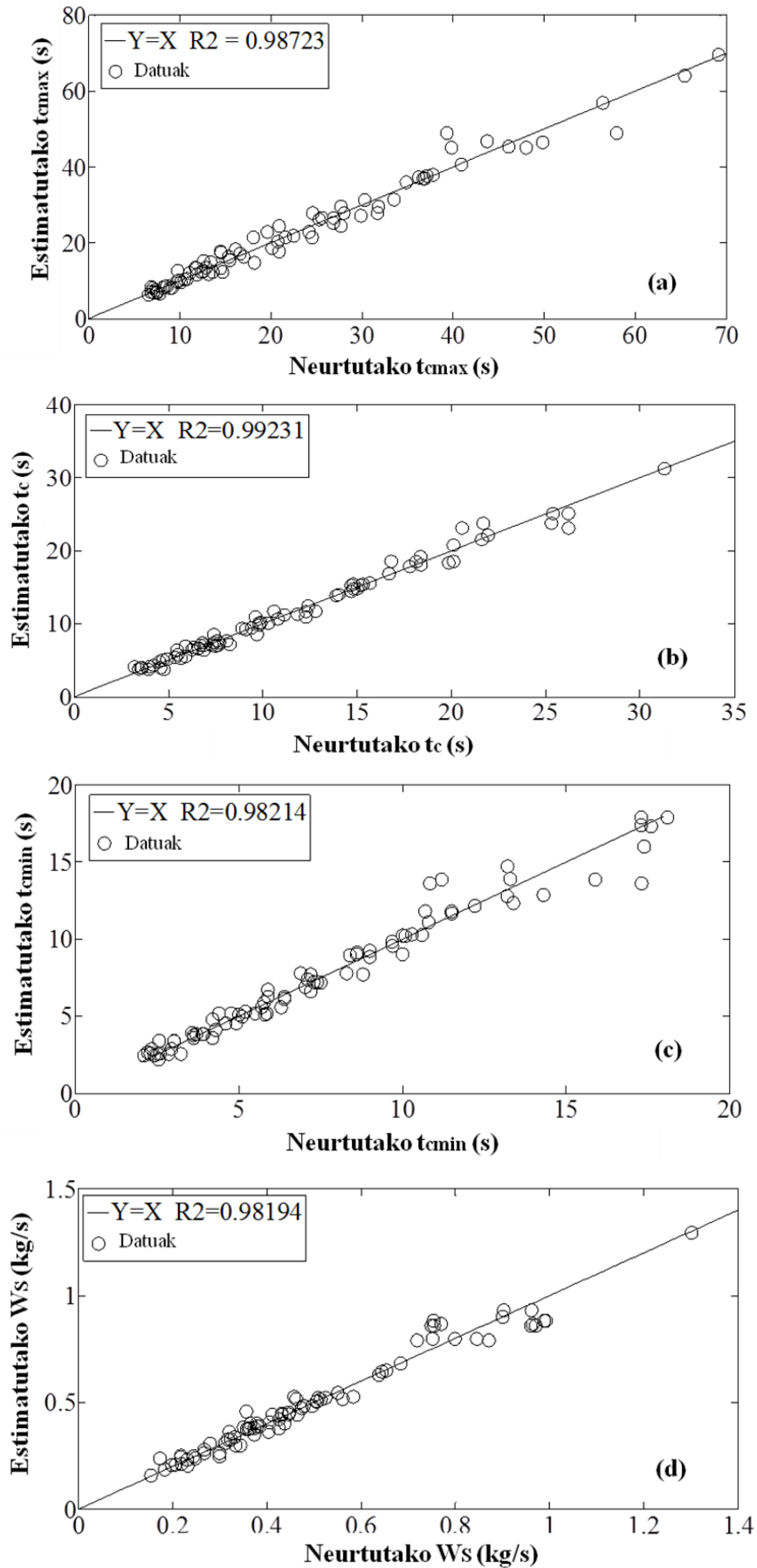
3.42. Irudia. Kontaktorearen angeluaren eragina ziklo denbora minimoan, maximoan eta batez bestekoan irteera bakarreko (IBSN) eta anitzeko (IASN) sare neuronalak erabiliz, irekiduradun hodia (IH) duen iturri ohandzerako. Sistema: D_0 , 0.04 m; H_0 , 0.27 m; W_H , 0.018 m; D_T , 0.04 m; d_p , 0.0034 m; materiala, ilarrak.

Nahiz eta 3.41 Irudiko paritate grafikoek doiketa onargarria erakusten duten, sistema honetan zehazki ziklo denbora maximorako balioak nahiko baxuak dira 45°-ko kontaktorean. Diferentzia hau irteera anitzeko sare neuronaletarako nabarmenagoa da. Aintzat hartu behar da erdiko hodi mota guztietarako sistema bera aukeratu dela aleatorioki konparaketa ahalik eta errealena izan dadin. Horretaz gain, aipatu behar da ziklo denborak ziurgabetasun garrantzitsuenen mende daudela eta batik bat, irekiduradun hodiaren kasuan hodiaren gune itxiaren mende. 3.42 Irudiko desberdintasuna eragin ahal duten faktoreak hauek dira: alde batetik, ziklo denbora maximoa entrenatzeko informazio falta, eta bestetik, egindako neurketa kopurua batez besteko ziklo denborarako baino txikiagoa izatea. Hala ere, orokorrean, 3.42 Irudiko joerak sare neuronalak ondo aurrezatu dituzte.

- **Erdiko hodi ez-porotsua**

Atal hau bukatzeko aurreko bi konfigurazioetarako jarraitu diren urratsak egingo dira erdiko hodi ez-porotsua duen sistamarako. Kasu honetarako datu-baseak 80 datu ditu. Bertatik, aleatorioki sare neuronalen sendotasuna balioztatzeko lau datu erabili dira, zehazki, 3.3.2 Atalean korrelazio enpirikoetarako erabili diren berberak.

Erdiko hodi ez-porotsua duen sistamarako diseinatu den sare neuronala erabiliz lortu diren doiketak hurrengo grafikoetan erakusten dira, estimatutako balioak neurtutako balioekiko irudikatu direlarik.



3.43. Irudia. Erdiko hodi ez-porotsuaren (HEP) emaitzak (a) ziklo denbora maximorako, (b) batez besteko ziklo denborarako, (c) ziklo denbora minimorako eta (d) zirkulazio emarirako.

Azken konfigurazio honetarako zazpi neurona nahikoak izan dira doiketa onargarria lortzeko. Aldagai guztietatik estimatzeko aldagai zailena ziklo denbora minimoa izan da, iterazio kopuru handiagoa behar izan duelako.

3.43 Irudiko grafikoetan ikus daitekeenez, doiketak nahiko onak dira erregresio koefizienteak 0.98 ingurukoak izan direlarik (irekiduradun hodian antzekoak) alabaina, erdiko hodirik gabeko erregresio koefizienteak direlarik oraingoan ere altuenak ($R^2 \sim 0.99$ ingurukoak).

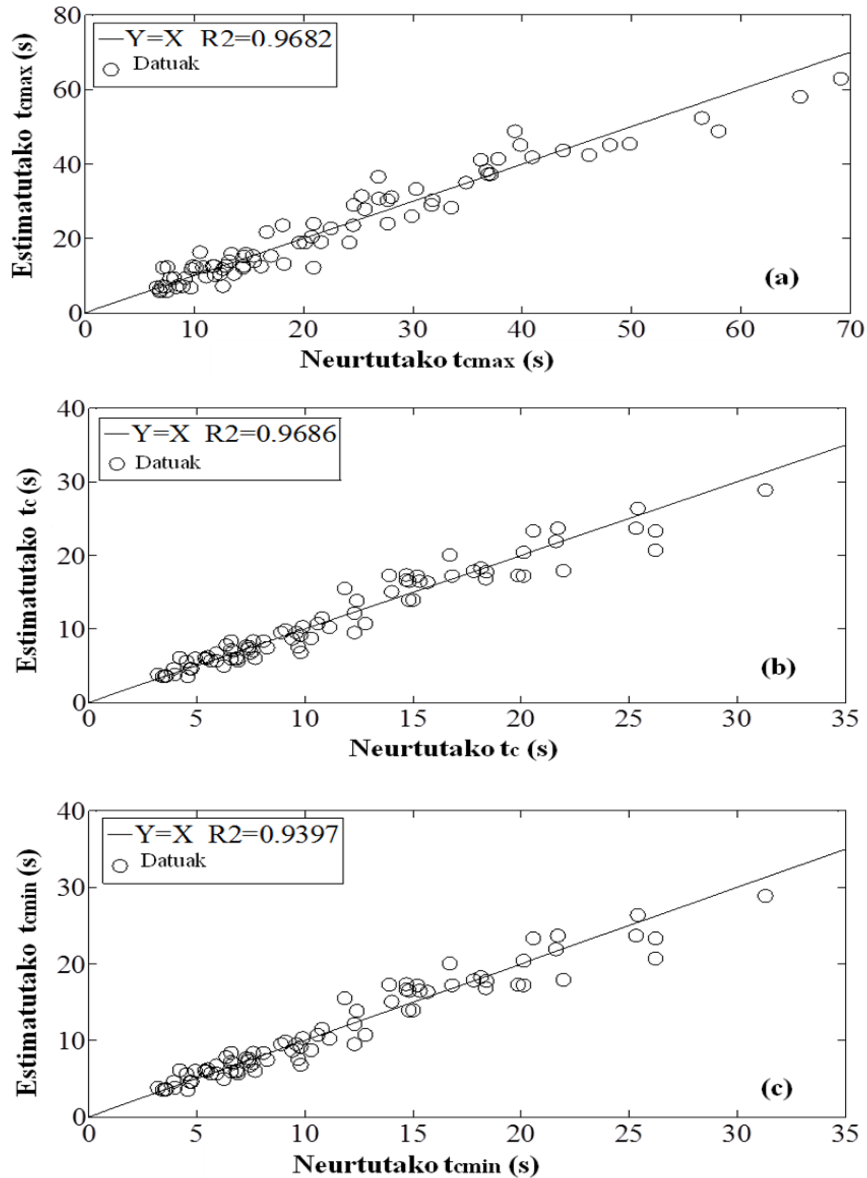
Irteera bakarreko sare neuronala aplikatuz, erdiko hodi ez-porotsua duen sistemarako simulazio emaitzak 3.21 Taulan biltzen dira.

3.21. Taula. Balioztapen emaitzak hodi ez-porotsudun iturri ohandzerako.

Esperimentu zenbakia	Aldagaia	Neurtuta	Estimatuta	%
1	t_c (s)	11.70	11.78	1
2		7.71	6.72	13
3		5.72	6.72	17
4		6.78	7.15	5
1	t_{cmax} (s)	20.00	19.00	5
2		19.39	14.78	24
3		9.64	12.18	26
4		14.59	13.41	8
1	t_{cmin} (s)	8.20	8.55	4
2		4.26	4.14	3
3		4.19	4.14	1
4		4.54	4.70	4
1	W_s (kg/s)	0.31	0.30	2
2		0.41	0.41	0
3		0.55	0.41	26
4		0.32	0.35	8

3.21 Taulan antzeman daiteke nola estimazio guztiak errore experimentalaren barnean dauden, eta ondorioz, egokiak dira. Hala ere, hodi ez-porotsuak erabiliz lortutako erroreak beste konfigurazioena baino handiagoak dira, irekiduradun hodiak erabiliz aterako erroreak %15 baino txikiagoak baitira eta erdiko hodirik gabe %10 baino txikiagoak.

Erdiko hodi ez-porotsurako ere irteera anitzeko sare neuronala garatu da hiru ziklo denborak (maximoa, minimoa eta batez bestekoa) aldiberean aurreratzeko. 3.44 Irudian lortutako doiketak irudikatu dira.



3.44. Irudia. Irteera anitzeko sarearen erdiko hodi ez-porotsudun (HEP) irteera (a) ziklo denbora maximorako, (b) batez besteko ziklo denborarako eta (c) ziklo denbora minimorako.

Erdiko hodirik gabeko sistemetan eta irekiduradun hodia duten sistemetan gertatu den moduan, 3.44 Irudiko grafikoek joera berbera erakutsi dute, hau da, irteera bakarreko doiketak ($R^2 \sim 0.98$ ingurukoak) irteera anitzekoak ($R^2 \sim 0.96$ ingurukoak) baino hobekak direla.

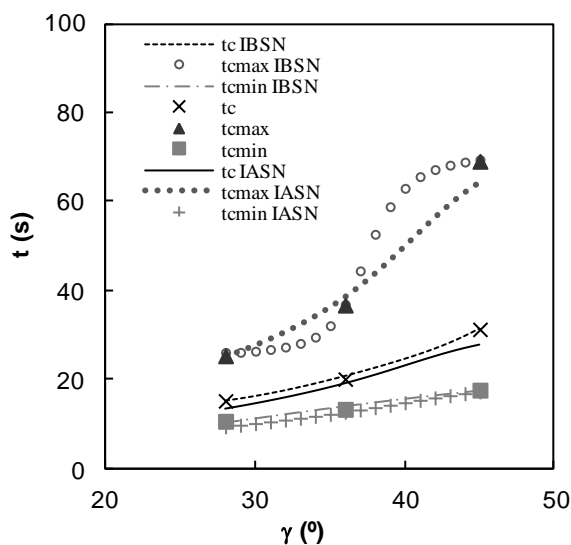
3.22 Taulan irteera anitzeko sare neuronalarekin lortu diren estimazioak adierazten dira.

3.22. Taula. Irteera anitzeko sare neuronalaren balioztapen emaitzak hodi ez-porotsudun iturri ohantzerako.

Esperimentu zenbakia	Aldagaia	Neurtuta	Estimatuta	%
1	t_c (s)	11.7000	12.6141	8
2		7.7093	6.0184	22
3		5.7197	6.0184	5
4		6.7816	6.6935	1
1	t_{cmax} (s)	20.0000	25.5146	28
2		19.3900	14.4151	26
3		9.6400	10.4151	8
4		14.5900	12.6392	13
1	t_{cmin} (s)	8.2000	8.7269	6
2		4.2600	4.1443	3
3		4.1900	4.1443	1
4		4.5400	3.4749	23

3.22 Taulako estimazio guztiak onartzeko modukoak dira errore experimentalaren barnean baitaude, eta ondorioz, irteera anitzeko sare neuronalak egokiak dira hiru ziklo denborak aldiberean auresateko. Dena den, jadanik ikusitakoa berresten da, hots, irteera bakarreko sare neuronalak irteera anitzekoa baino hobeto egokitzen direla datu esperimentaletara.

3.2.2.1 Atalean egindako analisi estatistikoan hodi ez-porotsuak erabili diren sistemetan (beste sistemetan bezala), kontaktorearen angeluak ere eragin nabarmena duela ikusi da. Hortaz, beste konfigurazioetarako egin den bezala, 3.45 Irudian irteera bakarreko (IBSN) eta anitzeko (IASN) sare neuronalak erabiliz hiru ziklo denboren (maximoa, minimoa eta batez bestekoa) kalkulaturako balioak eta balio esperimentalak konparatuko dira hurrengo sistemarako: D_0 , 0.04 m; H_0 , 0.27 m; L_H , 0.07 m; D_T , 0.04 m; d_p , 0.0034 m; materiala, ilar haziak.



3.45. Irudia. Kontaktorearen angeluaren eragina ziklo denbora minimoan, maximoan eta batez bestekoan irteera bakarreko (IBSN) eta anitzeko (IASN) sare neuronalak erabiliz, hodi ez-porotsuko (HEP) iturri ohantzerako. Sistema: D_0 , 0.04 m; H_0 , 0.27 m; L_H , 0.07 m; D_T , 0.04 m; d_p , 0.0034 m; materiala, ilarrak.

3.45 Irudiak erakusten du sare neuronalek kontaktorearen angeluarekiko joerak ondo ulertzen dituztela hodi ez-porotsua duen sistemarako; alabaina, berriro ere ikus daiteke irteera bakarreko sare neuronalek irteera anitzekoek baino doiketa hobea dutela.

Ondorioz, emaitzek erakusten dutenez, sare neuronalak erraminta egokia dira aldagaiek ziklo denboran eta partikulen zirkulazioan duten eragina aztertzeko. Hala, partikularen diametroak eta dentsitateak, kontaktorearen angeluak, hanken zabalerak eta luzerak, gasaren sarrerako diametroak eta ohantzearen altuerak duen eragina auresateko gai dira. Nahiz eta esperimentuak datuak doitzeko diseinatuta ez egon, portaera orokorra, oso ona izan da entrenatze doiketan eta balioztapenerako datu ezezagunen estimazioan. Gainera, irteera bakarreko sare neuronalek hiru ziklo denboretarako (maximoa, minimoa eta batez bestekoa) eta zirkulazio emarirako estimazio oso zehatzak ematen dituzten arren, irteera anitzeko sare neuronalen hiru ziklo denboretarako estimazioak ere onargarriak dira, sistema baterako hiru sareren ordeztu sare bakarra erabiltzearen abantaila ere badutela.

Sare neuronalak esanahi fisikorik gabeko prozesatze egiturak diren arren, datuetara ondo doitzen badira eta aleatorioki hautatutako datuak ondo balioztatzen badituzte (emaitza atalean aurkeztu diren irudiak eta taulak frogatu duten moduan), datuen portaera berbera izango dutela espero da.

3.5. SARE NEURONALEN ETA KORRELAZIO ENPIRIKOEN ARTEKO KONPARAZIOA BATEZ BESTEKO ZIKLO DENBORAK ESTIMATZEKO

Atal honetan, korrelazio enpirikoen eta sare neuronalen antzekotasunak eta ezberdintasunak aztertuko dira iturri ohantze konikoen batez besteko ziklo denbora auresateko. Horretaz gain, erabilitako datu-basea bi metodoetarik zeinek doitzen duen hobeto ikertuko da. Azpimagarria da, datu-basea berbera dela bi metodoetarako eta erdiko hodirik gabe eta irekiduradun hodia eta hodi ez-porotsua erabiliz lortu direla datuak.

Korrelazio enpirikoekin lan egitea sare neuronalekin baino errezagoa izateaz gain, eguneroko bizitzako aplikazioetan maiztasun gehiagoz erabiltzen dira. Hala ere, bibliografian dauden korrelazio enpirikoek kasu batzuetan ez dute portaera egokia. Hori dela eta, interesgarria da sare neuronalaren portaera korrelazio enpiriko sinpleek dutenarekin konparatzea doiketa metodo sofistikatuagoaren erabilpena justifikatu ahal izateko.

Sare neuronalen abantaila nagusien artean, elikadura ezberdinen aurrean duten malgutasuna da. Korrelazio enpirikoak, berriz, soilik diseinua egiteko erabili diren materialetan aplika daitezke, hots, muga gehiago dituzte. Era berean, sare neuronalen beste abantaila bat parametro nagusien arteko erlazioa ulertu gabe, eredu ona lortzean datza eta korrelazio enpirikoetan, aldiz, hori ez da posible. Azkenengo abantaila, korrelazio enpirikoak ez bezala, sare neuronalek datu esperimentalak doitzeko duten erraztasuna da, edozein aplikaziorako komuna den egitura erabiltzen duten kalkuluetan oinarritzen direlako.

Bibliografian dagoeneko sare neuronalen eta korrelazio enpirikoen arteko konparaketak aurkitu dira (Lira et al., 2007; Da Silva et al., 2015; Estiati et al., 2016), baina guk dakigula ez ziklo denboretarako.

Ikertutako parametroak doiketa metodo bakoitzean erabili diren berberak dira, hau da, kontaktorearen angelua (γ), gasaren sarrerako diametroa (D_0), ohantzearen altuera (H_0), partikularen diametroa (d_p), solidoaren dentsitatea (ρ_s), irekiduradun hodien hanken zabalera (W_H) eta erdiko hodi ez-porotsuen hanken luzera (L_H).

Aintzat hartu behar da, datu kopurua zenbat eta handiagoa izan korrelazio enpirikoek hobeto doitzen dutela, beraien erregresio koefizienteak altuagoak izanik. Aldiz, datu kopurua handitzen denean sare neuronalek okerrago doitzen dute (erregresio koefizienteak baxuagoak izanik). Modu honetan, sare neuronalen doiketa ahalmena hobetzeko iterazio kopurua handitzen da, eta horrela errorea txikitu egiten da.

3.3.2 eta 3.4.2 Ataletan, proposatutako korrelazio enpirikoak eta diseinatutako sare neuronalak erabiliz lortutako estimazioak banaka aurkeztu eta komentatu dira, baina orain estimazio horiek euren artean alderatuko dira. Estimazioen balioztapenak egiteko erabili diren esperimentuak berberak izan dira bi metodoetarako, eta dagoeneko 3.3.2 Atalean erakutsi dira taula moduan. Era berean, korrelazio enpirikoen eta sare neuronalen doiketa ahalmena erakusten duten grafikoak 3.3.2 eta 3.4.2 Ataletan jadanik erakutsi dira.

3.23 Taulan erakusten dira erdiko hodirik gabeko sistemei dagozkien estimazioak bai proposatutako sare neuronalerako baita (3.16) korrelazio enpirikorako.

3.23. Taula. Sare neuronalaren eta korrelazio enpirikoaren balioztapen emaitzak erdiko hodirik gabeko iturri ohantzerako.

Esperimentu zenbakia	t_c (s) Neurtuta	t_c (s) Estimatura		%	
		Sarea	Korrelazioa	Sarea	Korrelazioa
1	8.70	8.35	6.77	4	22
2	3.93	3.59	3.69	9	6

3.23 Taulan ikus daitekeenez, sare neuronalaren erroreak %10 baino txikiagoa diren bitartean, korrelazio enpirikoarenak %30 baino baxuagoak dira. Gainera, sare neuronalaren erregresio koefizientea ($R^2= 0.9955$) korrelazio enpirikoarena ($R^2= 0.8141$) baino askoz altuagoa da. Hortaz, sare neuronalaren portaera hobea da ez soilik doiketan, baizik eta datu berrien aurreikuspenean ere. Datu-basearen tamaina txikian datza zergatia, aspektu hau korrelazio enpirikoetan funtsezkoagoa delarik sare neuronaletan baino.

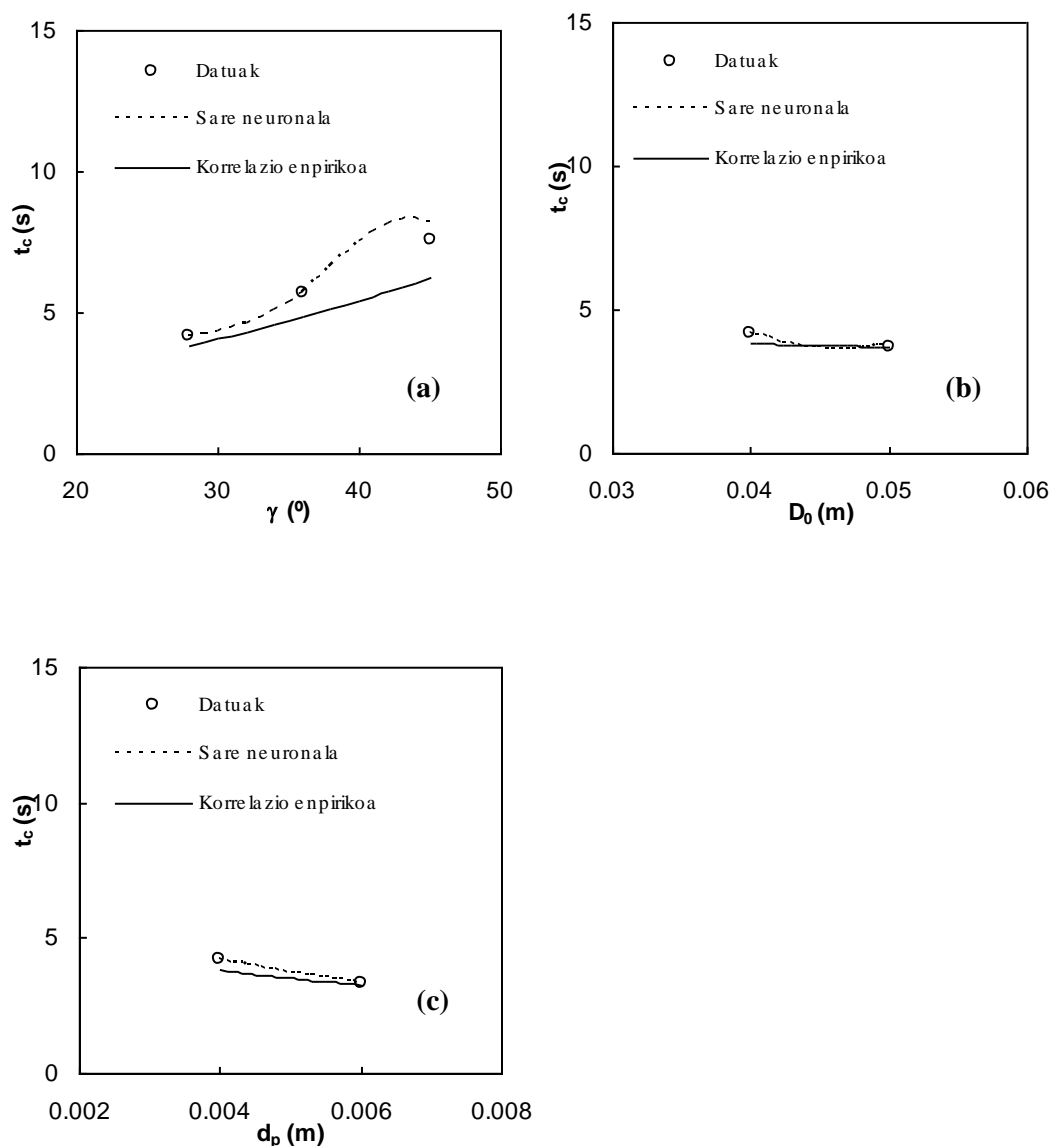
Oro har, doiketa metodoen helburua aldagai bakoitzak emaitzetan duen eragina jakitea da erduen osagaiek gora edo behera egiten duten ulertzeko. Korrelazio enpirikoetarako azken hau egitea erraza den bitartean, sare neuronaletarako zaila da. Izan ere, aldagaien antolaketa konplexuagatik prozesu fisiko batean sare neuronalaren egitura osagaien arabera interpretatzea oso zaila da. Sare neuronalen kasuetan aztertu daitekeena, sarreraren aldaketek batez besteko ziklo denboran eragiten dituzten joerak dira. Atal honetan ikertuko diren sarrerak kontaktorearen angelua (γ), gasaren sarrerako diametroa (D_0), partikularen diametroa (d_p), irekiduradun hodiaren hanken zabalera (W_H) eta erdiko hodi ez-porotsuen hanken luzera (L_H) dira 3.2.2.1 Ataleko azterketa estatistikoan aldagai esanguratsuen artean agertzen direlako.

Erdiko hodirik gabeko sistemarako sarrera multzoa 3.24 Taulan biltzen da.

3.24. Taula. Sarrerak erdiko hodirik gabeko konfiguraziorako.

Sarrera	Angelua (°)	D_0 (m)	H_0 (m)	d_p (m)	ρ_s (kg/m ³)
Angelua (°)	28; 36; 45	0.04	0.27	0.004	2420
D_0 (m)	28	0.04; 0.05	0.27	0.004	2420
d_p (m)	28	0.04	0.27	0.004;0.006	2420

3.24 Taulako saiakuntzak erabiliz hurrengo grafikoak eratu dira, non erdiko hodirik gabeko sistemetarako garrantzitsuak diren aldagaien joerak erakusten diren sare neuronalak eta korrelazio enpirikoak erabiliz.



3.46. Irudia. Kontaktorearen angeluak (a), gasaren sarrerako diametroak (b) eta partikula diametroak (c) duten eragina erdiko hodirik gabeko (HG) sistemen batez besteko ziklo denboran.

Sare neuronalari dagokion 3.46 Irudiko (a) grafikoak eta korrelazio enpirikoari dagokion (3.16) Ekuazioak erakusten dutenez kontaktorearen angeluaren aldaketekiko joerak ondo ulertzen dituzte metodo biek. Sare neuronalaren erregresio koefizientea korrelazio enpirikoarena baino altuagoa denez, sare neuronalaren joeraren kurbadura korrelazio enpirikoarena baino nabarmenagoa da. Grafiko berean ikus daitekeenez, sare neuronalak aurrezaten dituen balioak esperimentaletatik gertu dauden arren, fisikoki zentzu handirik ez duen maximo bat dago. Maximo horrek adierazten du tarte horretan sare neuronalak informazio falta duela, edo daukan informazioa gaizki dagoela (sareak ez du zentzu fisikorik eta ondorioz, ez daki ikasi duena egokia den ala ez). Maximo hori ekidin daiteke datu-baseak kontaktorearen angelu ezberdin (batez ere 40° eta 45° bitartean) gehiago izango balitu edo gutxienez, estimazioak hobetuko lirateke. Hala ere, 40 eta 45° tarteko estimazioen desberdintasunak errore esperimentalaren barnean daude.

3.46 Irudiko (b) grafikoan ikus daitekeenez, gasaren sarrerako diametroa aldatzen denean, sare neuronalak batez besteko ziklo denboraren balioen aldaketak auresateko gai dira (datu esperimentaletatik hurbil). Dena dela, aldakuntza hori espero zena baino nabarmenagoa da. Korrelazio enpirikoa ez da sare neuronala bezain zehatza, baina emaitzei begira sendoagoa (ez-sentikorragoa) da.

3.46 Irudiko (c) grafikoak erakusten du sare neuronalak korrelazio enpirikoak baino hobeto auresaten dituela partikula diametroan sortzen diren aldaketen joerak.

Bestalde, irekiduradun hodidun sistemarako garatutako sare neuronala eta (3.17) korrelazio enpirikoa erabiliz lortutako estimazioak 3.25 Taulan agertzen dira.

3.25. Taula. Sare neuronalaren eta korrelazio enpirikoaren balioztapen emaitzak irekiduradun hodorako.

Esperimentu zenbakia	t_c (s) Neurtuta	t_c (s) Estimatura		%	
		Sarea	Korrelazioa	Sarea	Korrelazioa
1	6.10	6.38	7.62	5	25
2	13.40	13.83	12.53	3	6
3	12.60	12.15	12.74	4	1
4	12.10	12.15	12.74	0	5
5	7.64	7.45	7.71	3	1
6	4.00	4.06	5.03	1	26

3.25 Taulan erakusten denez, argi dago (3.17) korrelazioak baino sare neuronalak askoz hobeto doitzen duela datu-base berbera, beraz, sare neuronala behin eta berriro entrenatu ostean, batez besteko ziklo denboraren balio egokiak ikasteko gai da.

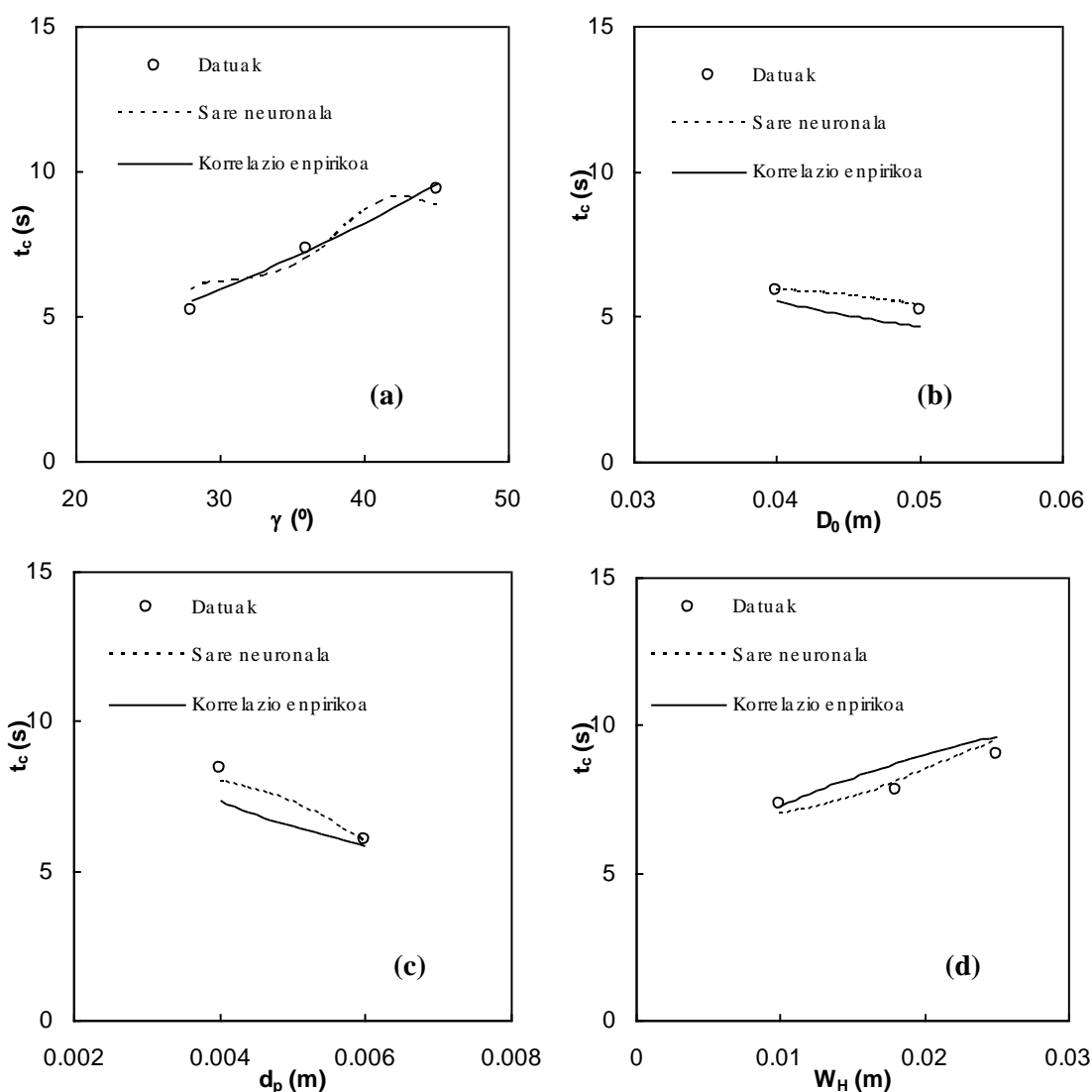
3.25 Taulako estimazioak aztertu ondoren, erregresio koefizienteei ekingo zaie. Gogoratu beharra dago irekiduradun hodia duen sistemarako sare neuronalaren erregresio koefizientea $R^2 = 0.9840$ dela eta korrelazio enpirikoarena $R^2 = 0.9236$, hau da, sare neuronalaren erregresio koefizientea altuagoa da, baina diferentzia erdiko hodorik gabeko sistemetan dutena baino txikiagoa da. Diferentzia txikitze hori, konfigurazio honetarako datu-baseak erdiko hodorik gabekoena baino datu gehiago (ia bikoitza) dituelako da. Izan ere, lehen esan den moduan, doitzeko erabiltzen den datu kopurua handiagoa denean korrelazio enpirikoek hobeto doitzen dute. Berriz, harrigarriena da sare neuronalak datu-base handiago batekin erdiko hodorik gabeko sistemetan izan duen portaera mantendu egin duela. Hau sare neuronalaren erregresio koefizientea pixka bat txikituz lortu da, hau da, sare neuronalak neurketen desbideraketekiko duen sendotasunaren mekanismo bezala uler daiteke emaitza hau.

Irekiduradun hodia duten sistemarako esperimentalki neurtutako datuak lortzeko erabili diren baldintzak 3.26 Taulan erakusten dira.

3.26. Taula. Irekiduradun hodia duten iturri ohanzerako sarrerak.

Sarrera	Angelua (°)	D ₀ (m)	H ₀ (m)	W _H (m)	d _p (m)	ρ _s (kg/m ³)
Angelua (°)	28; 36; 45	0.04	0.27	0.01	0.004	2420
D ₀ (m)	28	0.04; 0.05	0.27	0.01	0.004	2420
d _p (m)	28	0.04	0.27	0.01; 0.018;	0.004; 0.006	2420
W _H (m)	36	0.04	0.24	0.025	0.004	2420

3.47 Irudian irekiduradun hodirako diseinatutako sare neuronala eta (3.17) korrelazio empirikoa aplikatuz eskuratu diren joerak irudikatzen dira.



3.47. Irudia. Kontaktorearen angeluak (a), gasaren sarrerako diametroak (b), partikula diametroak (c) eta erdiko hodien hanken zabalerak (d) duten eragina irekiduradun hodia duten (IH) sistemen batez besteko ziklo denboran.

3.47 Irudiko (a) grafikoan ikus daitekeenez, (3.17) korrelazio enpirikoaren doiketa sare neuronalarena baino hobea da erdiko hodirik gabe lortutako korrelazio enpirikoaren kasuan bezalatsu. Aldiz, sare neuronalaren portaera erdiko hodirik gabeko konfigurazioan eskuratu dena baino pobregoa izan da. Berrero ere, sare neuronalaren joeran fisikoki zentzugabekoa den maximoa agertu da erdiko hodirik gabeko grafikoan azalpenean aditzera eman diren arrazoi berberengatik. Hala, bi doiketa metodoen portaerak batez besteko ziklo denbora aurretateko onargarriak dira.

Sare neuronala da bi doikuntza metodoen artean batez besteko ziklo denbora egokien aurretatean duena 3.47 Irudiko (b) grafikoan agertzen diren gasaren sarrerako diametroko aldaketetarako, eta 3.47 Irudiko (c) grafikoan erakusten diren partikula diametroaren aldaketetarako.

3.47 Irudiko (d) grafikoan erdiko hodian hanken zabaleraren aldaketetarako (3.17) korrelazio enpirikoek eta sare neuronalek ia zehaztasun berbera eta datu esperimentalen joera berbera jarraitzen dutela antzeman daiteke.

Bukatzeko, erdiko hodi ez-porotsua duen sistemarako planteatutako sare neuronalaren bidez lortutako estimazioak eta (3.18) korrelazio enpirikoaren bidez eskuratutakoak 3.27 Taulan alderatzen dira.

