



IKER
GAZTE
NAZIOARTEKO
IKERKETA EUSKARAZ

IV. IKERGAZTE

NAZIOARTEKO IKERKETA EUSKARAZ

2021eko ekainaren 9, 10 eta 11a
Gasteiz, Euskal Herria

ANTOLATZAILEA:
Udako Euskal Unibertsitatea (UEU)

INGENIARITZA ETA ARKITEKTURA

**Bidaiari trenak konforta
bermatzeko darabiltzaten baloi
pneumatikoen azterketa**

*Irati Mendia-Garcia,
Nere Gil-Negrete, Elisabeth Viles
eta Ainara Pradera-Mallabiabarrena*

25-32 or.
<https://dx.doi.org/10.26876/ikergazte.iv.03.03>



Bidaiari trenek konforta bermatzeko darabiltzaten baloi pneumatikoen azterketa

Mendia-Garcia, I.¹, Gil-Negrete, N.^{1,3}, Viles, E.², Pradera-Mallabiabarrena, A.¹

¹ Tecnun, Mekanika eta Materialen saila, Nafarroako Unibertsitatea, Donostia

² Tecnun, Industria Antolakuntza saila, Nafarroako Unibertsitatea, Donostia

³ CEIT-IK4 Technology Center, Division of Transport and Energy, Donostia

imendia@tecnun.es

Laburpena

Ikerketa lan honek trenetan erabili ohi diren baloi pneumatikoen eraikitze parametroek esekiduraren portaeran duten eragina ebaluatzea eta diseinua errazteko jarraibide batzuk proposatzea du helburu. Horretarako, ordenagailuz bideratutako esperimentazio diseinuan (CADE) oinarrituz esekidura sistemaren eraikitze parametroek zurruntasun estatiko bertikal zein horizontalean izan dezaketen eragin zuzen, koadratiko zein elkarrekintza aztertu da. Esperimentazio diseinua kuboaren aurpegietan zentraturiko metodoan funtsatu da eta datuak elementu finituetan (FEM) oinarrituriko software batean gauzatutako simulazioetatik lortu dira. Ikerketak, baloi pneumatikoen ezagutza areagotzeaz gain diseinu gida interesgarri baten eratorriera bultzatu du, etorkizuneko trenen esekiduren diseinuan eta optimizazioan lagungarri izan daitekeelakoan.

Hitz gakoak: trenen esekidura, baloi pneumatikoa, ordenagailuz lagunduriko esperimentazio diseinua, FEM

Abstract

An assesment and design guideline of the air spring employed in the passenger rail vehicles is performed. Based on a Computer Aided Design of Experiments (CADE) the linear, quadratic and interaction influence of the construction parameters of the bellow in the vertical and lateral static stiffness are analysed in the present reseach project. A faced-centered cube design is used in the experimentation. The data were obtained conducting computer simulations using finite element design techniques. It enables better understanding on how these valiables affect the performance of the air spring and therefore the comfort of the railway vehicle. It will be very useful tool for the suspension design purposes.

Keywords: railway suspension, air spring, Computer Aided Design of Experiments, FEM

1. Sarrera eta motibazioa

Duela mende bat arte, zaldiez tiratutako bagoiak garraio baliabide urrienetarikoa ziren, motelak eta deserosoak izateagatik ezagunak. Autoen sorrerarekin bat garraio ibilgailuen betebeharrak aldatu egin ziren, azkartasuna eta erosotasuna ziren helburu. Egun, toki batetik bestera garraiatuak izateaz gain, joan-etorriak irauten duen denboran bestelako ekintzak egin ahal izatea funtsezko ataza izatera heldu da. Bidaiariak autoan jan, irakurri, idatzi edota lan egitea ahalbidetzeko, ibilgailuek, esekidura elementuak daramatzate.

Trenen kasuan adibidez, bogie eta bidaiarien kaxaren artean bi baloi pneumatiko kokatzen dira, hauek kanpo bibrazioen igorpena eteteko jarriak dira (Iwnicki, 2020). Pasa-ez pasa filtro baxu gisa dihardute, maiztasun baxuko uhinak pasaraziz eta altuak leunduz. Gizakiok 4-8 Hz bitarteko bibrazioei sentikortasun handia diegu, azken finean organoek (birrikak, bihotza, burmuina eta hesteak esaterako) maiztasun natural balio horiek dauzkate (ISO, 2014).

Baloi pneumatikoa elementu konplexua da, material konposatuz osaturiko elementu mekaniko bat da zeina presio jakin batekin betetzearen ondorioz bibrazioak xurgatzeko gai dena. Esekidura elementu honen material konposatuaren eraikuntzak suspentsioaren eraginkortasunean duen eragina nabarmena dela jakin arren, zerk eta nola eragiten duenaren ezagutza urria da (Mendia-Garcia *et al.*, 2020a). Ondorioz, ikerketa lan honen motibazioa horixe bera da, eragin horri nolabait mugak jartzen ahalegintzea.

