



IKER
GAZTE
NAZIOARTEKO
IKERKETA EUSKARAZ

III. IKERGAZTE NAZIOARTEKO IKERKETA EUSKARAZ

2019ko maiatzaren 27, 28 eta 29
Baiona, Euskal Herria

ANTOLATZAILEA:
Udako Euskal Unibertsitatea (UEU)

INGENIARITZA ETA ARKITEKTURA

**Baloi pneumatiko baten
zurruntasun estatiko bertikal zein
horizontalean eragina duten
parametroen azterketa**

*Irati Mendia-Garcia, Nere Gil-
Negrete, Ainara Pradera-
Mallabiabarrena eta
Francisco Javier Nieto*

64-71 or.
<https://dx.doi.org/10.26876/ikergazte.iii.03.08>



Baloi pneumatiko baten zurruntasun estatiko bertikal zein horizontalean eragina duten parametroen azterketa

Mendia-Garcia, Irati¹; Gil-Negrete, Nere^{1,2}; Pradera-Mallabiabarrena, Ainara¹
eta Nieto, Francisco Javier^{1,2}

¹Nafarroako Unibertsitatea-Tecnun Ingenieritza eskola, Mekanika eta Materialen saila, Donostia ²CEIT-IK4 Technology Center, Division of Transport and Energy, Donostia
imendia@tecnun.es

Laburpena

Baloi pneumatiko komertzial baten zurruntasun estatiko bertikal zein horizontala aztertzea helburu duen ikerketa proiektua da. Batetik, Festo EB-145-60 baloi komertziala eskura izanik, Instron makina hidraulikoaren bitartez, entsegu estatiko eta 0-400Hz bitarteko entsegu dinamikoak egin dira. Bestetik, eta era paraleloan, Abaqus erreminta erabiliz, baloi beraren FEM (*Finite Element Model*) eredu egin da, datu esperimentalekin balidaturiko elementu finituetan oinarritutako modeloa hain zuzen ere. Azkenik, simulazio ezberdinak eginez, baloi pneumatikoa definitzen duten eraikitze parametroek (zuntzen inklinazio angeluak batez ere) zurruntasun estatikoan duten eragina aztertu da.

Hitz gakoak: Baloi pneumatikoa, zurruntasun estatiko bertikal eta horizontala, modelizazioa, eraikitze-parametroak

Abstract

Vertical and horizontal static stiffness of Festo EB-145-60 commercial air spring is analyzed in the present research project. On the one hand, experimental measurements of the static and dynamic stiffness of the air spring are done in an Instron hydraulic testing machine in a range of 0-400 Hz. On the other hand, in parallel, a FEM (Finite Element Model) model is developed in ABAQUS, which is validated by comparing with experimental measurements. Finally, different simulations are carried out which allow establishing the influence of construction parameters (more precisely the angle at which fibers are disposed) on the dynamic behavior of the air spring.

Keywords: Air spring, vertical and horizontal static stiffness, modelling, construction-parameters

1. Sarrera eta motibazioa

Ingeniariek, beren egunerokotasunean, gizakion ongizatea bermatu eta hobetzeko lanean dihardute. Horren adibide gisa, ikerketa lan hau trenen segurtasunean eragin zuzena duen elementu baten azterketan oinarritzen da: baloi pneumatikoa. Trenetan erabiltzen diren baloi pneumatikoak kotxea kanpoko bibrazioetatik isolatzeko erabili ohi dira, bigarren mailako esekiduran, pasa-ez pasa filtro baxu gisa lan eginez (Sañudo, 2014). Ezjakintasun handia dago baloiaren eraikitze parametroek baloiaren zurruntasunean eta bibrazioen dinamikan duten eraginaren inguruan (Evans et al., 2009). Ikerketa honen motibazioa hutsune horri erantzun bat ematen saiatzea litzateke.