3.27. Taula. Sare neuronalaren eta korrelazio enpirikoaren balioztapen emaitzak erdiko hodi ez-porotsudun sistemarako.

Esperimentu zenbakia	t_c (s) Neurtuta	t_c (s) Estimaturata		%	
		Sarea	Korrelazioa	Sarea	Korrelazioa
1	11.70	11.78	13.55	1	16
2	7.71	6.72	5.82	13	25
3	5.72	6.72	5.82	17	2
4	6.78	7.15	7.52	5	11

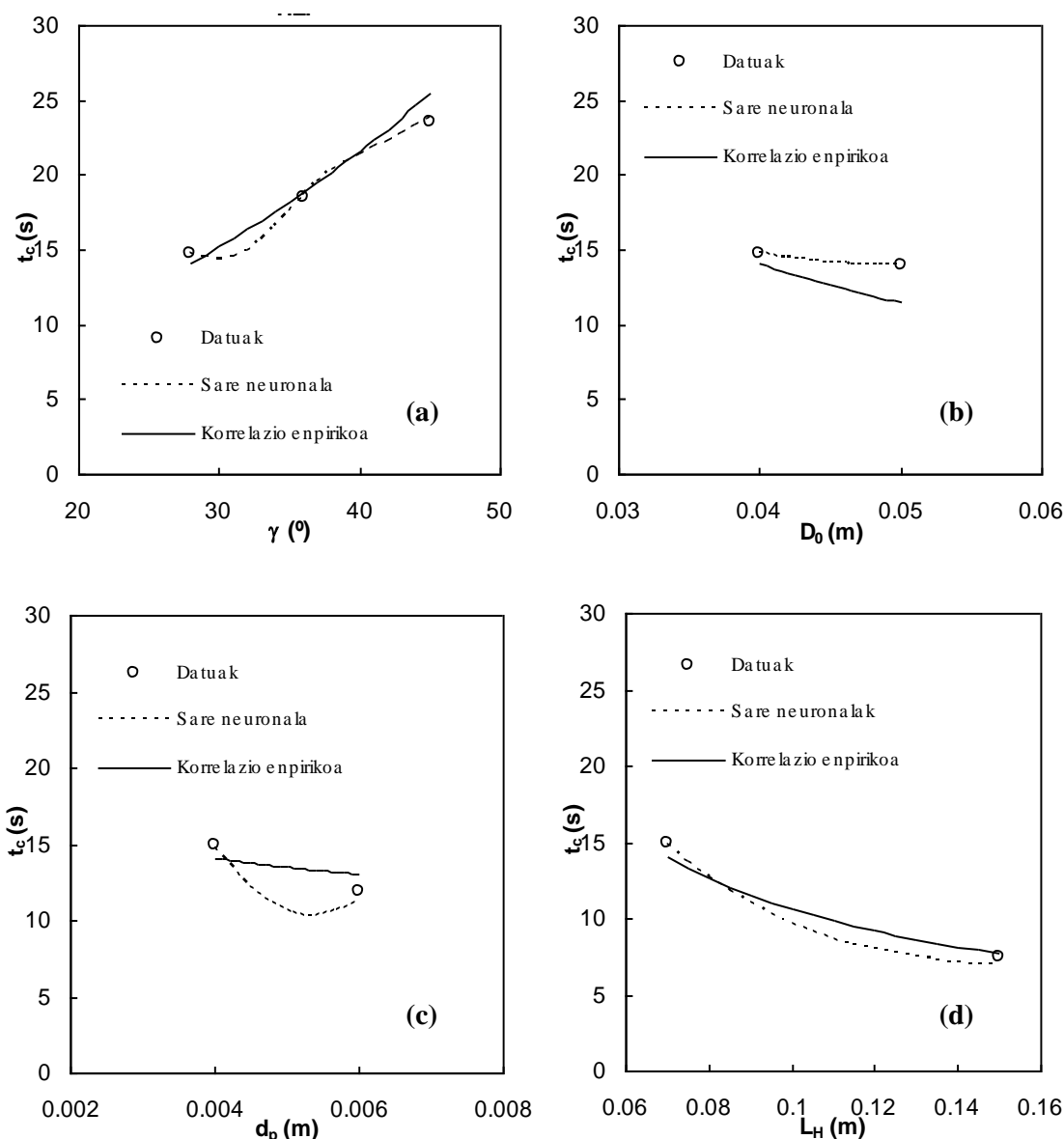
3.27 Taulan, sare neuronalaren estimazioen eta neurketa esperimentalen arteko erroreak (3.18) korrelazio enpirikoarena baino txikiagoak direla ikus daiteke. Beraz, sare neuronalak errorean aurrean korrelazio enpirikoak baino sendoagoak dira eta datu esperimentalak hobeto aurretateko gai dira. Ildo beretik, erregresio koefizientea aintzat hartuz, sare neuronalaren doiketa hobea dela ondorioztatzen da sare neuronalaren erregresio koefizientea ($R^2= 0.9923$) korrelazio enpirikoarena ($R^2= 0.9215$) baino altuagoa baita. Dena den, bi doiketa metodoek ondo aurretatean dutela balioztatuta geratu da estimazio guztiak errore esperimentala baino txikiagoak baitira.

Erdiko hodi ez-porotsudun konfiguraziorako kontuan hartu diren esperimenduak hurrengo taulan erakusten dira.

3.28. Taula. Hodi ez-porotsudun iturri ohandzerako sarrera aldagaiak.

Sarrera	Angelua (°)	D_0 (m)	H_0 (m)	L_H (m)	d_p (m)	ρ_s (kg/m ³)
Angelua (°)	28; 36; 45	0.04	0.27	0.07	0.004	2420
D_0 (m)	28	0.04; 0.05	0.27	0.07	0.004	2420
d_p (m)	28	0.04	0.27	0.07	0.004; 0.006	2420
L_H (m)	28	0.04	0.27	0.07; 0.15	0.004	2420

3.48 Irudian 3.28 Taulako esperimentuak abiapuntutzat hartuta garatu den sare neuronalak eta (3.18) korrelazio empirikoa aplikatuz eratutako grafikoak aurkezten dira.



3.48. Irudia. Kontaktorearen angeluak (a), gasaren sarrerako diametroak (b), partikula diametroak (c) eta erdiko hodien hanken luzerak (d) duten eragina hodi ez-porotsudun (HEP) sistemen batez besteko ziklo denboran.

3.48 Irudiko (a) grafikoari erreparatuz berehala igartzen da diseinatutako sare neuronalak beste konfigurazioetarako deskribatzen zuen maximoa desagertu egin dela. Beraz, oraingo sare neuronalak kontaktorearen angeluan gertatzen diren aldaketak hobeto ulertzen ditu. Gainera, batez besteko ziklo denboraren joerak sare neuronalak (3.18) korrelazio enpirikoak baino hobeto aurratsen ditu, batez ere kontaktorearen angulu handietarako, non lehen maximoa agertzen baitzen.

Gasaren sarrerako diametroen aldaketei dagokionez, 3.48 Irudiko (b) grafikoan sare neuronalaren joera (3.18) korrelazio enpirikoarena baino egokiagoa dela argi ikusten da.

3.48 Irudiko (c) grafikoko estimazioak, batez ere hautatutako datu esperimentaletik gertu daudenak, errore esperimentalaren barnean daude eta (3.18) korrelazio enpirikoak sare neuronala baino hobea da balio horiek aurratsateko. Hala ere, sare neuronalak batez besteko ziklo denborarako iragarritako joerak kurbadura nabarmena duela ikusi da partikula diametroaren aldaketetarako, eta ondorioz, fidagarritasuna ikertutako partikula diametroa mugatzen da. Hortaz, sare neuronalak 3.48 Irudiko (c) grafikoko diametroen artean interpolatzeko duen gaitasuna ez da onargarria.

3.48 Irudiko (d) grafikoan ikus daitekeenez, sare neuronalaren eta (3.18) korrelazio enpirikoaren portaera oso antzekoa da.

Atal honetan komentatu den guztia laburtuz, sare neuronalen eta korrelazio enpirikoen arteko antzekotasun garrantzitsua biak batez besteko ziklo denbora aurratsateko egokiak izatean datza. Dena den, joeretan zenbait desbiderapen agertu dira, baina horiek datu-baseko informazio faltagatik izan dira. Bestalde, sare neuronalen eta korrelazio enpirikoen arteko ezberdintasun nagusia lehenengoek zentzu fisikoa ez izatean datza. Korrelazio enpirikoek, ordea, sarrerak irterekin erlazionatzen dituzte aldagaien antolamendu esplizituagoan oinarrituz eta beraz, ikuspuntu fisikotik interpretatzeko errazago dira.

Ildo beretik, sare neuronalen eta korrelazio enpirikoen doiketa parametroak datu esperimentalekin bat egiteko printzipio berberak izan arren, ikerketa honek beraien doitze ezaugarriak ezberdinak direla erakutsi du. Hala, aurretik esan den bezala, sare neuronalek datu-base handietarako erregresio koefizientea txikituz portaera onargarria lortzen dute. Korrelazio enpirikoek, oster, doiketa datuak sistematikoki hobeto dituzte datu-base handietarako erregresio koefiziente altuagoak erdietsiz.

Ereduen doiketan, informazio kantitatea aldagai garrantzitsua da normalean, baina ikerketa honetan ez da hori soilik gertatu, datu kopuruaz gain, datu horiek nolakoak diren ere eragina izan duelako. Horrela, batez besteko ziklo denboraren azterketan erabilitako datu-basearen tamainak korrelazio enpirikoen portaeran eragin handia izan duen bitartean, sare neuronaletan datu-basearen nolakotasunak efektu handiagoa izan du.

Horretaz gain, esperimentalki frogatu da parametro nagusien arteko erlazioa ulertu gabe, sare neuronalak erabiliz eredu ona lortzea posible dela, aldeztu aurretik sarearen trebakuntza egokia egin bada eta elikadura ezberdinen aurrean sare neuronalek portaera egokia dutela. Izan ere, sarrera atalean esan den legez, sare neuronalak malguak dira eta hori doiketa teknika batentzako oso ezaugarri desiragarria da. Bibliografian orain arte

erabili diren korrelazio enpirikoak, erabilera murrizta dute, hots, material mota zehatzari baino ezin dakioke aplikatu era fidagarrian.

Azkenik, eredu en balioztapen emaitzek erakutsi dutenez, proposatutako korrelazio enpirikoak eta diseinatutako sare neuronalak datu-basetik kanpoko batez besteko ziklo denborak aurrerako gai dira, eta sare neuronalen doiketak hobeak dira korrelazioenak baino.

4. Kapitulu

4. ITURRI BILGAILUDUN ITURRI OHANTZE KONIKOAREN IKERKETA

4.1. ITURRI BILGAILUAK

4.2. ARRASTEAK EKIDITEKO ITURRI BILGAILUAREN AHALMENA

4.2.1. Arrastea

4.2.2. Arraste saiakuntzen prozedura esperimental

4.2.3. Arraste emaitzak

4.2.3.1. Arraste azterketa kuantitatiboa

4.2.3.2. Arraste saiakuntzen zinetika

4. ITURRI BILGAILUDUN ITURRI OHANTZE KONIKOAREN IKERKETA

Atal honetan, iturri ohantzearen aldaera berri bat deskribatuko da, hots, iturri bilgailudun iturri ohantze konikoa. Aldaera hau ikerketa taldean sortu zen eta patentatze bidean dago. Iturri bilgailudun iturri ohantze konikoa partikula fin eta handien nahasteak edo partikula oso finak tratatu behar direnean da beharrezkoa, finen arrastea ekidin behar den aplikazioetan batez ere. Honek garrantzi berezia hartzen du arrastatu eta galtzen diren finak katalizatzaileak bezalako material garestiak direnean.

Ikerketa taldean duela gutxi garaturiko gailua denez, bibliografian ez dago informazio askorik, baina jarraian bibliografian aurki daitezkeen antzeko kasuak aipatuko dira.

Ikerketa taldearen aurreko tesi batean (Altzibar, 2011), iturri ohantze konikoaren ikerketa hidrodinamikoa egin zen iturri bilgailu eta erdiko hodi mota ezberdinak erabiliz. Tesi berean arrastea ekiditeko iturri bilgailuaren ahalmena ikusi zen. Hala ere, azken ikerketa hau ez zen oso zabala izan ekipoaren mugengatik. Beraz, sakonago ikertuko da tesi honetan arrastea ekiditeko iturri bilgailuaren ahalmena. Horretarako, saiakuntzak diametro ezberdineko iturri bilgailuak erabiliz eta iturri bilgailurik gabe egin dira bilgailuak partikula finen arrastea ekiditeko duen ahalmena aztertzeke. Horretaz gain, saiakuntzetan erdiko hodi mota ezberdinak erabiliko dira, bakoitzaren eragina aztertuko da eta euren artean alderatuko dira.

4.1. ITURRI BILGAILUAK

Atal honi hasiera emateko, iturri bilgailua nola asmatu den, zer den eta zertarako erabiltzen den azalduko da.

Gure ikerketa taldean iturri ohantze konikoak material ezberdinen errekuntzan, gasifikazioan eta pirolisian erabili ohi dira. Prozesu horietako batzuetan katalizatzaileak ere erabiltzen dira prozesua nahi den bidera eramateko. Kasu horietan katalizatzaileak tratatu nahi den materialekin nahastuta dago, eta beraz, ohantzea tamaina oso ezberdineko partikulez osaturik dago. Izan ere, katalizatzaileen partikula tamaina mikra batzuetakoa den bitartean, tratatu nahi diren materialen partikula diametroak milimetro batzuetakoak izaten dira, eta beraz, diferentzia nabarmena da. Hala, zenbait saiakuntza egin ziren metakrilatozko ekipoan materialen nahasteak iturri ohantze konikoetan duten portaera ikertzeko. Hain tamaina txikiko partikulekin lan egitean, partikula handiak fluidizatzeke beharrezko den gasaren abiadura partikula finek behar dutena baino askoz handiagoa denez, aireak partikula finak kontaktoretik kanpora ateratzen zituen. Ondorioz, katalizatzailearen galera handia gertatzen zen. Gainera, partikula finekin eta erdiko hodi ez-porotsuekin lan egitean ohantzean altuera handiko iturriak sortzen zirenez, partikulen arraste handiagoa gertatzen zen. Hortaz, arazo honi irtenbidea emateko sortu zen iturri bilgailuaren (edo arrastea ekiditeko gailuaren) ideia.

4.1 Irudian erakusten den bezala, iturri bilgailuak eite zilindrikoa du eta goiko aldea itxita du, airea eta solidoa bertatik irten ez daitezela.



4.1. Irudia. Iturri bilgailuaren itxura.

Iturri bilgailua metakrilatoz eginda dago (kontaktoreen material berbera) bere barnean gertatzen dena behar bezala ikusi ahal izateko. Hitzak berak adierazten duen moduan, iturria biltzen duen gailua da. Hala, bilgailua kontaktorearen erdian eta goialdean kokatzen da iturria bildu eta arrastea ekiditeko. Iturri bilgailua finko egotea komenigarria da, hau da, esperimentuan alde batera eta bestera mugituz ez egotea. Horretarako, 4.2 Irudian erakusten den moduan altzairuzko hiru hagatxoak eutsi da iturri bilgailua.

4.2 Irudian erakusten den bezala, iturri bilgailuak goialdean kono bat du. Honen arrazoia arrastea gertatzen den saiakuntzetan arrastatuak izaten diren partikulak iturri bilgailuaren gainean ez pilatzea eta berriz ohandzera erortzea da. Konoa, hagatxoak bezala altzairu herdoilgaitzez eginda dago. Bestalde, diametro ezberdineko iturri bilgailuak diseinatu dira aldagai horren eragina saiakuntzetan aztertzeko.

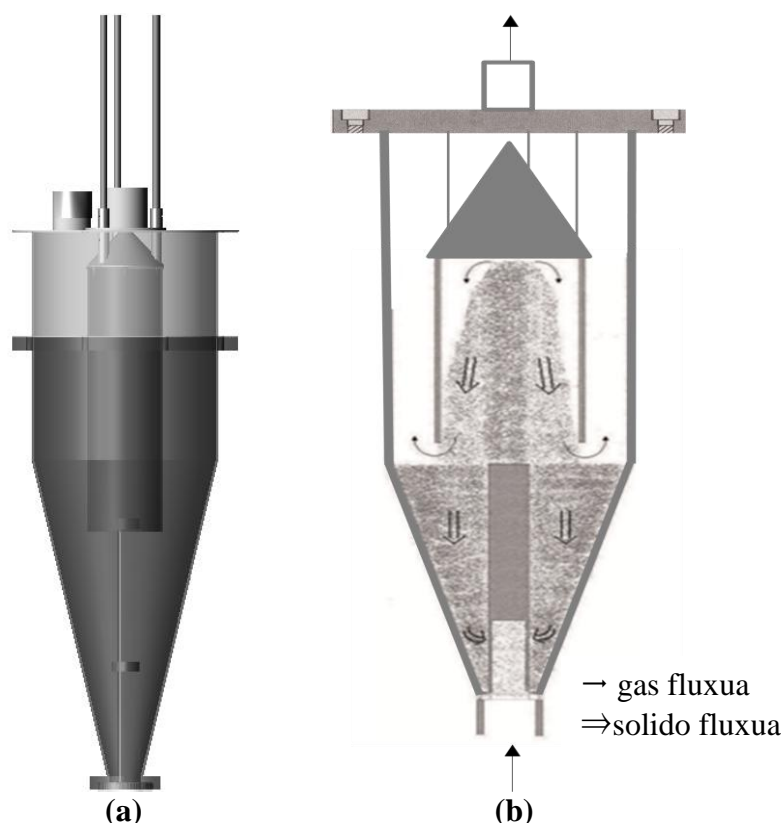


4.2. Irudia. Iturri bilgailua konoarekin.

Aurreko lerroetan iturri bilgailua kontaktorearen goialdean kokatzen dela aipatu da, baina ez da zehaztu zein altuerara. Altzibar-en tesian (2011) iturri bilgailua ohandzearen gainazalarekiko zenbat eta gorago jarri, iturriaren portaera egonkorragoa zela ondorioztatu zen. Tesi berean iturri bilgailuaren behealdearen eta ohandzearen gainazalaren arteko distantzia (H_B) iturri bilgailuaren portaera egokirako parametro oso garrantzitsua zela ondorioztatu zen. Hala, sistema ahalik eta egonkorrenari dagokion

altuera bilatu behar da esperimientuen bidez. Saldarriaga-k (2015) bere tesian erakutsi zuenez, iturri bilgailuaren behealdearen eta ohantzearen gainazalaren arteko distantzia egokiak ohantzearen gainazalean kraterraren eraketa saihesten du biomasa bezalako partikula irregularrekin lan egitean. Hurrengo ataletan iturri bilgailuaren kokapena sakonago aztertuko da eta iturri bilgailuaren behealdearen eta ohantzearen gainazalaren arteko distantziaren garrantzia zehaztuko da.

4.3 Irudian erakusten da kontaktorearen barruan dagoen iturri bilgailuaren edo arrastea ekiditeko gailuaren funtzionamendua.



4.3. Irudia. Iturri bilgailudun eta erdiko hodidun iturri ohantze konikoaren irudia (a) eta funtzionamendua (b).

4.3 Irudiko (b) eskeman, aireak eta solidoak egiten dituzten bideak erakusten dira. Solidoaren bidea ohiko sistemetan egiten duenaren berdina da. Airearena berriz, lehenbizi iturri bilgailuaren goiko aldera heltzen da, gero, iturburutik beherantz bideratzen da, eta ondoren kontaktoretik irten aurretik iturri bilgailuaren behealdearen eta ohantzearen arteko hutsunetik igarotzen da. Beraz, iturri bilgailuak gasaren traiektoa aldatu egiten du. Horrela, alde batetik, gasaren eta solidoaren arteko kontaktua hobetzen da iturrian, eta bestalde, partikula finen arrastea saihesten da. Izan ere, aireak arrastatzen dituen finak ez dira airearekin iturburutik zuzenean kanpora ateratzen. Gainera, airea beherantz bideratzean ez da gai izango partikula finen arrastea abiadura gainditzeko (grabitate indarrak arrastearena gaindituko duelako) eta airearekin irtengo diren partikulak frakzio finena izango dira. Horren ondorioz, finak ohantzearen gainazalera eroriko dira eta euren galera asko murriztuko da.

Ondorengo ataletan iturri bilgailua erabiliz esperimentuak egin ostean ondorioztatu da iturri bilgailuak arrastea ekiditeaz gain, beste zenbait abantaila dituela. Harrigarria izan den abantaila bat iturri bilgailuak iturria biltzean sistema egonkortzean datza, iturriaren higidura kaotikoak eta ohantzearen saltoak baretu egiten baititu. Era berean, iturriaren altuera murriztu egiten du iturri bilgailuak. Iturriaren altuera murrizteak sistema gehiagorekin lan egitea ahalbidetzen du, lehen (bilgailurik gabe) iturri oso altuak zituzten sistemekin lan egitea ezinezkoa zelako, alde batetik, tapa erabiltzen ez zen saiakuntzetan iturria kontaktoretik kanpo ateratzen zelako partikulen galera dela eta, eta bestalde, tapa erabiltzen zen saiakuntzetan iturriak taparen kontra talka egiten zuelako eta, beraz, iturriaren mugimendua aldatu. Hortaz, iturri bilgailuak ohantzeari egonkortasuna ematen dio eta lehen egin ezin zitezkeen esperimentuak egin ahal izatea ahalbidetzen du.

Gainera, iturri bilgailuak iturri ohantze konikoen eraginkortasuna eta fluidizazioa hobetzen du, partikula tamaina tarte zabaleko partikulak, hots, Geldart-en sailkapenaren A, B eta D motakoak eta egitura irregularrekoak erabiliz lan egin baitaiteke.

Iturri bilgailuaren beste abantaila bat partikulen egoitza denbora handitzean datza, hots, gasaren eta solidoaren arteko kontaktua hobetzen du aireari zuzenean iturburutik kanpora irteten uzten ez diolako. Izan ere, aurretik azaldu den moduan, iturri bilgailuak airea iturburutik berriz ere beherantz bideratzen du eta kontaktoretik irten aurretik ohantzearen gainazalarekin kontaktuan jartzen du. Beraz, gasaren eta solidoaren arteko kontaktua hobetzen denez, iturri bilgailua lehorketarako onuragarria izatea espero da. Iturri bilgailuak lehorketan duen eragina hurrengo kapituluan aztertuko da.

Bibliografiari dagokionez, ohantzearen portaera hobetzeko Hattori eta Takeda-k alboko irteera eta Erdiko hodia duen iturri ohantzea izeneko aldaera berria garatu zuten. Sistema honek ere, sarrera atalean azaldu den bezala, aireari eta partikula finei iturburutik zuzen irtetea galarazten die (Hattori eta Takeda, 1976, 1978). Hori dela eta, alboko irteeradun iturri ohantzearen portaera eta iturri bilgailudunarena antzekoa da bietan gasaren eta solidoaren arteko kontaktua hobetu egiten baita. Sarrerako 1.2.3 Atalean alboko irteeradun iturri ohantzearen eskema eta funtzionamendua azaldu dira.

Honen guztiaren ondorioz, ikerketa taldean egiten ari garen material ezberdinen tratamendurako erabiltzen ari gara iturri bilgailua. Pablos et al.ek (2015a) egindako segregazio eta arraste azterketetan, iturri bilgailuak bi fenomeno horiek murriztu egiten dituela ondorioztatu da.

Azken autore horiek egindako beste ikerketa batean (Pablos et al., 2015b), harea finarekin eta oso finarekin era egonkorrean lan egin daitekeela frogatu zen iturri bilgailua duten Erdiko hodirik gabeko ohantzeetan. Izan ere, hodirik gabeko saiakuntzetan, aireak partikula finak kontaktoretik kanpora arrastatzen zituen, eta beste partikula batzuk kontaktorearen goialdean flotatzen mantentzen zituen (laino antzeko fenomeno eratuz) eta ez ziren berriro ohantzera itzultzen. Arazo horiek iturri bilgailua erabiliz konpondu ziren. Ondorioz, Olazar et al.ek (1992) Erdiko hodirik gabe modu egonkorrean operatzeko bete beharreko erlazioa ($D_0/d_p \leq 20-30$) aldatu egiten da iturri bilgailua erabiltzean. Beraz, partikula finekin Erdiko hodirik gabe operatzea ahalbidetzen du bilgailuak.

4.2. ARRASTEA EKIDITEKO ITURRI BILGAILUAREN AHALMENA

Sarrera atalean definitu da iturri bilgailua eta bere betebeharrak azaldu dira. Horretaz gain, bilgailuaz hornituriko iturri ohantzeen inguruko bibliografia zehaztu da. Atal honetan, urrats berberak jarraituko dira arrastea azaltzeko. Ondoren, iturri bilgailudun iturri ohantze konikoaren ikerketari ekingo zaio eta bertan lortu diren emaitzak azalduko dira.

Lehen esan den bezala, iturri bilgailudun iturri ohantze konikoaren ikerketa hidrodinamikoa aurreko tesi batean (Altzibar, 2011) egin da. Bertan, iturri bilgailuek iturkuntza abiadura minimoan, karga galera egonkorrean eta iturriaren altueran zuten eragina aztertu zen ohantzearen karga galerak aire emariarekin duen eboluzioan oinarrituta. Gainera, saiakuntzak erdiko hodi mota desberdinekin egin ziren eta partikula diametro eta dentsitate ezberdinetako materialak erabili ziren. Ondorioz, solidoaren dentsitatearen azterketa egin ahal izan zen. Horretaz gain, esperimentuak hiru kontaktore desberdinetan, hiru airearen sarrerako diametro ezberdinak erabiliz, eta dimentsio ezberdineko iturri bilgailuak (eta bilgailurik gabe) egin ziren sistema esperimental ezberdinak konparatu ahal izateko.

Azpiagarria da, 4.1 Atalean esan den moduan, iturri bilgailuz hornituriko saiakuntzen bidez, ohantzearen gainazalaren eta iturri bilgailuaren beheko aldearen arteko hutsuneak (H_B) eragin handia zuela iturri ohantzearen portaeran frogatu zen. Gainera, iturri bilgailuaren kokapenaren (H_B balioa) arabera, operazioa egonkorra izatetik ez izatera pasa zitekeela ikusi zen. Izan ere, iturri bilgailua ohantzearen barnean sarturik badago sortzen den karga galera handia da, eta ekipoaren puzgailua ez da gai iturria irekitzeko beharrezkoa den aire emaria emateko, hots, saiakuntza ezin da egin. Horregatik, iturri bilgailua ohantzearen gainazaletik gora kokatu behar da iturri ohantze erregimenak behar bezala funtziona dezan.

Altzibar-en tesian (2011) egindako iturri bilgailuaren ikerketatik ondorio garrantzitsu bi atera ziren nagusiki, hala nola, iturri bilgailuak arrastea ekidin egiten duela eta operazioa egonkortu egiten duela iturriak dituen ezegonkortasunak murriztuz. Dena den, iturri bilgailua erabiliz, iturkuntza abiadura minimoan sortzen ziren aldaketak ez ziren nabarmenak eta iturri bilgailuaren diametroa zen iturkuntza abiadura minimoarengan eragiten zuena. Hala, iturri bilgailuaren diametroa handitzean iturkuntza abiadura minimoak behera egiten zuen, nahiz eta aldaketa ez zen nabarmena.

Ildo beretik, ohantzearen gainazalaren eta iturri bilgailuaren beheko aldearen arteko hutsuneak (H_B) iturkuntza abiadura minimoan sortzen zituen aldaketak ez zirela esanguratsuak ondorioztatu zen, baina bai karga galera egonkorrean sortzen zirenak. Era honetan, ohantzearen gainazalaren eta iturri bilgailuaren beheko aldearen arteko hutsunea handiagoa zenean, karga galera egonkorrak behera egiten zuen.

Solidoaren dentsitateari dagokionez, aldagai hau handitzean iturkuntza abiadura minimoak eta karga galera egonkorrak gora egiten zuten bitartean, iturriaren altuera murriztu egiten zen. Era berean, iturriaren altueran aldaketa handienak sortzen zituzten faktoreak solidoaren dentsitatea, kontaktorearen angelua, gasaren sarrerako diametroa eta iturri bilgailuaren diametroa ziren.

4.2.1. Arrastea

Jariakinetan mugitzen den partikula baten arrastea, kanpo jariakinaren fluxuaren norabideko indar aerodinamiko eta hidrodinamiko guztien batuketa da. Hau dela eta, arrasteak objektuaren mugimenduaren aurkako norabidean jarduten du, eta objektutik tira egiten duen grabitate indarra arraste indarraren berdina denean abiadura terminala lortzen da. Gas abiadura altuek partikula finak arrastatuak izatea eragiten dute.

Jakinik arrastea objektu solido baten eta solido hori mugitzen duen jariakinaren (gas edo likidoa) arteko marruskadura dela, askotan, objektu baten mugimendua aztertzerakoan ez da airearen erresistentzia kontuan hartzen. Kasu askotan azken hurbilketa hau ona den arren, beste batzuetan, ez da arbuigarria eta zenbatu beharra dago. Arrastea zenbatzeko arraste koefiziente adimentsionala erabiltzen da. Hala, arraste koefizientea baxua denean objektuak arraste indar txikia jasango du.

Partikulen arrastea gertatzea kaltegarria da produkzio prozesurako eta ingurumenerako. Horrexegatik, partikulen arrastea prozesuan aintzat hartu behar den parametroa da, eta gas-solido ohandze fluidizatuzko errektoreen desabantailarik nagusienetariko bat da. Orokorrean, arraste ezaugarriak baldintza esperimentalen menpekoak dira, hau da, ohandzearen diametroak, altuerak, batez besteko partikula diametroak, partikula tamainaren distribuzioak eta gas emariak eragiten dute arrastearen (Ma eta Kato, 1998). Kutsadura kontrol arauak, fluidizazio kalitatearen mantentze-lanek eta batzuetan, solidoen kostu altuek (adibidez, errektore katalitikoetan) arrastatutako partikulen berreskurapena beharrezkoa egiten dute (Briens et al., 1992). Gainera, ohandzeko partikula finak murriztean errektore katalitikoaren abiaduran eragiten da. Solidoaren berreskuratze ekipoen diseinu egokirako, zikloen kasurako adibidez, solidoaren fluxua eta arrastatutako solidoen tamaina distribuzioa ondo zehaztu behar da.

Bibliografiari erreparatzen bazaio, arrastea simulatzeko lehenengoetariko korrelazioa 1955ean argitaratu zuten Yagi eta Aochi-k. Hortik aurrera, arraste korrelazio asko garatu dira. Zoritxarrez, arraste prozesuaren oinarriko ulermen faltak konstante enpirikoen erabilpena eragin du, eta ondorioz, auresate enpiriko eta datu esperimentalen arteko diferentzia oso handia da. Ohantze fluidizatuaren aplikazioaren arrakasta tekniko eta ekonomikorako arraste balioen auresate ahalmen ona kritikoa da, gas-solido bereizgailuen (zikloien eta iragazkien) diseinu optimoa (materialaren galera minimorako) auresate horren menpekoa delako (Kunii eta Levenspiel, 1990).

Ohandze fluidizatuetan partikula finak tratatzen direnean, ohandzearen gaineko altuerak TDH (ingelesez “transport disengaging height”) baino handiagoa izan behar du (Large et al., 1977). Hau da, arrastatutako solidoen fluxua geroago eta txikiagoa da gainazaletik gorago joanez, baina TDH baino gorago ez da aldatzen. Beraz, zutabe industrialak TDHaren gainetik dute gasaren irteera.

Baron et al.en arabera (1990), ohandzearen altuerak arrastearen duen eraginari buruzko ikerketa zehatzik ez da argitaratu oraindikarren, baina industri mailan ezaguna da ohandzearen altuera handitzeak partikulen arrastea handitu egiten duela. Baron et al.ek (1990) esperimentalki erakutsi zuten ohandzeko altuerak TDHaren gainetik arrastatutako partikulen fluxuan eragin nabarmena zuela. Horrela, ohandzearen altuera handitzean ohandzearen gainazaletik kanporatutako partikulen fluxua handiagoa da eta, ondorioz,

TDHaren gaintetik arrastatutako partikula fluxua ere handiago da. Altueraren eragina nabarmenagoa da gasaren abiadura handietan.

Baeyens et al.ek (1992), partikula finen tamaina txikitzean arraste koefizientearen emaria handiagoa zela adierazi zuten. Nakazato et al.ek (2004) gas-solido ohantze fluidizatuan partikula handien dentsitatea handitzean partikula finen eta handien arrastea murrizten zela aurkitu zuten. Horretaz gain, partikula handien tamaina handitzean finen arrastea gutxitzen zela ondorioztatu zuten. Era berean, Alsmari et al.ek (2016) arraste fluxua partikula handien eta finen dentsitatea handitu ahala gutxitzen zela ondorioztatu zuten.

Kim et al.ek (2014) partikula finek arrastean duten eraginari buruzko laburpen bibliografikoa egin zuten. Zenbait autorek (Leva, 1951; Wen eta Hashinger, 1960; Ma et al., 1996) partikula finen eragina oso txikia zela defendatzen zuten, baina beste batzuk aldiz (Geldart et al., 1979; Bashovchin et al., 1981), partikula finen masa handitzean arrastearen emaria handiagoa zela baieztatu zuten.

Gure ikerketa taldean, Pablos et al.ek (2015b) arrasteari buruzko azterketa egin dute eta lortutako emaitzarik garrantzitsuenak iturri ohantze kontaktoreari gaineratutako gailuak, hau da, erdiko hodiak baina batez ere iturri bilgailuak, kontaktorean gertatzen den partikulen arrastea nabarmen murriztean datza.

4.2.2. Arraste saiakuntzen prozedura esperimentalak

Tesi honen sarreran azaldu den moduan, iturri bilgailuaren funtzio garrantzitsuenetako bat arrastea ekiditea da. Hori dela eta, atal honen helburua ikerketa taldean orain arte egin diren arrastearen ikerketetan sakontzea da. Aurreko tesian (Altzibar, 2011) iturri bilgailuak partikula finen arrastea saihesteko duen ahalmena ikertu zen, baina esperimentu gutxi egin ziren ekipoaren mugak zirela eta. Oraingoan, arraste saiakuntzak ekipo berri batean (atal esperimentalean deskribatu den emari handietarako ekipoan) egin dira aldagaien balio gehiago aztertzeke egokia baita.

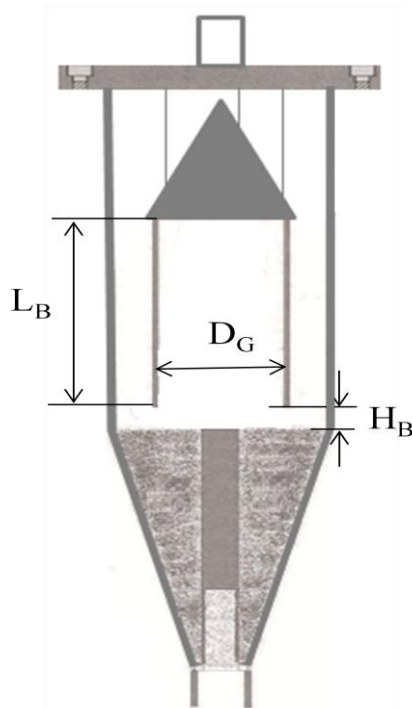
Aurretik egindako frogak batzuetan, iturri bilgailua erabiliz katalizatzaileak bezalako partikula finen arrastea ekidin zitekeela ikusi zen. Saiakuntza horiek katalizatzaileekin (aglomeratu daitekeen edozein katalizatzaile komertziala, zeolita HZSM5 edo SAPO bezala) egin ziren arren, hurrengo esperimentuak ogi arrailatuarekin egin dira material hori bereziki arina baita. Sistema erreal bat simulatzeko, partikula fin eta handien nahastea erabili da, zehazki, 0.41 mm-ko batez besteko partikula diametro duen ogi arrailatua erabili da partikula fin moduan, eta 4 mm-ko partikula diametroa duten beirazko bolak partikula handi moduan. Partikula fin eta handien nahastea, 10 kg beiraz eta 500 g ogi arrailatuz osatuta dago.

Katalizatzaileak bezalako partikula finen arrastea ekiditean bilgailuak duen eragina aztertzeke asmoz, esperimentu ezberdinak egin dira iturri bilgailuarekin (IB) eta iturri bilgailurik gabe (IBG). Honekin batera, hodi motaren eragina ikertzeke, saiakuntzak irekiduradun erdiko hodia (IH) eta hodi ez-porotsua (HEP) erabiliz, eta erdiko hodiurik gabe (HG) egin dira.

Era honetan, saiakuntzetan aldatu diren parametroak 4.4 Irudian erakusten dira, hala nola, ohantzearen gainazalaren eta iturri bilgailuaren beheko aldearen arteko hutsunea

(H_B), iturri bilgailuaren diametroa (D_G), eta erdiko hodi mota. Iturri bilgailuei dagokienez, 0.15 m-ko diametroa (D_{G15}) eta 0.20 m-ko diametroa (D_{G20}) dituzten bilgailuak erabili dira. 0.15 m-ko diametroa duen iturri bilgailuaren eta 0.20 m-ko diametroa duen iturri bilgailuaren luzera (L_B) berbera da, zehatz-mehatz, 0.50 m-koa.

Aipatu beharra dago, ohantzearen gainazalaren eta iturri bilgailuaren beheko aldearen arteko hutsunea Altzibar-en tesian (2011) H_G bezala adierazi zela, baina tesi honetan H_B deitzea erabaki da erdiko hodirik gabeko sistemak laburki izendatzen direnean erabilitako nomenklaturarekin (HG) ez nahasteko.



4.4. Irudia. Iturri bilgailuaren parametroak.

Hortaz, iturri ohantze konikoaren kontaktorearen angelua (γ), gasaren sarrerako diametroa (D_0), erdiko hodiaren diametroa (D_T) eta luzera totala (L_T), ohantzearen altuera (H_0), irekiduradun hodiaren hanken zabalera (W_H) eta hodi ez-porotsuen hanken luzera (L_H) konstante mantendu dira. Aldagaien efektuak aztertzeko, ikertu nahi den aldagaia aldatu da eta beste aldagai guztiak konstante mantendu dira. Hurrengo taulan laburbiltzen dira saiakuntzetan erabili diren faktoreak.

4.1. Taula. Esperimentuen faktore geometrikoak eta euren mailak.

FAKTOREAK	MAILAK		
Sistema mota	HG	IH	HEP
Iturri bilgailua	IBG	D _G 15	D _G 20
H_B (m)	0-0.14		
γ (°)	45		
D_0 (m)	0.04		
D_T (m)	0.04		
L_T (m)	0.27		
L_H (m)	0.07		
W_H (m)	0.018		
H_0 (m)	0.27		
d_p , partikula diametroa (m)			
Beira	0.002		
Ogi arrailatua	0.00041		
ρ_s , dentsitatea (kg/m ³)			
Beira	2420		
Ogi arrailatua	1038		

Ekipoaren mugak kontuan hartuz, faktore geometriko guztien mailak konbinatu dira saiakuntzetan. Adibidez, iturri bilgailua kokatzen den kontaktorearen tapatik ohantzera 0.70 m daudenez, eta iturri bilgailuaren altuera 0.50 m-koa denez, 0.20 m daude H_B ezberdinak frogatzeko. Hala ere, H_B posible guztiak frogatu ondoren, sistema gehienetan 0.03 m baino baxuagoko balioak ez direla egokiak ikusi da esperimentuak ez duelako iturri ohantze erregimenean ondo funtzionatzen. Hau da, ohantzea geldi dagoenean 0.03 m egon arren, airea pasaraztean hedatu egiten da eta ia ez dago zirrikiturik gailuaren beheko aldean. Ondorioz, gailuaren barruan sortzen den presioa kanpokoa baino handiagoa denez, airea alboetatik irteten da eta ez du iturririk eratzten. Era berean, H_B oso handia denean iturri bilgailuak ez du bere funtzioa betetzen, hots, ez du iturria biltzen oso urrun geratzen delako.

