



IKER
GAZTE
NAZIOARTEKO
IKERKETA EUSKARAZ

V. IKERGAZTE

NAZIOARTEKO IKERKETA EUSKARAZ

2023ko maiatzaren 17, 18 eta 19a
Donostia, Euskal Herria

ANTOLATZAILEA:
Udako Euskal Unibertsitatea (UEU)



Aitortu-PartekatuBerdin 3.0

INGENIARITZA ETA ARKITEKTURA

Modelizazioa aurrera-pausu, tren-
ibilgailuen esekidura eredu

Irati Mendia Garcia

71-76 or.

<https://dx.doi.org/10.26876/ikergazte.v.03.09>

ANTOLATZAILEA:



BABESLEAK:



LAGUNTZAILEAK:



Modelizazioa aurrerapauso, tren-ibilgailuen esekidura eredu

Irati Mendia-Garcia

Tecnun, Mekanika eta Materialen saila, Nafarroako Unibertsitatea, Donostia

imendia@tecnun.es

Laburpena

Modelizazioak jakintza zabaltzea dakar. Aztergai den objektu baten eredu balioztatu bat izateak ezagutza areagotzeaz gain, saiakuntza bidez bakarrik ezagutu ezin daitezkeen berezitasunak aurreikus ditzake. Tren ibilgailuen homologazio birtuala gauzatzeko, adibidez, ibilgailu osoaren eredu zehatz bat izatea beharrezkoa da. Ibilgailu osoarena, hau da, haren elementu guztiena. Ikerketa lan honetan trenen esekidura pneumatiko osoaren modelizazioan oinarritzen da, haren osagai bakoitzaren ezagutzan eta ereduaren garapenean. Horretarako, osagai bakoitzaren ereduaren garatzeko erabilitako metodologiaren urrats nagusiak azaltzen dira.

Hitz gakoak: Modelizazioa, trengintza, esekidura-sistema pneumatikoa

Abstract

Modelling involves the dissemination of knowledge. The existence of a validated model of an object under study may not only increase knowledge, but also predict peculiarities which cannot be known by testing. The virtual homologation of railway vehicles requires, for example, a precise model of the entire vehicle. The entire vehicle, that is, all of its components. The present research work deals with the modelling of the pneumatic suspension system, on the study of each of its components and the development of its models. To that purpose, the main steps of the methodology used to obtain the model of each component are discussed.

Keywords: Modelling, railway vehicles, secondary suspension system

1 Sarrera eta motibazioa

Gizarteak eta jakintzak aurrera egin dezan, modelizazioak ezinbesteko garrantzia du. Baina zer da zehazki? "Eredu bat zerbaiten adierazpen bat da. Zerbait horren atributu denak ez ditu zertan irudikatu behar, esanguratsuenak bakarrik. Eredua norbaitek helburu jakin batekin sortu du" (Rainery, 2021). Hau da, momentuko beharrei erantzuna emateko asmoz aztergai den fenomeno edo objektuaren biki birtual bat garatzea, alegia. Denborak aurrera egin ahala eta teknologia garatzen doan heinean, aztergai den elementuaren berezitasun berriak ezagutzen dira, eta horrek eredu berriak eguneratu, zabaldu edo sortzea dakar.

Trengintzan adibidez, egun, homologazio birtualaren lelopean ibilgailu osoaren eredu balioztatu zehatz bat garatzea dute helburu. Azken finean, ibilgailu berri bat diseinatu eta plazaratua izan aurretik balidazio-froga ezberdinak gaintu behar ditu. Saiakuntza-mota ezberdinak dira egun esperimentera egin beharrekoak eta etorkizunean biki birtualen simulazioaren bidez gauzatu nahi direnak. Horien artean dinamika, segurtasun eta konfort frogak daude, tren batek ibilbide (aldapatsua, bihurtune askokoa, klima) zein baldintza (karga barik edota bidaiariz zein esku-bagajez beteta) jakin batzuetan izango duen jarrera aurreikusteko helburua dutenak. Horretarako, ibilgailu osoaren eredu balioztatua garatzeko, lehenik ibilgailua osatzen duten elementu guztien ezagutza zehatza izatea ezinbestekoa da. Ikerketa lan honek, konforta bermatzeaz arduratzen den esekidura sistema pneumatikoaren modelizazioan dihardu.