2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

Gaur egun, literaturan ugariak dira frekuentzia bajutan (20 Hz bitarte) baloi pneumatikoen jarrera azaltzeko erabiltzen diren modeloak. Badira batzuk baloi pneumatikoa oinarritzko eredu mekanikoetara hurbiltzen dutenak, masa, malguki eta motelgailuz osaturiko sistemetara; Simpact modeloa, Vampire modeloa, Berg modeloa esate baterako (Alonso et al., 2017; Presthus, 2002; Nieto et al., 2008). Beste batzuk berriz, termodinamikako legeen bitartez baloiaren sistemaren portaera fisikoa azaltzen dute (Mazzola et al., 2014). Hortaz gain, badira zenbait eredu ezaugarri/berezitasun ezberdinak aztertu eta interesgarri egiten dituztenak (Alonso et al., 2017; Chang, 2008). Orain arte izendatu diren modelo hauek guztiek baloiak berak, malguki laguntzaileak, tutuek, tangak, metagailuak, balbulak, konpresoreak, bogiak eta kotxeak duen eragina aztertzen dute, baina baloiaren beraren eraikitze parametroek edo geometriak duten eragina ez dute kontutan hartzen. Gainera, orokorrean modelo hauek guztiek zurruntasun bertikala besterik ez dute kontutan hartzen.

Hori dela eta, ezinbestekoa da elementu finituetako modelo eraginkor bat izatea, zurruntasun horizontala ere aztertzeko aukera eskaintzen duena eta sistemako oinarrizko elementuez gain baloiaren eraikitze parametroek duten eragina aztertu ahal izateko balio duena. Arlo honetan zenbait ikerketa aurkitu daitezke, baloiaren zuntzen eta estrukturaren arteko erlazioa aztertu nahi dutenak eskala desberdineko hurbilketak erabiliz (ikus, adibidez, Von Eitzen et al., 2013). Era berean, modelo hau frekuentzia eremua areagotzeko xedearekin eraiki beharko litzateke. Jakina da errail-gurpil kontaktua bibrazio eta zarata iturri nagusia dela, trenaren konpartimentura esekidura elementuen bitartez transmititu ohi dela eta sistemaren egitura bibrazio barrutia 0-400 Hz bitartekoa dela. Hau honela izanik, baloiak frekuentzia eremu berean maiztasun natural bat izango balu bibrazioak izugarri handituko lirarteke. Orain arte, literaturan, ez da baloiaren eragin dinamikoa 400 Hz arte aztertu.

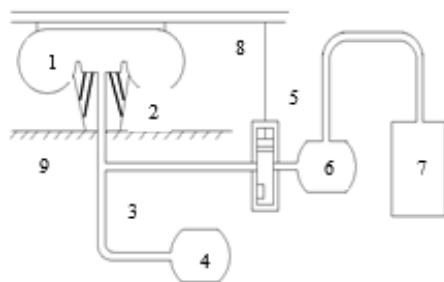
Ikerketa honen helburu nagusia baloi pneumatikoaren FEM eredua eraiki eta balioztatzea litzateke, bai bertikalki eta baita horizontalki ere zurruntasun estatiko zein dinamikoa aztertu ahal izateko eta bibrazio erak ezagutzeko asmotan.

3. Ikerketaren muina

3.1. Ikerketaren deskribapena

Aurrez aipatu bezala, baloi pneumatikoak kotxea kanpoko bibrazio eta zarata isolatzaile moduan erabili ohi dira. Baloi pneumatikoak, izenak dioen moduan, bere barnean presio jakin batean airea sartu edo ateraz, globo bat balira bezala, puztu edota hustu egiten dira, frekuentzia jakin bateko bibrazioak xurgatuz. Sistemak era eraginkor batean funtziona dezan atal ezberdinak bereiz daitezke, 1. Irudian ikus daitezkeen bezala (A. Orvnäs, 2010); autonibelazio balbulak kotxearen desplazamendu bertikala neurtuz, konpresorearen laguntzaz presio tangatik tutuen bitartez airea presio zehatz batekin baloira bideratzen du. Sistema pneumatikoak akatsen bat izango balu, malguki laguntzailea izango zen bogie eta kotxearen arteko distantzia kontrolatzeaz arduratuko zena. Ahal den heinean behintzat, ibilgailuaren frekuentzia natural bertikala hertzio batekoa izatea komeni da, gizakiok maiztasun horrekin ibiltzen baikara eta gure organoek oszilazio hori baitute. (Presthus, 2002).