2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

Zurrun bigunaren aurkako adjektiboa da, gorputz batean tentsioa aplikatuz gero honek deformatzeko duen gaitasunari egiten dio erreferentzia: zurruna bada deformatzeko da eta biguna bada deformagarria. Esekidura elementuetan oreka bat topatu beharra dago; baloi pneumatikoa zurrunez bada bibrazio guztiak bidaiarion kaxara pasaraziko lituzke, aldiz bigunegia izanda ibilgailuak gora-behera asko izango lituzke, segurtasuna ere arriskuan jarriaz. Horra hor gakoa.

Baloi pneumatikoaren berezitasun nagusia diafragma osatzen duten materialetan datza. Material konposatu bat da, non aztergai den kasuan kautxu naturalezko matrize bat nylonezko zuntzekin irmotua dagoen. Elastomeroak luzatu ondoren jatorrizko forma berreskuratzeko duten gaitasunarengatik ezagunak dira, nylonezko zuntz sintetikoak berriz malgutasun mugatuagoa duten arren, sendoak dira. Batasunari darraio indarra lelopean, bi materialak elkarlanean arituz gero sortutako material konposatuak aplikaziorako ezaugarri aproposak izango ditu: matrizeak kargak banatuz euskarri gisa dihardu eta zuntzek kargak jasanez baloi forma bermatzen dihardute.

Badira zenbait artikulua, zuntzen aldaera ezberdinek esekidura elementuan izan dezaketen eragina aztertu dutela. Denek elementu finituetan oinarritutako eredu bat dute euskarri (gehiengoek ABAQUS edo ANSYS) eta zuntzen eraikitze parametro bati balio ezberdinak emanez (gehienek zuntzen angeluari), honek emaitzan duen eraginaren joera erakusten dute (fibrak bertikalago kokatuta erradialki baloia bigundu egiten dela). Ez dute metodologia zehatz bat jarraitzen eta gutxi batzuk bakarrik aztertu dute trenetan erabili ohi diren baloiak (Lee *et al.*, 2003), eta are gutxiagok portaera bertikal naiz horizontala (Mendia-Garcia *et al.*, 2020b). Aztergai den aplikazioko baloiak errepideko ibilgailuetan edota makina erramintetan erabili ohi diren baloiengandik ezberdinak dira, batez ere kanpo geometrian bereizten dira.

Yan Wei-min *et al.* (2004) eta Wenku *et al.* (2009) ikerlariek errepideko kotxe bateko baloi pneumatikoan zuntzen angeluak, diametroak eta geruza kopuruak indar-desplazamendu erlazio bertikalean duten eragina aztertu dute. Li *et al.* (2009) autoreek ere autoetan erabili ohi diren baloien zuntzen orientazioaren eragin bertikala analizatu dute. Tang *et al.* ikerlariek (2011) baloi laukizuzen baten norantza horizontalean irmotze materialak (angeluak, zuntzen arteko distantziak eta geruza kopuruak) duen eragina aztertu dute.

Ljubljana unibertsitateko ikerlariek pistoidun baloi pneumatikoaren egitura parametroek elementuaren balio-bizitzan duten eragina aztertu dute. 2013. urtean (Oman eta Nagode) zuntzen angeluak eta 2019. urtean (Bešter *et al.*) karga aplikatzeko lau era ezberdinek eta baloiaren eraikitze bi parametrok (zuntzen angelua eta baloiaren diametroa) duten garrantzia, hain zuzen ere. Azken honetan, Taguchi metodo estatistikoa aplikatu dute.

Gure ikerketa taldeak makina erramintetan erabili ohi diren lobulu bakarreko baloi pneumatikoetan zuntzen angeluak, diametroak eta euren arteko distantziak maiztasun naturaletan eta zurruntasun bertikalean (Gil-Negrete *et al.*, 2018) nahiz horizontalean (Mendia-Garcia *et al.*, 2019) duten eragina aztertu zuen. Egun, trenen esekiduran erabiltzen diren elementuak aztertzerako salto egin dugu eta angeluak zurruntasun bertikal zein horizontalean eta eredu mekanikoen parametroetan duten eragina aztertu eta azaldu dugu (Mendia-Garcia *et al.*, 2020b).

Parametroen eragina metodologia zehatz bat erabili gabe aztertuz gero, uneko aztergai den elementuaren informazioa lor daiteke, baina estatistikako datuen analisirako erramintaz baliatuta, ezagutza hori are eta gehiago zabal daiteke; parametro bakarrak ez ezik elkarren arteko interakzioak ere aztertu daitezke. Hortaz gain, joerak ikusi eta kuantifikatu daitezke. Horregatik, produktuen diseinu eta optimizazioan geroz eta erabiliagoak dira, baloi pneumatiko (Bešter *et al.*, 2019) edo nylon eta kautxuzko paketatzaileetan (Zhang *et al.*,) esaterako.