Esan beharra dago arrastearen erabili den kontaktorea metakrilatozkoa (betiko materiala) izan beharrean, polietilen tereftalatozkoa (PET) dela arraste esperimentuen abiadura eta presio handiek metakrilatozko kontaktorean zenbait pitzadura eragin zituztelako eta orduan, kontaktorea material gogorragoaz eginda egon behar zela erabaki zen. Ildo beretik, arrasterako erabilitako erdiko hodiak ez dira ziklo denbora atalean erabilitako

berberak aurrekoen diseinuak askotan iturriaren sorrera (hodiaren erdian eraztun bat dutelako) edo airearen distribuzioa (erdiko hodian hankengatik) eragozten duelako eta beraz, diseinua hobetu da. Erdiko hodi berrietan eraztuna oinarritik 0.07 m-tara dago eta oinarria hiru hankak izan ordez, eraztun laua da ohantzearen zirkulazioari eragozpen gutxien eragiteko. Tesiko 2.1.2.1 Atal esperimentalean hodian irudiak eta azalpen zehatzagoa agertzen da.

Aintzat hartu behar da arraste saiakuntzak egiteko ez direla laborategian dauden kontaktore eta erdiko hodi guztiak erabili, ikerketaren helburu nagusia iturri bilgailuaren eragina aztertzea zelako, baina atala luzeegia egin barik. Hortaz, aztertu gabe geratu diren kontaktoreak eta erdiko hodiak hurrengo lanetan ikertuko dira.

Jarraian, arraste saiakuntzen prozedura esperimentalak deskribatuko da. Lehenik eta behin sistema esperimentalak prestatzen da. Sistema iturri bilgailuz hornitzeko, ekipoaren goikaldeko tapa kentzen da, bilgailua kontaktorearen barruan sartu eta goikaldeko tapa berriz ipini. Ohantzearen gainazalaren eta iturri bilgailuaren beheko aldearen arteko hutsunea (H_B) jartzeko, iturri bilgailuak dituen hagatxoak igo edo jaitsi ahal dira, bertako torlojuak estutuz edo lasaituz. Azpimagarria da, ekipoak baimentzen dituen H_B balio posible guztiak frogatu direla, baina soilik iturri ohantze erregimen egokia izan duten esperimentuak eman dira ontzat.

Aurretik deskribatu bezala, materiala (ogi arrailatua kasu honetan) iturri bilgailuaren gainean gera ez dadin, iturri bilgailuaren gainean konoa jarri da (4.2 Irudia), konoaren gaineko ogiak irrist egin dezan eta ohantzera eror dadin. Jarraian, kontaktorerak elikatu den nahasteak prestatu dira. Horretarako, lehenengo beirazko bolak pisatu dira, eta ondoren ogi arrailatuaren kantitate jakinaz nahastu.

Esperimentua hasteko, iturkuntza abiadura minimoa determinatu behar da. Hala ere, aurreko tesi batean (Altzibar, 2011) ikusienez, erregimen zurrumbilotsua da arrastea egiteko egokiena, erreakzio katalitikoetan horixe baita ohikoena. Beraz, iturkuntza abiadura minimoa baino %50 abiadura handiagoa erabili da erregimena zurrumbilotsua izan dadin. Esperimentuen iraupena hogeita hamar minutu izan da eta tarte horretan gertatu diren xehetasunak apuntatu dira.

Esperimentuak amaitu direnean, nahastea tamizatu egiten da ogi arrailatua beirazko boletatik banatzeko. Arraste esperimentuetan zehar beirazko boleki ogi arrailatua atrizionatu egiten dute. Horregatik, ogi arrailatuaren partikula diametroa txikiagoa denez amaieran, hurrengo saiakuntzarako ogi arrailatu berria erabiltzen da. Ondoren, ohantzean geratu den finen (ogi arrailatuaren) kantitatea pisatu da. Horrela, hasierako finen kantitateari bukaerako finen kantitatea kenduz esperimentuan gertatu den arraste portzentajea kalkulatu izan da.

Horretaz aparte, esperimentu bakoitzean, hasierako eta bukaerako emari masikoaren eta karga galera egonkorraren datuak irakurri dira kontrol panelean. Airearen emaria kaudalimetro baten bidez neurtu da eta sortutako presio galera egonkorra presio neurgailu baten bitartez. Bi neurri horiek instalazioaren kontrol panelean zuzenean agertzen dira. Ekipo berrian arraste esperimentuak emariaren balio jakin baterako automatizatzea (begizta itxian) posible den arren, saiakuntzak begizta irekian egin dira, kontrol automatikoa bat-batekoa delako eta horrek ia ogi arrailatu guztiaren arrastea suposatzen duelako. Izan ere, esperimentua automatikoki egitean, bariadoreak lan egiten

du lehenengo eta emariaren balio zehatz horretara ez denez heltzen, balbula guztiz irekitzen da eta horrek itzelezko arrastea eragiten du.

Azkenik, partikulen ziklo denbora maximoak neurtu dira, batez besteko ziklo denborak baino errazago neurtzen direlako. Izan ere, iturri bilgailuak ez du baimentzen ohiko trazatzailearen metodoarekin batez besteko ziklo denbora neurtzea. Hala, kontaktorearen hormaren ondoan erortzen den partikula bati so egiten zaio, eta ohantzearen gainazaletik behealderaino heldu arte irauten duen denbora neurtu da. Iturriaren irregulartasunak kontuan izateko, ziklo denbora maximoak kontaktorearen hormako posizio ezberdinetan hartu dira (gutxienez sei), hormako posizio bakoitzean ohantzearen zirkulazioa ezberdina izan daitekeelako. Kontuan izan behar da beirazko partikulen ziklo denbora maximoak neurtu direla soilik, eta ez ogi arrailatuarenak, azken honen hormako ziklo denborak ez direlako adierazgarriak. Hau da, ogi arrailatuaren dentsitatea txikia denez, eraztungunetik igotzen den aireak gorantz bidali dezake. Dena den, eraztungunearen barnean ogi arrailatua beherantz doa, hots, ohiko zirkulazioa du sortzen den iturrian ogi arrailatua ikusten baita.

4.2.3. Arraste emaitzak

Atal honetan, arrastea ekiditeko aurrera eraman diren saiakuntzetatik lortutako emaitzak aurkeztuko dira. Kapitulu honen sarreran aipatu denez, bibliografia eskasia nabarmena dago iturri ohantze konikoen arrastearen inguruan. Horregatik, ikerketa zabala egin da fenomeno horretan eragiten duten aldagaiak zein diren aurkitzeko eta euren eragina aztertzeko.

Esperimentuetan ikertu diren faktoreak (H_B , D_G eta erdiko hodi mota) operazio emarian, karga galera egonkorrean, arrastean eta ziklo denbora maximoan sortzen duten eragina aztertu da. Horretarako, ikertu nahi den aldagaia aldatu da eta beste aldagai guztiak konstante mantendu dira.

Saiakuntzak egin ostean, hainbat ondorio atera dira era kualitatiboan. Esate baterako, ohantzea laua ez denean, hau da, ohantzearen gainazalak alde guztietan altuera berbera ez duenean, ohantzea altuagoa den aldean ogi arrailatua pilatzen da, eta ez da nahasten beirazko bolekin. Gainera, hodirik gabe egindako esperimentuen iturria irekiduradun hodiekin eta hodi ez-porotsuekin egindakoena baino altuagoa da. Emari altuenak hodirik gabeko saiakuntzetan erabili behar dira eta, beraz, esperimentu horietan solidoaren zirkulazioa oso azkarra da. Hala ere, hodirik gabeko esperimentuek iturri egonkorra dute iturri bilgailuarekin, eta ogi arrailatua ohantzeko gune guztietara ondo banatzen da.

Era berean, egindako saiakuntzetan ikusi denez, segregazioa gertatzen da ogi arrailatua eta beirazko bolak dituen ohantzearekin lan egitean. Segregazioa iturgune eta iturburuko hidrodinamikagatik, partikula handien artean gertatzen den finen perkolazioagatik, eta osagai arinen eta dentsioen arteko flotazio ezberdinengatik gertatzen da.

Arraste ikerketarako erabili diren partikula finen dentsitatea partikula handiena baino askoz txikiagoa denez, iturburuan dauden partikula finak kontaktorearen hormatik hurbil erortzen dira eta handiak iturritik gertu, (4.5 Irudia). Joera hau ikusia zen ikerketa taldean dentsitate bereko nahaste bitar eta hirutarrekin egindako azterketetan (San José et al., 1994). Dena den, arrasterako erabilitako bi materialen partikula diametroa eta

dentsitatea hain ezberdinak direnez, kontaktorerara sartu eta eraztungunetik igotzen den aireak dentsitate txikiko partikulei kontaktorearen oinarriraino jaistea eragozten die.



4.5. Irudia. Iturri bilgailuaren itxura arrastea gertatu ondoren.

Ikerketa taldean egindako beste segregazioa azterketa batean (Pablos et al., 2015b), lehen aipatu dena ikusi da, hots, ohantzean ez zela segregazio aipagarririk gertatzen. Portaera horren arrazoia, saiakuntzetan iturri bilgailua erabiltzean datza. Izan ere, sarrera atalean azaldu den moduan, iturri bilgailuak sistema egonkortu egiten du, eta Bacelos-ek eta Freire-k (2006) esperimentalki ondorioztatu zuten moduan, iturri ohantzean egonkortasuna hobetzean segregazioa murriztu egiten da. Hortaz, iturri ohantze konikoari gaineratutako gailuak, hots, erdiko hodiak eta, batez ere iturri bilgailuak, ohantzeko partikulen segregazio erradiala murrizten du.

Segregazioari dagokionez, batzuetan esperimentua hasi eta berehala gertatzen da, beste batzuetan esperimentuaren erdialdera eta gainontzekoetan esperimentuaren amaieran. Beraz, arrastearen denboran zeharreko bilakaera jakiteko eta arrastaturiko kantitatea kalkulatzeko, azterketa kuantitatiboa egin da eta esperimentu ezberdinen zinetika ikertu da.

Aurrean aipatu denez, oso garrantzitsua da ohantzearen gainazalaren eta iturri bilgailuaren beheko aldearen arteko hutsunea (H_B) zehazki neurtzea, saiakuntzen hidrodinamikan berebiziko eragina baitu. Izan ere, iturri bilgailua ohantzetik hurbil dagoenean, zentimetro bat gorago edo beheago ipintzeak ohantzea egonkorra edo ez-egonkorra izatea eragiten du.

Ildo beretik, ohantzearen gainazalaren eta iturri bilgailuaren beheko aldearen arteko hutsunea (H_B) eta iturri bilgailuaren diametroa (D_G) aldatzean, sistema esperimentalaren hidrodinamika ere aldatzen da. Hala, H_B -ren balio txikiak ez dira normalean egokiak, airea alboetatik irteten baita. Baina balio oso altuak direnean ere, iturri bilgailuak ez du iturria biltzen eta beraz egonkortzen. Horretaz gain, ohantzean iturria sortzean, ohantzea gutxi gorabehera bi zentimetrotan hedatzen da, eta beraz, H_B -ren balioak gutxienez hiru zentimetrokoa izan behar du, aireak irteteko lekua izan dezan. Beraz, arraste minimoa ahalbidetzen duen H_B -ren balio optimoa dago. Gainera, H_B handitzean karga galera egonkorra ere txikiagoa da balio optimoa lortu arte, eta ondoren berriro handiago egiten

da. Hortaz, helburua karga galera egonkor txikiena eragiten duen H_B bilatzea da beroni dagokion operazio kostua ere txikiena izango baita.

Saiakuntzetan ikusi denez, H_B desegokia erabili den kasuetan, beirazko bolak mugimendu kaotikoa izan dute, eta ogi arrailatua iturri bilgailuaren hormaren ondoan geratu da suspentsioan, alde batera eta bestera mugituz.

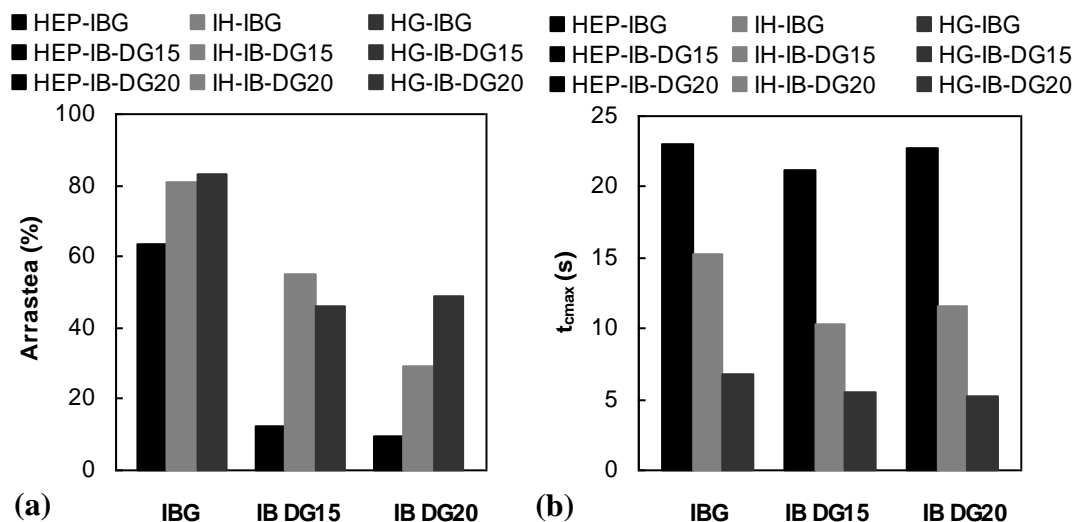
Azkenik, ohantzea apurtzen den unea kritikoa da arraste gehien gertatzen den unea baita. Beraz, une horretan ahalik eta arraste gutxien izan dadin, abiadura poliki-poliki igo behar da ohantzea apurtu arte eta ondoren nahi den operazio abiadura ezarri. Ondorio hau balioztatzeko, zenbait esperimenturen zinetika kalkulatu da kapitulu honen azken atalean.

4.2.3.1. Arraste azterketa kuantitatiboa

Atal honetan, aldagai independenteek (iturri bilgailuaren diametroa eta ohantzearen gainazalaren eta iturri bilgailuaren beheko aldearen arteko hutsunea) menpeko aldagaietan (operazio emarian, ziklo denbora maximoan, arraste kantitatean eta karga galera egonkorrean) sortzen dituzten aldaketa kuantitatiboak azalduko dira eta garrantzitsuenak irudikatuko dira.

Arraste saiakuntzak atal esperimentalean azaldu den prozedurari jarraituz egin dira, eta aldagai nagusienak operazio era (iturri bilgailuz edo bilgailu barik), ohantzearen gainazalaren eta iturri bilgailuaren beheko aldearen arteko hutsunea (H_B), eta iturri bilgailuaren diametroa (D_G) dira. Esperimentuetan neurturiko aldagaiak honako hauek dira: arraste portzentajea, operazio emari masakoa (Q), partikulek ziklo bat egiteko behar duten denbora maximoa (t_{cmax}), eta karga galera egonkorren balioa (ΔP s). Aipagarria da, ziklo denbora maximoaren balioa deritzona neurtutako ziklo denboren artean baliorik handiena dela. Datu hauek sistemen portaeraren adierazgarri dira eta garrantzizko informazioa ematen dute.

Jarraian, erdiko hodi mota ezberdinekin, erdiko hodirik gabe, iturri bilgailu ezberdinekin eta bilgailurik gabe lorturiko emaitzak aurkeztuko dira histogrametan. Horretarako, sistema ezberdinen datuen batez besteko balioak kalkulatu eta irudikatu dira. Sistemak euren artean ezberdintzeko, hurrengo hizkiekin adieraziko dira: iturri bilgailu gabeko sistemak (IBG), iturri bilgailudun sistemak (IB), 0.15 m-ko iturri bigailuaren diametroa (DG15), 0.20 m-ko iturri bilgailuaren diametroa (DG20), erdiko hodi ez-porotsudun sistemak (HEP), irekiduradun erdiko hodidun sistemak (IH), eta erdiko hodirik gabeko sistemak (HG). Lehenik eta behin, saiakuntzetan eskuratutako arraste portzentajeak eta ziklo denbora maximoak erakusten dira 4.6 Irudian.



4.6. Irudia. Iturri bilgailu eta erdiko hodi mota ezberdinekin lortutako arrasteak (a) eta ziklo denbora maximoak (b).

4.6 Irudiko (a) grafikoari erreparatuz, zenbait ondorio atera daitezke. Alde batetik, iturri bilgailuaren arabera, iturri bilgailurik gabeko sistemetan arraste balio handienak lortzen direla (ohantze finen %64-83). Iturri bilgailua erabiltzeak, aldiz, portzentaje hau txikitzen du. 0.20 m diametroko iturri bilgailua duten sistemek jasiten dute gehien arrastea (%10-49) eta ondoren, 0.15 m-ko iturri bilgailua dutenek (%13-55). Beraz, frogatuta geratzen da iturri bilgailuak nabarmen murrizten duela finen arrastea. Egiaztatu da zenbat eta iturri bilgailuaren diametroa handiagoa izan, orduan eta hobeto ekiditen duela finen arrastea, iturri bilgailu handiek iturri zabalagoak biltzeko aukera baitute.

Bestetik, erabiltzen den erdiko hodi motaren arabera ikusi da arraste balio txikienak eragiten dituen sistema hodi ez-porotsudun sistema dela (%10-64), arraste balio handienak berriz, erdiko hodirik gabeko sisteman gertatzen direla (%47-83), eta irekiduradun hodi-dun sisteman bitarteko balioak (%29-81) lortzen direla. Emaitza hauek ulertzeko, airearen banaketa ohantzean izan behar da kontuan, hots, erdiko hodirik gabe airea iturritik eraztungunera altuera guztian zehar sartzen dela, eta horrek ohantzearen mugimendu kaotikoa eragiten duela. Erdiko hodi ez-porotsuak erabiltzean aldiz, airea erdiko hoditik igarotzen da eta ohantzearen erdian iturria sortzen da. Hala, partikulen mugimendu zikliko egonkorragoa eragiten da, eta iturriaren jardura kaotikoak saihesten dira, ohantzeari egonkortasuna emanez.

Honetaz gain, erdiko hodi ez-porotsuekin lan egitean kontaktorerara sartzen den airearen frakzio handiena iturgunean zehar igotzen da, eta frakzio txiki bat soilik doa eraztungunean zehar. Irekiduradun hodiekin oster, airearen frakzio handiagoa igotzen da eraztungunetik, eta ondorioz iturri bilgailua erabiltzean fin kantitate handiagoa arrastatzen du aireak. Honela, hodi ez-porotsuekin sortzen den iturburua irekiduradun hodiekin sortzen dena baino askoz luzeagoa denez, aireak kanpora fin gehiago arrastatzen ditu. Iturri bilgailua erabiltzean berriz, airearen frakzio handiena kanpora zuzenean joan beharrean iturri bilgailua zeharkatzera behartzen da, eta honek finen frakzio handiagoa ohantzean geratzea eragiten du. Gainera, kontuan izan behar da iturkuntza modu egonkorrean aurrera eramateko behar den aire emaria handiagoa dela irekiduradun hodia erabiltzen den sistemetan, eta batez ere erdiko hodirik gabeko

sistemetan. Egoera horretan, airearen emari hain handiarekin bilgailua ez da gai iturria biltzeko ezta egon daitezkeen iturriaren ezegonkortasunak txikitzeko, eta beraz, fin gehiago arrastatzen dira.

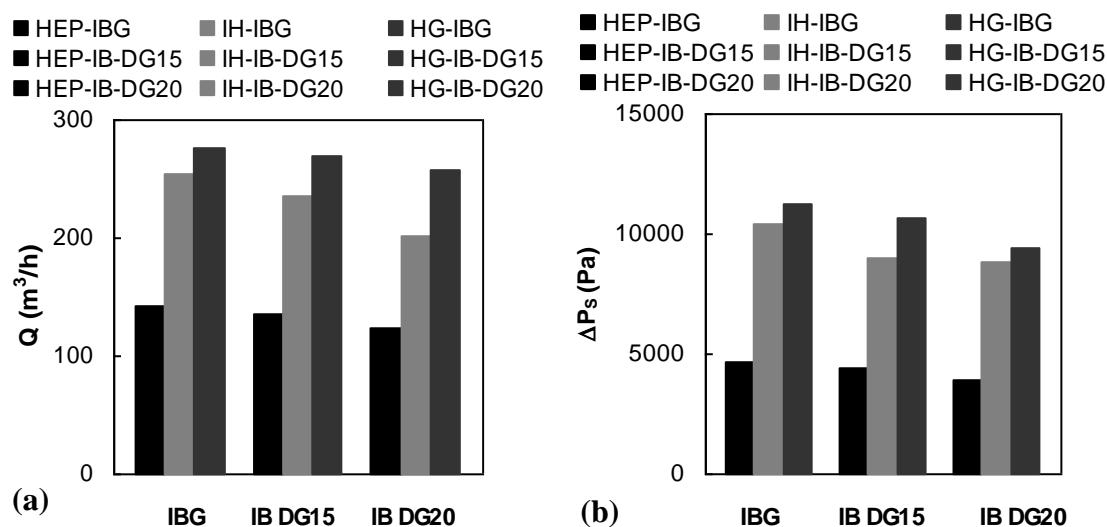
Balioei dagokienez, arrasterik handiena ez iturri bilgailurik ez eta erdiko hodirik ez duten sistemetan gertatzen den bitartean (%83), arrasterik txikiena 0.20 m-ko iturri bilgailu eta erdiko hodi ez-porotsua duten sistemetan izan da (%10).

4.6 Irudiko (b) grafikoan ikus daitekeenez, sistema ezberdinen artean iturri bilgailurik gabeko sistemek ematen dituzte ziklo denbora maximoaren baliorik handienak (6.7-23.1 s), 0.15 m-ko iturri bilgailua dutenek baliorik txikienak (5.5-21.2 s), eta 0.20 m-ko iturri bilgailua dutenek tarteko balioak (5.2-22.7 s). Iturri bilgailuarekin sortzen den iturria txikiagoa denez, partikulak azkarrago jaisten dira eta beraz zirkulazioa azkarragoa da eta ziklo denbora maximoak txikiagoak dira. Era berean, 4.6 Irudiko (b) grafikoan erakusten den bezala, diametro handiagoa duen iturri bilgailuak ziklo denbora maximoaren balio altuagoak ditu. Iturri bilgailuaren diametroa zenbat eta handiagoa izan, bilgailu barneko presioa txikiagoa da, eta beraz ohantzearen zirkulazioa motelagoa eta ziklo denbora maximoaren balioak handiagoak dira.

Sistema desberdinei erreparatuz, 4.6 Irudiko (b) grafikoan ikus daitekeenez, hodi ez-porotsua duten sistemek ziklo denbora maximoen baliorik handienak (21.2-23.1 s) dituzte, hodirik gabeko sistemek ziklo denbora maximoen baliorik txikienak (5.5-6.7 s) dituzte eta irekiduradun hodia duten sistemek aurreko bien arteko balioak (10.4-15.3 s) dituzte. Izan ere, hodirik gabeko eta irekiduradun hodiak sistemek iturkuntza abiadura minimoaren balio handia dutenez, sortzen den karga galera handiagoa da. Honek ohantzearen mugimenduari zurrumbilatasuna ematen dio eta ondorioz, partikulak zikloa egiteko behar duen denbora laburragoa da. Joera hauek 3.2.2.2 Ataleko ziklo denboren ikerketan lorturiko berberak dira.

Sistema guztiak kontuan izanda, ziklo denbora maximoaren balio txikiena (5.2 s) 0.20 m-ko iturri bilgailua eta erdiko hodirik gabeko sistemak duen bitartean, balio handiena hodi ez-porotsua eta iturri bilgailurik gabeko sistemak du (23.1 s).

Jarraian, arraste saiakuntzetan eskuratutako emariak eta karga galera egonkorak irudikatuko dira. Grafiko hauek egiterakoan kontuan izan behar da emaria, eta batez ere, karga galera egonkorraren balioa esperimentuan zehar aldatuz joan dela. Horregatik, emariak eta karga galera egonkorak saiakuntzaren hasieran eta amaieran dituzten balioak hartu dira, eta balio horien batez bestekoa kalkulatu da.



4.7. Irudia. Iturri bilgailu eta erdiko hodi mota ezberdinekin lortutako emariak (a) eta karga galera egonkorak (b).

4.7 Irudiko (a) grafikotik ondorengo joera nagusiak ondoriozta daitezke: Iturri bilgailurik gabeko sistemen esperimentuetako emaria ($143\text{-}276\text{ m}^3/h$) iturri bilgailudun sistemena ($124\text{-}269\text{ m}^3/h$) baino handiagoa da, iturri bilgailuak zirkulazioa egonkortu egiten baitu eta horrek emari baxuagoetan lan egitea baimentzen du. Iturri ohantzea lortzeko emari altuenak ($143\text{-}276\text{ m}^3/h$) iturri bilgailurik gabeko sistemek behar dituzte, 0.15 m -ko diametroa duten iturri bilgailudun sistemek tarteko emariak ($135\text{-}269\text{ m}^3/h$) eta 0.20 m -ko diametroa duten iturri bilgailudun sistemek emari baxuenak ($124\text{-}257\text{ m}^3/h$) behar dituzte. Altzibar-en tesiko (2011) ikerketa hidrodinamikoan ondorioztaturikoa betetzen da, hots, iturri bilgailuaren diametroa handitzean emariak behera egiten duela. Efektu hau ziklo denbora maximoaren ikerketan azaldu den arrazoi berberetatik gertatzen da zirkulazio emaria eta ziklo denbora alderantziz proportzionalak baitira.

Erdiko hodiaren eraginari dagokionez, hodirik gabeko sistemei dagozkien emari altuenak ($257\text{-}276\text{ m}^3/h$), hodi ez-porotsudun sistemei emari baxuenak ($124\text{-}143\text{ m}^3/h$), eta irekiduradun hodiaren sistemei bitarteko balioak ($201\text{-}255\text{ m}^3/h$). Espero den bezala, joera hau aurreko grafikoan ziklo denbora maximorako lortutakoaren alderantzizkoa da. Hodi ez-porotsua erabiltzen den saiakuntzetako emaria baxuena da eraztungunetik igotzen den aire frakzioa txikia delako, aire gehiena hoditik igotzen baita. Aitzitik, erdiko hodirik gabeko saiakuntzen emaria handiena da operazio egonkorra lortzeko beharrezkoa den aire emaria askoz ere handiagoa delako.

Konfigurazio guztien artean emari handiena duena iturri bilgailurik eta erdiko hodirik gabeko sistema da ($276\text{ m}^3/h$), eta emari txikiena berriz, 0.20 m -ko iturri bilgailua eta erdiko hodi ez-porotsua duen sistema da ($124\text{ m}^3/h$).

4.7 Irudiko (b) grafikoan erakusten den moduan, karga galeraren joerak emarirako lortutako berberak dira bai iturri bilgailu bai erdiko hodi mota ezberdinetarako. Hala, antzeman daiteke iturri bilgailudun sistemek ($3897\text{-}10638\text{ Pa}$) bilgailurik gabekoek ($4637\text{-}11236\text{ Pa}$) baino karga galera egonkorra txikiagoa dutela, iturri bilgailua erabiltzeak ohantzeko karga galera egonkorra txikitzea lortzen duelako. Joera hau gertatzen da iturri bilgailuak ohantzea egonkortzean, karga galera txikitu egiten delako.

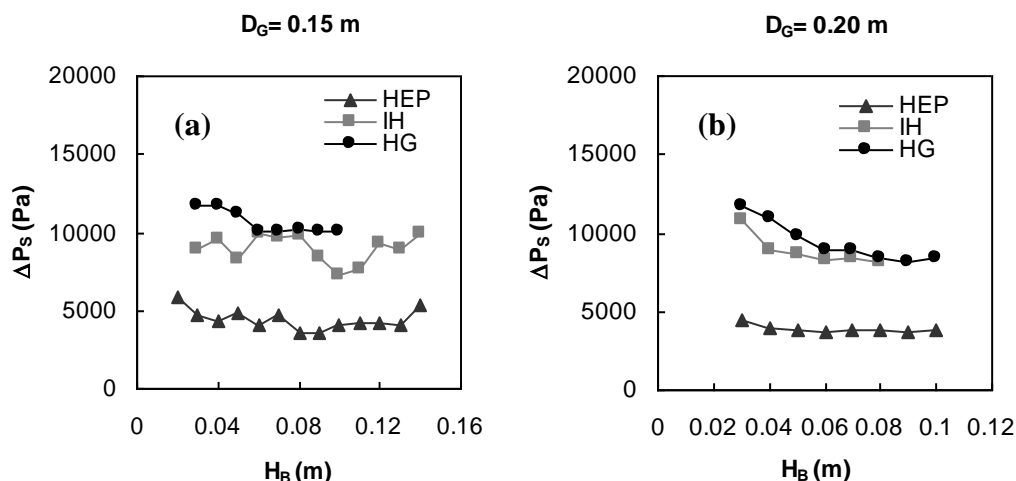
Karga galera egonkorraren balio altuenak (4637-11236 Pa) iturri bilgailurik gabeko sistemek eragiten dituzte, tarteko balioak (4425-10638 Pa) 0.15 m-ko diametroa duten iturri bilgailudun sistemek eta balio txikienak (3897-9434 Pa) 0.20 m-ko diametroa duten iturri bilgailudun sistemek. Iturri bilgailuaren diametroa handitzean, sistema horren barneko karga galera egonkorra txikiagoa da.

Sailkapena erdiko hodi motaren arabera egiten bada, hodirik gabeko sistemek karga galera egonkorraren balio altuenak dituzte (9434-11236 Pa), hodi ez-porotsua duten sistemek balio txikienak dituzte (3897-4637 Pa), eta irekiduradun hodia duten sistemek bitarteko balioak (8870-10456 Pa), baina balio hauek hodirik gabekoetatik oso hurbil aurkitzen dira erabili den irekiduradun erdiko hodiaren irekidura portzentajea %57koa izan delako. Hodirik gabeko saiakuntzetan partikula ohantzearen altuera guztian zehar pasa daitekeenez eraztungunetik iturgunera, sortuko den karga galera handiena izango da. Irekiduradun hodiak erabiltzean aldiz, partikulak iturgunera ohantze guztian zehar pasa daitezkeen arren, erdiko hodiaren hankek partikula gutxiago igarotzea eragiten dute. Hori dela eta, irekiduradun hodia duten sistemek hodirik gabeko sistemek baino karga galera egonkorraren balio txikiagoak dituzte. Hodi ez-porotsua dutenetan ordea, airea hodiaren hanketatik bakarrik igaro daiteke iturgunera, airearen frakzio handiena hodian zehar igoko da eta frakzio txiki bat (hodiaren hanketatik pasa daitekeena) eraztungunean zehar soilik igoko da. Honen ondorioz, sortuko den karga galera beste sistemena baino txikiagoa da.

Karga galera egonkorraren balioak, prozesuen diseinuan garrantzitsuenetariko datuak dira, prozesuaren kostua garestitzea edo merkatzea eragiten dutelako. Modu honetan, karga galera egonkorraren balio txikiak desiragarriak dira. Egindako esperimentu guztien artean 0.20 m-ko iturri bilgailua eta hodi ez-porotsua duen sistemak du karga galera egonkorraren balio txikiena (3897 Pa).

Kapitulu honen hasieran aipatu da iturri bilgailuaren beheko aldearen eta ohantzearen gainazalaren arteko hutsunea (H_B) aldagai oso garrantzitsua dela, sistemen funtzionamenduan eragin nabarmena duelako. Arrazoi horregatik hurrengo grafikoetan H_B ezberdinek saiakuntzetan duten eragina aztertuko da bai iturri bilgailu txikirako ($D_G=0.15$ m) bai iturri bilgailu handirako ($D_G=0.20$ m). Honetaz gain, grafikoetan erdiko hodi ez-porotsudun (HEP) konfigurazioak, irekiduradunak (IH) eta hodirik gabekoak (HG) bateratu dira erdiko hodi bakoitzaren eragina hobeto ikusteko eta euren artean alderatzeko.

Horretarako, arraste saiakuntzak egin dira ekipoaren altuerari eta funtzionamenduari dagokienez eragozpenik izan ez den tartean, hots, ahal izan diren H_B guztiak erabiliz. Helburuen artean arraste gutxien eragiten duen H_B aurkitzea denez normalean, H_B ezberdinak probatu dira arraste minimoa lortu arte, eta gero beste hutsune altuago bat saiatu da baieztatzeko hurrengo arrastearen balioa handiagoa dela, hau da, aurrekoa benetako minimoa dela. Sistema batzuetan, minimo bat baino gehiago izatea edo minimorik ez izatea gertatu da. Kasu horietan, ahal izan diren H_B guztiakin egin dira esperimentuak eta joera azertu da. Honen guztiaren ondorioz, konfigurazio bakoitzerako H_B -ren balio ezberdinak saiatu dira. Hasteko, iturri bilgailuaren eta ohantzearen arteko hutsuneak (H_B) karga galera egonkorrean sortzen duen eragina irudikatu da 4.8 Irudian.

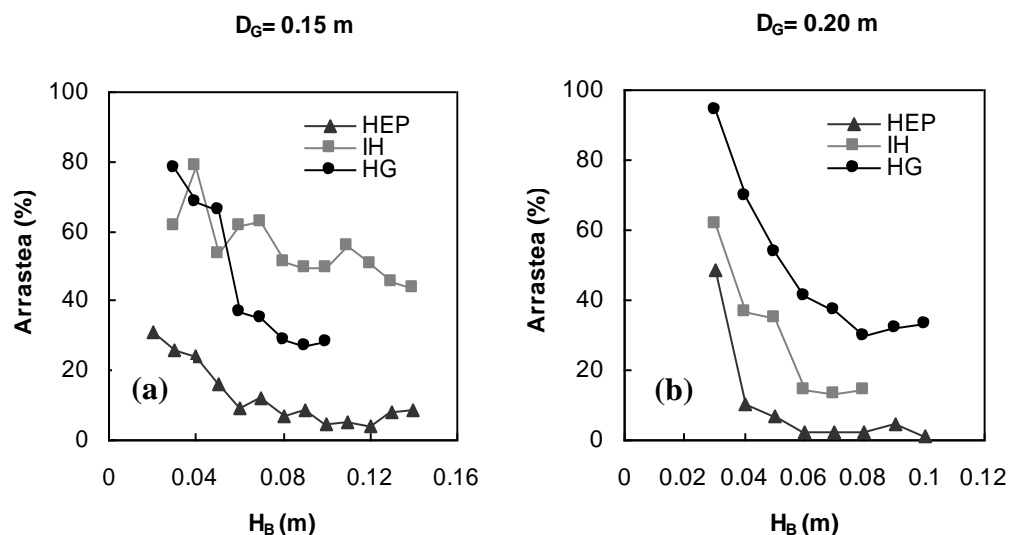


4.8. Irudia. Iturri bilgailuaren eta ohantzearen arteko hutsuneak (H_B) karga galera egonkorrean sortzen duen aldaketa diametro txikiko (a) eta diametro handiko (b) iturri bilgailurako.

4.8 Irudian ikus daitekeenez, iturri bilgailuaren eta ohantzearen gainazalaren arteko hutsunea (H_B) handitu ahala, karga galera egonkorraren joera beherakorra da hiru sistemetarako eta iturri bilgailuaren bi diametro ezberdinetarako. Izan ere, iturri bilgailuaren eta ohantzearen gainazalaren arteko distantzia txikiegia denean, iturgunetik igotzen den aireak ezin du iturburutik zuzenean kanpora irten, eta iturri bilgailuan behera jaistean ohantzearen gainazala zeharkatu behar du kanpora irteteko eta, beraz karga galera egonkor handia sortzen da. Iturri bilgailuaren eta ohantzearen gainazalaren arteko distantzia egokia denean berriz, aireak kanpora irteteko ez du ohantzea zeharkatu beharrik. Izan ere, iturri bilgailuaren eta ohantzearen gainazalaren arteko hutsunetik pasa daiteke eta karga galera egonkor txikiagoa sortzen da. Lehen aipatu den bezala, iturri bilgailuaren eta ohantzearen gainazalaren arteko hutsune handiegia ere desegokiak dira, iturri bilgailuak ez baitu iturria biltzeko ezta egonkortzeko gaitasunik, eta beraz bilgailurik gabe balego bezala litzateke.

4.8 Irudian ikus daitekeenez, H_B handitzean karga galera egonkorra (ΔP_s) txikitu egiten da balio optimoa lortu arte, eta ondoren berriro handitzen da. Alabaina, 4.8 Irudian hutsune batzuetan karga galera egonkorraren balioa handitu dela ikus daiteke, baina datu horiek errore esperimentalaren barnean aurkitzen dira. Karga galera egonkorraren balio txikienak direnez operatzeko egokienak, ΔP_s txikiena eragiten duen H_B -ren balioa erabili behar da. Kasu honetan H_B -ren balio optimoa 0.15 m-ko iturri bilgailudun sistemetarako 0.08-0.10 m artean dagoela ikus daiteke eta 0.20 m-ko iturri bilgailudun sistemetarako 0.06-0.09 m artean dagoela ikus daiteke.

Jarraian, 4.9 Irudian iturri bilgailuaren eta ohantzearen arteko hutsuneak (H_B) arrastean sortzen duen aldaketa deskribatuko da.



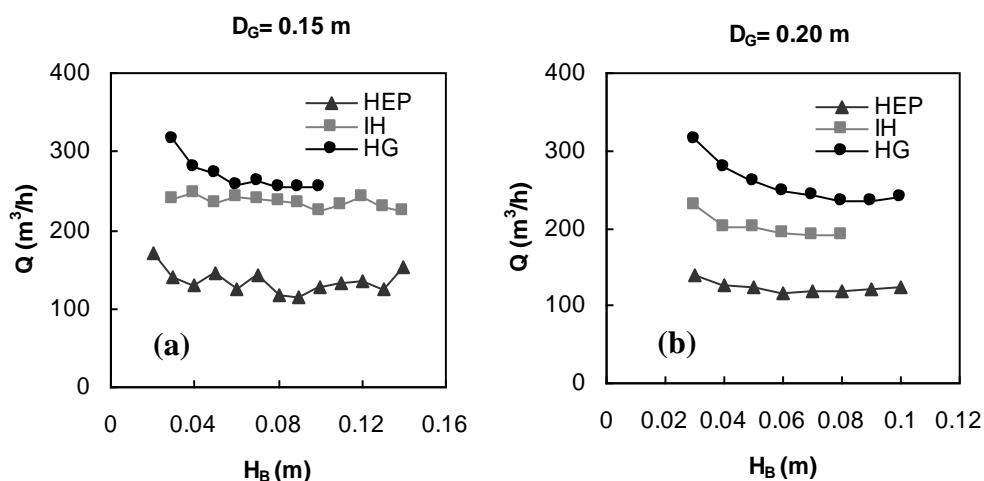
4.9. Irudia. Iturri bilgailuaren eta ohantzearen arteko hutsuneak (H_B) arrastearen sortzen duen aldaketa diametro txikiko (a) eta diametro handiko (b) iturri bilgailurako.

4.9 Irudian erakusten den bezala, iturri bilgailuaren eta ohantzearen gainazalaren arteko hutsunea (H_B) handitzean arrasteak behera egiten du bi iturri bilgailu ezberdinetarako eta sistema guztietarako. Aurreko grafikoan azaldu den bezala, H_B handiagoa denean karga galera egonkorra txikiagoa da, eta horrek arraste gutxiago eragiten du. Grafiko honetan ikus daitekeenez, H_B handitzean arrastea txikitu egiten da balio optimoa lortu arte, eta ostean handitu egiten da. Hala ere, 4.9 Irudian nabaria da zenbait puntuetan arrastea txikitu ordez handitu egin dela. Puntu horien joera okerra errore experimentalari dagokio.