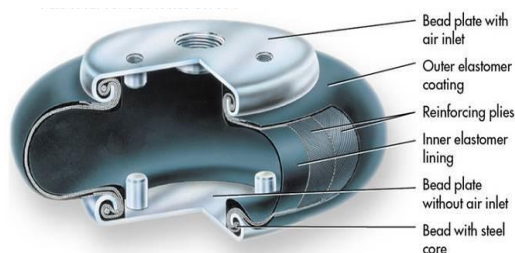
1. irudia. Bigarren mailako esekidura pneumatikoaren eskema (Eraldatua, A. Orvnäs, 2010)



- | | |
|-------------------------|----------------|
| 1 Baloia | 6 Presio tanga |
| 2 Malguki laguntzailea | 7 Konpresorea |
| 3 Tutuak | 8 Kotxea |
| 4 Metagailua | 9 Bogiea |
| 5 Autonibelazio balbula | |

Baloiaren barne estrukturari erreparaturaz, 2. Irudian, bi atal nagusi nabarmendu daitezke; batetik, baloia bera elastomeroz egina dagoen globo bat dela zein Nyloneko zuntz bidez irmotuta dagoen, eta bestetik; kanpoaldea altzairuzko bi plaka, gorputza kaxa eta bogiera estekatzen dutenak. 3. Irudia berriz, barne egituraren zuntzak nolakoak diren erakusten dituen argazki bat da.

2. irudia. Baloiaren material geruzak (Festo katalogoa, 2018)



3. irudia. Baloiko barne egitura



Merkatuan badira baloi pneumatikoez gain erabiliak diren beste zenbat esekidura elementu; malguki helikoidalak, tortsio barrak, baleztak eta kautxu-metal malgukiak kasurako (Bruni et al., 2011). Tren-industrian eragingailu pneumatikoak erabiltzearen arrazoi nagusia indar-deformazio erlazioa jasandako kargaren menpe ez dagoela da eta ondorioz, karga maila ezberdinentzako esekidura altuera konstante mantendu daitekeela. Nahiz eta puntadun elementuek materiala zulatu dezaketen edota lan tenperatura maximoa beste esekidura mota batzuen baxuagoa izan, konponbide egokitzat hartzen da. Gainera, baloia inklinazio maila ezberdinetan jar daiteke, honek baloiaren zurruntasun bertikal nahiz alboko zurruntasunaren ezagutza sendoa izatea eskatzen du (Evans et al., 2009 eta Bruni et al., 2013). Behar honi aurre egin nahian, ikerketa lan hau baloi pneumatiko baten zurruntasun bertikal estatiko zein dinamikoan eragina duten parametroen azterketan oinarritzen da.

3.2. Esperimentazioa

Trenetan erabili ohi diren baloien dimentsio handiak direla eta, eskala txikiagokoa den Festo EB-145-60 baloi komertziala erabili da laborategiko entseguak egiteko. Baloiak 90 mm-ko altuera nominala du eta 145 mm-ko diametroa. Instron markako MHF251 eragingailu hidrauliko komertziala erabili da entseguak egiteko, LVDT (*Linear variable differential transformer*) motako ± 25 mm ibiltartea duen indukzio posizio sentsorea eta ± 20 kN indar neurgailuarekin. 4.irudia, baloia entsegu makinan muntatuta eta giroko presio atmosferikoan egonda ateratako argazkia da. Muntaketa era dela eta, entsegu guztiak norabide bakarrean egin dira, norabide bertikalean hain zuzen ere. Entsegu guztiak goiko plaka era kontrolatuan mugituz burutu dira.

4. irudia. Entseguetako baloi pneumatikoa Instron MHF25 makinan muntatuta



Lehen aipatu bezala, baloi pneumatikoen ezaugarri nagusia indar-deformazio erlazioa jasandako kargaren menpe ez dagoela da. Ezaugarri hau horrela dela ikusteko eta fabrikatzaileak ematen dituen kurbak errealitatearekin bat datozela baieztatzeko, entsegu estatiko bat egin da, baloia hiru presio maila jakinetarako puztuaz (2, 4 eta 6 bar). Bertatik lortutako emaitzak ondorengoak dira:

1. taula. Konparaketa estatikoa

Presioa [bar]	Katalogoko Indarra [kN]	Neurtutako Indarra [kN]	Akatsa [%]
2	1000	1045	4,5
4	2100	2177	3,6
6	3150	3146	0,2

