



IKER
GAZTE
NAZIOARTEKO
IKERKETA EUSKARAZ

VI. IKERGAZTE

NAZIOARTEKO IKERKETA EUSKARAZ

2025eko maiatzaren 28, 29 eta 30a
Bilbo, Euskal Herria

ANTOLATZAILEA:
Udako Euskal Unibertsitatea (UEU)



Aitortu-PartekatuBerdin 4.0

INGENIARITZA ETA ARKITEKTURA

**Bihurdura-bibrazioak tren-
ibilgailuen ardatzen gako**

*Irati Mendia-Garcia,
Joseba Iñaki Murua Gonzalez
eta Asier Alonso Pazos*

149-155 or.

<https://dx.doi.org/10.26876/ikergazte.vi.03.18>

ANTOLATZAILEA



BABESLEAK



EUSKO JAURLARITZA
GOBIERNO VASCO



LAGUNTZAILEAK



Bihurdura-bibrazioak tren-ibilgailuen ardatzen gako

Irati Mendia-Garcia¹, Joseba Iñaki Murua¹, Asier Alonso²

¹ CAF, dinamika eta errodadura berrikuntza taldea, Beasain

² CAF, teknologia-digital taldea, Beasain
irati.mendia@caf.net

Laburpena

Tren-ibilgailu bateko ardatzaren bi gurpilak kontrako norantzan oszilatzeari, bihurdura-bibrazioa deritzo. Ardatzaren integritatea bermatzeko oszilazio hau identifikatuta eta kontrolatuta izatea funtsezkoa da, non ardatzaren bihurdura-bibrazioen homologazioan saiakuntza esperimentalak burutzea ezinbestekoa den. Hala ere, fenomeno-fisikoa konplexua da eta xehetasun guztiak ez dira erabat ulertzen. Beraz, bihurdura-momentu altueneko mutur-egoera kritikoa zein den ez da ezagutzen, eta ondorioz, ardatzaren diseinua, zein homologazio-saiakuntzen estrategia aurrez jakitea ezinezkoa da. Honela, diseinu-fasean erabilgarria den bihurdura-momentua aurreikusteko metodologia bat garatu da, ardatz-gurpil sistemen diseinua optimizatu eta homologazio saiakuntzak murriztea ahalbidetu dezakeena.

Hitz gakoak: tren-ibilgailuak, bihurdura-bibrazioak, homologazio-saiakuntzak, diseinu-optimizazioa, modelizazioa.

Abstract

The oscillation of the two wheels on an axle of a rail vehicle in opposite directions is called torsional vibration. To ensure the integrity of the axle, it is essential to identify and control this oscillation, making experimental testing for the homologation of torsional vibrations on the axle indispensable. However, the physical phenomenon is complex and not fully identified in the literature. Therefore, the critical extreme condition with the highest torsional moment is not known, making it impossible to predict the axle's design and the strategy for homologation tests in advance. Consequently, a methodology has been developed to predict the torsional moment during the design phase, which can optimize the design of axle-wheel systems and reduce homologation tests.

Keywords: railway vehicle, torsional vibrations, homologation tests, design optimization, modelling.

1. Sarrera eta motibazioa

Tren-ibilgailuak garraio-sistema eraginkor, seguru eta iraunkortzat ezagunak dira urteetan zehar buruturiko erronka tekniko ugariaren ondorioz. Bide honetan, istripuak inflexio-puntu izan dira, hala nola: balazta-sistemaren akatsaren ondoriozko talka-istripua (1952 Harrow eta Wealdstone) non konponbidea balazta-sistema aurreratuen (erregenerazio-balazta) garapena izan den; gurpilaren neke-hausturaren ondorioz errail irtetea (1998 Eschede) non konponbidea ardatzen eta gurpilen diseinu zorrotzagoa eta mantentze-lanak izan diren; gehiegizko abiaduraren ondorioz iraultze-istripua (2013 Santiago de Compostela) non konponbidea ETCS (*European Train Control System*) segurtasun-seinale eta ATP (*Automatic Train Protection*) kontrol automatizatuaren arteko komunikazioa hobetzea izan den.

2010. urtean Alemanian mantentze-lanetan zebiltzala gurpilak ardatzarekiko biraketa-erlatiboa jasan zuela antzeman zuten (Trimpe F., 2020), gurpilen eta ardatzaren arteko loturaren degradazioaren ardura bihurdura-bibrazioei egotziz. Geroztik, herrialdean ibili behar duen tren orok bihurdura-bibrazioen homologaziorako prozesu luze, neketsu eta garestia pasa behar dute (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2013), (Die Bahnindustrie, 2021).