Kapitulu honen hasieran aipatu den moduan, esperimentu hauen xede nagusia arraste gutxien eragiten duen sistema aurkitzea da, katalizatzailea (ogi arrailatua saiakuntzetan) prozesu katalitikoaren elementu garestiena baita, eta bere galera minimoa izatea nahi delako. Hori dela eta, interesgarriena arraste txikiena eragiten duen H_B -a erabiltzea da. Hala, H_B -ren balio optimoa 0.15 m-ko iturri bilgailudun sistemetarako 0.09-0.14 m artean dagoela ikus daiteke eta 0.20 m-ko iturri bilgailudun sistemetarako 0.07-0.010 m artean dagoela ikus daiteke.

Azpimagarria da esperimentuetan lortu den arraste minimoa %1ekoa izan dela, eta zehazki 0.20 m-ko iturri bilgailuarekin, erdiko hodi ez-porotsuarekin eta 0.010 m-ko hutsunearekin egin den esperimentuari dagokio. Horrek prozesuan ia arrasterik ez dela egon adierazten du, hots, sistema egokiena dela.

Ildo beretik, 4.10 Irudian iturri bilgailuaren eta ohantzearen arteko hutsuneak (H_B) emarian eragiten duen aldaketa deskribatuko da jarraian.



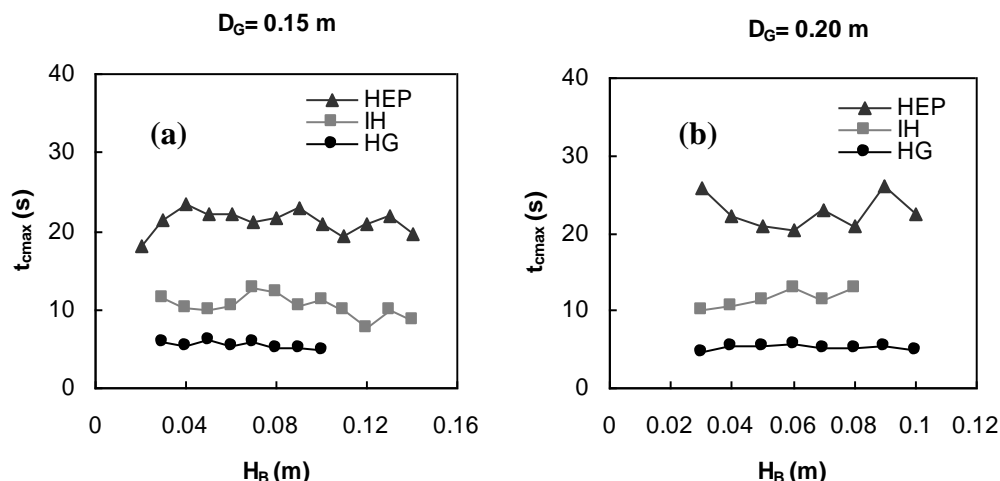
4.10. Irudia. Iturri bilgailuaren eta ohantzearen arteko hutsunea (H_B) emarian sortzen duen aldaketa diametro txikiko (a) eta diametro handiko (b) iturri bilgailurako.

4.10 Irudian antzematen da iturri bilgailuaren eta ohantzearen arteko hutsunea (H_B) handitzeak emariaren txikitzea sortzen duela sistema eta iturri bilgailu ezberdinetarako. Hau gertatzen da, lehen aipatu den moduan, H_B handitzerakoan iturri bilgailuaren barruko karga galera egonkorra txikitu egiten delako eta horrek emari txikiagoa behar izatea eragiten du. Efektu honen zergatia 4.8 Irudian azaldu da.

4.10 Irudiko bi grafikoak konparatuz, 0.20 m-ko iturri bilgailua erabiltzen denean hiru sistema ezberdinetarako ikusi den antzeko joera ikus daiteke, baina 0.15 m-ko iturri bilgailua erabiltzen denean aldiz, zenbait gorabehera daude. Azken joera hauek errore esperimentalei esleitzen zaizkie.

Aurreko bi grafikoetan bezala H_B egokiena emari txikienari dagokio. Kasu honetan H_B hoberena 0.15 m-ko iturri bilgailudun sistemarako 0.09-0.10 m artean dago eta 0.20 m-ko iturri bilgailudun sistemarako 0.06-0.08 m artean dago.

Iturri bilgailuaren eta ohantzearen arteko hutsunea (H_B) ziklo denbora maximoan sortzen duen eragina 4.11 Irudian erakusten da iturri bilgailuaren diametro txikira eta handirako.



4.11. Irudia. Iturri bilgailuaren eta ohantzearen arteko hutsunea (H_B) ziklo denbora maximoan sortzen duen eragina diametro txikiko (a) eta diametro handiko (b) iturri bilgailurako.

4.11 Irudian joera ezberdin samarrak agertzen diren arren, oro har iturri bilgailuaren eta ohantzearen arteko hutsunea (H_B) handiagoa denean ziklo denbora maximoa handiagoa da. Hormako ziklo denborak, partikulek egiten dituzten ziklo luzeenak dira eta, normalean, euren artean oso antzekoak dira. Horregatik, 4.11 Irudiko zenbait joera ia konstante mantentzen dira hormako zikloa oso gutxi aldatzen baita. 4.11 Irudiko grafikoetan antzeman daitezkeen gorabeherak errore esperimentalei dagozkie.

Zirkulazio azkarra (ziklo denbora maximo laburrak) nahi izanez gero, H_B egokiena 0.03-0.09 m artean dago eta, aldiz, zirkulazio geldoa (ziklo denbora maximo luzeak) nahi bada, H_B egokia 0.04-0.09 m artean dago.

Grafiko guztiak aztertu ostean, H_B -ren baliorik egokiena zenbait baldintza bete behar ditu, hala nola, arraste maila, emaria eta karga galera egonkorraren baliorik txikienak, eta ziklo denbora maximoaren bitarteko balioak. Baldintza horiek betetzen dituen hutsunea (H_B) 0.08 m-koa da.

4.2.3.2. Arraste saiakuntzen zinetika

Arraste emaitzen azterketa osatzeko eta kualitatiboki ikusi diren joerak balioztatzeko asmoz, arraste zinetika ateratzeko saiakuntzak egin dira. Horretarako, arraste saiakuntzak egiteko erabili den antzeko prozedurari jarraitu zaio zenbait aldaketarekin.

Lehen aipatu bezala, arraste esperimentuek hogeita hamar minutu irauten dute. Denbora tarte honetan, 5 minuturo esperimentuan gertatzen denaren jarraipena egin da. Hala, lehenengo saiakuntzan, bost minutu pasatu direnean gelditu da saiakuntza, eta arrastea neurtu da. Bigarren saiakuntzan berriz berdina egin da baina hamar minutu igaro direnean gelditu da saiakuntza. Horrela jarraitu da zinetikaren ikerketa seigarren saiakuntzan hogeita hamar minutu aztertu direlarik. Saiakuntza gelditu den bakoitzean, ohantzea tamizatu egin da eta gertatu den arrastea kalkulatu da, eta hurrengo esperimenturako prestatu da nahastea. Aipagarria da, saiakuntza bakoitzerako prestatu den nahasteak hasierako kantitate eta proportzio berberak izan dituela, saiakuntza

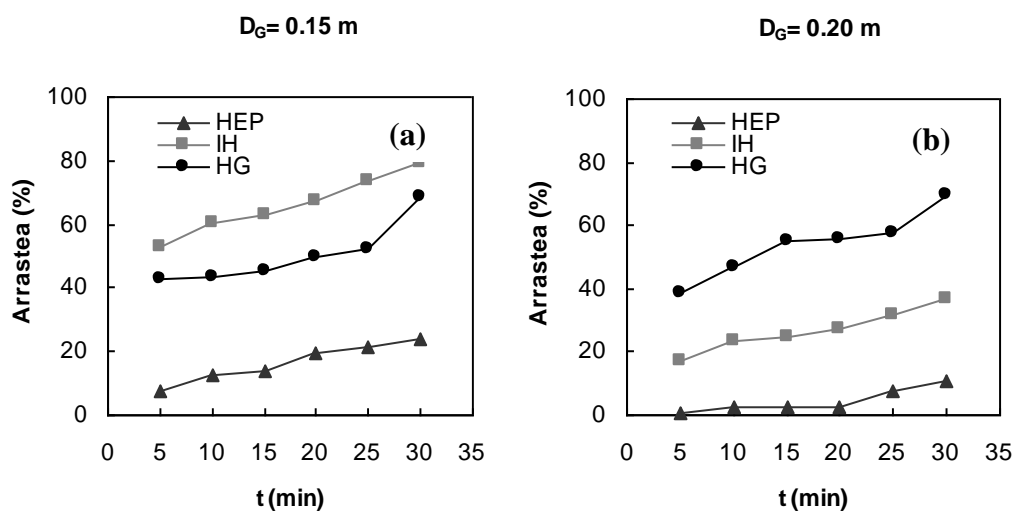
guztietan baldintza berberak bermatzeko. Prozedura honi jarraitzearen zergatia ohantzea apurtzean gertatzen den eraginean dago. Hau da, aurreko saiakuntzako nahastea sartzen bada berriro kontaktorerara, hurrengo bost minututan arrastatzen dena ez da behar den moduan neurtzen (gehiegi arrastatzen da), ohantzea berriz ere apurtu behar baita. Lehen adierazi den bezala, ohantzea apurtzen denean gertatzen da arrasterik handiena. Beraz, saiakuntza hori ez litzateke adierazgarria izango.

Atal honetan, saiakuntzak tamaina ezberdineko iturri bilgailuekin eta erdiko hodi mota desberdinekin eta erdiko hodirik gabe egin dira. 0.15 m-ko diametroa (DG15) eta 0.20 m-ko diametroa (DG20) duten iturri bilgailuak erabili dira. Iturri bilgailurik gabe ez da zinetikarik aztertu, arraste esperimenduak egiterakoan begi bistaz ikusi baita lehenengo bost minutuan partikula fin denak arrastatu direla eta, beraz, ez du merezi hurrengo minutuetan arrastatzen dena kalkulatzeko. Saiakuntzak hodi ez-porotsua (HEP) erabiliz, irekiduradun hodia (IH) eta erdiko hodirik gabe (HG) egin dira. Zinetika aztertzeko erabili diren erdiko hodiak arraste saiakuntzetan erabilitako berberak izan dira.

Zinetika ateratzeko, arraste saiakuntzetan erabili diren aldagai berberak mantendu dira konstante (esperimenduak euren artean konparagarriak izan ahal izateko). Hala, esperimenduak 45°-ko kontaktorean eta 0.04 m-ko gasaren sarrerako diametroarekin egin dira. Erdiko hodiaren dimentsioei dagokionez, 0.04 m-ko diametroa, 0.27 m-ko altuera, 0.018 m-ko hanken zabalera (irekiduradun hodiaren kasuan) eta 0.07 m-ko hanken luzera (hodi ez-porotsuen kasuan) izan dira.

Iturri bilgailuaren eta ohantzearen gainazalaren arteko hutsunearen (H_B) balio bakarra erabili da, hots 0.04 m-koa, H_B gehienetarako joera berbera errepikatzen baita.

Nahiz eta zinetikaren kalkulurako saiakuntzak egitean emaria, karga galera egonkorra, ziklo denbora maximoa eta arrastea jaso diren (arraste saiakuntzetan bezala), azkenengoa baino ez da irudikatu beste parametroek ia ez dutelako eraginik izan. 4.12 Irudian ikus daiteke elikatu den kantitatetik arrastatu den portzentajea iturri bilgailu txikirako (a) eta handirako (b).



4.12. Irudia. Elikatu den kantitatetik arrastatu den portzentajea diametro txikiko (a) eta diametro handiko (b) iturri bilgailurako.

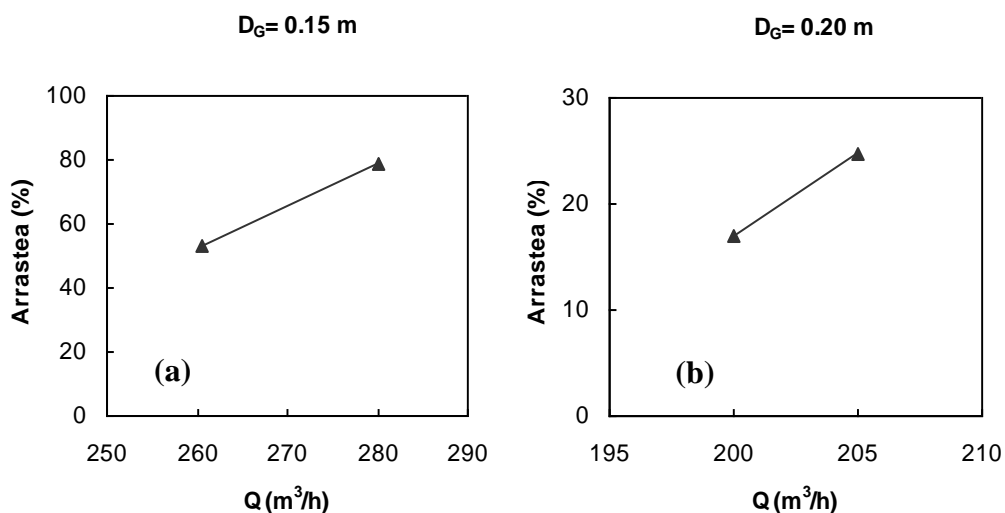
4.12 Irudian ikus daitekeenez, hiru sistema eta iturri bilgailu guztietarako joera gorakorra da, hau da, denbora igaro ahala arrastatua izan den portzentajea geroago eta handiagoa da. Joera hau beirazko bolen eta ogi arrailatuaren arteko talken ondorioa da ogi arrailatu partikulak geroago eta finago egiten baitira eta, beraz, errazago dira arrastatuak.

Kualitatiboki ikusienez, arraste handiena saiakuntzaren hasieran gertatzen da. 4.12 Irudian antzeman daitekeenez, lehen bost minututan gertatzen da arraste portzentajerik handiena. Ondoren, arrastaturiko kantitatea geroago eta handiago den arren, portzentajeren igoera apalagoa da. Izan ere, aurretik esan den legez, ohantzea apurtzen denean (esperimentuaren lehenengo bi minututan gutxi gorabehera) gertatzen da arraste handiena.

Dena den, 4.12 Irudiko (a) grafikoan ikus daitekeenez, 0.20 m-ko iturri bilgailua eta erdiko hodi ez-porotsua duen sistemarako aurreko paragrafoan azaldutakoa ez da betetzen, hasierako bost minututan oso gutxi arrastatzen baita eta geroago era linealean egiten baitu gora arraste portzentajeak. Efektu honen zergatia erabilitako erdiko hodian dago. Aurreko ataleko 4.6 Irudiko (a) grafikoan hodi ez-porotsuak arraste gutxien eragiten dituzten hodiak direla ikusi eta arrazoitu da. Era berean, 4.12 Irudiko (b) grafikoan ere antzeman daiteke hodi ez-porotsudun sistemek arraste txikiena dutela.

Ildo beretik, 4.12 Irudiko grafikoetan argi ikusten da arrastea ezberdina dela erabiltzen den iturri bilgailuaren diametroaren arabera. Hala, 0.15 m-ko iturri bilgailurako arraste portzentajerik handienak irekiduradun hodiekin dituzte eta jarraian hoderik gabekoekin. 0.20 m-ko iturri bilgailurako, aldiz, arraste baliorik handienak hoderik gabekoekin dituzte, eta ondoren irekiduradunek. Bi iturri bilgailuetarako, hodi ez-porotsuek eragiten dute arrasterik gutxien. 4.6 Irudiko (a) histograma azaldu denean, 0.20 m-ko iturri bilgailurako ordena bera antzeman zen. Beraz, pentsa daiteke 0.15 m-ko iturri bilgailua erabiliz gertatzen den ordena ezberdina, irekiduradun hodiaren eta iturri bilgailu hain txikiaren arteko efektoren bat izatea.

Amaitzeko, 4.13 Irudian zinetikarako saiakuntzak egitean antzeman den arrastearen eta elikatutako aire emariaren arteko eragina azalduko da.



4.13. Irudia. Arrastearen eta elikatutako aire emariaren arteko efektua diametro txikiko (a) eta diametro handiko (b) iturri bilgailurako.

4.13 Irudiari erreparatuz, arraste gehiago sortzen da esperimentu berbera emari altuagoan egitean. Emaria handiagoa denean erregimena zurrumbilotsuagoa da eta, beraz, ohantzearen zirkulazioa azkarragoa da. Izan ere, emari altuetan lortzen den beirazko bolen eta ogi arrailatuaren arteko elkarrekintza bortitzagoa da eta ogi arrailatuaren partikulak geroago eta finago dira eta, ondorioz, errazago arrastatuak dira. Eragin hau erdiko hodi guztiekin gertatzen da, baina adibide moduan irekiduradun hodiekin lortutako datuak bakarrik irudikatu dira, bertan antzematen baita hobekien.

5. Kapitulu

5. APLIKAZIOAK: LEHORKETA OPERAZIOA

5.1. LEHORKETA OPERAZIOA

5.2. LEHORKETA OPERAZIOAREN PROZEDURA ESPERIMENTALA

5.3. LEHORKETA OPERAZIOAREN EMAITZAK

5. APLIKAZIOAK: LEHORKETA OPERAZIOA

Aurreko ataletan egin den moduan, lehenengo lehorketa operazioari buruzko laburpen bibliografikoa egingo da, ondoren lehorketa saiakuntzen prozedura esperimentalak deskribatuko da eta azkenik, egin diren lehorketa saiakuntzak aurkeztuko dira.

Iturri ohantzearen aplikazio ezberdinen artean, lehorketa saiakuntzak egin dira, aurretik ikerketa taldean egin diren saiakuntzei jarraipena emanez. Lan honetan, iturri bilgailuaren erabilerak lehorketan izan ditzakeen hobekuntzak aztertzea izan da helburua, aurreko atalean aipatu diren iturri bilgailuaren abantailengatik egokia baitirudi lehorketa modu hobean gerta dadin. Abantaila hauen artean, gasaren eta solidoaren arteko kontaktu ezin hobe aipatu behar da, horixe izan delarik hain zuzen ere lehorketarako funtsezko parametroa.

Emaitzen atalean, tesi honetan egin diren lehorketa saiakuntzak aurreko tesi batean (Altzibar, 2011) egindakoekin konparatu nahi izan dira iturri bilgailuaren eragina aztertzeko. Konparazioa ezin izan da kasu guztietan egin, ekipoaren osagai batzuk aldatu egin direlako. Beraz, Altzibar-en tesian egindako esperimentuak errepikatu dira, baina soilik giro tenperaturarako. Hala ere, aurreko tesiko esperimentuak oinarri edo orientazio modura erabiliko dira. Aipagarria da, tesi horretako lehorketaren informazioa bi artikulutan bilduta argitaratu izan dela (Altzibar et al., 2008, 2011).

5.1. LEHORKETA OPERAZIOA

Lehorketa operazioari buruz bibliografian aurki daitekeen informazioa ugaria denez, atal honetan iturri ohantzeari lotutako informazioa bereziki ezagutaraziko da.

Ingeniaritza kimikoko operazio zaharrenetarikoa da lehorketa. Lehorketa, laburki azalduta, produktu solidoari substantzia hegazkorra (hezetasuna) kentzean datza. Solido heze bat tenperaturaren eraginez lehortzen denean, bi prozesu gertatzen dira aldi berean:

1. Ingurumenarekiko energia transferentzia (gehiengoa bero moduan), gainazaleko hezetasuna lurruntzeko.
2. Barneko hezetasunaren transferentzia solidoaren gainazalera eta ondorengo lurrunketa lehenengo prozesua jarraituz.

Lehorketa emaria bi prozesu horien menpe dago eta ingurumenetik solido hezerako energia transferentzia konbekzio, kondukzio edo erradiazioaren ondorioz gertatzen da.

Lehorketa operazioa da egiten diren banaketa prozesuen artean energia kontsumo handienetakoa duena. Lehorketak energia asko kontsumitzen du, lurruntze bero sorra altuagatik eta lehortzeko aire beroa erabiltzen delako. Beraz, lehorketa egiteko, prozesuaren diseinuan energiaren kontsumoa optimizatu behar da halaberrez. Lehorketa operazioaren efikazia handitzeko bideetako bat, ahalik eta aire kantitate txikiena erabiliz gasaren eta solidoaren arteko kontaktu egokiena duten metodoez baliatzean datza.

Lehorgailu industrialak erabiltzen duten bero transferentziarako mekanismo nagusiaren arabera desberdintzen dira. Kasu gehienetan beroa solido hezearen gainazalera transferitzen da eta ondoren barnealdera. Beraz etapa bi gertatzen dira lehorketan:

1. etapa, kanpoko baldintzen (tenperatura, airearen hezetasuna eta emaria, gainazalaren azalera eta presioa) menpekoa da eta materialaren gainazaletik lurrin moduan gertatzen da uraren eliminazioa.
2. etapan, solidoaren barnean gertatzen da hezetasunaren mugimendua, solidoaren izaera fisikoaren, tenperaturaren eta bere hezetasun edukiaren funtzioa da.

Amaieran solidoak izan behar duen hezetasun edukiak mugatzen ditu lehorketaren denbora eta lehorketarako beharrezko baldintzak. Gehienetan, bukaerako hezetasun edukiaren aukera biltegitratze beharren arabera da (Mujumdar, 2006). Aipagarria da, lehorketa operazioa produktuaren garraioa eta biltegitratze kostea gutxitzeko modu bat dela (Krishnaiah et al., 2014).

Lehorketa egiten den ekipoei erreparatzen bazaie, lehorgailuak bero transferentziarako mekanismoaren eta lehorketa egiten den ontziaren arabera dira. Lehorgailu mota asko daude, hala nola, bibliografian 500 mota dagoeneko argitaratu dira (Mujumdar eta Law, 2010).

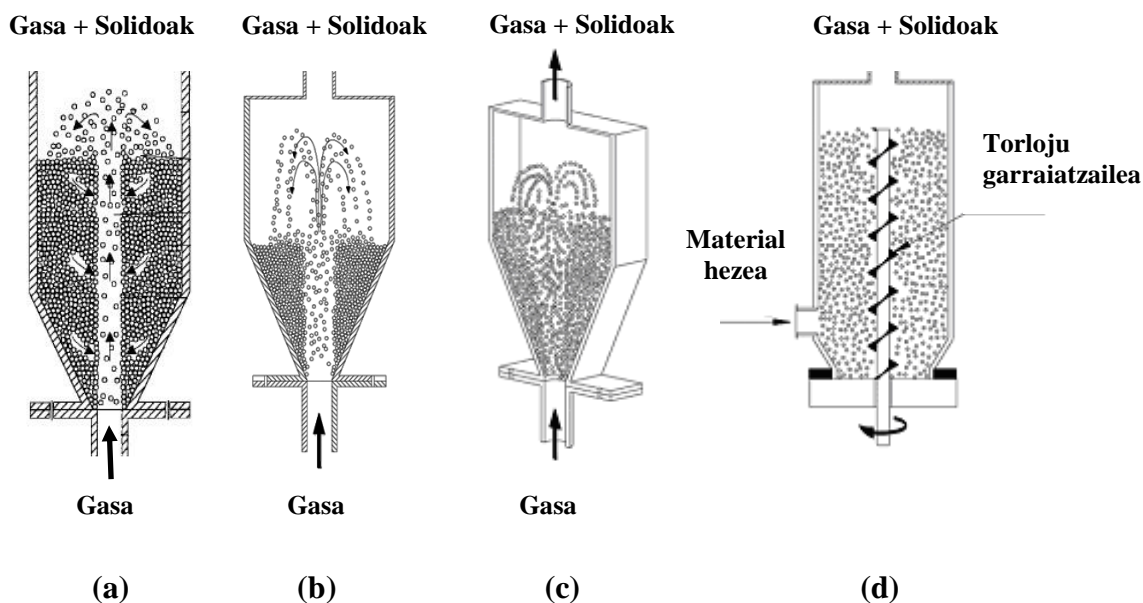
Iturri ohantzean oinarrituriko lehorgailuek ohiko lehorgailuekin konparatuz abantaila asko eta zenbait muga dituzte. Iturri ohantzeek iturgunean duten egoitza denbora laburratetik beroari sentikorrek diren solidoak (janaria, produktu farmazeutikoak, plastikoak...) lehertzeko erabili daitezke. Horretaz gain, iturri ohantzeak beroari sentikorrek diren materialekin lan egiteko egokiak dira bero transferentzia ona dutelako, isotermikoak direlako (Freitas eta Freire, 2001a), eta lehorketa tenperatura baxuetan ere lehorketa eraginkorra egin dezaketelako (Sahin et al., 2013).

Bestalde, iturri ohantzean oinarrituriko lehorgailuen desabantailen artean hurrengoak daude (Mujumdar, 1984): martxan jartzeko arazoak, erlazio geometriko mugatuak, partikula handien zirkulaziorako behar den aire emari altu samarra eta eskala handitzeko arazoak. Dena den, iturri ohantzeen eragozpen asko saihestu edo murriztu ahal dira zenbait iturri ohantzeen aldaera erabiliz. Iturri ohantzeen aldaketa simple batekin nahasketa ona, egoitza denbora kontrolatua, atrizio minimoa eta beste ezaugarri desiragarriak bermatzen dira (Mujumdar, 2006).

Ohiko iturri ohantzeak (zutabe geometria koniko-zilindrikoa dutenak) pilotu eskalan baino ez dira erabili lehorketarako hurrengo bi eragozpenengatik (Epstein eta Grace, 2011):

- Ohiko iturri ohantzeen kapazitatea (tratatu ahal den kantitatea) ohantzearen sakonerak eta zutabearen diametroak mugatuta dago.
- Ohiko iturri ohantzeen eraginkortasuna murriztuta dago iturkuntza erregimenaren baldintzen arabera.

Ohiko iturri ohantzean oinarrituriko lehorgailuen bolumen muga gaintzeko, bibliografian iturri ohantzeen beste konfigurazio batzuk proposatu dira (Passos et al., 1994; Pallai et al., 2006). Lehorgailuen konfiguraziorik erabilgarrienak hauexek dira: ohiko iturri ohantzea, iturri ohantze konikoa, bi dimentsiotako iturri ohantzea eta iturri ohantze mekanikoa (5.1 Irudia).



5.1. Irudia. Lehorgailu erabilgarrienak (a) ohiko iturri ohandzea, (b) iturri ohandze konikoa, (c) bi dimentsiotako iturri ohandzea eta (d) iturri ohandze mekanikoa (Freire et al., 2012b).

5.1 Irudiko konfigurazio guztietan egonkortasuna handitzeko eta iturritu daitekeen ohandzearen altuera maximoaren muga ekiditeko erdiko hodia erabiltzen da iturri ohandze mekanikoan izan ezik. 5.1 Irudiko konfigurazioen deskribapen zehatzagoa bibliografian aurki daiteke (Da Rosa eta Freire, 2009; Wang et al., 2006; Alzibar et al., 2013, 2014).

Iturri ohandzeen teknologia lehorketarako egokia da fluidizatuak izateko handiegia diren partikulak manipulatzeko ahalmena duelako, eta bero eta masa transferentzia ona duelako (Cui eta Grace, 2008).

Iturri ohandze konikoek segregazio baxua dute (San José et al., 1994), hau da, tamaina distribuzio zabala duten partikulekin lan egitea ahalbidetzen dute egonkortasun arazorik gabe. Ezaugarri hau lehorketarako oso interesgarria da. Gainera, iturri ohandze konikoak ohiko lehorgailuen alternatiba dira bero transferentzia eraginkorra eta masa transferentzia abiadura handiak eragiten dituztelako, eta diseinu sinplea dutelako (Olazar et al., 2011). Iturri ohandze konikoek duten solidoaren zirkulazio emari altuak ohandzeko hezetasuna eta tenperatura uniformeak izatea eragiten du lehorketa prozesuen errendimendua hobetuz (Swasdisevi et al., 2004).

Erdiko hodiak ohiko iturri ohandzea eraikitzeke erraza eta lehorgailu eraginkorra dela frogatu da (Costa et al., 2001; Kfuri eta Freitas, 2005). Lehorgailu mota honek gasaren eta solidoaren arteko kontakturako fase-arte azalera handia, bero eta masa transferentzi koefiziente altuak eta ekoizpen emari altuak ahalbidetzen ditu. Beraz, erdiko hodiak iturri ohandze konikoak solido finak lehertzeko funtzionamendu egokia du (Olazar et al., 2011).

Lehorketa prozesuetan erdiko hodi porotsuaren aukera interesgarria izaten da. Izan ere, erdiko hodi porotsuak iturgunetik eraztungunera pasatzen den gas emaria handitzeko

erabiltzen dira eta, beraz, eraztungunean bero transferentzia handiagotzen da (Wang et al., 2010b). Erdiko hodi porotsuak hodi ez-porotsuekin konparatzen badira, gas-solido ukipen hobe sortzen dute, eta zirkulazio emari altuagoak lortzen dira (Nagashima eta Ishikura, 2009).

Lehorketarako iturri ohantzeen portaera hobetzeko beste aukera bat irekiduradun erdiko hodiak erabiltzea da. Erdiko hodi mota honek iturgune eta eraztungunearen arteko gas eta solido transferentzia ahalbidetzen du. Gailu hau erabiliz lortutako gas-solido ukipena erdiko hodi porotsua erabiliz lortzen dena baino hobe da, eta sortzen diren iturriak baxuagoak eta dentsuagoak dira. Ondorioz, irekiduradun hodia erabiltzeko behar den kontaktorearen bolumena txikiagoa da (Altzibar et al., 2009).

Passos et al.ek (1994) iturri ohantze lehorgailuak diseinatzeko oinarriak eta irizpideak proposatu eta eztabaidatu zituzten. Beraien ondorioek lehorgailuen kapazitate (tratu ahal den kantitatea) maximoa eta eraginkortasuna zutabe geometriaren menpe ez ezik, partikularen ezaugarrien (tamaina, itxura, porotasuna eta dentsitatea) menpekoa ere bazela frogatu zuten.

Operazio kostuaren eta eraginkortasunaren arteko erlazioa kontuan izanik, eta ohiko lehorgailuekin konparatuz, iturri ohantzea etorkizun handiko teknika bihurtu da orean lehorketarako (egokiak diren inerteak erabiliz) eskala txikian (Passos et al., 1997). Iturri ohantzean oinarrituriko lehorgailuetan solidoen nahasketa ona gertatzen da sortzen den gas-partikula ukipen onari esker (sistemaren bero eta masa transferentziaren emari altuak sustatzen dituena), lehorketa errendimendua hobetzen delarik (Epstein eta Grace, 1997). Dena den, Passos et al. (1997) konturatu ziren iturri ohantzearen zenbait alderdi teknikoak, hala nola, iturkuntza erregimenaren ezegonkortasunak eta partikulen aglomerazioak, bere aplikazio praktikoa oztopa zezaketela. Arazo horiek gainditzeko bide bat ohantzean material bakoitzerako operazio baldintza hoberenak lortzean datza. Hala, lehorketa fenomenoak hobeto ezagutzeko lortuko litzateke iturri ohantzearen portaera fluidodinamikoaren modelaketarako (Bacelos et al., 2005).

Iturri ohantzeak produktu farmazeutikoak lehortzeko erabiltzen direnean bere eskala handitze arazoek garrantzia gutxiago dute produktu horiek normalean eskala txikikoak direlako (Pakowski eta Mujumdar, 1995). Eskala txikiko ekoizpenean, iturri ohantzea lehiakorra da (Marreto et al., 2006). Adibidez, ikerlari batzuek (Passos et al., 1997; Jono et al., 2000) Wurster ganbara (1950etik produktu farmazeutikoen estaldurarako eta aleketarako erabili den ekipamendua) erdiko hodidun iturri ohantzearen baliokidea dela uste dute eta txosten askok iturri ohantzeen bideragarritasuna pilulak estaltzeko frogatu dute (Espinaco eta Freitas, 2004). Brasilen egindako zenbait ikerketaren arabera iturri ohantzeek etorkizun handia dute landare sendagarrien estraktuak (Shuhama et al., 2003) eta mikrokapsulak (Baracat et al., 2004) lehortzeko.

Merkatuaren lehiakortasuna dela eta, oso zaila da prozesu baten garapena eredu matematiko fidagarriak erabili barik egitea (Da Silva et al., 2014). Bibliografian, produktu ezberdinen lehorketa zinetika ikertzen saiatu dira zenbait ikerlari. Ikerketa horiek prozesua simulatzeko eredu matematikoen garapena suposatzen dute. Lehorketa prozesuen modelaketa matematikoa hurbilketa enpiriko, teoriko edo erdi teorikoetan oinarritzen da. Eredu teorikoek difusio ekuazioa edo aldibereko bero eta masa transferentzi ekuazioak erabiltzen dituzte. Hurbilketa erdi teorikoek, aldiz, ekuazio teoriko hurbilduak aipatzen dituzte. Lehorketa simulatzeko ekuazio enpirikoak

erabiltzeko errazak dira eta asko erabili dira (Afzal eta Abe, 2000). Ostera, modelakuntza oinarri fisikoetan soilik egitea zaila da ekipamendu mota ezberdinek, elikaduraren ezaugarri heterogeneoek, bero eta masa transferentzien mekanismoek eta lehorketa prozesuaren bilakaeran gertatzen diren propietate aldaketek zailtzen baitute. Hori dela eta, enpirismoren bat sartu beharra dago (Cubillos et al., 1996).

Lehorketa prozesuaren simulazioa eta optimizazioa, lehorgailuen dimentsio egokiak eta baldintza esperimentalak lortzeko era onena da (Epstein eta Grace, 2011). Matematikoki, lehorgailu batean parte hartzen duten prozesu guztiak ez-linealak dira. Horregatik, lehorgailuen eskala handitzea oso zaila da (Mujumdar, 2006).

Zenbait artikulu argitaratu dira erdiko hodiekin lehorketa parametroei nola eragiten dieten simulatzeko (Szafran et al., 2005; Neto et al., 2008; Azizi et al., 2010; Olazar et al., 2011), hala nola, Correa et al.ek (2012) lehorketa prozesuetara aplikatutako kontrol sistemaren ezaugarri nagusien laburpena aurkeztu zuten. Laburpen horretan kontrol sistemaren diseinuan zehar kontuan hartu behar ziren faktoreak ikertu ziren. Hala ere, lehorketa ereduak ez dute iturri ohantzeko lehorketan zehar gertatzen den fenomeno fisikoaren eskala anitzeko integrazioa ahalbidetzen. Horregatik, lehorketa ereduak mugatuak izaten jarraitzen dute eta ez dira behar bezain zabalak beraien erabilera orokorra ahalbidetzeko (Epstein eta Grace, 2011).

Tesi honen sarrera atalean dagoeneko aipatu da iturri ohantzeen lehenengo aplikazioa gari aleen lehorketa izan zela. Hortik aurrera, material oso ezberdinak lehortu dira, besteak beste, ore farmazeutikoak (Marreto et al., 2006), almidoi landare soluzioak (Benali eta Amazouz, 2006), zerrautsa (Berghel et al., 2008), harea (Altzibar et al., 2008, 2011), azenarioak (Aversa et al., 2012), haziak (Jittanit et al., 2013), banana berdeen lorea (Bezerra et al., 2013), lokatzak (San José et al., 2013), ilar haziak (Sahin et al., 2013), esnea eta masusta pulparen ore nahasketa (Braga eta Rocha, 2015) eta guaiba (De Alsina et al., 2014). Horretaz aparte, material inertez (harea edo plastikoa esate baterako) osaturiko ohantzea erabili izan da iturri ohantzeetan ore, esekidura eta disoluzioak lehortzeko (Taruna eta Jindal, 2002; Correa et al., 2004; Passos et al., 2004; Marmo, 2007). Inerte horiek orearen euskarri bezala eta lehorketarako energia-iturri moduan jokatzeko dute (Braga eta Rocha, 2013).

Honen guztiaren ondorioz, argi dago iturri ohantzean oinarrituriko lehorgailuak balioko direla industria mota ezberdinetan (elikagaigintzan, nekazal-industrian, industria farmazeutikoan eta abarretan) aplikatzeko.

Gure ikerketa taldean, aspaldi aztertzen ari den aplikazioa da lehorketa. Altzibar et al.ek (2008) erdiko hodidun iturri ohantze konikoaren portaera aztertu zuten partikula finen lehorketarako. Operazio ez-jarraituan eta giro tenperaturan lan egin zen hodi porotsu, hodi ez-porotsu eta irekiduradun hodiak erabiliz, lehorketarako erdiko gailuaren konfigurazio hobereana determinatzeko.

San José et al.ek (2010) paper industriako hondar-lokatzak lehortzeko iturri ohantze konikoaren baliagarritasuna determinatu zuten operazio baldintza egonkorrek zehaztuz eta sarrerako gasaren tenperaturak ohantzearen egonkortasunean zuen eragina aztertuz (25-140 °C tartean). Lokatzen hezetasunaren bilakaera neurtu zen denboran zehar eta sarrerako gasaren tenperaturak, gasaren sarrerako diametroak eta kontaktorearen angeluak lehorketa denboran zuten eragina aztertu zen.

Olazar et al.ek (2011) masa balantzeetan oinarritutako eredu bat garatu zuten eraikuntzarako harea lehortzeko prozesuan erdiko hodi ez-porotsudun iturri ohandte konikoen portaera aurreratzeko. Ereduak gas eta solido faseen hezetasun edukiaren bilakaera aurreratu du denborarekiko. Ereduaren egokitasuna frogatzeko ereduaren datuak emaitza esperimentalekin konparatu ziren.

Altzibar et al.ek (2011), erdiko hodi ez-porotsua eta irekiduradun hodia duten iturri ohandte konikoaren portaera ikertu zuten partikula finak lehortzeko, operazio ez-jarraituan eta tenperatura ezberdinetan. Emaitzak erdiko hodirik gabe lortutakoekin konparatu ziren. Tenperaturaren eragina aztertzeke lehorketa esperimentuak 25 eta 300 °C bitartean egin ziren.

San José et al.ek (2011) iturri ohandte konikoaren baliagarritasuna ikertu zuten nekazal-hondakinen nahasketen lehorketarako, operazio baldintza egonkorak eta tenperatura baxuak erabiliz (25-50 °C tartean). Hezetasun edukiak eta sarrerako gasaren tenperaturak ohandtearen egonkortasunean zuten eragina aztertu zuten. Lehorketan eragin handiena zuten faktoreak aditzera eman ziren.

Olazar et al.ek (2012) iturri ohandte konikoan oinarrituriko planta pilotuan aztertu zuten zerrautsaren lehorketa. Aire tenperatura ezberdinak erabili ziren, eta zerrauts partikula tamainaren eta operazio gasaren abiaduraren eragina ikertu zen. Operazio ez-jarraituan lan egin zen erdiko hodirik gabe, erdiko hodi ez-porotsua eta irekiduradun hodia erabiliz kontaktorearen konfigurazio optimoa aurkitzeko helburuarekin.