Gurpil-errail kontaktutik eratorritako bibrazioak xurgatzeko asmoz, bidaiarion kaxaren eta bogiearen artean kokatzen diren baloi-pneumatikodun elementu elastomerikoak dira esekidura elementu hauek. 1963. urteaz geroztik bidaiari tren gehienek daramatzate, zuntzez irmoturiko globo batzuk dira non puztu edo hustuz kanpo bibrazioak xurgatzeko gai diren. Garai hartan, abiadura baxuetan, modelo sinplistik nahikoa ziren adierazpen gisa. Gaur egun trenak, aldiz, eskakizun zorrotzagoak dituzte segurtasun, erosotasun eta eraginkortasun aldetik; bereziki,

abiadura handiko (> 250 km/h) trenetan. Hori dela eta, esekidura pneumatikoen ereduak geroz eta landuago izatea ezinbestekoa da.

Ikerketaren lehen urratsa, aztergai den fenomeno edo objektuaren inguruan literaturan aurki daitezkeen ereduaren bilaketa eta azterketa egitea ezin bestekoa da. Horretako, Mendia-Garcia et al., 2020b lanean, modelizaio-tekniken helburuaren (jarrera estatiko zein maiztasun altuagoak aurreikustea) eta konplexutasunean (elementu kopurua, ez-linealtasunak barneratzea, etab.) oinarrituz, egungo esekidura ereduaren sailkapen bat burutu da. Lan honen helburu nagusia, ikerketa-lerro berrien identifikazioa izan da. Alde batetik, esekidura pneumatiko osoaren maiztasun altuko 20 Hz-tik gora esekidura sistemaren jarreraren ezagutza eza (Iwnicki, 2020), eta bestetik, Elementu Finituetan oinarritutako Modelizazioan (FEM) oinarritutako ereduaren potentzialtasuna goi-mailako maiztasun tartea aztertzekeo (Sañudo, 2014).

FEM-Elementu finituen metodoak aztergai den objektuaren adierazpen geometrikoan oinarritzen da, non objektu hori elementu txikiagotan banatzen den, elementu finituetan, hain zuzen ere. Elementu bakoitzak puntu edo nodo jakin batzuk ditu elementu bakoitzaren ezaugarriak biltzen dituena, eta funtzio-konstitutiboaren bitartez inguruko beste nodoekin erlazionatu daitezkeenak. Funtzio horiek magnitudeen arteko eredu edo legeak osatzen dituzte, eta horiek ongi definitzean dago gakoa.

Jarrera dinamikoak berriz, kanpo bibrazioen maiztasuna handitzen doan heinean, esekidura sistemak bibrazioak xurgatzeko duen ahalmenari egiten dio erreferentzia. Badira zenbait maiztasun, esekidura sistemak bibrazioak xurgatu beharrean anplifikatu egiten dituela, horiei sistemaren maiztasun naturalak deritzo. Egoera horretan, esekidura sistema ez da efizientea eta ondorioz, ibilgailuaren konforta bermatu beharrean deserosotasuna agerian jartzen da, ibilgailuaren segurtasuna konprometzuan jarritz. Ondorioz, ikerketa lan honen motibazioa horixe bera da, FEM ereduaren oinarrituz esekidura pneumatikoaren jarrera dinamikoaren azterketa gauzatzea.

2 Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

Modelizazioaren garapen jarraia ukazina da. Neurketa gailuen doikuntza handiagoa den heinean, aztergai den objektuaren ezagutza sakonagoa egitea ahalbidetzen du, eta era berean ereduaren eguneraketa edo garapena bultzatzea. Eskuardean dugun lan honen helburua tren ibilgailuen esekidura pneumatikoaren eredu dinamiko bat garatzea denez, esekidura osatzen duten elementuak xehetasunez ezagutzea ezinbestekoa da. Horretarako bi azpi-helburu edo ikerketa-pausu finkatu dira. Bata, bakarka elementu bakoitzaren karakterizazio esperimentalean oinarrituriko FEM eredu bat garatzea. Eta bestea, puzzle bateko piezak bezala, esekidura sistema osoaren eredu eraikitzea.