Ikerketa lan honetan, baloi pneumatikoaren diafragmako material konposatuaren diseinu eraginkorrean eragina izan dezaketen faktoreak topatu eta kuantifikatu nahi dira. Horretarako kautxu naturalaren eta nylon sintetikoaren gogortasun ezberdinak nahiz geometria desberdinak (lodiera, zuntzen diametroa, angelua eta kokapenak esate baterako) alderatu dira. Horretarako, ordenagailuz lagunduriko esperimentazio diseinuaz baliaturik eta estatistikako kuboaren aurpegietan zentratutako metodoa-n oinarrituz, metodologia oso bat garatu da.

3. Ikerketaren muina

3.1. Ikerketaren deskribapena

Baloi pneumatikoaren FEM (finite element method) simulazio eredu sinplifikatu bat garatu da. Eredu honek, materialaren parametro eta propietateen arabera, esekidura elementuaren portaeraren analisi azkarra egitea ahalbidetu du. Ereduaren konplexutasun maila material konposatuak (zuntzez irmoturiko elastomeroa) eta fisika ezberdinak (airez beteriko baloia) eredu berean aztertzean datza, honek dakarren karga konputazional handiarekin.

Ordenagailuz lagunduriko diseinuen funtsa, aztergai dauden parametroen konbinaketa ezberdinen emaitzak elkar alderatzean datza. Konbinaketa kopurua hautatutako datuen eta metodoaren arabera izango da, gurean 273 guztira. Esperimentalki eginez gero, konbinazio bakoitzerako baloi berri bat fabrikatu eta esperimentatu beharko litzateke. Hori ekiditeko, baloi pneumatiko jakin baten biki birtuala eraikiz eta balioztatuz, konbinaketa bakoitzerako simulazio bana gauzatzea aukera egokia izan ohi da.

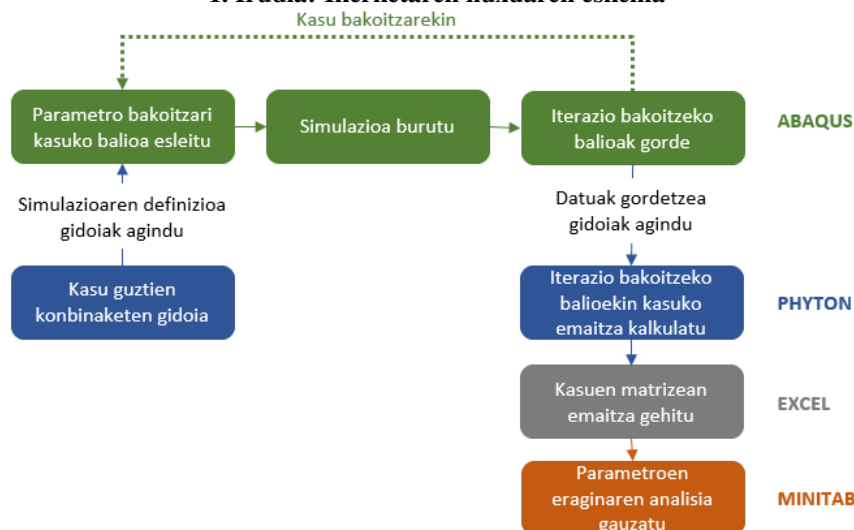
Kasu bakoitzean, parametro bakoitzari balio jakin bat esleitu behar zaionez (parametroen definizioa 3.3 atalean azalduko da) hainbat programa elkar lanean jartzea ezinbestekoa izan da, simulazio katea automatizatzea hain zuzen ere (ikus 1 irudia). Simulazioak ABAQUS elementu finituen metodoan oinarritzen den softwarean gauzatu dira. Automatizazioa Phyton lengoaiaren bitartez arautu da, bertan parametro bakoitzari distantziakide den balio sorta bat definitu zaio eta kasu bakoitzarentzako *for* begiztaren bitartez balio egokia esleitu zaio, makro antzeko bat sortuz. ABAQUS-ek Phyton-en arauen gidoia irakurri eta exekutatu egiten du, kasu bat simulatzean emaitzak gorde eta hurrengoa automatikoki hasieratu eta exekutatzen du. ABAQUS-en emaitzak, iterazio bakoitzerako desplazamendu (D) eta indarren (F) balioak dira. Phyton-en bertan, 1 eta 2 ekuazioen bitartez kasu bakoitzaren emaitzak kalkulatu dira: zurruntasun (K) bertikal (b) eta horizontala (h).

$$K_b = \frac{F_b}{D_b} (kN/m) \quad (1)$$

$$K_h = \frac{F_h}{D_h} (kN/m) \quad (2)$$

Kalkulatoriko emaitzak .csv artxibo batean gordetzen dira. Artxibo hau EXCEL-en zabaltu eta kasuen matrizean (ikus definizioa 3.3 atalean) kopiatzen da. Behin konbinazio guztiak simulatuta eta matrizea beteta, datu guztiak MINITAB programan kopiatzen dira. Bertan, datuak estatistikoki aztertzen dira, eta parametro bakoitzak eta euren interakzioek zurruntasun bertikal eta horizontalean duten eragina kuantizatzen da.