San José et al.ek (2013) pulpa eta paper industriako hondar-lokatzen lehorketa aztertu zuten iturri ohandte konikoan. Hezetasunaren bilakaera eta ohandtearen egonkortasunean operazio parametroek zuten eragina ikertu zen lehorketa tenperatura ezberdinetarako (25-140 °C).

Pablos et al.ek (2015b) harea fina eta ultrafina fluidizatu eta lehortu zituzten iturri ohandte konikoan iturri bilgailua erabiliz. Esperimentuak erdiko hodirik gabe, hodi ez-porotsua eta irekiduradun hodia erabiliz egin ziren.

Freire et al.ek (2016) hondar-laranja azalaren lehorketa egin dute iturri ohandte konikoan, ondoren modelatzeko helburuarekin. Saiakuntzak 70 °C, 80 °C eta 90 °C-tan egin ziren eta sarrerako emaria iturkuntza minimoa baino %70 handiagoa izan zen. Bi faseko nahasketa perfektuko erreaktorearen ereduak garatu ziren.

Bukatzeke, iturri ohandte konikoa erabiliz eginiko lehorketa operazioaren inguruan argitaratu diren azken ikerketak aipatuko dira. Spreutels et al.ek (2014) garagardo legamiaren lehorketa esperimentuak egin zituzten iturri ohandte konikoan. Garagardo legamiaren lehorketa deskribatzeko, ikertzaile hauek eskala anitzeko eredu berri bat aurkeztu zuten. Perazzini et al.ek (2015) esne gaingabetuaren lehorketa prozesua iturri ohandte konikoan aztertu zuten, ohandte geometria eta operazio baldintza ezberdinen funtzio bezala. Inerte moduan polietilenoazko partikulak erabili zituzten. Mussi et al.ek (2015) airearen tenperaturaren eta abiaduraren eragina jambilao hondakinaren (azala eta haziak) lehorketa zinetikan deskribatu zuten. Chielle et al.ek (2016) olio ekoizpenerako papaya hazien lehorketa egin zuten. Azken autore horiek zenbait operazio aldagai ikertu zituzten hezetasunaren behar-kuntza eta olioaren ekoizpena hobetzeko. Alves et al.ek (2016) laranja zuku probiotikoa lehortu zuten iturri ohandtean

eta lehorketa teknika honek mikroorganismo biziraupenean eta propietate fisikokimikoetan duen eragina ebaluatu zuten.

5.2. LEHORKETA OPERAZIOAREN PROZEDURA ESPERIMENTALA

Lehortu den materiala eraikuntzarako harea da. Lehen aipatu bezala, lan honen helburua iturri bilgailua erabiliz egindako lehorketa esperimentuak aurretik bilgailu barik egindakoekin alderatzea da material berbera erabiliz.

Eraikuntzarako harearen deskribapena 2.2 Atal esperimentalean aurkeztu da. Erabili den harea harrobitik zuzenean ekarria da. Harrobitik ateratzean hareak %6 eta %10 bitarteko hezetasuna du, baina eraikuntzan erabili ahal izateko 0.0005 kg ur/kg solido lehor izan arte lehortu behar da. Atal esperimentalean agertzen den 2.12 Irudian ikus daitekeen bezala, harea banaketa granulometrikoa duen partikula finez osatuta dago, eta batez besteko partikula diametroa 0.0006 m-koa da. Gainera, lehorketa saiakuntzak giro tenperaturan egin dira.

Aurreko atalean aipatu da harea bezalako materialak lehortzeko ezaugarririk onenak dituen lehorgailua erdiko hodidun iturri ohantzea dela, eta frogaturik dago eraikitze sinplea eta efikazia handiko lehorgailua dela (Passos eta Mujumdar, 1989). Gainera, materialek partikula tamaina banaketa dutenean, ohantze fluidizatuak eta iturri ohantze zilindrikoak dituzten eragozpenak gainditzeko gai da erdiko hodidun iturri ohantzea.

Iturri ohantze konikoak erabiltzen direnean, erdiko hodirik gabe operazio egonkorrean lan egiteko $D_0/d_p \leq 20-30$ erlazioa bete behar da (Olazar et al., 1992). Kasu honetan, erabili den harearen batez besteko partikula diametroa 0.0006 m-koa da eta gasaren sarrerako diametroa 0.04 m-koa da. Beraz, D_0/d_p erlazioa 66.6 da eta, ondorioz, ezin dira saiakuntzak egin erdiko hodirik gabe.

Esperimentuak hiru erdiko hodi mota ezberdinak erabiliz egin dira, hala nola, erdiko hodi porotsua (HP), erdiko hodi ez-porotsua (HEP) eta irekiduradun hodia (IH). Saiakuntzak 36°-ko angelua duen metakrilatozko kontaktorean egin dira 2.1.1 Atal esperimentalean deskribatutako emari ertainetarako ekipoa.

Saiakuntzak egiteko erabili diren erdiko hodien dimentsioak hurrengo taulan erakusten dira aurretik frogatu baita erdiko hodien dimentsio horiek sistema egonkor egiten dutela.

5.1. Taula. Erdiko hodiak dimentsioak.

Erdiko hodia	D_T (m)	W_H (m)	Irekidura portzentajea (%)	L_T (m)	L_H (m)
Hodi porotsua	0.04	—	80	0.17	0.02
Hodi ez-porotsua	0.04	—	0	0.22	0.07
Hodi ez-porotsua	0.04	—	0	0.22	0.15
Irekiduradun hodia	0.04	0.025	42	0.22	0.07
Irekiduradun hodia	0.04	0.018	57	0.22	0.07
Irekiduradun hodia	0.04	0.010	79	0.22	0.07

5.1 Taulan erakusten da ikertu diren erdiko hodiak sei konfigurazioak. Konfigurazio horien artean hodi porotsu bat, bi hodi ez-porotsu eta hiru irekiduradun hodi daude. Hodi ez-porotsuek hanken luzera ezberdina dute eta irekiduradun hodiak hanken zabalera edo irekidura portzentajea. Azpimagarria da, lehorketarako erabili diren erdiko hodiak diseinatutako berriak direla. Tesiko 2.1.2.1 Atal esperimentalean erdiko hodi berrien irudiak eta azalpen zehatzagoa agertzen da.

Lehorketa esperimentuetan erabili den iturri bigailua, aurreko lanetan egindako esperimentuetan oinarriturik lehorketarako aproposen gisa aukeratu da. Iturri bilgailuaren diametroa (D_G) 0.20 m-koa izan da eta luzera (L_B) 0.60 m-koa. Ohantzearen gainazalaren eta iturri bilgailuaren arteko distantzia, hau da, arraste atalean aipatutako H_B parametroa, 0.10 m-koa izan da. Faktore geometriko hauek tesiko atal esperimentalean jarri den eskeman adierazi dira.

Lehorketa guztiak ez dira airearen emari berdinean egin. Sistema bakoitzerako, operazio egonkorrean harea hezearekin iturria oztopatu eta gelditu ez dadin, emari egokia aukeratu da. Horretarako, sistema esperimental bakoitzaren egonkortasunaren azterketa egin da, eta ikerturiko sistemek era egonkorrean funtzionatzen dutela ziurtatu da. Horrela, harea hezearekin operatzean, hodi ez-porotsua erabiltzen den sisteman iturkuntza abiadura minimoan egonkor lan egin daiteke baina beste konfigurazioek emari minimoari dagokion abiadura baino handiagoa behar dute operazio egonkorrean lan egin ahal izateko.

Ekipoaren mugak direla eta, sistema guztiekin ezin da aire emariaren baldintza berdinetan funtzionatu. Beraz, ondorengo taulan erakusten diren emariak finkatu dira operazio egonkorrean lan egiteko.

5.2. Taula. Iturkuntza abiadurak erdiko hodi motaren arabera.

Erdiko hodia	W_H (m)	Irekidura portzentajea (%)	u_{ms} (m/s)
Hodi ez-porotsua ($L_H= 0.07$ m eta $L_H= 0.15$ m)	—	0	u_{min}
Hodi porotsua	—	80	$0.5u_{min}$
Irekiduradun hodia	0.025	42	$0.2u_{min}$
Irekiduradun hodia	0.018	57	$0.4u_{min}$
Irekiduradun hodia	0.010	79	$0.6u_{min}$

5.2 Taulan ikus daitekeen bezala, operazio egonkorrean lan egiteko emariak finkatu dira. Hodi ez-porotsuen kasuan abiadura minimoa nahikoa da operazio egonkorrean lan egiteko, hodi porotsuen kasuan abiadura minimoa baino %50 handiagoko emaria behar da, eta irekiduradun hodien kasuan, %20 handiagoa irekidura txikiena duen hodirako, %40 handiagoa tarteko irekidura duen hodirako eta %60 handiagoa irekidura handiena duenerako.

Lehorketak euren artean konparagarriak izateko, iturkuntza abiadura minimoan egin behar dira eta ez abiadura berebean. Izan ere, bi saiakuntza ezberdinetan iturkuntza abiadura minimoan lan egiten bada, biak fluidizazio egoera berebean daudela ziurtatzen da.

Tesi honetan egin diren lehorketa esperimentuak era ez-jarraituan egin dira eskala handitzeko lehen urratsa horixe baita. Saiakuntzetan ohantze lehorrarekin hasi da lan egiten eta harea hezea gehitu zaio ondoren. Prozedurari dagokionez, lehenengo urratsa sistema esperimentala prestatzea da. Horretarako, dagokion kontaktorea, gasaren sarrerako diametroa eta erdiko hodia aukeratu dira. Ondoren, 5 kg harea lehorrez bete da kontaktorea (ohantzearen altuera 0.22 m inguru izan dadin, hau da, erdiko hodien altuera totaleraino). Lehen aipatu den bezala, erdiko hodiaren luzera totala eta ohantzearen altuera parekoak izatea komenigarria da. Altzibar-en tesian (2011) erabilitako erdiko hodien luzera totala 0.27 m-koa izan zenez, 5 kg ordez 7 kg erabili ziren ohantzearen altuera gutxi gorabehera 0.27 m-koa izan zedin. Amaitzeko, iturri bilgailua jarri da kontaktorea hareaz bete ondoren.

Sistema bakoitzean aireak izan behar duen abiadura zehazteko, lehenengo iturkuntza abiadura minimoa lortu da eta ondoren behar den beste handiagoa jarri. Iturkuntza abiadura hori eskuz jarri da errotametroa erabiliz. Esperimentuan zehar, aireak duen hezetasuna, tenperatura eta emariaren eta presio galeraren bilakaera hartu dira ordenagailuko Data Control programaren bidez. Dena den, iturkuntza minimoari dagokion airearen emaria eta presioa zuzenean ere hartu dira errotametroan eta ur manometroan begiratu, hurrenez hurren, ordenagailuko datuen desbideraketak kontrolatzeko. Sistema bakoitzaren airearen hezetasuna neurtu ahal izateko, zikloiaren ondoren dagoen tutuerian zunda bat kokatu da eta datuak neurgailu bati bidali.

Iturri bilgailua duten sistemetan, harea hezea ohantzera goialdetik elikatzeke tarte estua dagoenez, ez da behar den moduan gainazal guztira barreiatzen. Hori dela eta, bilgailu

gabeko sistemetan ere saiakuntzak bilgailua balego bezala elikatu egin dira bi sistemak ahalik eta konparagarrienak izan daitezen.

Harea hezea botatzen den unean eman zaio hasiera lehorketari, eta kontaktorearen barneko harearen hezetasuna $0.0005 \text{ kg ur/kg solido lehor}$ denean amaitutzat eman da esperimentua. Data Control programak egiten duen grafikoan hasierako hezetasuna lortzen dela ikustean amaitu da saiakuntza.

5.3. LEHORKETA OPERAZIOAREN EMAITZAK

Behin prozedura esperimentalaz azalduz, lortu diren emaitzak aztertuko dira jarraian. Saiakuntzetan erdiko hodi ezberdinez osaturiko iturri ohantze konikoen portaera aztertu da partikula finen lehorketarako. Dena den, atal honen analisi garrantzitsuenak iturri bilgailua erabiltzeak lehorketa prozesuan duen eragina azaltzea da.

Lehen aipatu den moduan, kapitulu honen helburu nagusia aurreko tesi batean (Altzibar, 2011) lortu diren emaitzak eta hemengoak alderatzea da. Hala ere, konparazioak egitea ez da erraza beti, ekipoak zenbait aldaketa izan baititu.

Tesi honetan egindako sei sistemen lehorketa emaitzen azterketari ekin baino lehen, Altzibar-en tesian (2011) harea lehorra erabiliz egin zen ikerketa hidrodinamikoaren ondorioak laburtuko dira, lehorketen emaitzak analizatzean lagungarri izango baitira. Ikerketa hidrodinamikoan, sistema bakoitzean iturri ohantze erregimenak duen funtzionamendua aztertzeaz gain, airearen abiadurarekiko ohantzeak duen karga galeraren bilakaera aztertu zen, bertatik iturkuntza abiadura minimoaren, karga galera egonkorraren eta karga galera maximoaren balioak lortu baitziren.

Ikerketa horretan ondorioztatu zenez, operaziorako behar zen iturkuntza abiadura minimorik txikiena hodi ez-porotsua zuen sistemari zegokion eta iturkuntza abiadura minimorik handiena irekiduradun hodie zegokien. Abiadura hau handiago da zenbat eta irekidura portzentajea handiago den, eta hodi porotsuak tarteko abiadura behar du.

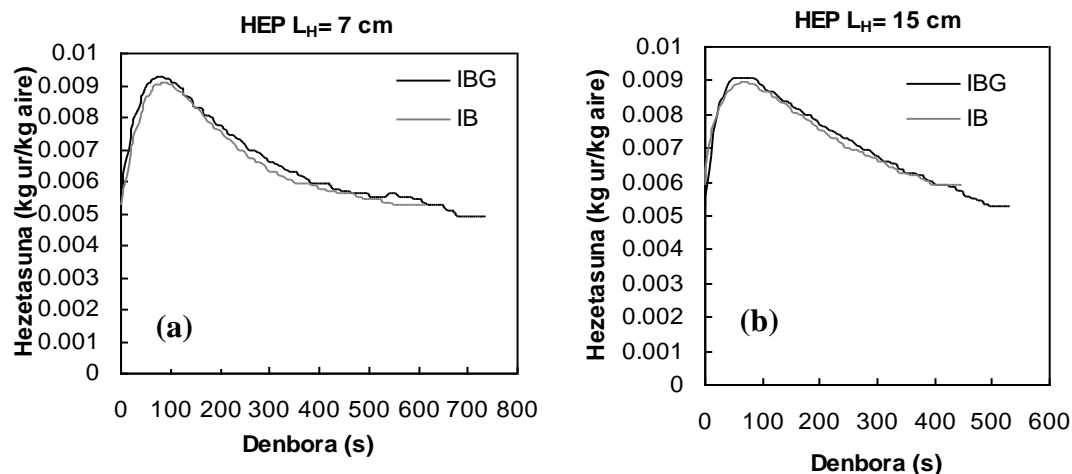
Karga galera egonkorraren balioei erreparatuz, hodi porotsuari eta ez-porotsuari zegokien balioak antzekoak ziren, azken honena apur bat handiagoa izanik. Sistema hauekin konparatuz, irekiduradun hodian karga galera egonkorra bikoitza zen, eta karga galera egonkorraren balioa handitu egiten zen irekidura portzentajea handitu ahala.

Lan honetan, irteerako airearen hezetasunaren, aire emariaren eta ohantzearen karga galera egonkorraren jarraipena egin da lehorketa prozesu osoan zehar, hau da, harea hezea $0.0005 \text{ kg ur/kg solido lehor}$ izan arte.

Tesi honen helburu nagusietariko bat lehorketa operazioan iturri bilgailuak duen eragina aztertzea denez, lehorketa saiakuntzak iturri bilgailua (IB) erabiliz eta iturri bilgailurik gabe (IBG) egin dira euren artean konparatu ahal izateko.

Sei sistema ezberdin izan direnez, binaka aurkeztuko dira. Lehenengo, hodi ez-porotsudun sistemak (HEP) aurkeztuko dira, hanken luzera (L_H) ezberdinen arabera. Ondoren, hodi porotsudun sistema (HP) aurkeztuko da, tarteko portaera duelako. Bukatzeko, irekiduradun hodian sistemak (IH) komentatuko dira erdiko hodian hanken zabaleraren (W_H) edo irekiduraren portzentajearen (IP) arabera banaturik.

Lehorketen analisiari hasiera emateko, 5.2 Irudian ikus daiteke irteerako airearen hezetasunaren denboran zeharreko bilakaera hodi ez-porotsua duten sistemetarako. Aipagarria da, esperimenduak egun ezberdinetan egin direnez, airearen tenperaturak ere ezberdinak izan direla (22 °C, 24 °C, 25 °C). Hori dela eta, grafikoetan irudikatu dena hezetasun absolutua izan da. Izan ere, hezetasun erlatiboa tenperaturaren menpekoa da, eta beraz bi tenperatura ezberdinetara egindako esperimenduak ez lirateke konparagarriak izango.

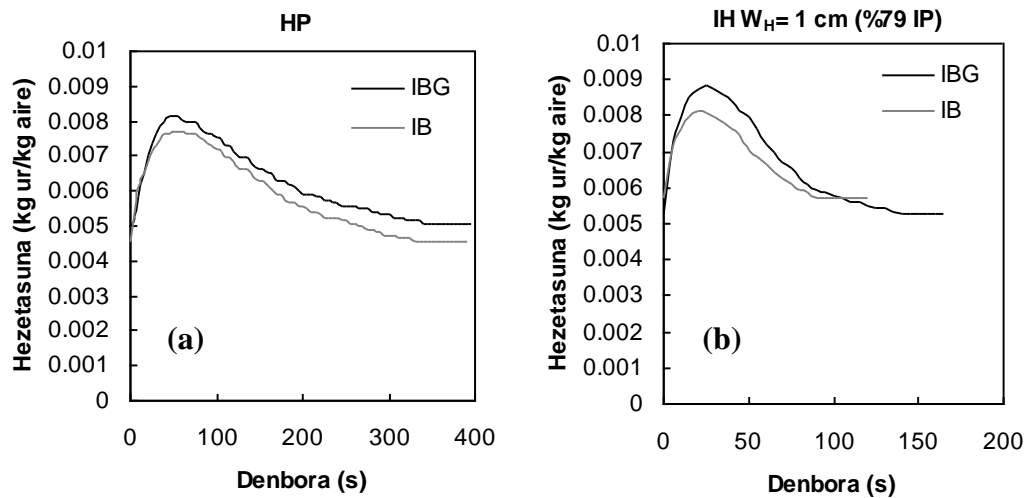


5.2. Irudia. 0.07 m-ko (a) eta 0.15 m-ko (b) hanken luzera duten hodi ez-porotsudun sistemen hezetasunaren bilakaera denboran zehar.

5.2 Irudiko grafikoetan erakusten denez, hodi ez-porotsua erabiltzen denean lehorketak oso antzekoak dira sisteman iturri bilgailua erabiltzen denean edo ez denean erabiltzen, esperimenduen hezetasunaren kurbak parekoak baitira. Hala ere, beherakuntza txiki bat sumatzen da lehorketa denboran bilgailua erabiltzen denean. Hala, 5.2 Irudiko (a) grafikoan ikus daitekeenez, 0.07 m-ko hanken luzera duen hodi ez-porotsuaren kasuan, iturri bilgailudun konfigurazioaren lehorketa denbora (615 s) iturri bilgailurik gabekoa baino txikiago izan da (735 s). Honen arrazoia, iturri bilgailuak ohantzeari egonkortasuna ematean eta gas solido kontaktu hobea lortzean datza. Horrela, bilgailudun esperimenduen hezetasunaren balio maximoa bilgailurik gabekoa baino txikiagoa da, eta beraz, iturri bilgailua duen saiakuntzan azkarrago lehortzen da. Arrazoi berberetatik, 5.2 Irudiko (b) grafikoan 0.15 m-ko hanken luzera duen hodi ez-porotsua eta iturri bilgailua erabili den saiakuntzak lehortzeko behar izan duen denbora (445 s), bilgailua erabili ez den kasuan baino laburrago izan da (530 s).

5.2 Irudiko grafikoetatik ondorioztatzen da hodi ez-porotsuaren hanken luzera (L_H) handitzean lehorketa denbora txikiagoa dela. Joera hau logikoa da hodi ez-porotsuaren hanken luzera handitzerakoan iturgunetik eraztungunera pasa daitekeen aire kantitatea handiago delako, eta beraz harea azkarrago lehortuko da. Horretaz gain, esperimenduak egin bitartean ikusi da 0.15 m-ko hanken luzera duen hodi ez-porotsuak sortzen duen iturria eta eragiten duen zirkulazioa 0.07 m-ko hanken luzerakoak eragiten duena baino zabalagoa eta jariakorragoa dela. Azpimagarria da, hodi ez-porotsuen hanken luzera handituz iturriaren altuera murriztu egiten dela, hanken luzera handiagoa denean airea ohantzean hobeto banatzen delako eta solidoaren zirkulazio abiadura handiagoa delako (Neto et al., 2008).

5.3 Irudian erakusten dira hodi porotsuaz (HP) eta 0.01 m-ko hanken zabalera (W_H) (edo %79ko irekidura portzentajea, IP) duen irekiduradun hodia (IH) horniturik egin diren esperimentuen hezetasun bilakaerak iturri bilgailua erabiliz eta erabili gabe.



5.3. Irudia. Hodi porotsua (a) eta 0.01 m-ko hanken zabalera duen irekiduradun hodiaren (b) hezetasunaren bilakaera denboran zehar.

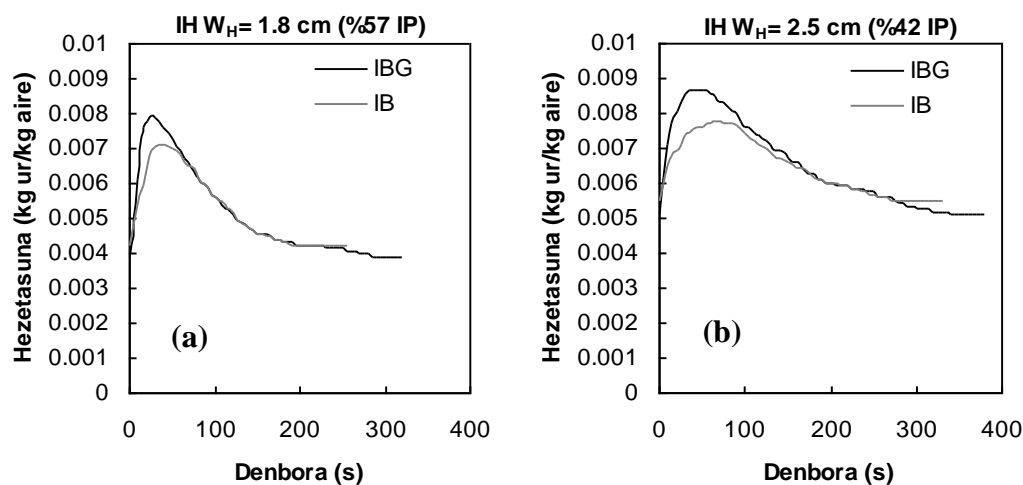
5.3 Irudiko (a) grafikoan ikus daitekeenez, bi sistemetan lehortzeko behar izan den denbora oso antzekoa da, nahiz eta hodi porotsuaren kasuan iturri bilgailua erabiltzean lortzen den hezetasun kurba bilgailu gabekoa baino pixka bat beherago dagoen. Hau, 5.2 Irudiko grafikoan eman den arrazoï berberagatik gertatzen da. Hala, bilgailua duen konfigurazioak (390 s) bilgailu gabekoa baino (395s) bost segundo gutxiago behar izan ditu lehortzeko.

Hodi porotsuaz egin den saiakuntza, 5.3 Irudiko (a) grafikoa, dimentsio antzeko hodi ez-porotsuaz egin denarekin (5.2 Irudiko (a) grafikoa) konparatzen bada, hodi porotsudun sisteman azkarrago lehortzen da. Hau gertatzen da hodi porotsuak airea iturgunetik eraztungunera pasaratzen uzten duelako, eta beraz gasaren eta solidoaren arteko kontaktua hobea delako (Claflin eta Fane, 1983). Azken efektu hau Altzibar et al.ek (2008) lortutako berbera da. Esperimentalki ere ikusi da hodi porotsuak duen zirkulazioa hodi ez-porotsudunak duena baino arinagoa dela. Horretaz gain, hodi porotsua erabiliz sortu den iturria zabala izan da eta, hodi ez-porotsua erabiliz sortutakoa aldiz, estuagoa izan da (gas-solido kontaktu txikiagoa).

5.3 Irudiko (b) grafikoan ikus daiteke 0.01 m-ko hanken zabalera (edo %79ko irekidura portzentajea) duen irekiduradun hodia erabiltzen den kasuan ohandzea lehortzeko behar den denbora iturri bilgailua erabiliz (120 s) iturri bilgailurik gabe (165 s) behar izan dena baino txikiagoa dela, 5.2 Irudirako emandako azalpen berberagatik.

5.3 Irudiko (a) eta (b) grafikoak erkatuz gero, irekiduradun hodia hodi porotsua baino eraginkorragoa dela ondoriozta daiteke, irekiduradun hodia erabiliz lehortzeko behar den denbora askoz txikiagoa baita. Altzibar et al.ek (2008) ere ondorio bera lortu zuten, hots, irekiduradun hodia erabiltzean eraztungunea aireztatuago zegoela eta lehorketa denbora laburragoa zela.

5.4 Irudian berriz, 0.018 m-ko hanken zabalera (%57ko irekidura portzentajea) eta 0.025 m-ko hanken zabalera (%42ko irekidura portzentajea) duten irekiduradun hodian hezetasunaren grafikoak erakusten dira.



5.4. Irudia. 0.018 m-ko (a) eta 0.025 m-ko (b) hanken zabalera duten irekiduradun hodian hezetasunaren bilakaera denboran zehar.

5.4 Irudian ikus daitekeenez, bai %57ko baita %42ko irekiduradun portzentajea (IP) duten irekiduradun hodiekin ere, aurreko grafikoetan aipatutakoa berresten da, hots, iturri bilgailua erabili den kasuetan harea lehertzeko behar izan den denbora laburragoa dela. Arrazoia 5.2 Irudian eman den berbera da. Lehorketa denborei erreparatu, %57ko IP eta iturri bilgailua duen saiakuntzan 255 s-tan lehortu den bitartean iturri bilgailurik gabekoan 320 s-tan lehortu da. %42ko IP eta iturri bilgailua duen saiakuntzan berriz, 330 s-tan lehortu den bitartean iturri bilgailurik gabekoan 380 s behar izan dira.

Bestalde, irekiduradun hodiak konparatu, irekidura portzentajea (IP) handitu ahala lehorketa denbora txikituz doa, izan ere irekidura portzentaje handiena duen sisteman iturgunetik eraztungunera aire kantitate handiagoa pasatzen da, solidoaren zirkulazio abiadura handituz eta, beraz, gasaren eta solidoaren arteko kontaktua hobetuz. Irekidura portzentaje txikiena duten konfigurazioek lehorketa egiteko 330-380 s artean behar dituzte, tarteko irekidura dutenek 255-320 s artean, eta irekidura handiena dutenek 120-165 s artean. Irekidura portzentajearen arabera joera hau Altzibar-en tesian (2011) ere ikusia da.

5.4 Irudiko grafikoak 5.2 Irudikoekin konparatzen badira, irekiduradun hodiak dituzten sistemen lehorketak hodi ez-porotsuenak baino eraginkorrak direla antzematen da, eraztunguneari sartzen den gasak bertako masa transferentzia hobetzen duelako. Hodi ez-porotsua duten sistemetako gas-solido kontaktua ez da hain ona, batez ere eraztunguneari, bertara pasatzen den aire emaria kontaktorerari sartzen denaren frakzio txiki bat besterik ez baita (Wang et al., 2010b). Bibliografian ere ikusi da joera hori harea bezalako material finak erabiliz giro tenperaturan egindako lehorketa saiakuntzetan (Altzibar et al., 2008) eta tenperatura altuan egindakoetan (Altzibar et al., 2011), baita zerrautsarekin egindako saiakuntzetan ere (Olazar et al., 2012).

Konfigurazio guztiak kontuan izanik lehorketa denboraren arabera ordena hauxe da: $t_{LH7} > t_{LH15} > t_{HP} > t_{WH2.5} (\%42 \text{ IP}) > t_{WH1.8} (\%57 \text{ IP}) > t_{WH1} (\%79 \text{ IP})$. Orden hori Altzibar et al.ek (2008) iturri bilgailurik gabe lortutako berbera da.

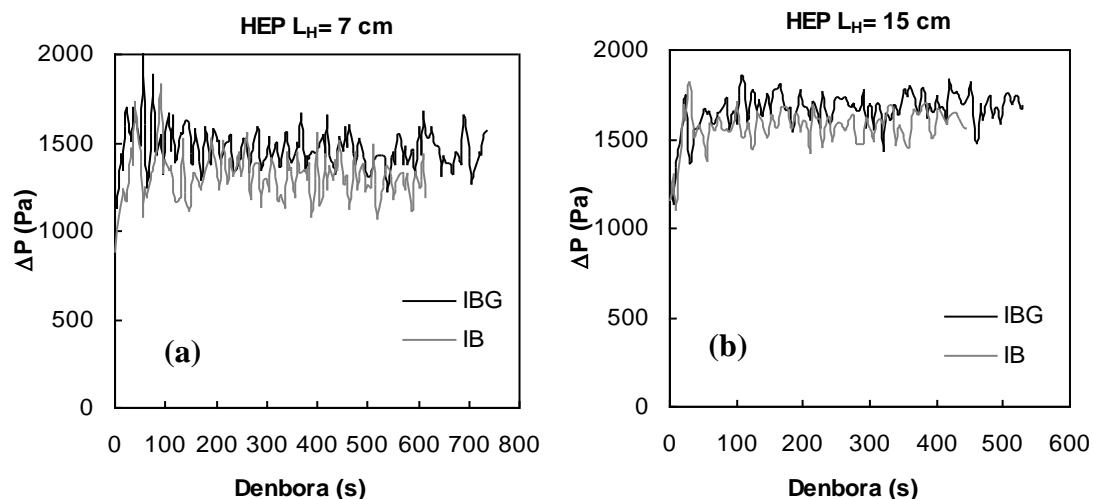
Hezetasunaren bilakaeraren grafiko guztiak aztertu ostean, iturri bilgailua erabiliz edo iturri bilgailurik gabe egindako lehorketen bilakaera antzekoa dela ikusi da. Bi konfigurazioetan, denbora igaro ahala hezetasuna maximo batera arte igotzen da hasieran, eta jarraian astiroago behera egiten du balioa konstante mantendu arte. Ezberdintzen diren bi etapa horiek, lehorketa iraunkorreko tartea eta lehorketa beherakorrekoko tartea dira. Lehorketa iraunkorreko tartean lehorgailutik irteten den airearen hezetasunaren balioak konstante dirau eta partikularen kanpoan gertatzen den materia transferentziak kontrolatzen du prozesua. Tarte horretan, partikularen gainazalean dagoen ur geruza lurruntzen da. Behin partikularen gainazaleko geruza lehortu denean, barneko difusioaren bidez ura gainazalera heltzen da eta bigarren etapa gertatzen da. Beraz, lehorketa beherakorrekoko tartea difusioak kontrolaturik dago.

Irteerako airearen hezetasunaren grafikoak ikusita, pentsa daiteke solidoa lehortzeko luzaroago ohandean mantentzea nahikoa dela, baina esperimentera frogatu denez, zenbait saiakuntzetan denbora gehiago utzi arren, ez da hasierako hezetasuna lortzen. Hala, saiakuntza batean lehorketa denbora luzatzeak ez du bermatzen solidoa erabat lehortuko denik. Horregatik, tesi honetako lehorketak hareak hezetasun espezifiko bat duenean (0.0005 kg ur/kg solido lehor) bukatu dira.

Azpimarratzekoa da, iturri bilgailua erabili den ia kasu guztietan gune hezeak sortu direla ohandean, irekidura portzentaje handiena duen hodian izan ezik. Iturri bilgailurik gabeko esperimentera ostera, gune hezeak hodi ez-porotsuak erabiltzean soilik eratu dira.

Aurreko grafiko guztietan ikusi denez, iturri bilgailudun sistemetan irteerako aireak duen hezetasun maximoaren balioa bilgailurik gabekoa baino txikiagoa da. Hortaz, erabilitako erdiko hodi mota guztietarako, iturri bilgailuak lehorketa denbora murriztea eragin du. Dena den, iturri bilgailuaren abantailak ikusita, esperimentera ekin baino lehen murrizketa nabarmenagoa izango zela uste zen, baina kasu batzuetan ez da horrela izan. Hala ere, finekin lan egin denez, aurreko kapituluan aipatu bezala, prozesua hobetu da, finen arrastea modu garrantzitsuan gutxitu delako.

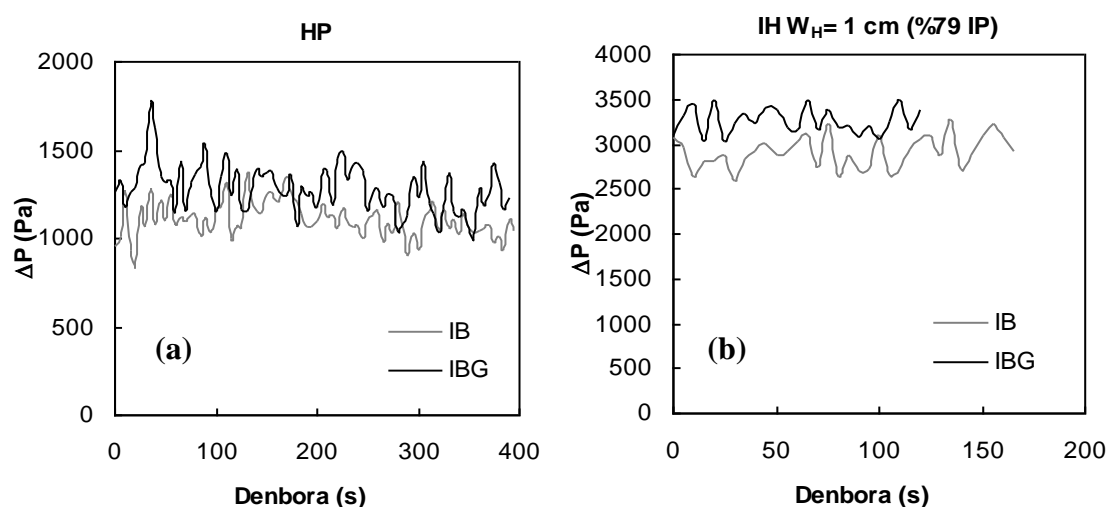
Lehorketen analisiarekin jarraitzeko, 5.5 Irudian hanken luzera ezberdineko (L_H) erdiko hodi ez-porotsuen (HEP) ohandeko karga galera egonkorraren denborarekiko bilakaerak irudikatuko dira.



5.5. Irudia. 0.07 m-ko (a) eta 0.15 m-ko (b) hanken luzera duten hodi ez-porotsua duten sistemen karga galera egonkorraren bilakaera denboran zehar.

5.5 Irudiko (a) grafikoa erakusten denez, iturri bilgailudun konfigurazioaren karga galera egonkorra (1310 Pa) iturri bilgailurik gabekoa (1470 Pa) baino txikiagoa da, 4.2.3 Atalean aipatu den bezala, iturri bilgailuak ohantzeari egonkortasuna ematen dio eta ohantzeko karga galera egonkorak behera egiten du. Arrazoi berberetatik, 5.5 Irudiko (b) grafikoa iturri bilgailua erabili den saiakuntzaren karga galera egonkorra (1570 Pa) iturri bilgailurik gabekoa (1660 Pa) baino txikiagoa da. 5.5 Irudiko grafikoei erreparatu, hodi ez-porotsuaren hanken luzera handiago egitean karga galerak gora egiten du. Kasu honetan ere, hodi ez-porotsuaren hanken luzera handitzean eraztungunetik iturgunera solido kantitate handiago sartzen da, aireak solido kantitate gehiago arrastatzen du eta solidoaren zirkulazio emaria azkartu egiten da (Cunha et al., 2009). Honen ondorioz, karga galera egonkorraren balio handiagoak lortzen dira (Luo et al., 2004).

5.6 Irudian, hodi porotsua (HP) erabili den saiakuntzaren eta 0.01 m-ko hanken zabalera (W_H) (edo %79ko irekidura portzentajea, IP) duen irekiduradun hodia (IH) erabili den saiakuntzaren karga galerak erakusten dira.



5.6. Irudia. Hodi porotsua (a) eta 0.01 m-ko hanken zabalera duen irekiduradun hodiaren (b) karga galera egonkorraren bilakaera denboran zehar.

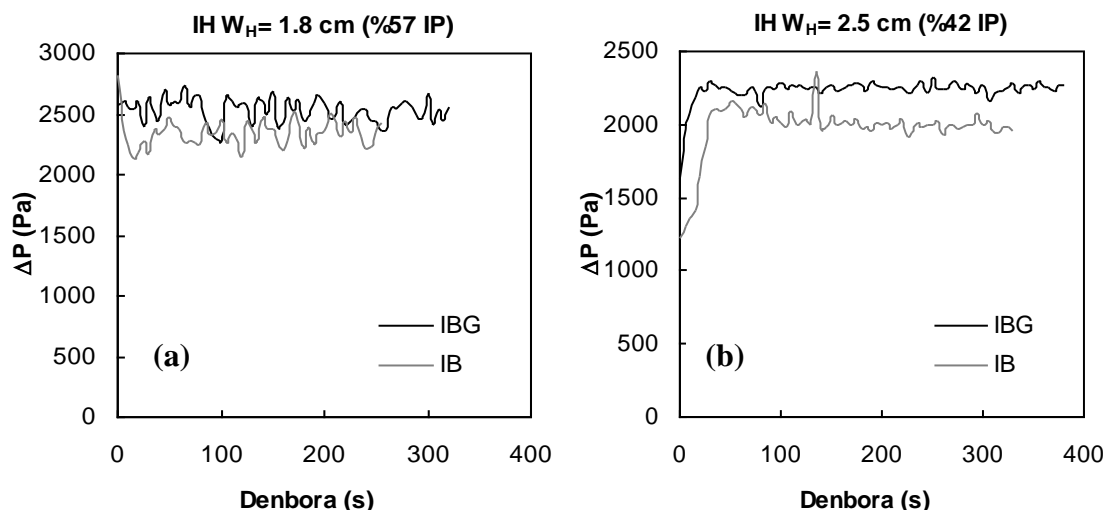
5.6 Irudiko (a) grafikoan ikus daitekeenez, hodi porotsua erabiltzean iturri bilgailudun sistemaren karga galeraren balioa (1110 Pa) iturri bilgailurik gabeko sistemarena (1290 Pa) baino baxuagoa da, 5.5 Irudian eman den arrazoi beragatik. Hodi porotsuak eragiten duen karga galera egonkorra hodi ez-porotsuek eragindakoarekin konparatzean, azken hauena handiagoa dela antzematen da. Handitze hau aireak hodi ez-porotsuaren hormarekin duen frikzioaren kausa izan daiteke, iturgunetik eraztungunera poroetan zehar pasatzean eragiten duen karga galera baino handiagoa delarik. Altzibar et al.ek (2008) ondorio berbera atera zuten. Aipagarria da, hodi porotsu eta ez-porotsuetan hodiaren hanken luzerak mugatuko duela eraztungunetik iturgunera pasako den solido kantitatea eta, beraz, solidoaren zirkulazio abiadura (Zhao et al., 2008).