Tren ibilgailuen esekidura sistemak lau elementu nagusi ditu, baloi edo hauspoa, andala, hodia eta larrialdi malgukia (ikus 1 irudia). Lehen aipatu bezala, hauspoa zuntzez irmoturiko baloi elastomeriko bat da, bere barnean aire presurizatua duen material konposatua da. Andala, altzairuzko edukiera handidun ontzia da. Hodiak aurreko bi elementu horiek konektatzen ditu, airearen pasabidea delarik. Eta larrialdi malgukia, hauspoaren azpian kokatzen den kautxu-pieza bat da, izenak dioen bezala, hauspoak airea galtzen duenerako beharrezkoa dena. Hauspoak, andalak eta hodiak sistema pneumatikoa osatzen dute, malgukia gehituz esekidura sistema osoa deritzo.

Ikerketa lan honek, modelizazioa du jomuga. Horretarako, tren ibilgailuaren esekidura sistema pneumatiko osoaren FEM eredu bat garatzeko jarraitu den metodologia azaltzen du. Metodologia honi, literaturan V-Eredua deritzo (Comission, 2019), modelizazio osoa egin aurretik zati edo atal bakoitzarena egitea beharrezkoa dena diona. Horretarako, ondorengo 3. ataletan esekidura osoaren eredu garatzeko eman diren pausuak azaltzen dira, elementu bereizi direlarik (ikus 1 irudia).

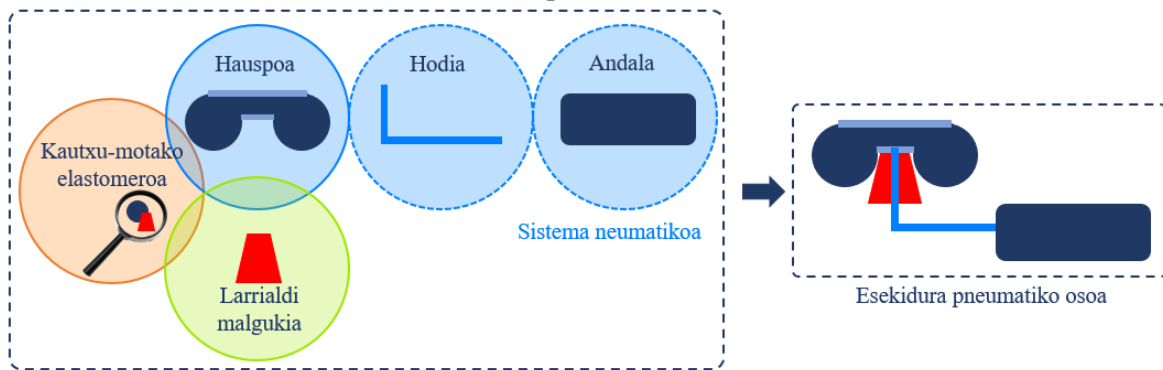
3 Ikerketaren muina

Atal honek puzzlea osatzen duten piezak nolakoak diren azaltzen ditu. Esekidura sistema pneumatiko osoaren eredu dinamiko balioztatua helburu izanik, elementuz elementu, euren bereizgarritasunak aurkituz eta zentzu fisikoa emanez, eredu ezberdinak aurkeztu dira.

3.1 Material elastomerikoa

Bibrazio-fluxua iturritik egitura nagusira hel dadin ekiditeko, kautxuz eginiko elementuak erabili ohi dira. Kautxua izatez ez linealtasun mekaniko handiko materiala da, berezia, isolamendurako aproposa baina aztertzekeo eta FEM ereduaren sartzeko konplexua (Kareaga, 2016). Badira esekidura osatzen duten bi elementu, hauspoa eta larrialdi malgukia, kautxu-erako elastomeroz eginik daudenak. Hori dela eta, bi kautxu mota ezberdin saiatu dira eta euren