1. Irudia: Ikerketaren fluxuaren eskema



3.2. Baloi pneumatikoaren FE eredua eta balidazioa

Zuntzez irmoturiko materialak modelizatzeko berezko elementu bat duenez eta barneko airearen presioa nolabait alderdi estrukturalarekin konbinatzeko gai denez, baloi pneumatikoaren biki birtuala ABAQUS softwarean gauzatzea erabaki da. Hortaz gain, simulazioak katean exekutatu ahal izateko gaitasuna izatea ere balioetsi da.

Fabrikanteak erraztutako planotik eta baloi bera moztetik ondorioztatu den informazioarekin baloi pneumatikoaren geometria irudikatu da. 2a irudian trenetan erabili ohi diren baloi pneumatikoaren argazki ¹ bat ageri da.

¹[https://www.toolern.com.au/contitech-heavy-vehicle-air-springs/TOOLERN baloi pneumatiko banatzailearen webgunetik hartutako irudia](https://www.toolern.com.au/contitech-heavy-vehicle-air-springs/TOOLERN%20baloi%20pneumatiko%20banatzailearen%20webgunetik%20hartutako%20irudia).

1. Taula: Fabrikatzaile datu, entsegu datu eta simulazio zurruntasunen alderaketa (norabide bertikalean).

Presioa (bar)	Simulazioa (kN/m)	Fabrikatzailea (kN/m)	Katalogoarekiko akatsa (%)	Esperimentala (kN/m)	Esperimentalekiko akatsa (%)
3,67	633	633	0,0	632	0,13
4,4	707	723	-2,11	703	0,67
5,1	778	774	0,48	787	-1,18

2b irudian, denera sei zuntz kapa bereiz daitezke, bakoitiek horizontalarekiko 75° orientazioa dute eta bakoitiek berriz -75°. Kapa bakoitzeko zuntzen diametroa 0,5mm ingurukoa dela dirudi eta bi geruza albokideren distantzia 1mm. Geruzak lodieraren erdiko planoarekiko simetrikoki ezarriak daude, elkarren arteko tartea 0.4mm-koa delarik. Diafragmaren lodiera totalak 12mm dauzka.

2. Irudia: Trenen esekidurako baloi pneumatikoen barne egitura.

(a) Baloi pneumatiko baten adibidea.



(b) Diafragmaren barne egitura.

Baloiaren diafragmaren lodiera gainontzeko neurriekin alderatuta (diametroa 740mm eta altuera 215mm, hurrenez hurren) oso txikia da, hortaz, *shell* motatako elementuak erabiltzea erabaki da. Elementu hauek, solido erakoekin alderatuta lodieran elementu bakarra definitzearekin nahikoa dute. Honela ereduak elementu kopurua dezentente jaisten da, karga konputazionala murriztuz eta beti ere analisiaren fidagarritasuna konprometzuan jarri gabe.

Lehen aipatu bezala, ABAQUS-ek zuntzak matrizean txertatzeko *rebar* elementuak erabiltzen ditu, elementu uniaxialak dira; non zuntzen nodoek matrizearen nodoekin bat egiten duten (ABAQUS, 2018). *Rebar* geruza bakoitzeko zuntz guztiek propietate berdinak izango dituzte, hau da, materiala, orientazioa, diametroa eta elkarren arteko distantzia berdina izango dute. Baloiaren barneko airea fluidoazko barrunbe gisa modelizatu da, airearen propietateak kontuan hartuz fluidoazko zatia betetzen duen bolumena nahiz presioa kalkulatzeko ahalbidetzen duena.

Bestetik, CAF eta CEIT-en elkarlanean sorturiko Air Spring Test Bench (ASTB) baloi pneumatikoen entsegu makinan baloia testatu da. Makinak baloi pneumatikoa trenean ezarrita dagoenean jasaten dituen indarrak irudikatzen eragingailu ezberdinak dauzka. Desplazamendu bertikal zein horizontalak ezarri gero, eta indar zelula baten bidez erreakzio indarra neurtuz gero, baloi beraren zurruntasun bertikal eta horizontala ezagutu daitezke.

Baloi pneumatikoaren FEM modeloa ontzat jotzeko beharrezkoa da ABAQUS-en simulatutako emaitzak entsegu esperimentaletan lortutakoekin bat datozela ikustea. Horretarako, 1 eta 2 taulek hornitze presio maila ezberdinetarako zurruntasun estatiko bertikal zein horizontaleko emaitzak eta euren arteko aldea zenbatekoa den biltzen dituzte. Akatsak errore erlatiboari egiten dio erreferentzia, aldagaia simulaturiko zurruntasuna (S) eta oinarria fabrikantearen katalogoan azaltzen diren zurruntasun balioak (T) edota entsegu esperimentaletatik lortutako datuak (E) direlarik (ikus 3 eta 4 ekuazioak). FEM ereduaren fidagarritasun maila altua da, %6 baino akats gutxiagorekin baloi pneumatikoaren zurruntasun estatikoa aurreikusteko gai delarik.