5.6 Irudiko (b) grafikoan, 0.01 m-ko hanken zabalera (edo %79ko irekidura portzentajea) duen irekiduradun hodia erabiltzean, iturri bilgailuaren eragina nabarmenagoa da. Dena den, erdiko hodi mota honetarako ere, iturri bilgailudun konfigurazioaren karga galera egonkorraren balioa (2910 Pa) bilgailurik gabekoa (3260 Pa) baino txikiagoa da aurretik (5.5 Irudian) aipaturiko arrazoi berberengatik.

5.6 Irudiko grafikoak euren artean konparatzen badira, irekiduradun hodiaren karga galera egonkorra hodi porotsuaren bikoitza dela ikus daiteke. Izan ere, irekiduradun hodiak solidoaren zirkulazioa hobetzen du eraztunguneko aireztapen hobeari eta hodietako irekiduretan zehar eraztungunetik iturgunera igarotzen den solido fluxu erradialari esker. Modu honetan, solidoaren zirkulazioa handitzeak karga galera handiagoa sortzen du iturgunean partikulak garraiatzeko gasak gainditu behar duen arraste indar handiagoagatik (Olazar et al., 2012). Solidoaren zirkulazioaren eta karga galeraren arteko erlazio hau dagoeneko beste autore batzuk ere ikusi zuten (Ishikura et al., 2003; Altzibar et al., 2009).

Gainera, irekiduradun hodiaren karga galera egonkorraren balioak hodi porotsu eta ez-porotsuaren balioak baino handiagoak dira solidoa eraztungunetik iturgunera ohanztearen altuera guztian zehar sartzen delako. Hodi porotsu eta ez-porotsuaren kasuan solidoa hodiaren hanketatik soilik pasa daiteke iturgunera.

Karga galera egonkorraren ikerketa amaitzeko, 5.7 Irudian 0.018 m-ko hanken zabalera (%57ko irekidura portzentajea) eta 0.025 m-ko hanken zabalera (%42ko irekidura portzentajea) duten irekiduradun hodieiei dagozkien bilakaerak erakusten dira.



5.7. Irudia. 0.018 m-ko (a) eta 0.025 m-ko (b) hanken zabalera duten irekiduradun hodian karga galera egonkorren bilakaera denboran zehar.

5.7 Irudiko bi grafikoetan ikus daiteke iturri bilgailua erabiltzean karga galera egonkorren balio baxuagoak lortzen direla, arrazoa aurretik (5.5 Irudian) emandako berbera delarik. Datuei erreparatuz, irekidura ertaineko hodiarekin (%57ko irekidura portzentajea) iturri bilgailua erabiltzean 2340 Pa sortzen dira eta, iturri bilgailurik gabe aldiz, 2530 Pa sortzen dira. Bestetik, irekidura txikiena duen hodiarekin (%42ko irekidura portzentajea) bilgailua erabiltzean, 1980 Pa sortzen dira eta iturri bilgailurik gabe 2230 Pa. Hala, argi geratzen da irekidura portzentajea handitu ahala karga galera egonkorra handiagoa dela. Lehen esan denez, irekidura portzentajea handitzean iturgunetik eraztungunera aire kantitate handiagoa pasatzen da eta solidoaren zirkulazio abiadura handiagoa da baita karga galera egonkorra ere. Efektu hau bibliografian jadanik ikusi da (Altzibar et al., 2008).

5.7 Irudia 5.5 Irudiarekin konparatuz gero, irekiduradun hodian karga galera egonkorra hodi ez-porotsuena baino askoz handiagoa dela ondorioztatzen da. Irekiduradun hodian kasuan partikulak ohantze guztian zehar pasa daitekeenez iturgunera, solidoaren zirkulazio abiadura handiagoa da eta karga galera egonkorren balioa ere bai. Hodi ez-porotsuetan ordea, airea hodiaren hanketatik igaro daiteke soilik iturgunera, eta beraz sortzen den karga galera irekiduradun sistemena baino txikiagoa da. Altzibar-en tesian (2011) ere joera beraz ohartu zen.

Sistema guztiak kontuan izanda, karga galera egonkorren arabeko ordena hurrengoa da: $\Delta P_{WH1} (\%79 \text{ IP}) > \Delta P_{WH1.8} (\%57 \text{ IP}) > \Delta P_{WH2.5} (\%42 \text{ IP}) > \Delta P_{LH15} > \Delta P_{LH7} > \Delta P_{HP}$. Orden hau Altzibar et al.ek (2008) lortu zuten bera da.

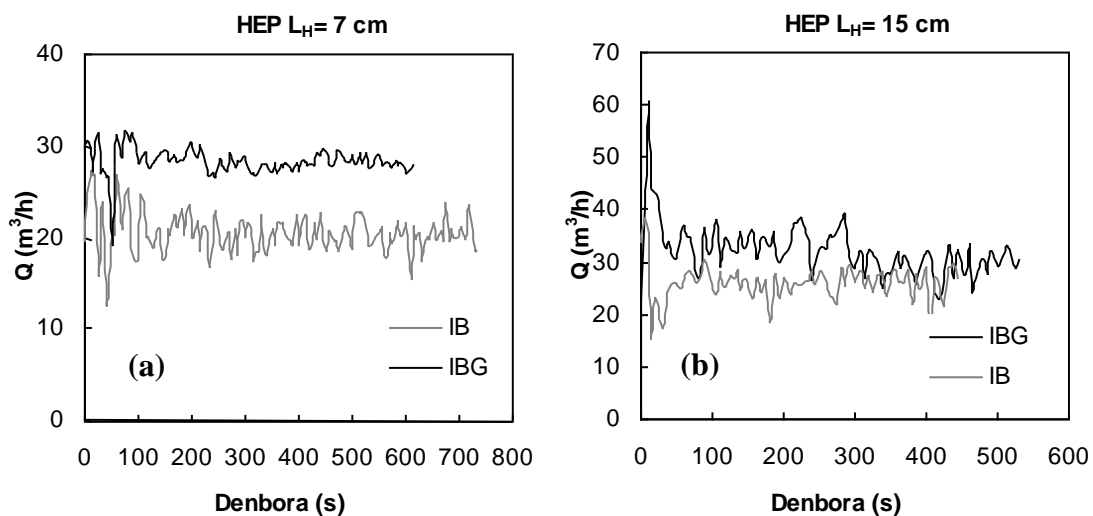
5.5, 5.6 eta 5.7 Irudietan erakusten denez, zenbait kasutan saiakuntzen hasieran karga galera denborarekin handituz doa solido lehorrezko ohantzeari dagokion karga galera lortu arte eta ondoren konstante dirau lehorketa amaitu arte.

Azken hiru irudi hauetan ikus daitekeenez, kasu batzuetan iturri bilgailua erabili denean karga galera egonkorren balioa bilgailurik gabekoaren antzekoa da. Altzibar-en tesian (2011) iturri bilgailuari buruz egindako azterketa hidrodinamikoan dagoeneko ikusi zen iturri bilgailuak irekiduradun sistemen karga galera egonkorrean eragina zuela, baina hodi ez-porotsua zuten sistemetan ez zela hain nabarmena. Izan ere,

ezegonkortasunik handiena duten sistemak hodirik gabekoak dira, eta hein txikiagoan irekiduradun hodia dutenak. Beraz, iturri bilgailuak sistema horien iturri ezegonkorragoak bildu egiten ditu eta sistema egonkortu. Hodi ez-porotsua duten sistemetan berriz, iturri bilgailurik erabili gabe ere sistema egonkorra da eta, beraz, iturri bilgailuaren eragina ez da asko antzematen.

Karga galera egonkorren diferentzia nabarmenagoak sumatzeko, egokia izan daiteke ohantzearen gainazalaren eta iturri bilgailuaren beheko aldearen arteko hutsune (H_B) ezberdinak erabiltzea, eta hori etorkizuneko lanetan egin beharreko ikerketa da.

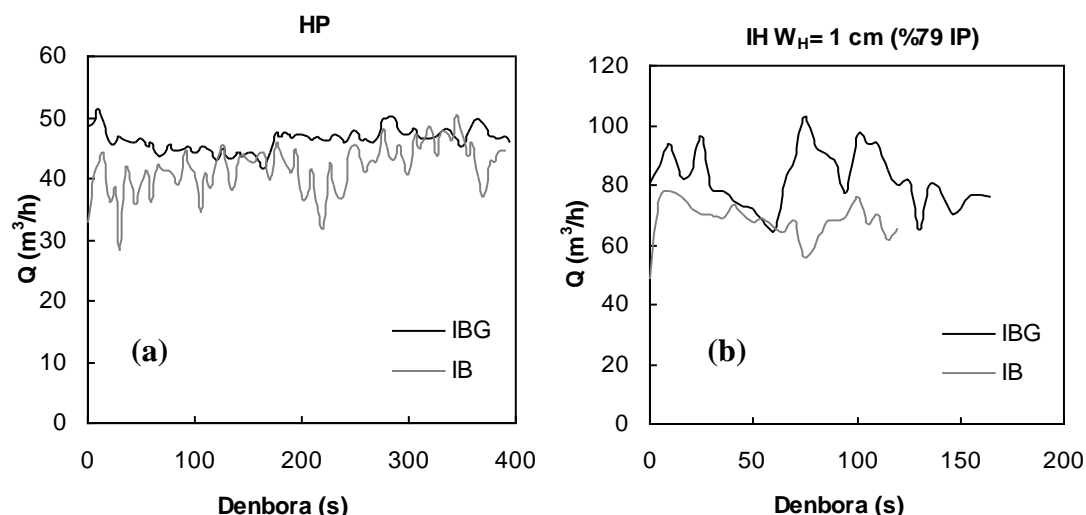
Esperimentalki egindako lehorketen azterketa amaitzeko, 5.8 Irudian aire emariaren denborarekiko bilakaerak aurkeztuko dira hodi ez-porotsudun sistema (HEP) ezberdinetarako.



5.8. Irudia. 0.07 m-ko (a) eta 0.15 m-ko (b) hanken luzera duten hodi ez-porotsudun sistemen emariaren bilakaera denboran zehar.

5.8 Irudiko grafikoetan ikus daitekeenez, hodi ez-porotsudun sistemetan iturri bilgailua erabiltzean operatzeko behar den aire emariaren balioa txikiagoa da. Joera hau logikoa da, iturri bilgailuak sistema egonkortu egiten duelako eta, beraz, egoera egonkorreko operazioa airearen abiadura txikiagoarekin lortzea posible delako. Banaka aztertuz, 0.07 m-ko hanken luzera duten hodiekin iturri bilgailua erabiltzean emaria 20 m^3/h -koa da eta, iturri bilgailurik gabe aldiz, 28 m^3/h -koa. Era berean, 0.15 m-ko hanken luzera duten hodiekin emaria 26 m^3/h -koa da iturri bilgailua erabiltzen denean eta 32 m^3/h -koa iturri bilgailurik gabe. Datu hauetatik ondoriozta daiteke hanken luzera (L_H) handiagoa denean operatzeko behar den aire emaria ere handiagoa dela. Jakina denez, hanken luzera handitzeak iturgunera solido kantitate gehiago sartzea ahalbidetzen du, solidoaren zirkulazio emaria handituz eta, beraz, iturkuntza minimoan operatzeko behar den abiadura minimoa ere handiagoa eginez. Ondorio hau dagoeneko Ishikura et al.ek (2003) eta San José et al.ek (2007a) ere lortu zuten.

5.9 Irudian, hodi porotsua (HP) eta 0.01 m-ko hanken zabalera (W_H) (edo %79ko irekidura portzentajea, IP) duen irekiduradun hodia (IH) duten sistemekin lan egiteko behar den aire emariaren bilakaerak erakusten dira.

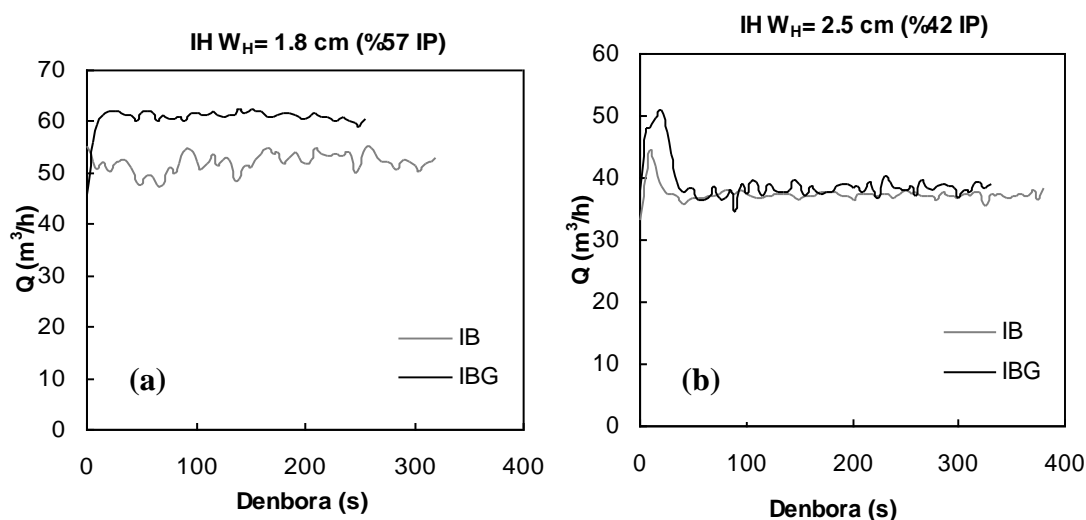


5.9. Irudia. Hodi porotsua (a) eta 0.01 m-ko hanken zabalera duen irekiduradun hodia (b) erabiliz behar den emariaren bilakaera denboran zehar.

5.9 Irudian ikus daitekeenez, hodi porotsudun sisteman zein 0.01 m-ko hanken zabalera edo %79ko irekidura portzentajea duen irekiduradun hodiaren kasuan, iturri bilgailua erabiltzean aire emariak behera egiten du, 5.8 Irudian eman den azalpen berberagatik. Hodi porotsua eta iturri bilgailua erabiltzen den kasuan emaria $42 \text{ m}^3/\text{h}$ -koa da eta, bilgailurik gabe aldiz, $46 \text{ m}^3/\text{h}$ -koa da. 0.01 m-ko hanken zabalera duen irekiduradun hodia eta iturri bilgailua erabiltzen denean aldiz, emaria $68 \text{ m}^3/\text{h}$ -koa da eta iturri bilgailurik gabe $82 \text{ m}^3/\text{h}$ -koa. Datu hauetatik 0.01 m-ko hanken zabalera duen irekiduradun hodiaren aire emaria hodi porotsuaren kasukoa baino handiagoa dela ondorioztatzen da. Irekiduradun hodiak aire emariaren balio handiena behar du, ohandzean gasaren banaketa hobereana ahalbidetzen duelako eta, ondorioz, aire gehiago behar da iturgunea irekitzeko. Hodi porotsuak erabiltzean, airea poroen bidez iturgunetik eraztungunera pasatzen da (eraztungunearen aireazioa gertatzen da solidoaren zirkulazioa azkartuz), baina poroek ez diote solidoari pasatzen uzten. Era honetan, hodi porotsuetan irekiduradun hodietan baino aire gutxiago igaroko da eraztungunera. Altzibar et al.ek (2008) emaitza berbera lortu zuten.

5.9 Irudiko (a) grafikoa eta 5.8 Irudiko grafikoa konparatzean, hodi porotsuaren kasurako behar den aire emaria hodi ez-porotsuaren kasurako behar dena baino handiagoa dela ikusi da. Hodi ez-porotsuaren kasuan, gasa kontaktorearen behekaldeetik soilik pasatzen da eraztungunera, solidoaren zirkulazio emaria baxua izanik eta, beraz, iturkuntza abiadura minimoaren balio baxuena beharko delarik. Hodi porotsuaren kasuan berriz, airea iturgunetik eraztungunera igarotzen da. Horregatik, irekiduradun hodiak erabiltzean baino aire gutxiago pasako da eraztungunera, baina hodi ez-porotsuak erabiltzean baino gehiago. Hala, hodi porotsudun sistemek irekiduradun hodiaren eta hodi ez-porotsuaren tarteko balioa dute iturkuntza abiadura minimorako. Altzibar-en tesian (2011) ondorio berberera heldu zen.

5.10 Irudian 0.018 m-ko hanken zabalera (%57ko irekidura portzentajea) eta 0.025 m-ko hanken zabalera (%42ko irekidura portzentajea) duten irekiduradun hodiaren sistemei dagozkien aire emariaren bilakaerak erakusten dira.



5.10. Irudia. 0.018 m-ko (a) eta 0.025 m-ko (b) hanken zabalera duten irekiduradun hodian emariaren bilakaera denboran zehar.

5.10 Irudiari erreparatuz, azken grafikoetan ikusitakoa berresten da, hau da, irekiduradun hodia duten sistemetan iturri bilgailuaren erabilerak aire emaria txikitu egiten duela. Honen arrazoia 5.8 Irudian emandako berbera da. Zehazki, 0.018 m-ko hanken zabalera duen hodiarekin (%57ko irekidura portzentajea) iturri bilgailua erabiltzean behar den aire emaria $52 \text{ m}^3/\text{h}$ -koa da eta, bilgailurik gabe aldiz, $61 \text{ m}^3/\text{h}$ -koa da. 0.025 m-ko hanken zabalaren kasuan (%42ko irekidura portzentajea) emaria $37 \text{ m}^3/\text{h}$ -koa da iturri bilgailua erabiltzen denean eta bilgailurik gabe $39 \text{ m}^3/\text{h}$ -koa da. Hala, aire emaria irekidura portzentajea handitzen den heinean handitzen dela ondorioztatzen da. Lehenago esan den bezala, irekidura portzentajea handiago izatean iturgunetik eraztungunera aire gehiago pasatzen da, solidoaren zirkulazioa handiago delarik eta iturgunea irekitzeko aire gehiago behar delarik. Hodian irekidurek airea iturgunetik eraztungunera pasatzea errazteaz gain, solidoa ere pasatzea ahalbidetzen dute. Honek, zirkulatzen ari den solido kantitatea handitzea dakar (Altzibar et al., 2008).

5.10 Irudiaren eta 5.8 Irudiaren arteko konparaketa egitean, irekiduradun hodiekin behar den aire emaria hodi ez-porotsuen kasuan baino handiagoa dela nabaria da. Joera hau logikoa da ondorengo arrazoiengatik. Hodi ez-porotsudun sistemetan solidoak duen zirkulazio abiadura baxua da, airea kontaktorearen serreran soilik pasatzen baita eraztungunera. Hortaz, beharrezkoa den airearen abiadura txikiagoa izango da (Ishikura et al., 2003). Aldiz, irekiduradun hodietan ohantze guztian zehar pasa daiteke airea iturgunetik eraztungunera, gasaren banaketa hobea lortuz eta, ondorioz, iturria irekitzeko behar den aire emaria eta solidoaren zirkulazio abiadura beste sistemetan baino handiagoa delarik. Bibliografian jadanik joera berbera ikusi da (Altzibar et al., 2011).

Konfigurazio guztiak aztertuz gero, aire emariaren arabeko ordena hurrengoa da: $Q_{WH1} (\%79 \text{ IP}) > Q_{WH1.8} (\%57 \text{ IP}) > Q_{HP} > Q_{WH2.5} (\%42 \text{ IP}) > Q_{LH15} > Q_{LH7}$. Orden hau bibliografian (Altzibar et al., 2008) agertzen denarekin konparatzen bada, hodi porotsuaren posizioa aldatzen da, Altzibar et al.en lanean (2008) hodi porotsua bigarren agertzen baita. Honen arrazoia, hodi porotsuaren hanken luzeran datza. Bibliografian hodi porotsuaren hanken luzera 0.07 m-koa den bitartean lan honetan 0.02 m-koa da. Hala, Altzibar et al.en laneko (2008) hodi porotsuaren kasuan, aire gehiago igarotzen da eraztungunetik iturgunera, eta lortzen den solidoaren zirkulazioa handiagoa da.

Emariaren bilakaeren grafikoetan ikusi denez, sistema gehienetan aire emaria geroago eta txikiagoa da lehorketan zehar, solido lehorrari dagokion baliora heldu arte. Aire emariaren txikitze hau karga galeraren handitzearen ondorio da.

5.8, 5.9 eta 5.10 Irudietan ikusi denez, aire emariaren balioak zenbait kasutan antzekoak dira iturri bilgailua erabili denean nahiz erabili ez denean. Izan ere, Altzibar-en tesiko (2011) azterketa hidrodinamiko eta estatistikoak erakutsi zuenez, iturri bilgailua erabiltzeko iturkuntza abiadura minimoan sortzen zituen aldaketak ez ziren esanguratsuak. Era berean, ohantzearen gainazalaren eta iturri bilgailuaren beheko aldearen arteko hutsuneak (H_B) iturkuntza abiadura minimoan sortzen zituen aldaketak ez zirela kontuan hartzeko modukoak aurkitu zen.

Laburbilduz, Altzibar-en tesian lortu ziren efektu berberak berretsi dira hodi porotsudun sistemaren emariaren kasuan izan ezik. Dena den, emarian dagoen ezberdintasun hori hodi porotsuaren dimentsio ezberdinagatik izan daiteke.

Honen guztiaren ondorioz, erabili diren erdiko hodi mota guztietatik lehorketa hoberena ahalbidetzen dutenak irekiduradun hodiak dira, bereziki irekidura portzentaje handiena duena. Altzibar et al.ek (2008) dagoeneko frogatu zuten irekiduradun hodiaren lehorketarako eraginkortasuna eta solidoaren zirkulazio emaria beste konfigurazioena baino hobea zela. Gainera, iturriaren altuera txikiago egitea ahalbidetzen du hodi horrek eta, beraz, lehorketa ekipoaren altuera ere bai. Era berean, Altzibar et al.ek (2011) ondorioztatu zuten, irekiduradun hodiak erabiliz lortzen zen gas-solido kontaktua bikaina zen eta kontaktu horrek lehorketa denbora laburrenak ahalbidetzen zituen.

Bestalde, hodi ez-porotsuak ez ziren lehorketarako aukera ona gas-solido kontaktu txarra eta solidoaren zirkulazio emari baxua baitzuten. Hosseini et al.ek (2009) ere, gasak paper garrantzitsua jokatzen zuen aplikazioetan (lehorketan bezala), hodi ez-porotsudun sistemen aukera ez dela egokia eman zuten aditzera. Azkenik, hodi porotsuak irekiduradun hodiaren eta hodi ez-porotsuen arteko portaera du (Ishikura et al., 2003).

Ildo beretik, lehorketarako iturri bilgailua erabiltzearen garrantzia frogatuta geratu da. Lehorketa denbora, karga galera egonkorra eta aire emaria iturri bilgailurik gabekoekin konparatuz, zenbait esperimintutan antzekoak izan diren arren, balioak oro har txikiagoak izan dira eta horrek operazioaren kostuaren murrizketa ere eragiten du.

6. Kapituluu

6. LABURPENA

6. LABURPENEA

Doktorego tesi honen bidez iturri ohandze teknologiaren ezagutzan sakondu nahi izan da, bereziki iturri ohandze konikoan, gure ikerkuntza taldeak duela hogeita hamar urte hasitako ikerkuntzari jarraituz. Horretarako, mota ezberdinetako esperimenduak egin dira, hala nola, ziklo denborak, arrasteak eta lehorketak. Horretaz gain, ziklo denborak auresateko korrelazio enpirikoak eta sare neuronalak diseinatu dira. Beraz, saiakuntzak esperimendalki egiteaz gain, ordenagailu bidezko simulazioak ere egin dira.

Tesi honen ardatza partikulen ziklo denborak izan dira. Izan ere, solidoaren ziklo denbora jakitea ia ezinbestekoa da zenbait aplikaziorako, operazio baldintzarik egokiena finkatzea ahalbidetuko baitu. Gainera, ziklo denboren informazioa funtsezkoa da bai ohandzearen portaera hidrodinamikoa auresateko baita kontaktorearen bolumena (kontaktoreak tratatu ahal duen solido kantitatea) determinatzeko.

Ziklo denborei buruzko azterketa hidrodinamiko zabala egin da. Konfigurazio eta tamaina ezberdineko erdiko hodiak (irekiduradunak eta ez-porotsuak), ezaugarri ezberdinetako materialak (beira, garbantzuak eta ilar haziak), kontaktoreen faktore geometriko ezberdinak eta operazio baldintza ezberdinak aztertu dira eta euren batez besteko ziklo denboran, ziklo denbora minimoan, ziklo denbora maximoan eta zirkulazio emarian duten eragina determinatu da. Lortutako ziklo denbora eta zirkulazio emarietan oinarrituz, sistemen arteko konparazioari ere ekin zaio.

Ildo beretik, ziklo denborei buruzko analisi estatistikoa egin da. Horretarako, azterketa hidrodinamikorako erabilitako aldagaien eragina aztertu da batez besteko ziklo denboran, ziklo denbora minimoan, ziklo denbora maximoan eta zirkulazio emarian, eta faktore esanguratsuenak bereizi dira. Aldagai bakoitzak bakarka duen eragina aztertzeaz gain, bi aldagaien arteko elkarrekintzek duten eragina ere ikertu da.

Partikula finen ziklo denborak kalkulatzeko metodo berri bat proposatu da eta bere fidagarritasuna balioztatu da. Balioztapena, partikula trazatuaren jarraipen metodoa erabiliz egin da bai partikula handietarako baita finetarako ere. Partikula trazatzaile moduan, gorri margotutako tamaina bereko partikula erabili da partikula handien kasuan. Partikula finen kasuan, arinagoa eta handiagoa den partikula isodromiko koloreztatua erabili da. Ondoren, ziklo denboren azterketa hidrodinamikoa egin da metodo berria aplikatuz. Azterketa hidrodinamiko honetan, 0.6 mm-ko harea erabili da erdiko hodiaren iturri ohandze konikoetan, eta kontaktorearen eta erdiko hodiaren geometria ezberdinek eta operazio baldintza ezberdinek solidoaren ziklo denboran eta zirkulazio emarian duten eragina ikertu da.

Bibliografian ziklo denboren eta zirkulazio emariaren kalkulurako dauden korrelazio enpirikoak bildu dira eta gure sistemarako egokitasuna balioztatu da. Ziklo denboren azterketa hidrodinamikoan lortutako emaitzetatik abiatuz, batez besteko ziklo denborak auresateko korrelazio enpirikoak lortu dira erdiko hodi mota bakoitzerako. Horretarako, modulu adimentsionalak proposatu dira eta euren egokitasuna egiaztatu da. Bestalde, sare neuronalak ere garatu dira ziklo denborak (batez bestekoa, minimoa eta maximoa) eta zirkulazio emaria auresateko. Irteera bakarreko eta irteera anitzeko sare neuronalak garatu eta alderatu dira eta gure datu-basea auresateko egokiena hautatu da. Ondoren, korrelazio enpirikoak eta sare neuronalak euren artean erkatu dira eta ziklo denborak eta zirkulazio emari berriak estimatzeko duten gaitasuna aztertu da.

Bestalde, gure ikerkuntza taldean hondakin ezberdinak balioztatzeko gasifikazioa eta pirolisia bezalako prozesuak egin dira iturri ohandze konikoetan. Prozesu horietan katalizatzaileak ezinbestekoak dira emaitzen hautakortasuna edo selektibitatea optimizatzeko. Prozesu horiek eskala handian egiten direnean, gas iturritzaileak katalizatzaile kantitate nabarmenak arrastatzen ditu kanpora. Horregatik, tesi honetan partikula finen arrastea ekiditen duen iturri bilgailua ikertu da erdiko hodidun iturri ohandze konikoetan.

Iturri bilgailuari dagokionez, gure ikerkuntza taldearen aurreko tesi batean (Altzibar, 2011) egindako ikerketa hidrodinamikoan lortutako emaitza onak frogatu dira arraste esperimentuak baldintza tarte askoz zabalagoan lan eginez. Arraste esperimentuak erdiko hodi mota ezberdinak (irekiduradunak eta ez-porotsuak) erabiliz egin dira. Hala ere, tesi honetako arraste esperimentuetan aldatu den parametro garrantzitsua ohandzearen gainazalaren eta iturri bilgailuaren behealdearen arteko hutsunea izan da Altzibar-en tesian azken parametro hau arrasterako kritikoa zela ikusi baitzen. Esperimentuetan, partikulek ziklo bat egiteko behar duten denbora maximoa lortzeaz gain, aire emariaren eta karga galera egonkorraren balioak erdietsi dira. Gainera, esperimentu mota bakoitzerako arrastearen zinetika aztertu da.

Arraste esperimentuetan sistema erreal bat simulatzeko, partikula fin eta handien nahastea erabili da; hau da, 0.41 mm-ko batez besteko diametroa duen ogi arrailatu partikula fin moduan eta 4 mm-ko diametroa duten beirazko bolak partikula handi moduan.

Azkenik, erdiko hodidun (irekiduradun, ez-porotsudun eta porotsudun) iturri ohandze konikoek eta iturri bilgailuek partikula finen lehorketarako duten aplikagarritasuna ikertu da giro tenperaturan. Lehortu den materiala 0.6 mm-ko eraikuntzarako harea izan da. Modu honetan, iturri bilgailuak hidrodinamikarako dituen abantailak lehorketarako ere baliogarri diren frogatu da. Sistema bakoitzean, irteerako airearen hezetasuna, aire emaria eta ohandzeko karga galera egonkorra neurtu dira denboran zehar.

Tesiko esperimentu gehienetan, iturkuntza abiadura minimoan lan egin da, baina sistema egonkor irauteko abiadura hori nahikoa izan ez denean, abiadura handiagoan lan egin da. Tesi osoan zehar, ahal izan denean erdiko hodirik gabe ere egin dira esperimentuak, erdiko hodia erabiliz egindakoekin konparatu ahal izateko.

Esperimentuak bi instalazio ezberdinetan egin dira. Alde batetik, ziklo denboren azterketa hidrodinamiko eta lehorketak ohiko emari ertainetarako ekipoan egin dira. Bestetik, arraste esperimentuak emari handietarako ekipo berri batean egin dira ohiko ekipoak eman ahal duena baino emari handiagoa behar baitzen helburu horretarako. Dena den, bi ekipoak aldakortasun handikoak dira geometria ezberdineko kontaktoreekin, material ezberdinekin eta gasaren abiaduraren tarte handian lan egitea ahalbidetzen baitute. Horretaz gain, datu esperimentalak ordenagailuaren bidez neurtu eta bildu dira.

7. Kapituluua

7. ONDORIOAK

7. ONDORIOAK

Tesi honetan lortutako emaitzetatik atera daitezkeen ondorio garrantzitsuenak eta etorkizunerako interesagarrienak hurrengoak dira gai bakoitzaren arabera sailkatuta.

1. Ziklo denboren azterketa estatistikoaz

1.1. Erdiko hodirik gabeko sistemetan, aldagaiek hiru ziklo denboretan (batez bestekoan, minimoan eta maximoan) duten eraginaren ordena berbera da, hala nola, kontaktorearen angelua da eraginik handienekoa eta, jarraian, kontaktorearen angeluaren eta dentsitatearen arteko elkarrekintza. Aldiz, zirkulazio emariaren ordena ez dator bat ziklo denborarenarekin, lehenengoa, kontaktorearen angeluaren eta partikula diametroaren arteko elkarrekintza baita eta, bigarrena, kontaktorearen angelua.

1.2. Irekiduradun hodia duten sistemetan, bai ziklo denboretarako (batez bestekoa, minimoa eta maximoa) baita zirkulazio emarirako ere, kontaktorearen angelua eta erdiko hodian hanken zabalera dira esangura gehien duten aldagaiak.

1.3. Hodi ez-porotsua duten sistemetan, ziklo denboretarako (batez bestekoa, minimoa eta maximoa) nahiz zirkulazio emarirako, erdiko hodian hanken luzera da garrantzitsua, eta ondoren kontaktorearen angelua (zirkulazio emarian ezik, bertan partikula diametroa baita).

1.4. Analisi estatistiko bateratuan, erdiko hodi mota da garrantzia handiena duen aldagaia bai ziklo denbora mota guztietarako baita zirkulazio emarirako ere.

2. Ziklo denboren azterketa hidrodinamikoaz

2.1. Partikulen ziklo denborak erdiko hodiaren konfigurazioaren eta kontaktorearen geometriaren menpekoak dira.

2.2. Kontaktorearen angelua, ohantzearen altuera eta irekiduradun hodian hanken zabalera handitzean, ziklo denboren balioek gora egiten dute eta solidoaren zirkulazio emariak berriz behera. Kontaktorearen angelua eta ohantzearen altuera handitzean ohantzean solido kantitate handiagoa dago (45° -ko kontaktorean 28° -koan baino %70 inguru gehiago dago).

2.3. Erdiko hodi ez-porotsuen hanken luzera handitzean, ziklo denboren balioek behera egiten dute eta solidoaren zirkulazio emariak gora.

2.4. Hodirik gabeko sistemek dituzte ziklo denbora laburrenak, hodi ez-porotsudun sistemek handienak (hodirik gabeko sistemen bikoitzak) eta irekiduradun hodia dutenek bitarteko ziklo denborak dituzte. Zehazki, hodi ez-porotsudun sistemen balioetatik baino hodirik gabeko sistemen balioetatik hurbilago daude.

2.5. Ziklo denbora tarterik zabalena erdiko hodi ez-porotsua duten sistemek dituzte, hodirik gabekoek estuenak eta irekiduradun hodia duten sistemek bitartekoak. Hodi ez-porotsua duten sistemek tarterik zabalena izatearen erantzule faktoreen eragina da, hots, faktoreek (aldagaiek) eragin handiago dute eta aldaketa handiagoak sortarazten dituzte.

2.6. Hodi ez-porotsuen kasuan hanken luzera handiena erabiltzean, partikulen batez besteko ziklo denborak laburragoak dira. Irekiduradun hodian kasuan hanken zabalera 0.01 m (irekidura portzentajea %79) denean, batez besteko ziklo denbora tarterik txikiena lortzen da.

2.7. Partikula finen ziklo denboren ikerketa egiteko diseinatu den metodo berria (partikulak iturrian biltzeko metodoa) fidagarria dela frogatu da. Partikula trazatuaren jarraipen metodoaren bidez eta partikulak iturrian biltzeko metodoaren bidez kalkulaturako zirkulazio emarien arteko diferentziak, errore esperimentalak baino txikiagoak dira kasu guztietan.

2.8. Partikula trazatuaren jarraipen metodoa erabiliz lorturiko ziklo denboren eta zirkulazio emariaren joerak partikulak iturrian biltzeko metodoarekin lan egitean baieztatu dira.

2.9. Partikula iturrian biltzeko metodoa erabiliz, bai abiadura minimoan baita abiadura minimoan baino %10 abiadura handiagoan ere lan eginez, ziklo denboren eta zirkulazio emariaren joera berbera da.

2.10. Erdiko hodi ez-porotsuen zein irekiduradun hodian diametroa handitzean, solidoen ziklo denbora laburragoa da. Dena den, bi hodi motek joera berdina duten arren, irekiduradun hodian ziklo denborak hodi ez-porotsuenak baino laburragoak dira.

3. Ziklo denboren korrelazio enpirikoez eta sare neuronalez

3.1. Iturri ohandze konikoen ziklo denborak edo zirkulazio emaria estimatzeko bibliografian dauden korrelazio enpirikoak ez dira egokiak. Beraz, korrelazio enpiriko berriak garatu dira bibliografiako korrelazioetan oinarrituz.

3.2. Korrelazio enpirikoak garatzeko proposaturako moduluak egokiak dira modulu bakoitzaren balio teoriko jakinerako, batez besteko ziklo denboraren balio esperimentalak antzekoak baitira.

3.3. Erdiko hodirik gabeko iturri ohandzerako proposaturiko ekuazioa hauxe da:

$$\bar{t}_c = 33.51(Ar)^{-0.12} \left(\frac{H_0}{D_0} \right)^{0.13} \tan(\gamma)^{0.78}$$

3.4. Erdiko hodirik gabeko ekuazioaren bidezko estimazioen eta neurtutako balioen arteko diferentziak errore esperimentalaren barnean daude. Ondorioz, erdiko hodirik gabeko sistemetarako proposaturiko korrelazio enpirikoa egokia da datu-basearen barruko balioak aurreratzeko.

3.5. Irekiduradun sistemetarako korrelazio enpirikoa hurrengoa da:

$$\bar{t}_c = 101.83(Ar)^{-0.18} \left(\frac{H_0}{D_0} \right)^{0.48} \left(\frac{W_H}{D_0} \right)^{0.31} \tan(\gamma)^{0.87}$$

3.6. Kasu honetan ere estimazioak errore experimentalaren barruan daude. Izatez, irekiduradun hodia duten sistematarako proposaturiko korrelazio honek erdiko hodirik gabeko sistematarako proposatutakoa baino hobeto doitzen ditu balio experimentalak.

3.7. Hodi ez-porotsuetarako korrelazio enpiriko berria ondorengoa da:

$$\bar{t}_c = 4.08 (Ar)^{-0.06} \left(\frac{H_0}{D_0} \right)^{1.71} \left(\frac{L_H}{D_0} \right)^{-0.79} \tan(\gamma)^{0.94}$$

3.8. Ekuazio honek ondo doitzen ditu datu experimentalak, eta estimazioen eta neurtutako balioen arteko diferentziak beste konfigurazioetarako lortutakoak baino txikiagoak dira.

3.9. Nahiz eta doiketa hoberena irekiduradun hodiatarako proposatutako korrelazio enpirikoak duen, erdiko hodirik gabeko sistematarako garatu den korrelazioa eta hodi ez-porotsuetarako garatu dena ere onargarriak dira.

3.10. Irteera bakarrek eta irteera anitzeko sare neuronalak garatu dira konfigurazio bakoitzerako (erdiko hodirik gabe, irekiduradun hodiako eta hodi ez-porotsurako). Irteera anitzeko sareen estimazioak onargarriak diren arren, irteera bakarrek sare neuronalek hobeto estimatzen dituzte datu-baseko balioak.

3.11. Doiketa onargarria lortzeko, erdiko hodirik gabeko sistemarako bost neuronako sare neuronala diseinatu behar izan da, irekiduradun sistemarako hamar neuronakoa eta hodi ez-porotsudun sistemarako zazpi neuronakoa.

3.12. Hiru konfigurazio ezberdinetarako garatutako sareak egokiak dira datu-baseko balioak auresateko. Hiruren artean, erdiko hodirik gabeko sistemen doiketak dira bereziki onenak. Horretaz gain, hodi ez-porotsuak erabiliz lortutako estimazioen eta neurketa experimentalen arteko diferentziak beste konfigurazioena baino handiagoak dira. Hortaz, sare neuronalek hobekien auresaten duten sistema erdiko hodirik gabekoa da.