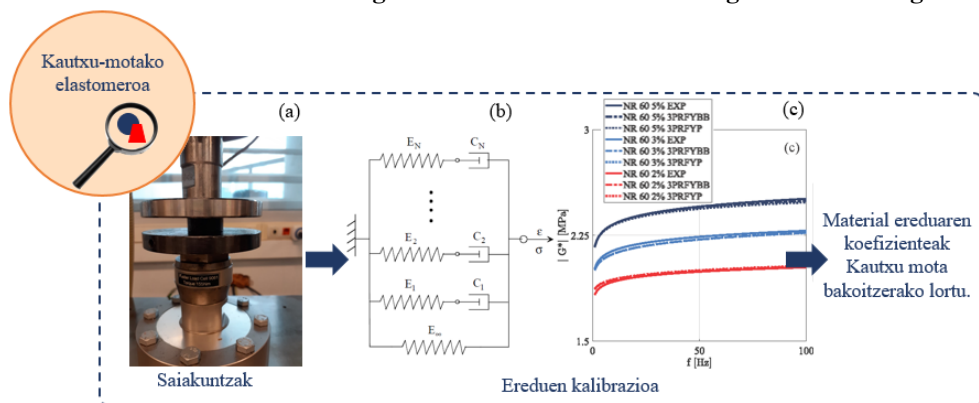
1. Irudia: Esekidura pneumatiko osoaren eskema.



materialaren ereduaren kalibrazioa egin da (Mendia-Garcia et al., 2020a).

2 irudiak, materialaren ereduaren garatzeko erabiliko metodologiaren urrats nagusiak biltzen ditu. Lehenengo, saiakuntza legeen jarraibideak jarraituz materiala konpresioan, trakzioan eta ebakiduran bai estatikoki eta baita dinamikoki ere saiatzeko datua (2a irudian konpresiozko saiakuntza bat ageri da). Ondoren, datu esperimentalekin literaturan aurki daitezkeen material ereduak kalibratu egiten dira, hau da, saiatu den materialarentzako FE kodeak dituen material eredu(ar)en koefizienteak finkatzen dira. 2b irudiak material eredu orokor bat azaltzen du, malguki eta motelgailu kate ezberdinez osatzen dena. Kalibrazioa malguki eta motelgailu horien balioak finkatzen datza. Azkenik, 2c irudiak kitzikatzen anplitude ezberdinetarako zurruntasun dinamikorako saiakuntza frogan emaitzak eta material ereduaren emaitzak alderatzen ditu, aldea % 5 baino txikiagoa delarik.

2. Irudia: Materialaren ereduaren garatzeko erabiliko metodologiaren urrats nagusiak.



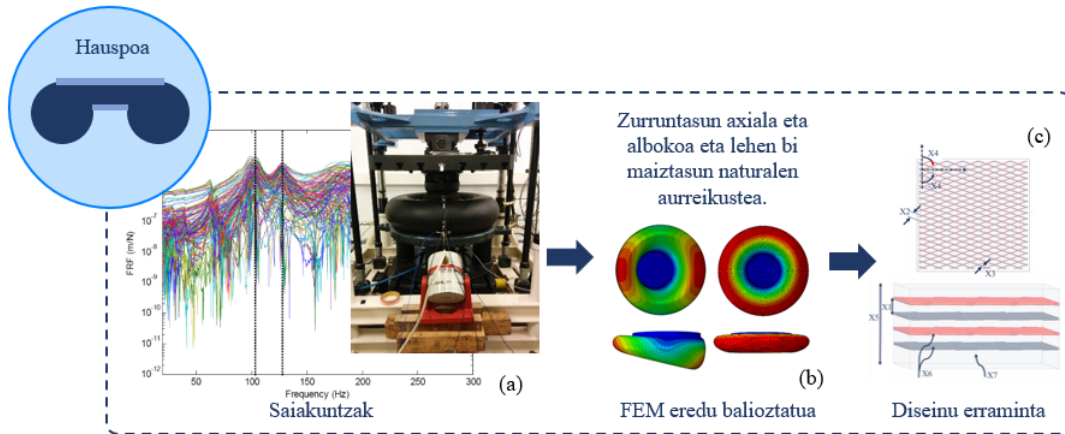
3.2 Hauspoa

Elementu honen atal nagusia, globoa bera da, zuntzez irimoturiko kautxua. Ondorioz, 3.1 atalean kalibratutako materialaren ereduaren erabili da. Hortaz gain, FEM ereduaren zuntz eta elastomeroak osatzen duten material konposatua definitu da. Gainera, barneko aireak duen eragina eta ingurunearekin dagoen bero-trukea aztertu da. Kasu honetan, saiakuntzak bi motatakoak izan dira, estatikoak zein dinamikokoak. Azken horiek baloiaren maiztasun naturalak kitzikatzea izan dute helburu, hau da, esekidura sistemak bibrazioak xurgatu baino oraindik eta bibrazio handiagoak sortzen dituzten maiztasunak zehaztu dira. Bukatzeko, FEM ereduaren erabiliz eta ordenagailu bidezko esperimentazio diseinuan oinarrituta, diseinu erreminta bat garatu da, hauspoaren zurruntasun estatikoa zein maiztasun naturalak aurreikusteko gai dena baloiaren egituratze parametroen funtziopean (Mendia-Garcia et al., 2022), (Mendia-Garcia et al., 2021).