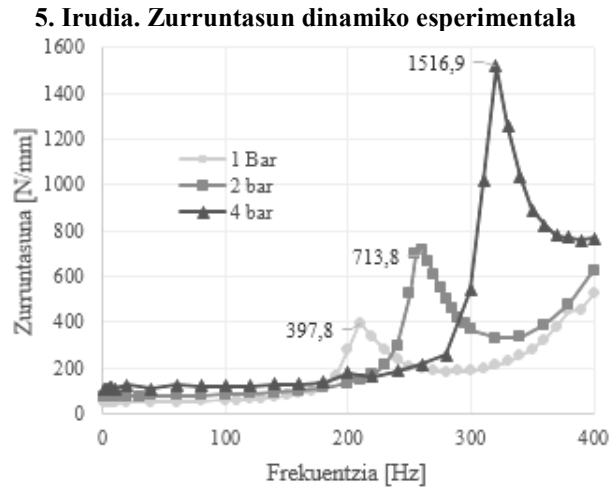
Entsegu estatikoekin jarraituz, zurruntasun estatiko bertikala ezagutzeko asmoz, behin baloia presio nominalean puzturik egonda, baloiaren goiko plaka 5 mm-ko joan-etorriak egitera behartu da. Zurruntasun estatikoaren balioa ($K_{estatikoa}$) neurturiko indarra (F) eta inposatutako desplazamendua (x) zatituz lortzen da (ikus 2.taula):

$$K_{estatikoa} = F / x \quad (1)$$

2. Taula. Konparaketa dinamikoa

Presioa [bar]	Zurruntasun estatiko bertikala [N/mm]	Lehen Maiztasun naturala [Hz]
1	-	210
2	51,3	260
4	88,7	320
6	127,3	aztertutako mugaz kanpo

Azkenik, baloiaren portaera dinamikoa aztertzeko, gorputza anplitude eta presio ezberdineko 0-400 Hz bitarteko seinale sinusoidalekin kitzikatu da, baloiaren lehen maiztasun naturalari buruz bi ondorio nagusi ateraz (ikus 2.taula): batetik, baloiak 0-400 Hz maiztasun eremuan modu estrukturalak dituela, eta bestetik, presioak duen garrantzia handia dela, presio maila altuagoek frekuentzia naturala eta erantzunaren anplitudea ere areagotu egiten dutelarik (ikus 5.irudia).

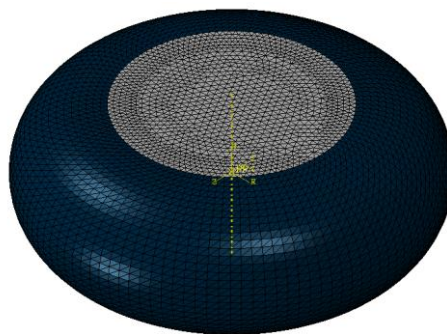


3.3. Modelizazioa (FEM)

Modelizazioaren helburua errealitatearekiko baliokide den alegiazko eredu bat sortzea da. Aztertzeke dagoen kasuan, ABAQUS erremintaren bitartez (ABAQUS, 2018), elementu finituetan oinarrituta baloi pneumatiko baten modelo bat egin nahi da, baloiaren benetako ezaugarriak deskribatzeko gai dena (datu esperimentalekin balioztatuko dena) eta aldi berean, eraikitze parametroei balore ezberdinak emanda haren efektua ikusteko balioko duena.

Baloiaren kanpo dimentsioak fabrikatzailearen data orritik hartu dira eta barneko zuntzen ezaugarriak lortzeko baloi bera moztu eta aztertu da. Gutxi gorabehera, Nylonezko zuntzez osaturiko bi geruza bereiz daitezke, 60° eta -60° inklinazioarekin hurrenez hurren. Hortaz gain, zuntzen diametroa 0,5 mm ingurukoa dela ikusi da eta elkarren arteko distantzia 1 mm. Datu hauekin guztiekin eta baloiaren materialak; altzairua ($E=2 \cdot 10^{11}$ Pa, $\nu=0,3$, $\delta=7850$ kg/m³), kautxua ($E=2 \cdot 10^7$ Pa, $\nu=0,495$, $\delta=1000$ kg/m³) eta Nylona ($E=1,13 \cdot 10^{10}$ Pa, $\nu=0,33$, $\delta=7850$ kg/m³) direla kontuan harturik *shell* erako modeloa egin da, zuntzak *rebar* funtzioaren bidez sartuta. Modeloak denera 13202 S4 motako elementu dauzka. 6.irudiak, baloiaren FEM modeloa erakusten du, gris kolorez esekidura plakak eta urdinez baloiaren gorputz nagusia.