$$Akatsa_{fabrikantearekiko} = \frac{S - T}{T} * 100(\%) \quad (3)$$

$$Akatsa_{entseguekiko} = \frac{E - T}{T} * 100(\%) \quad (4)$$

2. Taula: Fabrikatzaile datu, entsegu datu eta simulazio zurruntasunen alderaketa (norabide horizontalean).

Presioa (bar)	Simulazioa (kN/m)	Fabrikatzailea (kN/m)	Katalogoarekiko akatsa (%)	Esperimentala (kN/m)	Esperimentalarekiko akatsa (%)
3,67	238	235	1,47	247	-3,47
4,4	248	242	2,45	262	-5,37
5,1	257	252	1,85	266	-3,51

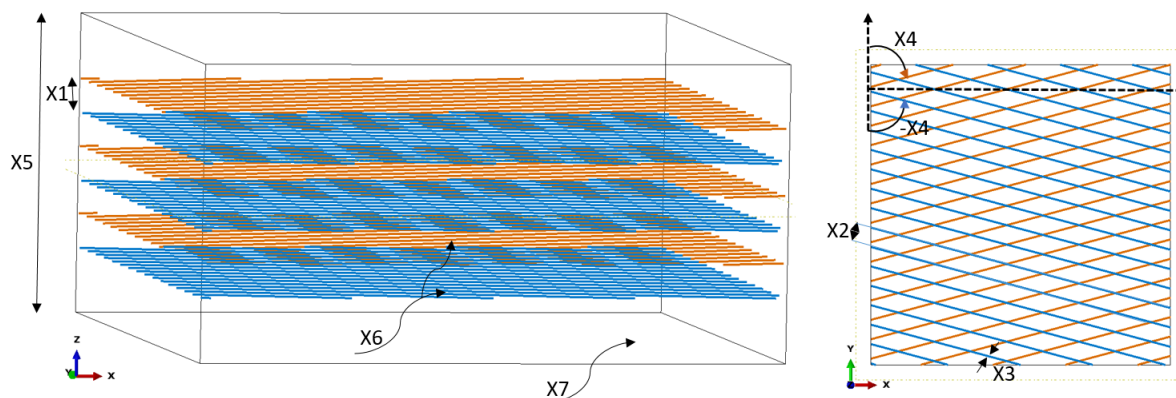
3.3. Ordenagailuz lagunduriko esperimentazio diseinua (CADE)

Ingeniaritzan, ordenagailuz lagunduriko esperimentazio diseinua produktu berrien garapenean edota merkatuan dauden produktuak optimizatu nahi direnean eskuragarri dagoen erraminta da. Produktu baten portaeran faktore ugari eragin dezakete, baina askotan zaila izaten da faktore bakoitzak duen eragina neurtzea eta are zailagoa faktore ezberdinek euren artean duten erlazioa zehaztea. Hori dela eta, badira zenbait metodo era ordenatu eta zehatz batean entsegu birtualak eginez eta ondoren datuak postprozesatuz, faktoreen erlazio lineal, koadratiko eta intererlazioak neurtzeko gai direnak.

Aztergai den kasuan, baloi pneumatikoaren eraikitze parametroek zurruntasunean duten eragina aztertzeko, *kubo baten aurpegietan zentraturiko diseinu metodoa* (FCD) erabili da. Analisia burutzeko, diafragma osatzen duen material konposatuaren zazpi eraikitze parametro aukeratu dira, X1 eta X7 bitarteko zenbakiekin izendatu direnak. Jarraian, parametro bakoitzaren esanahia eta unitateak azaltzeaz gain 3 irudiak parametro bakoitzaren azalpen grafikoa adierazten du.

- X1: Bi geruza albokideren arteko distantzia (mm)
- X2: Geruza bereko bi zuntz albokideren arteko distantzia (mm)
- X3: Zuntz diametroa (mm)
- X4: Zuntz orientazio angelua (°)
- X5: Diafragmaren lodiera (mm)
- X6: Zuntzen materialaren Young-en modulua (GPa)
- X7: Matrize materialaren Young-en modulua (MPa)