3 irudiak, hauspoaren ereduaren garatzeko erabiliko metodologiaren urrats nagusiak biltzen ditu. Saiakuntzei dagokienez, maiztasun altuko kitzikatzailen baten bidez hauspoaren maiztasun naturalak identifikatu dira (ikus 3a

irudian azaltzen diren tontorrak, horiek dira maiztasun naturalak). Hauspoaren geometria eta berezitasunak barneratzen dituen FEM eredu bat garatu da, saiakuntza satuekin balioztatu dena. 3b irudiak FEM ereduaren bidez lortutako maiztasun naturalen formak biltzen ditu. Azkenik, FEM ereduaren hauspoaren egitura parametroak aldatuz (ikus 3c irudian parametroen zentzu fisikoa: materiala eta zuntzen geometria) eta errendimenduan duten eragina aztertuz, diseinu erreminta garatu da.

3. Irudia: Hauspoaren ereduaren garatzeko erabilitako metodologiaren urrats nagusiak.



3.3 Sistema pneumatikoa

Literaturan, sistema pneumatikoaren eragina 20 Hz bitarte bakarrik aztertu da. Izan ere, talka bidez bibrazioak xurgatzeko eginak dauden elementuak kitzikatzea erronka zaila da. Hori dela eta, makina-erremintetan erabili ohi diren hauspo txikiago bat luzera ezberdineko hodiez andala batera konektatu, eta INSTRON MHF25 makinan entseatu da. Makina honek esekidura pneumatikoa 400 Hz bitarte duen portaera aztertzea ahalbidetu du. Hiru maiztasun tarte identifikatu dira, sistemaren maiztasun naturala fenomeno fisiko ezberdin bati egotziz. Lehena, sistemaren barneko airearen inertiaren ondorio da. Bigarrena, aurrekoarekin loturik dauden uhin geldikorrei egotzen zaie. Eta azkena, hauspoa berari. Garatutako FEM ereduak, era ezberdinetara fenomeno horiek aurre ikusteko gai da.

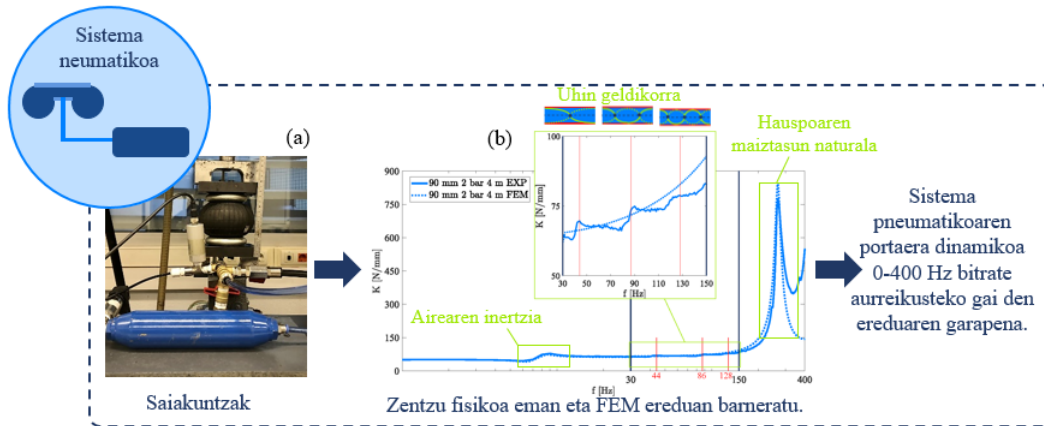
4 irudiak, sistema pneumatikoaren ereduaren garatzeko erabilitako metodologiaren urrats nagusiak biltzen ditu. 4a irudian sistema pneumatikoaren entsegu muntaia ageri da, baloia, andala eta konexio hodiak. 4b irudian berriaz, 400 Hz bitarte esekidura pneumatikoaren zurruntasunaren bilakaera ikus daiteke, tontor bakoitzak sistemaren maiztasun naturala bat irudikatzen du, hau da, tontor bakoitzean esekidurak sistemak bibrazioak xurgatu beharrean amplifikatu egingo ditu. Orain arte, 30 Hz bitarte airearen inertiaren ondoriozko erresonantziak ezagutzen ziren, ikerketa lan honek ezagutza esparrua 400 Hz arte zabaltu du. Garatutako FEM ereduak ere, 400 Hz bitarte esekidura pneumatikoaren jarrera aurreikusteko gai da, hau da, 4b grafikoko marra etenak eta jarraiak ia bat datoz.