6. irudia. Baloiaren FEM modeloa



Baloiaren portaera nolakoa den ezagutzeko asmoz, hiru simulazio gauzatu dira:

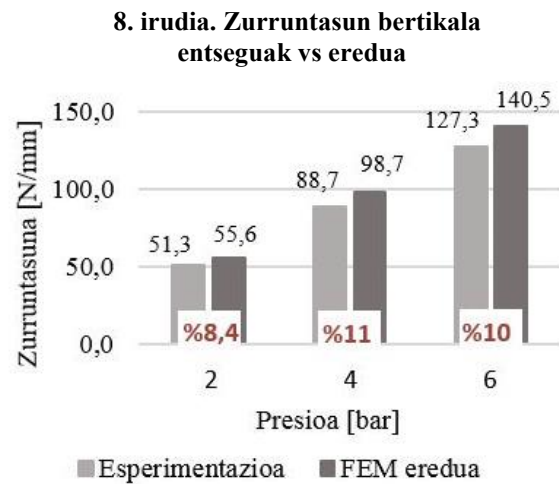
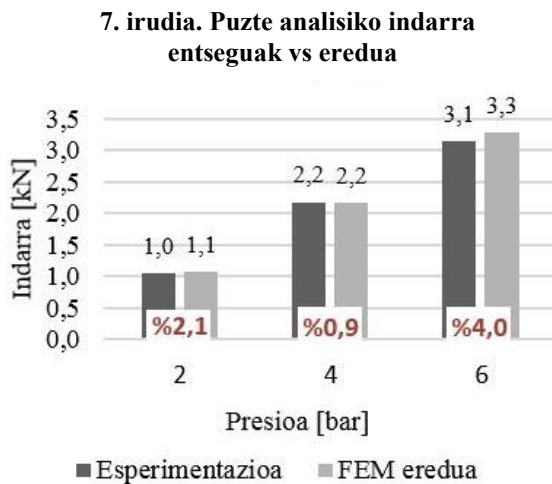
- Puzte-analisia: Altzairuzko bi xaflak estekatuz baloia airez betetzean datza, lan presio baldintzetan baloiaren deformazioa nolakoa den jakiteko.
- Desplazamendu-analisia: Behin baloia lan presioarekin puztuta dagoela, beheko xafla estekatuta mantenduz, goiko xafla mm gutxi batzuk (x) bertikalki gora-behera (edo

horizontalki ezker-eskuin) mugitzean datza, konprimatu eta trakzionatuz, indarra (F) neurtuz zurruntasun estatikoa ($K_{estatikoa}$) kalkulatzeko: F/x .

- Analisi-modala: Baloia lan presio eta posizioan egonda, maiztasun naturalak kitzikatuz, frekuentzia naturalak eta moduen forma nolakoak diren jakiteko.

3.4. Balidazio prozesua

FEM modeloa egokitzen hartzeko, entsegu esperimentaletan lortutako balioak eta ABAQUSEko ereduak kalkulaturako emaitzak bat datozela aztertu behar da. 7 eta 8 irudiek, presio hornitze balio ezberdinetarako (2, 4, 6 bar), baloiaren beheko xaflan neurtutako indarra eta zurruntasun estatikoaren eboluzioa islatzen dute. Bi kasuetan, presioa handituz doan heinean, bai indarra eta baita zurruntasuna ere handitu egiten dira. FEM ereduaren simulazioen bidez lortutako emaitzek %5 baino akats txikiagoarekin iragartzen dute indarra eta %10 inguruko akatsarekin zurruntasun estatiko bertikala.



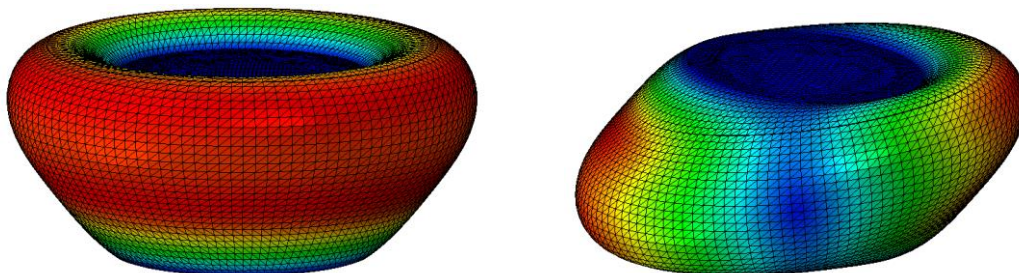
Maiztasun naturalei erreparaturaz, aztergai den frekuentzia eremuan (400 Hz bitarte), esperimentalki erresonantzia frekuentzia modu bakarra topatu da, lehen modu bertikala hain zuzen ere. Presioa handitzen bada, maiztasun naturala ere handitu egiten da eta aztertu diren kasu guztietarako, FEM eredu eta esperimentazio-bankuan neurturiko datuek %10 baino akats txikiagoa dute:

3. taula. Maiztasun naturalak

Presioa [bar]	Maiztasun natural esperimentala [Hz]	Maiztasun natural FEM [Hz]	Akatsa [%]
2	260	225,67	9,7
4	320	306,81	4,1

Jarraian, ABAQUSEn garatutako ereduaren bitartez, lehenengo bi moduak nolakoak diren azal daitezke; 9.Irudian, ezkerrean lehen modua (bertikala) eta eskuinean bigarregoa (horizontala).

9. irudia. Baloia lehenengo bi modu naturalak, FEM



3.5. Sentikortasun analisia

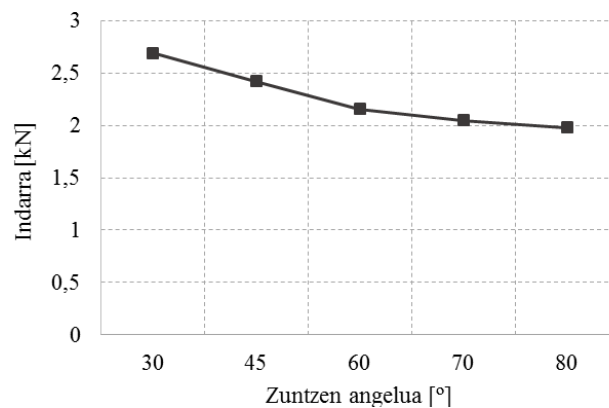
Sentikortasun analisi gisa zuntzen orientazio edo angeluak duen eragina aztertu nahi izan da, baloiaren portaeran influentzia handia izan dezakeelakoan. Zuntzen orientazio angelua 0° denean, zuntzak diametralki kokaturik daude, angelua 90° koa denean berriz, bertikal edo meridianoki.

10. Irudian, 4 bareko putze presiorako zuntzen angelua aldatzean baloian agertzen den indarra erakusten da. Angelu handietarako baloiaren azalera efektiboa (A_e) txikiagoa da, izan ere, zuntzek ez dute baloiaren diametroa handitzen uzten, trakzioan lan egiten dute, eta ondorioz indarra txikiagoa izango da:

$$F = P \cdot A_e \quad (2)$$

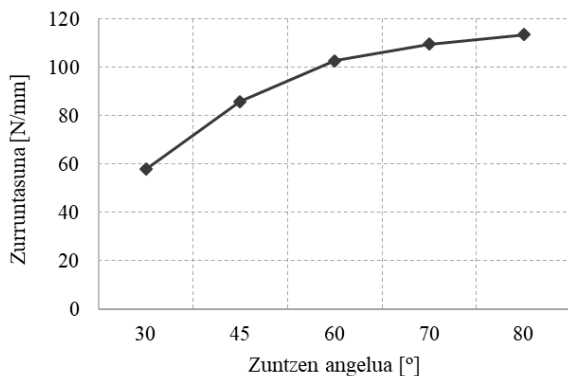
non F indarra den eta P -k presioa adierazten duen.

10. irudia. 4bar presiorako putze indarra

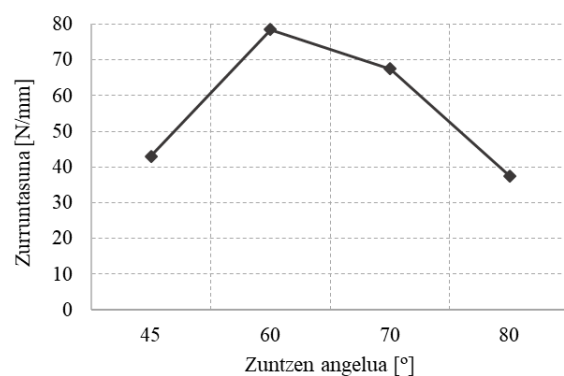


Lehen aipatu bezala, baloiaren zurruntasun estatiko bertikal zein horizontalean zuntzen orientazioak duen eragina ikertu nahi da. Horretarako azterketa bi zatitan banatu da, jarrera bertikalaren analisia eta horizontalaren analisia. Eta aldi berean, kasu bakoitzerako aztergai den norantzako zurruntasun estatikoa eta moduarekin bat datorren frekuentzia miatu dira. Adibide gisa, 11. irudiko grafikak presio nominala 4 bar kasurako eginak dira baina gainerako presioetan joera berdina da.