3.13. Hiru konfigurazioetarako (erdiko hodirik gabe, irekiduradun hodiatarako eta hodi ez-porotsuetarako) esanguratsua den aldagaiak (kontaktorearen angeluak) ziklo denboretan eragindako joerak ondo ulertzen dituzte sare neuronalek. Berrito ere, irteera bakarrek sare neuronala doitzen da hobekien datu experimentaletara.

3.14. Batez besteko ziklo denboraren kalkulurako, korrelazio enpirikoak zein sare neuronalak egokiak diren arren, sare neuronalaren portaera hobe da bai doiketari dagokionez baita datu berriak auresateko ere.

3.15. Oro har, sare neuronalak eta korrelazio enpirikoak egokiak dira aldagaien (kontaktorearen angeluaren, gasaren sarrerako diametroaren, partikula diametroaren, erdiko hodian hanken luzeraren eta hanken zabaleraren) eraginak auresateko. Dena den, aldagai horiek eragindako joerak zehatzago estimatzen dituzte sare neuronalek.

4. Arrastea ekiditeko azterketa kualitatiboaz

4.1. Hodirik gabeko esperimentuen iturria irekiduradun eta hodi ez-porotsudun sistemena baino altuagoa da. Horretaz gain, hodirik gabeko saiakuntzetan emari altuenak erabili dira eta, beraz, solidoen zirkulazioa oso azkarra izan da.

4.2. Ohantzearen gainazalaren eta iturri bilgailuaren beheko aldearen arteko hutsunea (H_B) zehazki neurtzea oso garrantzitsua da saiakuntzaren hidrodinamika asko aldatzen baita.

4.3. Ohantzearen gainazalaren eta iturri bilgailuaren beheko aldearen arteko hutsunea (H_B) txikia denean, airea ez da bilgailura sartzen. Hutsunea handia denean aldiz, iturri bilgailuak ez du iturria biltzen eta ohantzea egonkortzen. Gainera, ohantzea askatzen denean bi zentimetro inguru hedatzen denez, H_B hutsuneak gutxienez hiru zentimetrokoa izan behar du.

4.4. Arrasteari dagokionez, ohantzea askatzen den unea da kritikoena, arraste gehien orduantxe gertatzen baita. Beraz, abiadura poliki-poliki handitu behar da ohantzearen iturria irekitzen den unean.

5. Arrastea ekiditeko azterketa kuantitatiboaz

5.1. Iturri bilgailurik gabeko sistemetan arraste balio handienak lortzen dira (%64-83). Iturri bilgailua erabiltzeak, aldiz, portzentaje hau txikitzen du. 0.20 m diametroko iturri bilgailua duten sistemek jasiten dute gehien arrastea (%10-49) eta ondoren, 0.15 m-ko iturri bilgailua dutenek (%13-55). Beraz, frogatuta geratzen da iturri bilgailuak nabarmen murrizten duela finen arrastea. Egiaztatu da zenbat eta iturri bilgailuaren diametroa handiagoa izan, hobeto ekiditen duela finen arrastea.

5.2. Erdiko hodi motaren arabera, arraste balio txikienak (%10-64) hodi ez-porotsua duten sistemek eragiten dituzte, arraste balio handienak (%47-83) erdiko hodirik gabeko sistemek eta irekiduradun hodia duten sistemek bitarteko balioak (%29-81).

5.3. Iturri bilgailurik gabe eta erdiko hodirik gabe arraste handiena (%83) gertatu den bitartean, 0.20 m diametroko iturri bilgailuarekin eta erdiko hodi ez-porotsuarekin lan eginez gertatu da arraste txikiena (%10).

5.4. Iturri bilgailurik gabeko sistemek ziklo denbora maximoaren baliorik handienak (6.7-23.1 s) dituzte, 0.15 m diametroko iturri bilgailua dutenek baliorik txikienak (5.5-21.2 s) eta 0.20 m-ko iturri bilgailua dutenek tarteko balioak (5.2-22.7 s), hau da, iturri bilgailua erabiliz zirkulazioa azkarragoa da. Diametro handiagoa duen iturri bilgailuak ziklo denbora maximoaren balio altuagoak ditu.

5.5. Hodi ez-porotsua duten sistemek ziklo denbora maximoen baliorik handienak (21.2-23.1 s) dituzte, hodirik gabeko sistemek ziklo denbora maximoen baliorik txikienak (5.5-6.7 s) dituzte eta irekiduradun hodia duten sistemek aurreko bien arteko balioak (10.4-15.3 s) dituzte.

5.6. Ziklo denbora maximoaren balio txikiena (5.2 s) 0.20 m diametroko iturri bilgailua eta erdiko hodirik gabeko konfigurazioak du, eta balio handiena (23.1 s) hodi ez-porotsua eta iturri bilgailurik gabeko konfigurazioak.

5.7. Iturri ohantze erregimena lortzeko emari altuenak (143-276 m³/h) iturri bilgailurik gabeko sistemek behar dituzte, 0.15 m-ko diametroa duten iturri bilgailudun sistemek tarteko emariak (135-269 m³/h) eta 0.20 m-ko diametroa duten iturri bilgailudun sistemek emari baxuenak (124-257 m³/h) behar dituzte. Erdiko hodiaren eraginari dagokionez, hodirik gabeko sistemei dagozkie emari altuenak (257-276 m³/h), hodi ez-porotsudun sistemei emari baxuenak (124-143 m³/h), eta irekiduradun hodidun sistemei bitarteko balioak (201-255 m³/h).

5.8. Konfigurazio guztien artean emari handiena behar duena iturri bilgailurik eta erdiko hodirik gabeko sistema da (276 m³/h), eta emari txikiena berriz, 0.20 m-ko iturri bilgailua eta erdiko hodi ez-porotsua duen sistema da (124 m³/h).

5.9. Karga galera egonkorraren balio altuenak (4637-11236 Pa) iturri bilgailurik gabeko sistemek eragiten dituzte, tarteko balioak (4425-10638 Pa) 0.15 m-ko diametroa duten iturri bilgailudun sistemek eta balio txikiak (3897-9434 Pa) 0.20 m-ko diametroa duten iturri bilgailudun sistemek. Iturri bilgailuaren diametroa handitzean, sistema horren barneko karga galera egonkorra txikiagoa da.

5.10. Erdiko hodirik gabeko sistemek karga galera egonkorraren balio altuenak (9434-11236 Pa) dituzte, hodi ez-porotsua duten sistemek balio txikiak (3897-4637 Pa) eta irekiduradun hodia duten sistemek bitarteko balioak (8870-10456 Pa), baina hodirik gabekoetatik oso hurbil erabili den irekiduradun hodiaren irekidura portzentajea %57koa izan delako.

5.11. Esperimentu guztien artean 0.20 m diametroko iturri bilgailua eta hodi ez-porotsua duen sistemak du karga galera egonkorraren balio txikiena (3897 Pa).

5.12. Iturri bilgailuaren eta ohantzearen gainazalaren arteko hutsunea (H_B) handitu ahala karga galera egonkorraren joera beherakorra da hiru erdiko hodi motarako eta iturri bilgailuaren bi diametro ezberdinetarako. Karga galera egonkorrerako H_B -ren balio optimoa 0.08-0.10 m tartean dago 0.15 m-ko iturri bilgailudun sistemetarako eta 0.06-0.09 m tartean 0.20 m-ko iturri bilgailudun sistemetarako.

5.13. Iturri bilgailuaren eta ohantzearen gainazalaren arteko hutsunea (H_B) handitzean arrastea txikitu egiten da bi iturri bilgailu ezberdinetarako eta erdiko hodi mota guztietarako. Arrastea ekiditeko H_B -ren balio optimoa 0.15 m-ko iturri bilgailudun sistemetarako 0.09-0.14 m artean dago, eta 0.20 m-ko iturri bilgailudun sistemetarako 0.07-0.010 m artean dago.

5.14. Iturri bilgailuaren eta ohantzearen arteko hutsunea (H_B) handitzean, iturri ohantze erregimena lortzeko emariak behera egiten du erdiko hodi mota eta iturri bilgailu ezberdinetarako. Emari baxuena lortzeko H_B hoberena 0.15 m-ko iturri bilgailudun sistemetarako 0.09-0.10 m artean dago eta 0.20 m-ko iturri bilgailudun sistemetarako 0.06-0.08 m artean dago.

5.15. Iturri bilgailuaren eta ohantzearen arteko hutsunea (H_B) handitzean ziklo denbora maximoa handitu egiten da. Zirkulazio azkarra (ziklo denbora maximo laburrak) nahi izanez gero, H_B egokiena 0.03-0.09 m artean dago eta, aldiz, zirkulazio geldoa (ziklo denbora maximo luzeak) nahi bada, H_B egokia 0.04-0.09 m artean dago.

5.16. H_B egokienak arrastearen, emariaren eta karga galera egonkorraren balio txikiena eta ziklo denbora maximoaren bitarteko balioa sortarazi behar ditu. Baldintza horiek betetzen dituen hutsunea 0.08 m-koa da.

5.17. Iturri bilgailuaren erabilpena behar-beharrezkoa da katalizataileak bezalako partikula finak erabiltzen diren prozesuetan.

5.18. Erdiko hodi mota eta iturri bilgailu guztietarako arraste portzentajea handiagoa da denbora igaro ahala. Lehenengo bost minutuetan (ohantzea irekitzean) gertatzen da arrasterik gehien, eta ondoren arrastearen handitze abiadura hasierakoa baino txikiagoa da. Gainera, sistema berberetan emari altuagoan operatzean arraste handiagoa sortzen da.

6. Partikula finen lehorketaz

6.1. Aztertutako iturri bilgailudun konfigurazio ezberdinak (erdiko hodi ez-porotsua, hodi porotsua eta irekiduradun hodia) erabiliz lehorketa denbora iturri bilgailurik gabeko sistemena baino txikiagoa da. Erdiko hodian hanken luzera eta irekidura portzentajea handitzean, lehorketa denbora laburragoa da.

6.2. Hodi porotsuaz baliatuz egin den lehorketa hodi ez-porotsuaz baliatuz egin dena baino azkarragoa izan da. Irekiduradun hodiekin aldiz, hodi porotsuek eta ez-porotsuek baino azkarrago lehortzen dute. 0.07 m-ko hanken luzera duen hodi ez-porotsua duen sistemak lehortzen du geldoen eta 0.01 m-ko hanken zabalerara (%79 irekidura portzentajea) duenak azkarren. Konfigurazio guztiak kontuan izanik lehorketa denboraren arabera ordena hauexek da: $t_{LH7} > t_{LH15} > t_{HP} > t_{WH2.5} (\%42 \text{ IP}) > t_{WH1.8} (\%57 \text{ IP}) > t_{WH1} (\%79 \text{ IP})$.

6.3. Iturri bilgailudun konfigurazio guztien karga galera egonkorra iturri bilgailurik gabekoena baino txikiagoa da. Erdiko hodian hanken luzera eta irekidura portzentajea handitzean, karga galera egonkorra handiagoa da.

6.4. Hodi porotsuak eragiten duen karga galera egonkorra hodi ez-porotsuek eragiten dutena baino txikiagoa da. Irekiduradun hodian karga galera egonkorra hodi porotsuarenaren bikoitza da. Irekiduradun hodia duten sistemen karga galera egonkorraren balioak hodi porotsua eta ez-porotsua dutenenak baino handiagoak dira. 0.01 m-ko hanken zabalerako (%79 irekidura portzentajea) irekiduradun hodia duten sistemek karga galera egonkorraren balio handiena eragiten dute eta hodi porotsua erabiltzen dutenek, aldiz, balio txikiena eragiten dute. Sistema guztiak kontuan izanda, karga galera egonkorraren arabera ordena hauexek da: $\Delta P_{WH1} (\%79 \text{ IP}) > \Delta P_{WH1.8} (\%57 \text{ IP}) > \Delta P_{WH2.5} (\%42 \text{ IP}) > \Delta P_{LH15} > \Delta P_{LH7} > \Delta P_{HP}$.

6.5. Konfigurazio guztietarako, iturri bilgailua erabiltzen duten sistemen iturkuntzarako beharrezko aire emaria iturri bilgailua erabiltzen ez dutenena baino txikiagoa da. Erdiko

hodian hanken luzera eta irekidura portzentajea handitzean, beharrezko aire emaria handiagoa da.

6.6. Hodi porotsua erabiltzean behar den aire emaria hodi ez-porotsuak erabiltzean behar dena baino handiagoa da. Irekiduradun hodiak erabiltzean behar den aire emaria hodi ez-porotsuak erabiltzean behar dena baino handiagoa da. 0.01 m-ko hanken zabalera (%79ko irekidura portzentajea) duen irekiduradun hodia erabiltzen duen sistemaren aire emaria da handiena eta 0.07 m-ko hanken luzera duen hodi ez-porotsua erabiltzen duen sistemarena txikiena. Konfigurazio guztiak aztertuz gero, aire emariaren araberako ordena hauxe da: $Q_{WH1} (\%79 \text{ IP}) > Q_{WH1.8} (\%57 \text{ IP}) > Q_{HP} > Q_{WH2.5} (\%42 \text{ IP}) > Q_{LH15} > Q_{LH7}$.

6.7. Lehorketarako hodirik eraginkorrenak irekiduradunak dira, bereziki irekidura portzentaje handiena dutenak.

8. Kapituluu

8. NOMENKLATURA

8. NOMENKLATURA

Ar	Arquimedes-en zenbaki adimentsionala.
b_1	Ezkutuko geruzen bias (faktore eskala) bektorea.
b_2	Irteerako geruzen bias (faktore eskala) bektorea.
b_j	j unitatearen bias pisua.
d_p, \overline{d}_p	Partikularen diametroa eta batez besteko diametroa, L.
D_b, D_C, D_i, D_0	Ohantzearen gainazaleko diametroa, zati zilindrikoaren diametroa, kontaktorearen oinarriaren diametroa eta gasaren sarrerako diametroa, L.
D_h	Hirukiak izan behar duen diametroa, L.
D_{pA}, D_{pB}	A partikularen diametroa, B partikularen diametroa, L.
D_T	Erdiko hodiaren diametroa, L.
D_G	Iturri bilgailuaren diametroa, L.
D_{G15}, D_{G20}	15 cm-ko diametroa duen iturri bilgailua eta 20 cm-ko diametroa duen iturri bilgailua, L.
f_i	Maiztasuna.
F	Fisher-Snedecor-en F banaketa.
g	Azelerazio grabitazionala, $L^2 T$.
H	Hedatutako ohantzearen altuera, L.
H_B	Ohantzearen gainazalaren eta iturri bilgailuaren beheko aldearen arteko hutsunearen altuera, L.
H_C	Kontaktorearen zati konikoaren altuera, L.
h_d	Hodi ez-porotsuen hanken altuera, L.
H_h	Gailuaren sakonera, L.
H_0	Ohantzearen altuera, L.
HG, HEP	Hodirik gabe eta hodi ez-porotsuz osaturiko sistemak.
IB, IBG	Iturri bilgailuz eta iturri bilgailurik gabe osaturiko sistemak.

IBSN, IASN	Irteera bakarreko eta anitzeko sare neuronalak.
IH	Irekiduradun hodiz osaturiko sistemak.
IP	Irekidura portzentajea, %.
IW	Sarrerako geruzatik ezkutuko geruzarako lotura matrizea.
k_1, k_2	Proporzionaltasun konstanteak, T^{-1} .
KF	Konfigurazioa.
L_B	Iturri bilgailuaren luzera, L.
l_d	Erdiko hodiaren goiko aldearen luzera, L.
L_H, L_T	Hodi ez-porotsuen hanken luzera eta hodian luzera totala, L.
LW	Ezkutatutako geruzatik irteera geruzarako lotura matrizea.
M_S, M_h	Ohantzeko solidoaren pisua, gailuarekin hartutako laginen batez besteko masa, M.
n	Transduktoreak bidaltzen duen seinale elektrikoaren balioa, I.
O_k	Irteera neurona bakoitza.
Q, Q_{ms}	Emaria, iturkuntzarako emari minimoa, L^3T^{-1} .
R	Erregresio koefizientea.
SS_E, SS_F, SS_I, SS_T	Errorearen karratuen batura, faktore bakoitzari dagokion karratuen batura, faktoreen arteko interazioen karratuen batura eta karratuen batura totala.
$\Delta t, \bar{t}_c, \bar{t}_i, t_{cmax}, t_{cmin}$	Ziklo denboren tartea, batez besteko ziklo denbora, denbora tarteen batez bestekoa, ziklo denbora maximoa eta ziklo denbora minimoa, T.
t	Denbora, T.
t_h	Laginak hartzeko ezarri den denbora, T.
$u, u_o, (u_o)_{ms}, u_{mf}, u_{ms}$	Airearen abiadura, gasaren sarrerako diametroari erreferituriko abiadura, gasaren sarrerako diametroari erreferituriko iturkuntza abiadura minimoa, fluidizazio minimorako abiadura eta iturkuntza abiadura minimoa, LT^{-1} .

V_{jk}	Ezkatututako geruzatik irteera geruzarako pisuak.
W_{ij}	i. sarrera eta ezkutuko geruzaren j. neuronaren arteko loturaren pisua.
W_H	Irekiduradun hodien hanken zabalera, L.
W_S, W_{Sh}	Solidoaren zirkulazio emaria, solidoaren zirkulazio emaria gailua erabiliz, $M T^{-1}$.
x	Sarrera bektorea.
x_i	Tamaina bakoitzeko partikulen frakzioa.
y	Irteera bektorea.
y_j	Ezkutuko geruzaren unitate bakoitzak.

Sinboloak

$\Delta P, \Delta P_S, \Delta P_h,$ $\Delta P_T, \Delta P_o$	Karga galera, karga galera egonkorra, kontaktore hutseko karga galera, neurturiko karga galera totala, ohantzearen karga galera, $M L^{-1} T^{-1}$.
$\gamma/2, \gamma_b$	Kontaktorearen konoaren angelua eta oinarri konikodun kontaktore zilindrikoen oinarriko angelua, radianak.
μ_g	Gasaren biskositatea, $M L T^{-1}$.
ϕ	Esferikotasuna.
ρ_A, ρ_B, ρ_L	A partikularen, B partikularen eta jariakinaren dentsitateak, $M L^{-3}$.
ρ_b, ρ_g, ρ_s	Ohantzearen, gasaren eta solidoaren dentsitateak, $M L^{-3}$.
$\rho_{poliestirenoa}, \rho_V$	Poliestireno hedatuaren eta beirazko bolen dentsitateak, $M L^{-3}$.

9. Kapituluwa

9. BIBLIOGRAFIA

9. BIBLIOGRAFIA

Adegoroye, A., Paterson, N., Li, X., Morgan, T., Herod, A., Dugwell, D., Kandiyoti, R., *Fuel*, 83, 1949 (2004).

Afzal, T. M., Abe, T., *Comput. Electron. Agric.*, 26, 137 (2000).

Agarwal, G., Lattimer, B., Ekkad, S., Vandsburger, U., *AIChE J.*, 58, (10) 3003 (2012).

Aguado, R., Olazar, M., San José, M. J., Gaisan, B., Bilbao, J., *Energy Fuels*, 16, 1429 (2002).

Aguado, R., Olazar, M., Gaisan, B., Prieto, R., Bilbao, J., *Chem. Eng. J.*, 92, 91 (2003).

Aguado, R., Prieto, R., San José, M., Álvarez, S., Olazar, M., Bilbao, J., *Chem. Eng. Process.*, 44, 231 (2005).

Aguado, R., Arrizabalaga, A., Arabiourrutia, M., Lopez, G., Bilbao, J., Olazar, M., *Chem. Eng. Sci.*, 106, 9 (2014).

Alghurabie, I. K., Hasan, B. O., Jackson, B., Kosminski, A., Ashman, P. J., *Chem. Eng. Res. Des.*, 91, (9) 1614 (2013).

Almeida, A. R. F., Freire, F. B., Freire, J. T., *Drying Technol.*, 28, 330 (2010).

Alsmari, T. A., Grace, J. R., Bi, X. T., *Powder Technol.*, 290, 2 (2016).

Altzibar, H., Ikasketa amaierako proiektua, Euskal Herriko Unibertsitatea, Bilbo, (2004).

Altzibar, H., Lopez, G., Álvarez, S., San José, M. J., Barona, A., Olazar, M., *Drying Technol.*, 26, 308 (2008).

Altzibar, H., Lopez, G., Aguado, R., Álvarez, S., San José, M. J., Olazar, M., *Chem. Eng. Technol.*, 32, 463 (2009).

Altzibar, H., Doktorego Tesia, Euskal Herriko Unibertsitatea, Bilbo, (2011).

Altzibar, H., Lopez, G., Olazar, M., Bilbao, J., *Chem. Eng. Technol.*, 34, (7) 1130 (2011).

Altzibar, H., Lopez, G., Estiati, I., Bilbao, J., Olazar, M., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 52, 15959 (2013).

Altzibar, H., Lopez, G., Bilbao, J., Olazar, M., *Ind. Eng. Chem. Res.* 53, (1) 415 (2014).

Álvarez, J., Lopez, G., Amutio, M., Bilbao, J., Olazar, M., *Fuel*, 128, (15) 162 (2014a).

Álvarez, J., Lopez, G., Amutio, M., Bilbao, J., Olazar, M., *Bioresour. Technol.* 170, 132 (2014b).

Álvarez, J., Kumagai S., Wu, C., Yoshioka, T., Bilbao, J., Olazar, M., Williams, P. T., *Int. J. Hydrogen Energ.*, 39, 10883 (2014c).

Álvarez, J., Lopez, G., Amutio, M., Bilbao, J., Olazar, M., *Energy Fuels*, 29, 3198 (2015).

Álvarez, J., Lopez, G., Amutio, M., Artetxe, M., Barbarias, I., Arregi, A., Bilbao, J., Olazar, M., *Fuel Process. Technol.*, 149, 169 (2016).

Álvarez, S., *Doktorego Tesia*, Euskal Herriko Unibertsitatea, Bilbo, (1997).

Alves, N. N., Messaoud, G. B., Desobry, S., Costa, J. M. C., Rodrigues, S., *J. Food Eng.*, 189, 45 (2016).

Amasorrain, A., *Ikasketa amaierako proiektua*, Euskal Herriko Unibertsitatea, Bilbo, (2005).

Amutio, M., Lopez, G., Aguado, R., Artetxe, M., Bilbao, J., Olazar, M., *Energy Fuels*, 25, 3950 (2011).

Amutio, M., Lopez, G., Aguado, R., Bilbao, J., Olazar, M., *Energy Fuels*, 26, 1353 (2012).

Amutio, M., Lopez, G., Álvarez, J., Moreira, R., Duarte, G., Nunes, J., Olazar, M., Bilbao, J., *Bioresour. Technol.*, 129, 512 (2013).

Amutio, M., Lopez, G., Álvarez, J., Olazar, M., Bilbao, J., *Bioresour. Technol.*, 194, 225 (2015).

Anabtawi, M., Uysal, B., Jumah, R., *Powder Technol.*, 69, 205 (1992).

Anabtawi, M., *J. Chem. Eng. Jpn.*, 26, 728 (1993).

Ando, S., Maki, T., Mizutani, T., Namiki, N., Emi, H., Otani, Y., *Funtai Kogaku Kaishi* 37, (8) 572 (2000).

Ando, S., Maki, T., Nakagawa, Y., Namiki, N., Emi, H., Otani, Y., *Adv. Powder Technol.*, 13, 73 (2002).

Arabiourrutia, M., Lopez, G., Elordi, G., Olazar, M., Aguado, R., Bilbao, J., *Int. J. Chem. Reactor Eng.*, 5, A96 (2007).

Arabiourrutia, M., Olazar, M., Aguado, R., Lopez, G., Barona, A., Bilbao, J., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 47, 7600 (2008).

Arabiourrutia, M., Elordi, G., Lopez, G., Borsella, E., Bilbao, J., Olazar, M., *J. Anal. Appl. Pyrol.*, 94, 230 (2012).

Arbib, H. A., Levy, A., *Can. J. Chem. Eng.*, 60, 528 (1982a).

- Arbib, H. A., Levy, A., *Combustion Sci. Technol.*, 29, 83 (1982b).
- Arnold, M. S. J., Gale, J. J., Laughlin, M. K., *Can. J. Chem. Eng.*, 70, 991 (1992).
- Arregi, A., Barbarias, I., Álvarez, J., Erkiaga, A., Artetxe, M., Amutio, M., Olazar, M., *Chem. Eng. Trans.*, 43, 547 (2015).
- Arregi, A., Lopez, G., Amutio, M., Barbarias, I., Bilbao, J., Olazar, M., *RSC Adv.*, 0, 1 (2016).
- Arsenijevic, Z. L., Grbavcic, Z. B., Garic-Grulovic, R. V., *Can. J. Chem. Eng.*, 82, 450 (2004).
- Artetxe, M., Lopez, G., Amutio, M., Elordi, G., Olazar, M., Bilbao, J., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 49, 2064 (2010).
- Artetxe, M., Lopez, G., Elordi, G., Amutio, M., Bilbao, J., Olazar, M., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 51, 13915 (2012).
- Artetxe, M., Lopez, G., Amutio, M., Elordi, G., Bilbao, J., Olazar, M., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 52, 10637 (2013).
- Artetxe, M., Lopez, G., Amutio, M., Bilbao, J., Olazar, M., *Chem. Eng. Sci.*, 116, 635 (2014).
- Artetxe, M., Lopez, G., Amutio, M., Barbarias, I., Arregi, A., Aguado, R., Bilbao, J., Olazar, M., *Waste Management.*, 45, 126 (2015).
- Atutxa, A., Aguado, R., Gayubo, A., Olazar, M., Bilbao, J., *Energy Fuels*, 19, 765 (2005).
- Aversa, M., Curcio, S., Calabrò, V., Iorio, G., *Food Bioprocess Tech.*, 5, 118 (2012).
- Azizi, S., Hosseini, S. H., Moraveji, M., Ahmadi, G., *Particuology*, 8, (5) 415 (2010).
- Bacelos, M. S., Neto, P. I. S., Silveira, A. M., Freire, J. T., *Drying Technol.*, 23, 427 (2005).
- Bacelos, M. S., Freire, J. T., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 45, 808 (2006).
- Bachovchin, D. M., Beer, J. M., Sarofim, A. F., *AIChE Symp. Ser.*, 205, 76 (1981).
- Baeyens, J., Geldart, D., Wu, S. Y., *Powder Technol.*, 71, 71 (1992).
- Balasubramanian, M., Meisen, A., Mathur, K. B., *Can. J. Chem. Eng.*, 56, 297 (1978).
- Baracat, M. M., Nakagawa, A. N., Freitas, L. A. P., Freitas, O., *Can. J. Chem. Eng.*, 82, 134 (2004).

Barbarias, I., Artetxe, M., Arregi, A., Álvarez, J., Lopez, G., Amutio, M., Olazar, M., *Chem. Eng. Trans.*, 43, 2029 (2015).

Barbarias, I., Lopez, G., Álvarez, J., Artetxe, M., Arregi, A., Bilbao, J., Olazar, M., *Chem. Eng. J.*, 296, 191 (2016).

Baron, T., Briens, C. L., Galtier, P., Bergougnou, M. A., *Powder Technol.*, 63, 149 (1990).

Becker, H. A., *Chem. Eng. Sci.*, 12, 246 (1961).

Belyaev, A., *Solid Fuel Chem.*, 42, 335 (2008).

Benali, M., Amazouz, M., *J. Food Eng.*, 74, 484 (2006).

Benkrid, A., Caram, H. S., *AIChE J.*, 35, 1328 (1989).

Berghel, J., *Drying Technol.*, 23, 1027 (2005).

Berghel, J., Nilsson, L., Renstrom, R., *Chem. Eng. Process.*, 47, 1252 (2008).

Bernocco, D., Bosio, B., Arato, E., *Chem. Eng. Res. Des.*, 91 (5) 843 (2013).

Berquin, Y. F., *Genie Chim.*, 86, 45 (1961).

Berquin, Y. F., G.B. Patente zkia.: 962265 (1964).

Berquin, Y.F., U.S.A. Patente zkia.: 3231413 (1966).

Berruti, F., Muir, J. R., Behie, L. A., *Can. J. Chem. Eng.*, 66, 919 (1988).

Béttega, R., Correa, G. R., Freire, J. T., *Can. J. Chem. Eng.*, 87, 193 (2009).

Bezerra, C. V., Amante, E. R., De Oliveira, D. C., Rodrigues, A. M. C., Da Silva, L. H. M., *Ind. Crop. Prod.*, 41, 241 (2013).

Bhattacharya, S., Shah, N., *Int. J. Energy Res.*, 11, 429 (1987).

Bilbao, J., Olazar, M., Romero, A., Arandes, J. M., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 26, 1297 (1987).

Bilbao, J., Olazar, M., Arandes, J. M., Romero, A., *Chem. Eng. Commun.*, 75, 121 (1989).

Borini, G., Andrade, T., Freitas, L., *Powder Technol.*, 189, 520 (2009).

Boulos, M. I., Waldie, B., *Can. J. Chem. Eng.*, 64, 939 (1986).

Bowers, R. H., Stevens, J. W., Suckling, R. D., G.B. Patente zkia.: 855809 (1960).

- Braga, M. B., Rocha, S. C. S., *Can. J. Chem. Eng.*, 91, 1786 (2013).
- Braga, M. B., Rocha, S. C. S., *Drying Technol.*, 33, (8) 930 (2015).
- Brereton, C. M. H., Epstein, N., Grace, J. R., *Can. J. Chem. Eng.*, 74, 542 (1996).
- Bridgwater, J., Spouted Beds, "*Fluidization*", J. F. Davidson, R. Clift, D. Harrison (Eds.), Academic Press, London, 201 (1985).
- Briens, C. L., Bergougnou, M. A., Inculet, I. I., Baron, T., Hazlett, J. D., *Powder Technol.*, 70, 57 (1992).
- Buchanan, R. H., Wilson, B., *Mech. Chem. Eng. Trans.*, MC1, 117 (1965).
- Busciglio, A., Vella, G., Micale, G., Rizzuti, L., *Chem. Eng. J.*, 140, 398 (2008).
- Cassanello, M., Larachi, F., Legros, R., Chaouki, J., *Chem. Eng. Sci.*, 54, 2545 (1999).
- Chatterjee, A., *Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop.*, 9, 340 (1970).
- Chen, X., Ren, B., Chen, Y., Zhong, W., Chen, D., Lu, Y., Jin, B., *Can. J. Chem. Eng.*, 91, 1762 (2013).
- Chen, W. Y., Kuo, H. P., *WCPT7 Procedia Eng.*, 102, 1144 (2015).
- Cheong, L. K., Malhotra, K., Mujumdar, A. S., *Powder Technol.*, 46, 141 (1986).
- Chielle, D. P., Bertuol, D. A., Meili, L., Tanabe, E. H., Dotto, G. L., *LWT - Food Sci. Technol.* 65, 852 (2016).
- Choi, M., Meisen, A., *Chem. Eng. Sci.*, 52, 1073 (1997).
- Claflin, J. K., Fane, A. G., *Can. J. Chem. Eng.*, 61, 356 (1983).
- Claflin, J. K., Fane, A. G., "*Drying 84*", Hemisphere Publishing Corp.: Washington, 137, (1984).
- Correa, N. A., Freire, F. B., Correa, R. G., Freire, J. T., *Drying Technol.*, 22, 1087 (2004).
- Correa, N. A., Freire, F. B., Correa, R. G., Control of the Drying Process in Spouted Bed, in "*Transport Phenomena In Particulate Systems*", J. T. Freire, A. M. Da Silveira, M. D. C. Ferreira (Eds.), Bentham ebooks, 124 (2012).
- Costa Jr., E. F., Cardoso, M., Passos, M. L., *Drying Technol.*, 19, 1975 (2001).
- Cubillos, F. A., Álvarez, P. I., Pinto, J. C., Lima, E. L., *Powder Technol.*, 87, 153 (1996).
- Cui, H., Grace, J. R., *Bioresource Technol.*, 99, 4008 (2008).

- Cunha, F. G., Santos, K. G., Ataíde, C. H., Epstein, N., Barrozo, M. A. S., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 48, 976 (2009).
- Cunha, R. L., Maialle, K. G., Menegalli, F. C., *Powder Technol.*, 107, 234 (2000).
- Da Rosa, C., Freire, J., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 48, 7813 (2009).
- Da Rosa, G. S., Rocha, S. C. S., *Chem. Eng. Process.*, 49, 836 (2010).
- Da Silva, B. G., Fileti, A. M. F., Taranto, O. P., *Chem. Eng. Commun.*, 202, 1089 (2015).
- Dankwerts, P. V., *Chem. Eng. Sci.*, 2, 1 (1953).
- Day, J. Y., Morgan III, M. H., Littman, H., *Chem. Eng. Sci.*, 42, 1461 (1987).
- De Alsina, O. L. S., De Almeida, M. M., Da Silva, J. M., Monteiro, L. F., "Transport Phenomena and Drying of Solids and Particulate Material", M. P. Q. Delgado, A. G. Barbosa de Lima (Eds.), *Advanced Structured Materials*, 48, 141 (2014).
- Devahastin, S., Mujumdar, A. S., *Powder Technol.*, 117, 189 (2001).
- Díaz, M. A., *Doktorego Tesia, Euskal Herriko Unibertsitatea, Bilbo*, (2017).
- Dobson, A. J., "An introduction to linear models", Chapman&Hall, New York, (1991).
- Du, S., Sun, Y., Gamliel, D. P., Valla, J. A., Bollas, G. M., *Bioresour. Technol.*, 169, 188 (2014).
- Duarte, C., Olazar, M., Murata, V., Barrozo, M., *Powder Technol.*, 188, 195 (2009).
- Elordi, G., Lopez, G., Aguado, R., Olazar, M., Bilbao, J., *Int. J. Chem. Reactor Eng.*, 5, A72 (2007).
- Elordi, G., Olazar, M., Lopez, G., Amutio, M., Artetxe, M., Aguado, R., Bilbao, J., *J. Anal. Appl. Pyrol.*, 85, 345 (2009).
- Elordi, G., Olazar, M., Lopez, G., Artetxe, M., Bilbao, J., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 50, 6061 (2011a).
- Elordi, G., Olazar, M., Lopez, G., Artetxe, M., Bilbao, J., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 50, 6650 (2011b).
- Elordi, G., Olazar, M., Castaño, P., Artetxe, M., Bilbao, J., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 51, 14008 (2012).
- Epstein, N., Grace, J. R., "Handbook of Powder Science and Technology" M. E. Fayed, L. Otten (Eds.), Van Nostrand Reinhold Co., New York (1997).

- Epstein, N., Grace, J. R., "Spouted and Spout-Fluid Beds. Fundamentals and Applications", Cambridge University Press, (2011).
- Erkiaga, A., Lopez, G., Amutio, M., Bilbao, J., Olazar, M., *Fuel Process. Technol.*, 116, 292 (2013).
- Erkiaga, A., Lopez, G., Amutio, M., Bilbao, J., Olazar, M., *Chem. Eng. J.*, 237, (1) 259 (2014).
- Erkiaga, A., Lopez, G., Barbarias, I., Artetxe, M., Amutio, M., Bilbao, J., Olazar, M., *J. Anal. Appl. Pyrol.*, 116, 34 (2015).
- Espinaço, A. L., Freitas, L. A. P., Analysis of tablet coating efficiency in a bottom spray spouted bed coater, in "Drying'04", M. A. Silva, S. C. S. Rocha, A. S. Mujumdar, (Eds.), Ourograf: Sao Paulo, Brazil, 239 (2004).
- Estiati, I., Altzibar, H., Olazar, M., *Chem. Eng. Trans.*, 39, 1669 (2014).
- Estiati, I., Altzibar, H., Tellabide, M., Olazar M., *Chem. Eng. Trans.*, 43, 787 (2015).
- Estiati, I., Freire, F. B., Freire, J. T., Aguado, R., Olazar, M., *Fuel*, 180, 377 (2016).
- Evin, D., Gul, H., Tanyiildizi, V., *Drying Technol.*, 26, 1577 (2008).
- Falcón, J., Hechavarría, T. L., Quintana, J. F., Vázquez, Y. G., *Tecnología Química*, 20, (2) 52 (2000).
- Fan, L., Kitano, K., Kreischer, B., *AIChE J.*, 33, 225 (1987).
- Fernández-Akarregi, A. R., Makibar, J., Lopez, G., Amutio, M., Olazar, M., *Fuel Process. Technol.*, 112, 48 (2013).
- Ferreira, M. C., Freire, J. T., *Can. J. Chem. Eng.*, 70, 905 (1992).
- Follansbee, D. M., Paccione, J. D., Martin, L. L., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 47, 3591 (2008).
- Foong, S. K., Barton, R. K., Ratcliffe, J. S., *Chem. Eng. in Australia Instn. Engrs.*, 1 (1976).
- Foong, S. K., Lim, C., Watkinson, A., *Can. J. Chem. Eng.*, 58, 84 (1980).
- Foong, S. K., Cheng, G., Watkinson, A., *Can. J. Chem. Eng.*, 59, 625 (1981).
- Freire, J. T., Freire, F. B., Ferreira, M. C., Nascimento, B. S. A., *Drying Technol.*, 30, 1342 (2012a).
- Freire, J. T., Ferreira, M. C., Freire, F. B., Nascimento, B. S. A., *Drying Technol.*, 30, 330 (2012b).

- Freire, F. B., Atxutegi, A., Freire, F. B., Freire, J. T., Aguado, R., Olazar, M., *Drying Technol.*, 1, 1 (2016).
- Freitas, L. A. P., Dogan, O. M., Lim, C. J., Grace, J. R., Luo, B., *Chem. Eng. Comm.*, 181, 243 (2000).
- Freitas, L., Freire, J. T., *Drying Technol.*, 19, 1065 (2001a).
- Freitas, L., Freire, J. T., *Powder Technol.*, 114, 152 (2001b).
- Gajewski, A. J., *Electrostat.*, 17, 289 (1985).
- Geldart, D., *Powder Technol.*, 7, 285 (1973).
- Geldart, D., Cullinan, J., Georghiadis, S., Gilvray, D., Pope, K. J., *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 57, 269 (1979).
- Gishler, P. E., Mathur, K. B., U.S.A. Patente zkoa.: 2786280 (1957a).
- Gishler, P. E., Mathur, K. B., G.B. Patente zkoa.: 801315 (1957b).
- Gorshtein, A. E., Mukhlenov, I. P., *Zh. Prikl. Khim.*, 40, 2469 (1967).
- Grbavcic, Z. B., Vukovic, D. V., Hadzismajlovic, Dz. E., Garic, R. V., Littman, H., *Can. J. Chem. Eng.*, 69, 386 (1991).
- Grbavcic, Z. B., Vukovic, D. V., Jovanovic, S. Dj., Garic, R. V., Hadzismajlovic, Dz. E., Littman, H., Morgan III, M. H., *Can. J. Chem. Eng.*, 70, 895 (1992).
- Hao, H., Guoxin, H., Fengchao, W., *Energy Convers. Manage.*, 49, 257 (2008).
- Hatano, S., Nakamura, N., Kobayashi, N., Itaya, Y., *J. Chin. Inst. Chem. Eng.*, 36, 61 (2005).
- Hatate, Y., Mihara, H., Ijichi, K., Yoshimi, T., Arimizu, S., Uemura, Y., King, D., *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 22, 1180 (1996).
- Hatate, Y., Ijichi, K., Uemura, Y., *J. Soc. Powder Technol.*, 34, 343 (1997).
- Hattori, H., Takeda, K., *J. Fac. Textile Sci. Tech.*, 70, 1 (1976).
- Hattori, H., Takeda, K., *J. Chem. Eng. Jpn.*, 11, 125 (1978).
- Hattori, H., Tanaka, K., Takeda, K., *J. Chem. Eng. Jpn.*, 14, 462 (1981).
- Hattori, H., Kobayashi, A., Aiba, I., Koda, T., *J. Chem. Eng. Jpn.*, 17, 102 (1984).
- Hattori, H., Nagai, T., *J. Chem. Eng. Jpn.*, 29, 484 (1996).