3. Irudia: Ordenagailuz lagunduriko esperimentazio diseinuaren faktoreen definizio grafikoa.



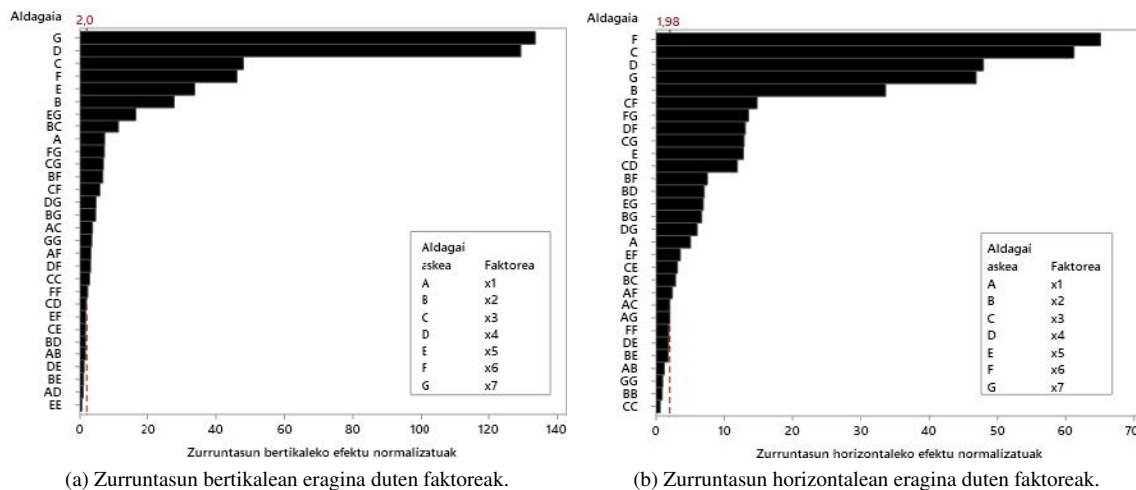
Metodologiak, aldagai bakoitzarentzako hiru balore zehaztea eskatzen du. Balore horiek distantziakideak izan behar dute; hau da, 0 balioak -1 eta 1 artean eta bakoitzetik distantzia berdinerara egon behar duela. Denera zazpi aldagai izanik eta konbinazio guztiak kontuan hartuta, 273 kasu ezberdin simulatu behar dira. Ondorengo 3 taulak faktore bakoitzaren hiru mailen datuak biltzen ditu. Datuak merkatuan dauden baloi pneumatikoetatik eta aurrez aipatutako lanetatik ondorioztatu dira. Esate baterako, matrizearen kautxua A-Shore 40 eta A-Shore 80 bitartean definitu da.

3. Taula: Faktoreen mailaketa.

	X1 (mm)	X2 (mm)	X3 (mm)	X4 (°)	X5 (mm)	X6 (GPa)	X7 (MPa)
-1	0	0	0,3	60	8	1,3	1,65
0	0,225	0,2	0,5	67,5	10	2,75	5,325
1	0,45	0,4	0,7	75	12	4,2	9

MINITAB-en analisia egiteko datuen matrizeak 273 errenkada eta 8 ilara dauzka, kasu guztietarako faktore bakoitzak duen balioa eta simulaturiko zurruntasun bertikal zein horizontaleko emaitzak ageri dira. *Erregresio analisia* gauzatu ondoren, Paretoen diagraman (ikus 4. irudia) termino bakoitzak (faktoreen arteko erlazio lineal, koadratiko eta interakzioak) duten eragina azaltzen da.

4. Irudia: Paretoen diagrama.



Paretoen diagramak faktoreen aldagai askeek ez ezik euren arteko interakzioek eragin nabarmena dutela adierazten du. Horizontalean, gakoa zuntzak dira: nylonaren Young-en modulua (X6) eta zuntzen diametroa (X3), hain zuzen ere. Matrizearen zurruntasunak (X7) eta orientazio angeluak (X4) bertikalean ez ezik, horizontalean ere garrantzia dute.

Paretoen diagramak zein faktoreek duten garrantzia jakiteko oso erabilgarriak dira, baina parametro bakoitzaren joera nolakoa den aztertzeke efektu nagusiak deritzon analisia egin behar da, ikus 5 irudia. Bertan, zuntzen orientazioak (X4) zurruntasunen arteko erlazioa aldatzeko giltza dela ageri da; angelu handiagoek norantza bertikalean baloia zurrundu egiten dute, horizontalean berriz bigundu. Paretoen diagraman ageri zen moduan, irmotze geruzen arteko distantziak (X1) ez du aparteko garrantzirik, joerak ez du aldaketarik. Gainontzeko faktoreak baliotz handitzean, hau da, materialetan Young-en modulua igotzean edota geometrian zuntzek azalera handiagoa hartzean, baloia zurrundu egiten da.

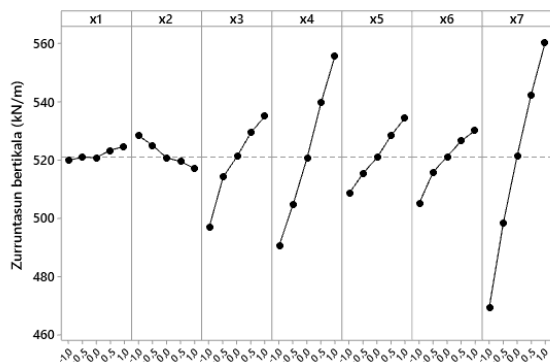
Azkenik, *erantzun azaleraren metodologia*-z (RMS) baliatuz faktore bakoitzak duen pisua era kuantitatiboan aztertzea ahalbidetu da. Honela, erantzuna (aztergai dagoen kasuan zurruntasun bertikal eta horizontala) faktoreen (diafragmaren eraikitze parametroen) ekuazio polinomiko batez adierazi dira:

$$Y = b_0 + \sum (b_i * x_i) + \sum (b_{ii} * x_i^2) + \sum (b_{ij} * x_i * x_j) \quad (5)$$