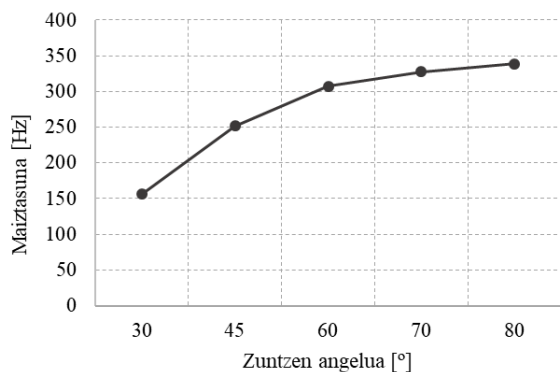
11. irudia. Zuntzen orientazio angeluaren influentzia zurruntasun eta maiztasunean: (a) zurruntasun estatiko bertikala, (b) zurruntasun estatiko horizontala, (c) lehen maiztasun naturala, (d) bigarren maiztasun naturala



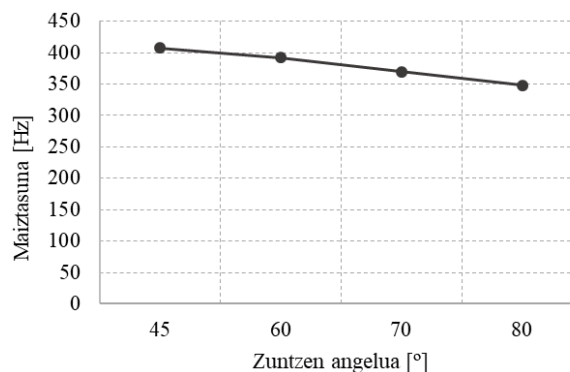
(a) Zurruntasun estatiko bertikala



(b) Zurruntasun estatiko horizontala



(c) Lehen maiztasun naturala



(d) Bigarren maiztasun naturala

Angelua handiagoa den heinean, zuntzen posizioa bertikalagoa da, hori dela eta, zurruntasun estatiko bertikala areagotu egiten da (11a) eta lehen maiztasun naturala ere handitu egiten da (11c). Portaera horizontala erreparatu berriz, zurruntasuna 60° arte handituz doa, hor maximoa izanik eta zuntzak bertikalago jartzen diren neurrian zurruntasuna gutxitu egiten da (11b). Maiztasunari dagokionez, angelua handiagotarako bigarren maiztasunaren balioak behera egiteko joera du (11d).

4. Ondorioak

Artikulu honetan, trenetan erabili ohi diren baloi pneumatiko eskalatu baten datu esperimentalekin eta ABAQUS erremintarekin eginiko FEM eredu balioztatua erabiliz, baloiaren errefortzu zuntzek zurruntasun estatiko bertikal eta horizontalean duten eragina aztertu da. Entsegetako baloiak (Festo EB-145-60) 0,5 mm diametroa duten, horizontalarekin 60° osatzen duten eta elkarren artean 1 mm-ko tartea duten nerbioz osaturik dago.

Ondorio nagusia, eskala txikiko baloi pneumatikoak gutxienez, 0-400 Hz maiztasun eremuan modu estrukturalak dituela da. Eskala handian berdina gertatuko balitz, trenaren lan maiztasun eremuan bibrazioak izugarri handituko lirarteke.

Bestetik, baloiko barne indarrak zein zurruntasun estatikoa ere, lan presioaren menpeko direla egiaztatzen da eta ereduak %5 eta %10 akatsarekin aurreikusteko gai da.

Bukatzeke, sentikortasun analisisan ondorio nagusia zuntzen orientazio angeluak duen garrantzia da. Puzte presio jakin bateko indarrari dagokionez, angelu handiagoei indarra gutxitu egiten dute. Era berean, angelu handiagoei, zurruntasuna handitzen dute bertikalean; aitzitik, horizontalean 60° tan joera aldatuta bat nabari da. Hortaz gain, angelua handitzen den heinean lehen maiztasun naturala (bertikala) handitu egiten da, bigarren maiztasun naturalean berriz (horizontala) efektu hau alderantzizkoa da.

5. Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Ikerketa lanaren amaierako helburu nagusia, trenen esekiduran erabiltzen diren baloi tamaina berberaren modeloa garatu eta balioztatzea litzateke. Honela, eredu fidagarri bat izanda, tren garraio industrian bigarren mailako esekiduran egiten diren prototipo kopurua murriztu egingo lirarteke, honek dakartzen denbora eta gastu murrizketekin.

Horretarako, baloiaren portaera estatikoa aztertzeaz gain, efektu dinamikoaren eragina kontuan hartzen duen FEM eredu bat sortu eta balidatzea erronka polita izan daiteke, ikasketa bai bertikal eta baita horizontala ere egitea. Ildo beretik, zurruntasun horizontalean angelu txikiak duen eragina sakonago aztertu beharko litzateke. Bestalde, baloia ez ezik, bigarren mailako esekidura osatzen duten elementu guztien influentzia eta barneko airea kontuan hartzen duen eredu zabalagoa egitea proposatzen da.

Hortaz gain, ikerketa artikulu honetan aipatzen den FEM eredutik abiatuta eta ildo beretik jarraituz, baloi pneumatikoaren eraikitze parametroen sentikortasun analisi zabalagoa egitea ideia ona izan daiteke; hau da, materialek, tamainak, zuntzen azalerak eta beren arteko tartek... sisteman duten eragina aztertzea. Horretarako, baloi beraren datu geometriko gehiago eta zehatzagoak lortzea posible balitz, eredia doitu ahalko litzateke.

6. Erreferentziak

- A. Alonso, J.G. Giménez, J. Nieto eta J. Vinolas, (2010): *Air suspension characterisation and effectiveness of a variable area orifice*, *Vehicle System Dynamics*, vol. 48 (Supplement), pp. 271-286
- ABAQUS (2018): Simulia User Assistance 2018
- S. Bruni, J. Vinolas, M. Berg, O. Polach, S. Stichel, "Modelling of suspension components in a rail vehicle dynamic context", *Vehicle System Dynamics* 49(7) (2011) 1021-1072
- F. Chang, Z-H. Lu, (2008): *Dynamic model of an air spring and integration into a vehicle dynamics model*, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 222, pp. 1813-1825
- J. Evans, M. Berg, (2009): *Challenges in simulation of rail vehicle dynamics*, *Vehicle System Dynamics* 47(8) 1023-1048
- FESTO, (2018): Cilindros de fuelle. Characteristics of commercial air-springs provided by manufacturer
- N. Gil-Negrete, F.J. Nieto, A. Pradera-Mallabiabarrena eta J. Gonzalez-Prada, (2018): *On the dynamic stiffness of air springs at medium-high frequencies*, *Proceedings of ISMA 2018 Conference*, 17-19 September, Leuven (Belgium), pp. 3567- 3580
- L. Mazzola eta M. Berg, (2014): *Secondary suspension of railway vehicles-air spring modelling: Performance and critical issues*, *Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 228, No. 3, pp. 225-241
- A.J. Nieto, A.L. Morales, A. González, J.M. Chicharro, P. Pintado, (2008): *An analytical model of pneumatic suspensions based on an experimental characterization*, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 313, pp. 290-307
- A. Orvnäs, (2010): *Methods for Reducing Vertical Carbody Vibrations of a Rail Vehicle: A Literature Survey*, KTH Engineering Sciences
- M. Presthus, (2002): *Derivation of air spring model parameters for train simulation*, MSc Thesis, Lulea University of Technology
- A. Sañudo, (2014): *Development of a new methodology for the analysis of structure-borne vibration in railway vehicles*, Ph.D. Thesis, University of Navarra
- A. Von Eitzen, U. Weltin, T. Brüger, T. Steinweger, M. Flamm, (2013): *Modelling of cord-rubber composites of bellow air-springs*, *Constitutive Models for Rubber VIII*, Gil-Negrete & Alonso (eds), Taylor & Francis Group, pp. 631-636

7. Eskerrak eta oharrak

Egileek Eusko Jaurlatzirari eskerrak eman nahi dizkiote UNIMODEL proiektuari emandako diru laguntzarengatik. Egindako ikerketa lana proiektu beraren *Investigación en la metodología de modelo de coste universal aplicada a vehículos ferroviarios*, *módulo de Ruido y Vibraciones*, T2.1 *Transmisión de vibraciones – modelo de balones neumáticos* atalaren barnean kokatzen da.