- Hattori, H., Nagai, T., Ohshima, Y., Yoshida, M., Nagata, A., *J. Chem. Eng. Jpn.*, 31, 633 (1998).
- Hattori, H., Morimoto, T., Yamaguchi, M., Onezawa, T., Arai, C., *J. Chem. Eng. Jpn.*, 34, 1549 (2001).
- Hattori, H., Ito, S., Onezawa, T., Yamada, K., Yanai, S., *J. Chem. Eng. Jpn.*, 37, 1085 (2004).
- He, Y. L., Doktorego Tesia, British Columbia Unibertsitatea, Kanada, (1990).
- He, Y. L., Lim, C. J., Grace, J. R., *Can. J. Chem. Eng.*, 70, 848 (1992).
- He, Y. L., Lim, C. J., Grace, J. R., Zhu, J. X., *Can. J. Chem. Eng.*, 72, 229 (1994).
- He, Y. L., Lim, C. J., Qin, S. Z., Grace, J. R., *Can. J. Chem. Eng.*, 76, 702 (1998).
- Heertjes, P. M., Khoe G. K., *Chem. Ing. Tech.*, 52, 333 (1980).
- Heil, C., Tels, M., *Can. J. Chem. Eng.*, 61, 331 (1983).
- Himmelblau, D. M., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 47, (16) 5782 (2008).
- Hook, B. D., Littman, H., Morgan III, M. H., Arkun, Y., *Can. J. Chem. Eng.*, 52, 966 (1992).
- Hosseini, S. H., Zivdar, M., Rahimi, R., *Chem. Eng. Process.*, 48, 1539 (2009).
- Hosseini, S. H., Ahmadi, G., Razavi, B., Zhong, W., *Energy Fuels*, 24, 6086 (2010).
- Hosseini, S. H., Ahmadi, G., Olazar, M., *J. Taiwan Inst. Chem. E.*, 45, 2140 (2014).
- Iammartino, N. R., *Chem. Eng.*, 81, 102 (1974).
- Ijichi, K., Miyauchi, M., Uemura, Y., Hatate, Y., *J. Chem. Eng. Japan.*, 31, 677 (1998).
- Ijichi, K., Uemura, Y., Hatate, Y., *J. Chem. Eng. Jpn.*, 33, 526 (2000).
- Ishikura, T., Nagashima, H., Ide, M., *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 22, 620 (1996).
- Ishikura, T., Nagashima, H., Ide, M., *Powder Technol.*, 131, 56 (2003).
- Izquierdo, M. A., Doktorego Tesia, Euskal Herriko Unibertsitatea, Bilbo, (1998).
- Jacob, M., Piskova, E., Morl, L., Krueger, G., Heinrich, S., Peglow, M., Ruempler, K. H., *WCCE7*, 86855, 1 (2005).
- Jarallah, A., Watkinson, A., *Can. J. Chem. Eng.*, 63, 227 (1985).
- Jeng, R., Altwicker, E., Morgan, M., *Combust. Sci. Technol.*, 170, 87 (2001).

- Ji, H., Tsutsumi, A., Yoshida, K., *AIChE J. Symposium Series*, 137, 131 (1997).
- Ji, H., Tsutsumi, A., Yoshida, K., *J. Chem. Eng. Jpn.*, 31, 842 (1998).
- Jittanit, W., Srzednicki, G., Driscoll, R. H., *Drying Technol.*, 31, 52 (2013).
- Jono, K., Ichikawa, H., Miyamoto, M., Fukumori, Y., *Powder Technol.*, 113, 269 (2000).
- Jumah, R., Al-Kteimat, E., Al-Hamad, A., Telfah, E., *Drying Technol.*, 25, 1417 (2007).
- Kechagiopoulos, P. N., Voutetakis, S. S., Lemonidou, A. A., Vasalos, I. A., *Catal. Today*, 127, 246 (2007).
- Kechagiopoulos, P. N., Voutetakis, S. S., Lemonidou, A. A., Vasalos, I. A., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 48, 1400 (2009).
- Kfuri, C. R., Freitas, L. A. P., *Drying Technol.*, 23, 2369 (2005).
- Khoe, G. K., Van Brakel, J., *Can. J. Chem. Eng.*, 61, 411 (1983).
- Khoe, G. K., Sun, S. L., Lim, C. J., Epstein, N., *10th Int. Conf. Chem. Eng. (CHISA)*, E5.17 (1990).
- Kikuchi, K., Suzuki, A., Mochizuki, T., Endo, S., Imai, E., Tanji, Y., *Proc. Int. Conf. Coal Sci.*, 407 (1985).
- Kim, J. H., Bae, J. W., Nam, J. W., Kim, S. D., Choi, J. H., Lee, D. H., *Korean J. Chem. Eng.*, 31, (11) 2094 (2014).
- Kim, S. J., Cho, S. Y., *Korean J. Chem. Eng.*, 8, 131 (1991).
- Kmiec, A., Leschonski, K., *Chem. Eng. J.*, 45, 137 (1991).
- Kmiec, A., Ludwig, W., Szafran, R., *Chem. Eng. Technol.*, 32, 450 (2009).
- Konduri, R., Altwicker, E., Morgan, M., *Combust. Sci. Technol.*, 101, 461 (1994).
- Konduri, R., Altwicker, E., Morgan, M., *Can. J. Chem. Eng.*, 73, 744 (1995).
- Konduri, R., Altwicker, E., Morgan, M., *Chem. Eng. Sci.*, 54, 185 (1999).
- Konopka, I., Markowski, M., Tanska, M., Zmojda, M., Malkowski, M., Bialobrzewski, I., *Int. J. Food Sci. Technol.*, 43, 2047 (2008).
- Krambrock, W., *Powder Technol.*, 15, 199 (1976).
- Krishnaiah, D., Nithyanandam, R., Sarbatly, R., *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, 54, 449 (2014).

- Kucharski, J., Kmiec, A., *Can. J. Chem. Eng.*, 61, 435 (1983).
- Kucharski, J., Kmiec, A., *Chem. Eng. Sci.*, 44, 1627 (1989).
- Kulah, G., Sari, S., Koksals, M., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 55, 3131 (2016).
- Kunii, D., Levenspiel, O., *Powder Technol.*, 61, 193 (1990).
- Larachi, F., Grandjean, B. P. A., Chaouki, J., *Chem. Eng. Sci.*, 58, 1497 (2003).
- Large, J. F., Martinie, Y., Bergougou, M. A., *J. Powder Bulk Solids Technol.*, 1, 15 (1977).
- Lefroy, G., Davidson, J., *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 47, T120 (1969).
- Leva, M., *Chem. Eng. Progress*, 47, 39 (1951).
- Leva, M., "*Fluidization*", Mc Graw Hill: New York (1959).
- Li, L., Rasmuson, A., Ingram, A., Johansson, M., Rimmelgas, J., Von Corswant, C., Folestad, S., *AIChE J.*, 61, (3) 756 (2015).
- Lim, C. J., Mathur, K. B., *Can. J. Chem. Eng.*, 52, 150 (1974).
- Lim, C. J., Mathur, K. B., *AIChE J.*, 22, 674 (1976).
- Lim, C. J., Mathur, K. B., "*Fluidization II*", Eng. Foundation, Cambridge U. Press.: Cambridge, 104 (1978).
- Lim, C. J., Watkinson, A., Khoe, G., Low, S., Epstein, N., Grace, J. R., *Fuel*, 67, 1211 (1988).
- Link, J., Cuypers, L., Deen, N., Kuipers, J., *Chem. Eng. Sci.*, 60, 3425 (2005).
- Link, J., Godlieb, W., Deen, N., Kuipers, J., *Chem. Eng. Sci.*, 62, 195 (2007).
- Lira, T. S., Barrozo, M. A. S., Assis, A. J., *ESCAPE17*, 51 (2007).
- Littman, H., Morgan III, M. H., Vukovic, D., Zdanski, F., Grbavcic, Z., *Can. J. Chem. Eng.*, 55, 497 (1977).
- Littman, H., Morgan III, M. H., *Can. J. Chem. Eng.*, 64, 505 (1986).
- Liu, J., Grace, J., Bi, X., *AIChE J.*, 49, 1405 (2003).
- Liu, L., Litster, J., *Powder Technol.*, 74, 215 (1993a).
- Liu, L., Litster, J., *Powder Technol.*, 74, 259 (1993b).
- Liu, M., Liu, B., Shao, Y., Wang, J., *Nucl. Eng. Des.*, 271, 68 (2014).

- Liu, W., Zhang, P., Xu, S., *Nongye Jixie Xuebao*, 39, 56 (2008).
- Llamosas, R., *Doktorego Tesia, Euskal Herriko Unibertsitatea, Bilbo*, (1996).
- Lopes, N. E. C., Moris, V. A. S., Taranto, O. P., *Chem. Eng. Process.*, 48, 1129 (2009).
- Lopez, G., Olazar, M., Amutio, M., Aguado, R., Bilbao, J., *Energy Fuels*, 23, 5423 (2009).
- Lopez, G., Artetxe, M., Amutio, M., Elordi, G., Aguado, R., Olazar, M., Bilbao, J., *Chem. Eng. Process.*, 49, 1089 (2010a).
- Lopez, G., Olazar, M., Aguado, R., Elordi, G., Amutio, M., Artetxe, M., Bilbao, J., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 49, 8990 (2010b).
- Lopez, G., Olazar, M., Aguado, R., Bilbao, J., *Fuel*, 89, 1946 (2010c).
- Lopez, G., Erkiaga, A., Artetxe, M., Amutio, M., Bilbao, J., Olazar, M., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 54, 9536 (2015).
- Luo, B., Lim, C. J., Freitas, L. A. P., Grace, J. R., *Can. J. Chem. Eng.*, 82, 83 (2004).
- Luo, K., Wu, F., Yang, S., Fan, J., *Chem. Eng. J.*, 267, 207 (2015).
- Ma, X., Honda, Y., Nakagawa, N., Kato, K., *J. Chem. Eng. Japan*, 29, 330 (1996).
- Ma, X., Kato, K., *Powder Technol.*, 95, (2) 93 (1998).
- Ma, X., Kaneko, T., Tashimo, T., Yoshida, T., Kato, K., *Chem. Eng. Sci.*, 55, 4643 (2000).
- Madonna, L. A., Boornazian, L., Bensel, B. K., Geveke, D., Nixon, D. McGowan, *Proc. 3rd Miami Int. Conf. Altern. Energy Sour.*, 6, 257(1983).
- Magalhaes, A., Pinho, C., *Chem. Eng. Process.*, 47, 2395 (2008).
- Makibar, J., Fernández-Akarregi, A. R., Alava, I., Cueva, F., Lopez, G., Olazar, M., *Chem. Eng. Process.*, 50, 790 (2011).
- Makibar, J., Fernández-Akarregi, A. R., Díaz, L., Lopez, G., Olazar, M., *Powder Technol.*, 219, 49 (2012).
- Makibar, J., Fernández-Akarregi, A. R., Amutio, M., Lopez, G., Olazar, M., *Fuel Process. Technol.*, 137, 283 (2015).
- Mamuro, T., Hattori, H., *J. Chem. Eng., Japon*, 1, 1 (1968).
- Mann, U., Crosby, E. J., *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, 11, 314 (1972).
- Mann, U., Crosby, E. J., *Chem. Eng. Sci.*, 28, (2) 623 (1973).

- Mann, U., Crosby, E. J., *Can. J. Chem. Eng.*, 53, 579 (1975).
- Mann, U., *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, 17, 103 (1978).
- Markowski, M., Sobieski, W., Konopka, I., Tanska, M., Bialobrzewski, I., *Drying Technol.*, 25, 1621 (2007).
- Markowski, M., Bialobrzewski, I., Modrzewska, A., *J. Food Eng.*, 96, 380 (2010).
- Marmo, L., *J. Food Eng.*, 79, 1179 (2007).
- Marreto, R. N., Freire, J. T., Freitas, L. A. P., *Drying Technol.*, 24, 327 (2006).
- Marreto, R. N., Peixoto, M. P. G., Tacon, L. A., Freitas, L. A. P., *Drying Technol.*, 25, 821 (2007).
- Martins, G. Z., Souza, C. R. F., Shankar, T. J., De Oliveira, W. P., *Chem. Eng. Process.*, 47, 2238 (2008).
- Mathur, K., Gishler, P., *J. Appl. Chem.*, 5, 624 (1955a).
- Mathur, K., Gishler, P., *AIChE J.*, 1, 157 (1955b).
- Mathur, K. B., Epstein, N., "Spouted Beds", Academic Press, New York, (1974a).
- Mathur, K. B., Epstein, N., *Adv. Chem. Eng.*, 9, 111 (1974b).
- Matthew, M. C., Morgan III, M. H., Littman, H., *Can. J. Chem. Eng.*, 66, 908 (1988).
- McCullough, D. P., Van Eyk, P. J., Ashman, P. J., Mullinger, P. J., *Energy Fuels*, 29, 3922 (2015).
- McNab, G. S., *British Chem. Eng. Process Tech.*, 17, 532 (1972).
- McNab, G. S., Bridgwater, J., *Resources and Energy*, 125 (1979).
- Melo, J. L. Z., Bancelos, M. S., Pereira, F. A. R., Lira, T. S., Gidaspow, D., *Chem. Eng. Process.*, 108, 93 (2016).
- Mikhailik, V. D., "Research on Heat and Mass Transfer in Technological Processes", Nauka I Tekhnika BSSR, Minsk, (1966).
- Milne, B. J., Berruti, F., Behie, L. A., De Bruijn, T. J. W., *Can. J. Chem. Eng.*, 70, 910 (1992).
- Mollick, P. K., Sathiyamoorthy, D., Rao, P. T., Rao, V. G., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 50, 13313 (2011).
- Mollick, P. K., Venugopalan, R., Roy, M., Rao, P. T., Sathiyamoorthy, D., Sengupta, P., Sharma, G., Basak, C. B., Chakravartty, J. K., *Chem. Eng. Sci.*, 128, 44 (2015).

- Morales, A., Doktorego Tesia, Euskal Herriko Unibertsitatea, Bilbo, (2002).
- Muir, J., Berruti, F., Behie, L., *Chem. Eng. Commun.*, 88, 153 (1990).
- Mujumdar, A. S., "*Drying 84*", Hemisphere Publishing Corp.: Washington, 151, (1984).
- Mujumdar, A. S., Principles, Classification, and Selection of Dryers, in "*Handbook of Industrial Drying*", A. S. Mujumdar (Eds.), Boca Raton, FL: CRC Press, 4 (2006).
- Mujumdar, A. S., Law, C. L., *Food Bioprocess Technol.*, 3, 843 (2010).
- Munz, R. J., Mersereau, O. S., *Chem. Eng. Sci.*, 45, 2489 (1990).
- Mussi, L. P., Guimaraes, A. O., Ferreira, K. S., Pereira, N. R., *LWT-Food Sci. Technol.*, 61, 80 (2015).
- Nagashima, H., Ishikura, T., Ide, M., *Korean J. Chem. Eng.*, 16, 688 (1999).
- Nagashima, H., Ishikura, T., Ide, M., *Can. J. Chem. Eng.*, 87, 228 (2009).
- Nagashima, H., Suzukawa, K., Ishikura, T., *Particuology*, 11, 475 (2013).
- Nakazato, T., Li, J., Kato, K., *Chem. Eng. Sci.*, 59, 2777 (2004).
- Neto, J. L. V., Duarte, C. R., Murata, V. V., Barrozo, M. A. S., *Drying Technol.*, 26, 299 (2008).
- Niksiar, A., Faramarzi, A. H., Sohrabi, M., *J. Anal. Appl. Pyrol.*, 113, 419 (2015).
- Nitta, B. V., Morgan III, M. H., *Chem. Eng. Sci.*, 47, 3459 (1992).
- Ogawa, T., Ikawa, K., *Japan Atomic Energy Inst.*, DE82702177XSP (1981).
- Olazar, M., San José, M. J., Aguayo, A. T., Arandes, J. M., Bilbao, J., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 31, 1784 (1992).
- Olazar, M., San José, M. J., Aguayo, A., Arandes, J. M., Bilbao, J., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 32, 1245 (1993).
- Olazar, M., San José, M. J., Llamosas, R., Álvarez, S., Bilbao, J., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 34, 4033 (1995).
- Olazar, M., San José, M. J., Aguado, R., Bilbao, J., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 35, 2716 (1996).
- Olazar, M., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 37, 4520 (1998).
- Olazar, M., San José, M. J., Aguado, R., Gaisan, B., Bilbao, J., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 38, 4120 (1999).

- Olazar, M., Aguado, R., Bilbao, J., Barona, A., *AIChE J.*, 46, 1025 (2000).
- Olazar, M., Aguado, R., San José, M. J., Bilbao, J., *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 76, 469 (2001a).
- Olazar, M., San José, M. J., Izquierdo, M. A., Ortiz De Salazar, A., Bilbao, J., *Chem. Eng. Sci.*, 56, 3585 (2001b).
- Olazar, M., Aguado, R., Velez, D., Arabiourrutia, M., Bilbao, J., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 44, 3918 (2005).
- Olazar, M., Lopez, G., Arabiourrutia, M., Elordi, G., Aguado, R., Bilbao, J., *J. Anal. Appl. Pyrol.*, 81, 127 (2008).
- Olazar, M., Lopez, G., Altzibar, H., Bilbao, J., *Chem. Eng. Res. Des.*, 89, (10) 2054 (2011).
- Olazar, M., Lopez, G., Altzibar, H., Amutio, M., Bilbao, J., *Drying Technol.*, 30, 207 (2012).
- Oliveira, W. P., Freire, J. T., Coury, J. R., *Int. J. Pharm.*, 158, 1 (1997).
- Osorio-Revilla, G., Elias-Serrano, R., Gallardo-Velázquez, T., *Can. J. Chem. Eng.*, 82, 142 (2004).
- Osorio-Revilla, G., Gallardo-Velázquez, T., Ramírez-Torres, A., Rivera-Espinoza, Y., *Can. J. Chem. Eng.*, 90, 153 (2012).
- Pablos, A., Vicente, J., Pascuas, I., Aguado, R., Olazar, M., *CHoPS8*, 1 (2015a).
- Pablos, A., Vicente, J., Pascuas, I., Aguado, R., Olazar, M., *CHoPS8*, 1 (2015b).
- Pakowski, Z., Mujumdar, A. S., Basic process calculations in drying, in *"Handbook of Industrial Drying"*, A. S. Mujumdar (Eds.), Marcel Dekker, New York, 54 (1995).
- Pallai, E., Szentmarjay, T., Mujumdar, A. S., Spouted bed drying, in *"Handbook of Industrial Drying"*, A. S. Mujumdar (Eds.), Boca Raton, FL: CRC Press, 363 (2006).
- Pallai, I., Nemeth, J., *4th Int. Conf. Chem. Eng. (CHISA)*, C3.11 (1972).
- Pallai-Varsanyi, E., Toth, J., Gyenis, J., *China Particuology*, 5, 337 (2007).
- Pannala, S., Daw, C. S., Finney, C. E. A., Boyalakuntla, D., Syamlal, M., O'Brien, T. J., *Chem. Vap. Depos.*, 13, 481 (2007).
- Park, K. B., Plawsky, J. L., Littman, H., Paccione, J. D., *Cem. Concr. Res.*, 36, 728 (2006).
- Passos, M. L., Mujumdar, A. S., Raghavan, G. S. V., *Powder Technol.*, 52, 131 (1987a).

- Passos, M. L., Mujumdar, A. S., Raghavan, V. G. S., "Advances in Drying", A. S. Mujumdar (Eds.), Hemisphere Publishing Corporation: Washington, 4, 359 (1987b).
- Passos, M. L., Mujumdar, A. S., Raghavan, G. S. V., *Drying Technol.*, 7, 663 (1989).
- Passos, M. L., Mujumdar, A. S., Massarani, G., *Drying Technol.*, 12, 351 (1994).
- Passos, M. L., Massarani, G., Freire, J. T., Mujumdar, A. S., *Drying Technol.*, 15, 605 (1997).
- Passos, M. L., Trindade, A. L. G., d'Angelo, J. V. H., Cardoso, M., *Drying Technol.*, 22, 1041 (2004).
- Patrose, B., Caram, H. S., *AIChE J. Symposium Series*, 80, 48 (1984).
- Paulo Filho, M., Rocha, S. C. S., Lisboa, A. C. L., *Chem. Eng. Process.*, 45, 965 (2006).
- Peñas, F. J., *Doktorego Tesia*, Euskal Herriko Unibertsitatea, Bilbo, (1993).
- Perazzini, M. T. B., Freire, F. B., Freire, J. T., *Adv. Chem. Eng. Sci.*, 5, 447 (2015).
- Pham, Q., *Can. J. Chem. Eng.*, 61, 426 (1983).
- Pianarosa, D. L., Freitas, L. A. P., Lim, C. J., Grace, J. R., Dogan, O. M., *Can. J. Chem. Eng.*, 78, 132 (2000).
- Piccinini, N., *Adv. Nucl. Sci. Technol.*, 8, 255 (1975).
- Piccinini, N., Bernhard, A., Campagna, P., Vallana, F., *Powder Technol.*, 18, 171 (1977).
- Piccinini, N., Grace, J. R., Mathur, K. B., *Chem. Eng. Sci.*, 34, 1257 (1979).
- Piccinini, N., Rovero, G., *Can. J. Chem. Eng.*, 61, 448 (1982).
- Pissinati, R., De Oliveira, W. P., *Eur. J. Pharm. Biopharm.*, 55, 313 (2003).
- Prachayawarakorn, S., Ruengnarong, S., Soponronnarit, S., *J. Food Eng.*, 76, 327 (2006).
- Pugsley, T. S., Berruti, F., *Powder Technol.*, 89, 57 (1996).
- Qian, L., Lu, Y., Zhong, W., Chen, X., Ren, B., Jin, B., *Can. J. Chem. Eng.*, 91, 1793 (2013).
- Randelman, R., Benkrid, A., Caram, H. S., *AIChE Symposium Series*, 83, 23 (1987).
- Rasul, M. G., *Fuel*, 80, 2189 (2001).
- Ray, T. B., Sarkar, S., *Indian Chem. Engr.*, 18, 11 (1976).

- Robinson, C. E., Estatu Batuak. Patente zkia.: 212508 (1879).
- Robinson, T., Waldie, B., *Can. J. Chem. Eng.*, 56, 632 (1978).
- Robinson, T., Waldie, B., *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 57, 121 (1979).
- Rocha, S., Taranto, O., Ayub, G., *Can. J. Chem. Eng.*, 73, 308 (1995).
- Rocha, S., Donida, M., Marques, A., *Can. J. Chem. Eng.*, 87, 695 (2009).
- Romankov, P. G., Rashkovskaya, N. B., "Drying in a Suspended State", Chem. Publ. House: Leningrad, (1968).
- Romankov, P. G., "Fluidization", J. F. Davidson, D. Harrison (Eds.), Academic Press: New York, (1971).
- Rong, L., Zhang, J., *J. Hydrodyn.*, 22, (3) 351 (2010).
- Rooney, N. M., Harrison, D., *Powder Technol.*, 9, 227 (1974).
- Rovero, G., Piccinini, N., Grace, J. R., Epstein, N., Brereton, C., *Chem. Eng. Sci.*, 38, 557 (1983).
- Roy, D., Larachi, F., Legros, R., Chaouki, J., *Can. J. Chem. Eng.*, 72, 945 (1994).
- Saadevandi, B. A., Turton, R., *Powder Technol.*, 98, 183 (1998).
- Saadevandi, B. A., Turton, R., *Chem. Eng. Commun.*, 191, 1379 (2004).
- Sahin, S., Sumnu, G., Tunaboyu, F., *Food Bioprod. Process.*, 9, 271 (2013).
- Salam, P. A., Bhattacharya, S. C., *Energy*, 31, 228 (2006).
- Saldarriaga, J. F., Doktorego Tesia, Euskal Herriko Unibertsitatea, Bilbo, (2015).
- Saldarriaga, J. F., Atxutegi, A., Aguado, R., Altzibar, H., Bilbao, J., Olazar, M., *Chem. Eng. Res. Des.*, 102, 80 (2015a).
- Saldarriaga, J. F., Grace, J., Lim, C. J., Wang, Z., Xu, N., Atxutegi, A., Aguado, R., Olazar, M., *Powder Technol.*, 283, 447 (2015b).
- San José, M. J., Doktorego Tesia, Euskal Herriko Unibertsitatea, Bilbo, (1991).
- San José, M. J., Olazar, M., Aguayo, A. T., Arandes, J. M., Bilbao, J., *Chem. Eng. J.*, 51, 45 (1993).
- San José, M. J., Olazar, M., Peñas, F. J., Bilbao, J., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 33, 1838 (1994).

San José, M. J., Olazar, M., Peñas, F. J., Arandes, J. M., Bilbao, J., *Chem. Eng. Sci.*, 50, 2161 (1995).

San José, M. J., Olazar, M., Aguado, R., Bilbao, J., *Chem. Eng. J. Biochem. Eng. J.*, 62, 113 (1996a).

San José, M. J., Olazar, M., Llamosas, R., Izquierdo, M. A., Bilbao, J., *Chem. Eng. J. Biochem. Eng. J.*, 64, 353 (1996b).

San José, M. J., Olazar, M., Álvarez, S., Bilbao, J., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 37, 2553 (1998a).

San José, M. J., Olazar, M., Álvarez, S., Izquierdo, M. A., Bilbao, J., *Chem. Eng. Sci.*, 53, 3561 (1998b).

San José, M. J., Olazar, M., Izquierdo, M. A., Álvarez, S., Bilbao, J., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 40, 420 (2001).

San José, M. J., Olazar, M., Izquierdo, M. A., Álvarez, S., Bilbao, J., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 43, 3433 (2004).

San José, M. J., Álvarez, S., Ortiz De Salazar, A., Olazar, M., Bilbao, J., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 44, 193 (2005).

San José, M. J., Álvarez, S., Morales, A., Olazar, M., Bilbao, J., *Chem. Eng. Res. Des.*, 84, 487 (2006).

San José, M. J., Álvarez, S., Ortiz De Salazar, A., Olazar, M., Bilbao, J., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 46, (9) 2877 (2007a).

San José, M. J., Álvarez, S., Morales, A., Ortiz De Salazar, A., Olazar, M., *Int. J. Chem. Reactor Eng.*, 5, 1 (2007b).

San José, M. J., Álvarez, S., Ortiz De Salazar, A., Morales, A., Bilbao, J., *Chem. Eng. Trans.*, 21, 145 (2010).

San José, M. J., Álvarez, S., López, L. B., García, I., *Chem. Eng. Trans.*, 24, 673 (2011).

San José, M. J., Álvarez, S., Peñas, F. J., López, L. B., *WCE2012*, 3, 1506 (2012).

San José, M. J., Álvarez, S., Peñas, F. J., García, I., *Chem. Eng. Sci.*, 100, 413 (2013).

Santos, K. G., Campos, A. V. P., Ferreira, L. V., Santana R. C., Barrozo, M. A. S., *Chem. Eng. Technol.*, 36, (12) 2148 (2013).

Scheuch, S., Kamphuis, A., McKay, I., Walls, J., *Second Eur. Conf. Young Res. Chem. Eng.*, 1, 997 (1996).

Schwedes, J., Otterbach, J., *Verfahrenstechnik*, 8, 42 (1974).

- Seiler, C., Fryer, P. J., Seville, J. P. K., *Can. J. Chem. Eng.*, 86, 571 (2008).
- Shuhama, I. K., Aguiar, M. L., Oliveira, W. P., Freitas, L. A. P., *J. Food Eng.*, 59, 93 (2003).
- Silva, D. O., Tamiozzo, L. M., Duarte, C. R., Murata, V. V., Barrozo, M. A. S., *Drying Technol.*, 29, 286 (2011).
- Singiser, R., Lowenthal, W., *J. Pharm. Sci.*, 50, 168 (1961).
- Singiser, R., Heiser, A., Prillig, E., *Chem. Eng. Prog.*, 62, 107 (1966).
- Souza, C. R. F., De Oliveira, W. P., *Can. J. Chem. Eng.*, 87, 279 (2009).
- Spiegl, N., Sivena, A., Lorente, E., Paterson, N., Milian, M., *Energy Fuels*, 24, 5281 (2010).
- Spreutels, L., Haut, B., Chaouki, J., Bertrand, F., Legros, R., *Food Res. Int.*, 62, 137 (2014).
- Spreutels, L., Chaouki, J., Bertrand, F., Haut, B., Legros, R., *Powder Technol.*, 290, 62 (2016).
- Stocker, R., Eng, J. H., Svrcek, W. Y., Behie, L. A., *AIChE J.*, 35, 1617 (1989).
- Strumillo, C., Kaminski, W., Markowski, A., "Drying 80", A. S. Mujumdar (Ed.), Hemisphere Publishing Corp.: Washington, (1980).
- Subramanian, G., Turton, R., Shelukar, S., Flemmer, L., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 42, 2470 (2003).
- Suciu, G. C., Patrascu, M. H., *AIChE J.*, 23, 312 (1977).
- Sue, A. Q., Cheng, G., Watkinson, A. P., *Fuel*, 74, 159 (1995).
- Sullivan, C., Benkrid, A., Caram, H., *Powder Technol.*, 53, 257 (1987).
- Sutanto, W., Epstein, N., Grace, J. R., *Powder Technol.*, 44, 205 (1985).
- Swasdisevi, T., Tanthapanichakoon, W., Charinpanitkul, T., Kawaguchi, T., Tanaka, T., Tsuji, Y., *Chem. Eng. Tech.*, 27, 971 (2004).
- Swasdisevi, T., Tanthapanichakoon, W., Charinpanitkul, T., Kawaguchi, T., Tanaka, T., Tsuji, Y., *Adv. Powder Technol.*, 16, 275 (2005).
- Szafran, R. G., Kmiec, A., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 43, 1113 (2004).
- Szafran, R. G., *Inz. Chem. Procesowa*, 26, 289 (2005).
- Szafran, R. G., Kmiec, A., Ludwig, W., *Drying Technol.*, 23, 1723 (2005).

- Szentmarjay, T., Pallai, E., *Drying Technol.*, 7, 523 (1989).
- Takahashi, H., Yanai, H., *Powder Technol.*, 7, 205 (1973).
- Takeda, K., Hattori, H., *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 1, 149 (1975).
- Takeda, K., Hattori, H., *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 2, 507 (1976).
- Takeda, K., *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 2, 250 (1976).
- Takeuchi, S., Wang, X. S., Rhodes, M. J., *Chem. Eng. Sci.*, 60, 1267 (2005).
- Tamir, A., Kitron, Y., *Drying Technol.*, 7, 183 (1989).
- Taruna, I., Jindal, V. K., *Drying Technol.*, 20, 1035 (2002).
- Taskaev, N. D., Kozhina, M. I., *Trudy Akad. Nauk Kirgiz S. S. R.*, 7, 109 (1965).
- Thorley, B., Saunby, J. B., Mathur, K. B., Osberg, G. L., *Can. J. Chem. Eng.*, 37, 184 (1959).
- Tia, S., Bhattacharya, S., Wibulswas, P., *Int. J. Energy Res.*, 15, 185 (1991a).
- Tia, S., Bhattacharya, S., Wibulswas, P., *Int. J. Energy Res.*, 15, 203 (1991b).
- Uemaki, O., Mathur, K. B., *Ind. Eng. Chem. Process Des.*, 15, 504 (1976).
- Uemaki, O., Fujikawa, M., Kugo, M., *Sekiyu Gakkai Shi*, 20, 410 (1977).
- Uemura, Y., Miyauchi, M., Tanaka, S., Ijichi, K., Tanaka, Y., King, D., Hatate, Y., *Abstr. Pap. Am. Chem. S.*, 204, 132 (1992).
- Van Buijtenen, M. S., Börner, M., Deen, N. G., Heinrich, S., Antonyuk, S., Kuipers, J. A. M., *Powder Technol.*, 206, 139 (2011).
- Van Velzen, D., Flamm, H. J., Langenkamp, H., *Can. J. Chem. Eng.*, 52, 145 (1974).
- Vieira, G. N. A., Freire, F. B., Freire, J. T., *Drying Technol.*, 33, (15) 1920 (2015).
- Viswanathan, K., *Can. J. Chem. Eng.*, 64, 87 (1986).
- Vogiatzis, A. L., Afara, S., Briens, C. L., Bergougnou, M. A., "Circulating Fluidized Bed Technology II", P. Basu, J. F. Large (Eds.), Pergamon Press, 483 (1988).
- Voice, E. H., *Chem. Engr.*, 785 (1974).
- Vukovic, D. V., Zdanski, F. K., Littmah, H., *5th Int. Conf. CHISA*, D2.20 (1972).
- Vukovic, D. V., Hadzismajlovic, D., Grbavcic, Z. B., Garic, R. V., Littman, H., *Can. J. Chem. Eng.*, 62, 825 (1984).

- Vuthaluru, H. B., Zhang, D., *Fuel Process. Technol.*, 70, (1) 41 (2001).
- Waldie, B., Robinson, T., *Powder Technol.*, 27, 163 (1980).
- Waldie, B., *Proc. Particle Technol.*, 19, 16 (1981).
- Waldie, B., Wilkinson, D., *Can. J. Chem. Eng.*, 64, 944 (1986).
- Waldie, B., *Can. J. Chem. Eng.*, 70, 873 (1992).
- Wang, S., Hao, Z., Sun, D., Liu, Y., Wei, L., Wang, S., *Chem. Eng. Sci.*, 65, 1322 (2010a).
- Wang, S., Liu, Y., Wei, L., Dong, Q., Wang, C., *Powder Technol.*, 199, 238 (2010b).
- Wang, Z. G., Bi, H. T., Lim, C. J., *China Particuology*, 4, 194 (2006).
- Wang, Z., Bi, H. T., Lim, C. J., *Can. J. Chem. Eng.*, 87, 264 (2009).
- Wang, Z., Bi, H. T., Lim, C. J., *Ind. Eng. Chem. Res.*, 49, 5053 (2010c).
- Wang, Z., Saidi, M., Lim, C. J., Grace, J. R., Tabrizi, H. B., Chen, Z., Li, Y., *Chem. Eng. J.*, 290, 63 (2016).
- Watkinson, A., Cheng, G., Prakash, C., *Can. J. Chem. Eng.*, 61, 468 (1983).
- Watkinson, A., Cheng, G., Lim, C., *Can. J. Chem. Eng.*, 65, 791 (1987).
- Wen, C. Y., Hashinger, R. F., *AIChE J.*, 6, 220 (1960).
- Whiting, K. J., Geldart, D., *Chem. Eng. Sci.*, 35, 1499 (1980).
- Wu, S., Lim, C., Epstein, N., *Chem. Eng. Commun.*, 62, 251 (1987).
- Wu, Z., Mujumdar, A. S., *Powder Technol.*, 183, 260 (2008).
- Xavier, T. P., Libardi, B. P., Lira, T. S., Barrozo, M. A. S., *Powder Technol.*, 299, 210 (2016).
- Xiao, R., Zhang, M., Jin, B., Liu, X., *Can. J. Chem. Eng.*, 80, 800 (2002).
- Xiao, R., Shen, L., Zhang, M., Jin, B., Xiong, Y., Duan, Y., Zhong, Z., Zhou, H., Chen, X., Huang, Y., *Korean J. Chem. Eng.*, 24, 175 (2007).
- Xu, G., Guo, Q., Kaneko, T., Kato, K., *Adv. Environ. Res.*, 4, 9 (2000).
- Xu, J., Tang, J., Wei, S., Bao, X., *Can. J. Chem. Eng.*, 87, 274 (2009).
- Yagi, S., Aochi, T., *Chem. Eng. Japan*, 1, 1 (1955).

- Yang, S., Luo, K., Fan, J., Cen, K., *AIChE J.*, 60, (8) 2788 (2014).
- Yang, W. C., Keairns, D. L., *Can. J. Chem. Eng.*, 61, 349 (1982).
- Ye, B., Lim, C. J., Grace, J. R., *Can. J. Chem. Eng.*, 70, 840 (1992).
- Yuan, Z., *Develop. Chem. Eng. Mineral Process.*, 8, 207 (2000).
- Zabala, G., Doktorego Tesia, Euskal Herriko Unibertsitatea, Bilbo, (1997).
- Zabrodsky, S. S., "*Hydrodynamics and Heat Transfer in Fluidized Beds*", MIT Press, Cambridge, Massachussets, (1966).
- Zahed, A. H., Epstein, N., *Can. J. Chem. Eng.*, 70, 945 (1992).
- Zak, C., Natcher, P. B., *Symp. Pap. Energ. Biomass Waste*, 1, 643 (1987).
- Zhao, J., Lim, C., Grace, J. R., *Chem. Eng. Sci.*, 42, 2865 (1987a).
- Zhao, J., Lim, C., Grace, J. R., *Chem. Eng. Res. Des.*, 65, 426 (1987b).
- Zhao, X., Yao, Q., Li, S., *Chem. Eng. Technol.*, 29, 875 (2006).
- Zhao, X. L., Li, S. Q., Liu, G. Q., Song, Q., Yao, Q., *Powder Technol.*, 183, 79 (2008).
- Zhong, W., Zhang, M., *Chem. Eng. Sci.*, 60, 315 (2005a).
- Zhong, W., Zhang, M., *Powder Technol.*, 159, 121 (2005b).
- Zhong, W., Zhang, M., *Powder Technol.*, 152, 52 (2005c).
- Zhong, W., Chen, X., Zhang, M., *Chem. Eng. J.*, 118, 37 (2006a).
- Zhong, W., Zhang, M., Jin, B., *Chem. Eng. J.*, 124, 55 (2006b).
- Zhong, W., Zhang, M., Jin, B., Chen, X., *Chem. Eng. Process.*, 45, 734 (2006c).
- Zhong, W., Xiao, R., Zhang, M., *AIChE J.*, 52, 924 (2006d).
- Zhong, W., Li, Q., Zhang, M., Jin, B., Xiao, R., Huang, Y., Shi, A., *Chem. Eng. J.*, 139, 42 (2008).
- Zhong, W., Zhang, Y., Jin, B., *Energy Fuels*, 24, 5131 (2010).
- Zhong, W., Chen, X., Grace, J. R., Epstein, N., Jin, B., *Powder Technol.*, 247, 197 (2013).
- Zhou, J., Doktorego Tesia, Tennessee Unibertsitatea, Knoxville, (2008).
- Zhou, Y., Ma, L., Shi, Y., *Huagong Xuebao*, 55, 1532 (2004).