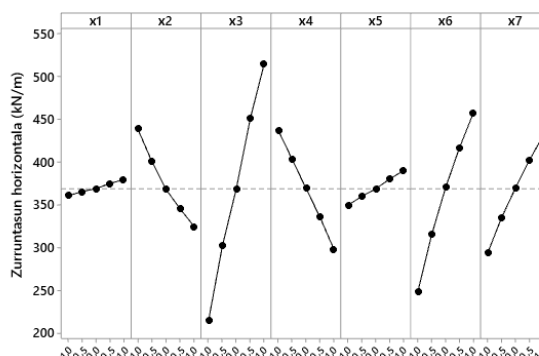
Y emaitza delarik, x_i x_j aldagaiak, b_0 b_i b_{ii} b_{ij} erregresio biderkagaiak direlarik. b_0 funtzioaren aldagai askea da eta b_i efektu linearen, b_{ii} efektu koadratikoen eta b_{ij} interakzioen koefizienteak dira, hurrenez hurren. x_i eta x_j aldagaiak X_i eta X_j faktoreekin ondorengo ekuazioaren bidez erlazonaturik daude:

$$x_i = \frac{X_i - X_0}{\Delta X_i} \quad (6)$$

5. Irudia: Efektu nagusien diagrama.



(a) Zurruntasun bertikalean eragina duten faktoreak.



(b) Zurruntasun horizontalean eragina duten faktoreak.

bertan, X_0 aldagaiak X_i faktoreak erdiko mailan (zero) duen balorea da eta X_i urrats aldaketaren balioa.

Baloi pneumatikoaren portaera bertikal eta horizontala eskutik emanak doaz, azken finean faktore bat aldatuz gero bi norantzetan du eragina. Hori dela eta, 5 irudiko bi alderdien faktore esanguratsuenak alderatuz eta *multzo onenaren erregresioa* aplikatuz, baloi pneumatikoaren zurruntasun bertikal (K_b) eta horizontaleko (K_h) azalera ekuazioak honela defini daitezke:

$$K_b = -6,7 + 96,3X_3 + 5,608X_4 + 11,33X_6 + 10,617X_7 - 6,61X_3 * X_6 + 0,437X_6 * X_7 \quad (7)$$

$$K_h = -623,2 + 236,1X_3 - 9,196X_4 + 7,9X_6 + 8,2X_7 + 74,2X_3 * X_6 + 3,69X_6 * X_7 \quad (8)$$

Proposatzen diren zurruntasun ekuazioek sei aldagai biltzen dituzte: lau aldagai aske; zuntzen diametroa (X_3), orientazioa (X_4), eta bi materialen Young-en modulua (X_6 eta X_7) eta bi interakzio; zuntzen materialak matrize zein zuntzen diametroaren arteko erlazioa ($X_6 * X_3$ eta $X_6 * X_7$). *Multzo onenaren erregresioa*-k bi norantzetan %85 baino zehaztasun handiagoarekin esekidura elementuaren portaera aurreikusteko gai da. Esate baterako, faktoreen mailaketaren erdiko kasua (zero) aztertuz gero, FE ereduak emaitzen ($K_b=522\text{kN/m}$ eta $K_h=370\text{kN/m}$) eta 7 eta 8 ekuazioen emaitzen ($K_b=619\text{kN/m}$ eta $K_h=367\text{kN/m}$) arteko akats erlatiboa %12 eta %-0,2 da, hurrenez urren.

4. Ondorioak

Ikerketa lan honen ondorio nagusia bidaiari trenak darabiltzaten balio pneumatikoen diafragmaren eraikitze parametrok esekidura elementuaren zurruntasunean duten eraginari mugak jartzea izan da. Orain arte era kualitatiboan parametro gutxiren zenbait joera lineal ikusi izan diren arren, kuantitatiboki eta faktoreen eragin lineala ez ezik, kubikoa eta elkarrekintza aztertu duten lanik ez da aurkeztu. Horren analisi zabala egin ahal izateko ezinbestekoa izan da kasuen automatizazioa, Python lengoaiaren ABAQUS softwarean burutu beharreko simulazio eta emaitzak antolatu izana.

Ondorioztatu diren baloi pneumatikoaren diseinu-gako nagusiak hauek dira:

- Giltza zuntzen orientazioa da, alderantziz proportzionala den faktore bakarra da; angelua handituz gero zuntzak bertikalago izanez zurruntasun bertikala handiagotu egiten da, horizontala berriz murriztu.
- Paretoren diagramak norantza bakoitzean eragin nabarmenenak dituzten faktoreak izendatu ditu:
Bertikalean: matrizearen materiala > angelua > zuntzen diametroa > zuntzen materiala > lodiera > zuntzen arteko distantzia.
Horizontalean: zuntzen materiala > zuntzen diametroa > angelua > matrizearen materiala > zuntzen arteko distantzia > zuntzen diametroa eta zuntzen materiala.
- Sei aldagai eta lau faktore bakarrik erabiliz, zurruntasun bertikal eta horizontala %85 baino zehaztasun handiagoarekin aurreikus daiteke. Oinarrizko eraikitze parametroak zuntz eta matrizearen materialak, zuntzen orientazio eta diametroa dira.

5. Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Ikerketa lerro berberetik jarraiki, baloiaren diafragmaren eraikitze parametroek esekidura elementuaren maiztasun naturaletan duten eragina aztertzea bultzatzen da. Azken finean, esekidura elementuek bidaiarion kaxa kanpo bibrazioetatik babestea du helburu, filtro pasa-baxu baten moduan lana eginez. Ibilgailuaren funtzionamendu egokia bermatuta izan ondoren, hau da, bihurguneetan zein alboko haizeak zakar jotzen duen egoeretan trenak bere ibilgutik jarrai dezan bermatzen duen baloi pneumatikoaren zurruntasunak finko izanda, maiztasun natural balioak ahalik eta altuen izatea komeni da. Honela, baloiak isolatu beharrean bibrazioak handitzen dituen maiztasun eremua gizakion sentikortasun mailatik ahalik eta gehien urrunduko litzateke.

Bestalde, nahiz eta baloi pneumatikoak ibilgailuan kokatzeko duen lekua mugatua izan, toki hartara egokien egokitzen den baloia zein den zehaztea erronka polita litzateke. Horretarako, baloi beraren geometriarekin ikerketa lan honetan aurkezten den metodologia aplikatzea gomendatzen da. Hortaz gain, ereduan segurtasun malgukia gehitu ahalko litzateke. Baloiori seriean loturik doa, zulatuko balitz ibilgailuaren segurtasuna bermatu dezan.

6. Erreferentziak

- ISO 2631-4:2014 Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 4: Guidelines for the evaluation of the effects of vibration and rotational motion on passenger and crew comfort in fixed-guideway transport system.
- ABAQUS. Simulia User Assistance 2018.
- Bešter, T., S. Oman, eta M. Ćagode. 2019. Determining influential factors for an air spring fatigue life. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 42.284–294.
- Gil-Negrete, N., F. J. Nieto, A. Pradera-Mallabiarrena, eta J. Gonzalez-Prada. 2018. On the dynamic stiffness of air springs at medium-high frequencies. In *Proceedings of ISMA 2018 - International Conference on Noise and Vibration Engineering and USD 2018 - International Conference on Uncertainty in Structural Dynamics; 2018 Sep 17-19; 2018 Leuven (Belgium)*, 3567–3579.
- H. W. Lee, S. H. Kim, H. Huh, J. Y. Kim, eta S. G. Jeong. 2003. Finite element analysis of diaphragm-type air springs with fiber-reinforced rubber composites. *Journal of Composite Materials* 37.1261–1273.
- Iwnicki, Simon. 2020. *Handbook of Railway Vehicle Dynamics*. Francis, Taylor and.
- Li, Feng Xiang, Wei Min Yang, eta Yu Mei Ding. 2009. Simulation of static test of air-spring. *Advanced Materials Research Journal* 11-12.713–716.
- Mendia-Garcia, I., N. Gil-Negrete, A. Pradera-Mallabiarrena, eta M. Berg. 2020a. A survey on the modelling of air springs—secondary suspension in railway vehicles. *Vehicle System Dynamics*.
- , N. Gil-Negrete, A. Pradera-Mallabiarrena, eta F. J. Nieto. 2019. Baloi pneumatiko baten zurruntasun estatiko bertikal zein horizontalean eragina duten parametroen azterketa. In *III. Ikergazte. Nazioarteko ikerketa euskaraz. Kongresuko artikulua bilduma. Ingeniaritza eta Arkitektura*, 64–71, Baiona.
- , —, —, eta —. 2020b. On the derivation of air spring model parameters of a passenger rail vehicle suspension based on finite element model. In *Proceedings of ISMA 2020 - International Conference on Noise and Vibration Engineering and USD 2020 - International Conference on Uncertainty in Structural Dynamics; 2020 Sep 7-9; 2020 Leuven (Belgium)*, 1–14, Leuven (Belgium).
- No Yang Weimin, Chen Can-hui, Chen Ya-ling, Ren Yan-sha. 2004. Finite element analysis of an air spring for automobile suspension. *Journal of Beijing University of Chemical Technology* vol. 31, N.pp. 105–109 (in english).
- Oman, S., eta M. Ćagode. 2013. On the influence of the cord angle on air-spring fatigue life. *Engineering Failure Analysis* 27.61–73.
- Tang, Zhao, Shijian Zhu, Xuetao Weng, eta Jingjun Lou. 2011. Analysis of the cord layer's influence on the air spring's lateral stiffness. In *2011 International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering, RSETE; 2011 Jun 24-26; Nanjing (China)*, volume 10, 2908–2911. IEEE.
- Wenku, Shi, Jiang Wan, Huang Ying, Yao Weimin, Ya Hao, eta Liu Zubin. 2009. Finite element analysis of an air spring concerning initial pressure and parameters of cord fabric layer. In *2009 2nd Asia-Pacific Conference on Computational Intelligence and Industrial Applications-PACIIA*, volume 1, 496–499, 28-29 Nov 2009; Wuhan (China). IEEE.
- Zhang, Yan Wen, Han Xiang Wang, Jia Qi Che, Ming Chao Du, eta Hong Jie Zhang. *Petroleum Science*.