3.4 Larrialdi malgukia

Larrialdi malgukia plaka metalikoz irmotutako kautxuzko pieza bat da. Tren ibilgailua modelizatzean, sarri norantz bertikalean konpresioan lan egiten duen malguki lineal ximple baten bidez adierazi da. Hala ere, ikerketa lan honetan, batetik Politecnico di Milanoko ikerlariak burututako entseguetan (Facchinetti et al., 2010), eta bestetik, garatu berri dugun FEM ereduak aurreikusiz, larrialdi malgukiaren hurbilketa ximplea ez dela nahikoa ondorioztatu da. Azken finean, kautxuz eginiko pieza bat da, ez linealtasun handidun material batez egin. Ondorioz, egungo larrialdi malgukiaren ereduaren zabaldu egin da.

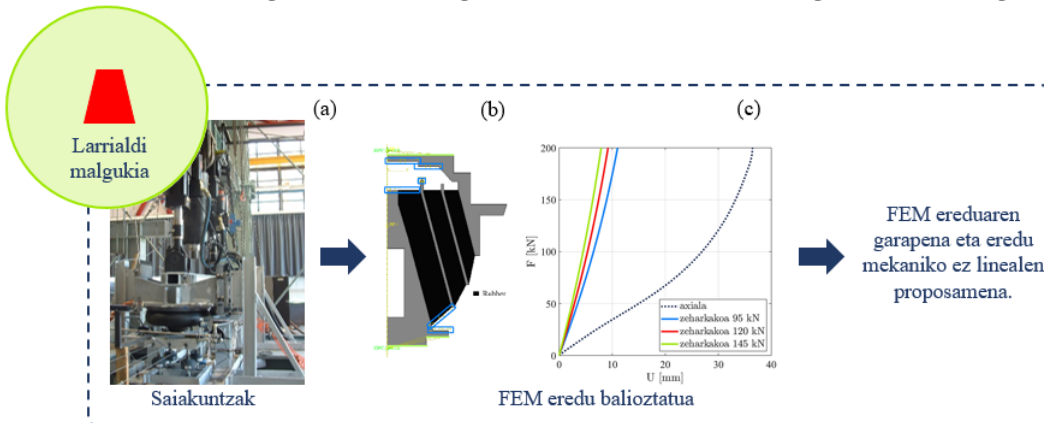
5 irudiak, larrialdi malgukiaren ereduaren garatzeko erabilitako metodologiaren urrats nagusiak biltzen ditu. Batetik, 5a irudiak tren ibilgailu baten esekidura sekundarioa karakterizatzeko Politecnico di Milanoko saiakuntza-bankua erakusten du. Bestetik, 5b irudia larrialdi malgukiaren eredu axisimetrikoa da, irudi geometriko hori bertikalki 360° biratuz gero, larrialdi malgukiaren 3D forma lortuko litzateke. Grisez altzairuzko zatiak ageri dira, eta beltzez berriz, elastomeriko edo kautxu-motakoak. Azkenik, 5c irudian larrialdi malgukiaren indar-desplazamendu

4. Irudia: Sistema pneumatikoaren eredia garatzeko erabilitako metodologiaren urrats nagusiak.



kurba azaltzen da, bertan nahiz eta zeharkako erlazioa aurrekargarekiko lineala den ikusi, axialki kurba ez da zuzena, hau da, ez lineala da eta ereduak jarrera hori barneratu behar dute, garatutako FEM ereduak bezalaxe.

5. Irudia: Larrialdi malgukiaren eredia garatzeko erabilitako metodologiaren urrats nagusiak.



4 Ondorioak

Biki birtualen garapenerako urrats bat eman da, hau da, bidaiari trenen esekidura pneumatikoaren modelizazioan sakondu da. Horretarako, sistemaren elementu bakoitza bakarka aztertu da, entsegu esperimentalen bidez. Material ereduak kalibratu dira eta hauspoaren, sistema pneumatikoaren eta larrialdi malgukiaren ereduak zabaldu eta FEM eredu ezberdinak garatu dira.

Azken finean, artearen egoeran identifikatutako hutsuneei erantzuna ematen saiatu da. Batetik, esekidura pneumatikoaren maiztasun altuko, 20 Hz-tik gorako, jarrera miaztea eta bestetik, FEM eredu ez-lineal bat garatzea, maiztasun tarte horretan esekidura sistemaren errendimendua aurreikusteko gai dena.

5 Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Modelizazioan oinarritua, hurrengo urratsa trenen esekidura pneumatikoa eta larrialdi malgukia bakarka aztertu ez ezik, esekidura osoa osatzen duten elementu guztien ereduak konbinatuz esekidura sistema osoaren FEM eredu balioztatua garatzea erronka polita litzateke. Eta hurrena, esekidura eredu tren-ibilgailuaren eredu osoan barneratzea litzateke eta haren zehaztasuna ebaluatzea. Era honetan, tren ibilgailuen homologazio birtualerantz aurrera pauso bat emango litzateke.

Erreferentziak

- Comission, E. (2019). Virtual certification : State of the art , gap analysis and barriers identification, benefits for the rail industry. Technical report, Plas2a-Deriverable D 4.1.
- Facchinetti, A., Mazzola, L., Alfi, S., & Bruni, S. (2010). Mathematical modelling of the secondary airspring suspension in railway vehicles and its effect on safety and ride comfort. *Vehicle System Dynamics*, 48(SUPPL. 1):429–449.
- Iwnicki, S. (2020). *Handbook of Railway Vehicle Dynamics*. Francis, Taylor and.
- Kareaga, Z. (2016). *Dynamic Stiffness and Damping Prediction on Rubber Material Parts, FEA and Experimental Correlation*. PhD thesis, Lea Artibai Ikastetxea S. Coop. and London Metropolitan University.
- Mendia-Garcia, I., Gil-Negrete, N., Nieto, F. J., Facchinetti, A., & Bruni, S. (2022). Analysis of the axial and transversal stiffness of an air spring suspension of a railway vehicle: mathematical modelling and experiments. *International Journal of Rail Transportation*, 00(00):1–20.
- Mendia-Garcia, I., Gil-Negrete, N., & Pradera-Mallabiabarrena, A. (2020a). Kautxuen portaera estatiko zein dinamikoaren karakterizazio esperimental eta elementu finituetan oinarritutako modelizazioa. In *Materialen Zientzia eta Teknologia V. Kongresua*, 170–175, Bilbo.
- Mendia-Garcia, I., Gil-Negrete, N., Pradera-Mallabiabarrena, A., & Berg, M. (2020b). A survey on the modelling of air springs–secondary suspension in railway vehicles. *Vehicle System Dynamics*.
- Mendia-Garcia, I., Gil-Negrete, N., Viles, E., & Pradera-Mallabiabarrena (2021). Bidaiari trenek konforta bermatzeko darabiltzaten baloi pneumatikoen azterketa. In *IV. Ikergazte. Nazioarteko ikerketa euskaraz. Kongresuko artikulu bilduma. Ingeniaritza eta Arkitektura*, Gasteiz.
- Rainery, L.B.and Jamshidi, M. (2021). *Engineering emergence: a modeling and simulation approach*. Broken Sound Parkway (NW): Taylor and Francis.
- Sañudo, A. (2014). *Development of a new methodology for the analysis of structure borne vibration in railway vehicles*. PhD thesis, Universidad de Navarra.

6 Eskerrak eta oharrak

Lan honetan ageri diren emaitzak, egun TECNUN-Nafarroako Unibertsitatean burutzen ari den Tesi baten parte dira. Zenbait atal CEIT ikerketa zentroaren eta Politecnico di Milanoko unibertsitatearekin elkarlanean garatu dira.