Baina zer dira bihurdura-bibrazio horiek? Bi gurpilek kontrako norantzan biratzean datza, hots, gurpilek antifasean oszilatzea. Homologazio-arauek zehazki, oszilazio-mugimendu hori sistemaren berezko bihurdurako antifaseko lehen maiztasun naturalari dagokiola diote (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2013) (Die Bahnindustrie, 2021). Hau da, nahiz eta ingurugiro-baldintzak aldatu (trenaren abiadura, trakzio- edo balazta-indarrak, eta bidaiari kopurua, esate baterako), gurpilen arteko biraketa-mugimenduaren erritmoa berbera izango dela,

eta lehen maiztasun naturalaren arabera. Biraketa zabalagoa edo motzagoa izan daiteke, hots, anplitude gehiagokoa edo gutxiagokoa; baina maiztasuna (erritmoa) bera. Biraketa anplitudea oso altua bada, biraketa indarrak sorturiko momentua ere handia izango da, eta ardatza zein ardatz-gurpil loturak ere momentu hori jasateko gai izan behar dute, ezin dira apurtu, eta horretarako diseinatzeko dira.

Baina diseinatzean nola jakin dezakegu zein diren trena zerbitzuan doanean azalduko diren bihurtura-momentu altuenak? Horra hor gakoa.

2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

Azken urte hauetan, zenbait autore tren ibilgailuen ardatzen bihurtura-bibrazioak eta bihurtura-momentuak aztertzen, ulertzen eta azaltzen saiatu dira. Horretarako saiakuntza-esperimentalak burutu zein fenomeno azaltzeko eredu matematikoen garapenean dihardute.

Trimpe et al. (Trimpe F., 2020)-k bere lanean, fenomeno beraren jatorria aztertu du, sistema bibratzen hasi ostean berau eteteko behar diren baldintzak zehaztuz. Bihurtura-bibrazioa autokitzikatua dela ondorioztatu dute, hau da, kanpo energia-iturri baten beharra duela sistemaren barneko bibrazioa hasteko, eta energia iturria kenduaz eteten dela. Beste hitz batzuetan, gurpilaren eta errailaren arteko kontaktu-puntuko marruskadura da energia iturri eta bertako baldintzak aldatu edo balaztatuz gero (aplikaturiko energia murriztuz), osilazioa etetea lor daiteke. Trenaren homologaziorako aplikagai den araudiak ere (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2013), (Die Bahnindustrie, 2021), azken finean, baldintza hauek aldatzea eskatzen du: errailak ureztatuz, bidaiari-zama aldatuz eta trakzionatu zein balaztatuz. Zertarako horrenbeste aldagai aldatzea? Bihurtura-bibrazioak eragiten duen momentua kuantifikatzeko, honela, ardatzaren diseinua balioztatzeko. Azken finean, ez da jakintzarik eta are gutxiago erremintarik ardatza fabrikatu zein trena saiatu aurretik haren balioa ezagutzeko.

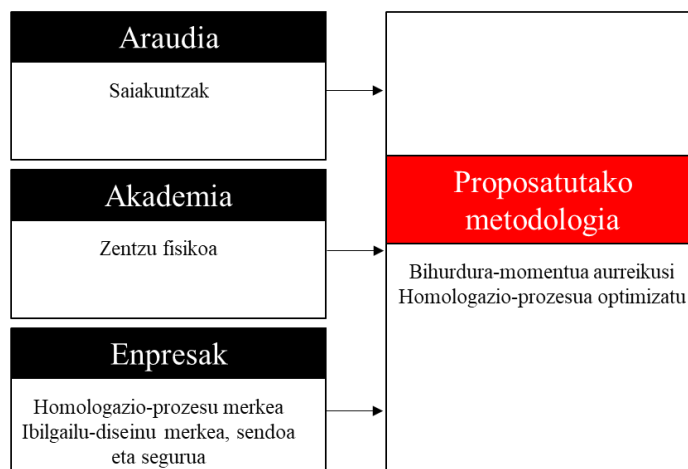
Gutxinaka badira zenbait eredu proposamen, maiztasun-domeinuan (Saur F. &, 2021) zein denbora-domeinuan (Abouzeid A. F., 2022; Bieker, 2014; Trimpe, 2020), bibrazio-momentuaren balioa zehaztu nahian dabiltzanak. Ez da onarturiko eredu balioztaturik literaturan ageri eta zenbait galderak zabalik jarraitzen dute, hala nola, gutxienez ibilgailu osoaren zenbat elementu behar diren definitu, gurpil-errail kontaktuan zehazki zer gertatzen den (aurreko ardatza puntu horretatik pasatzeak eragina ote duen, adibidez), etab.

Dena den, diseinua juxtukoa bada eta ardatz zein ardatz-gurpil loturak kolapsatzeko arriskua agerikoa bada, ardatzaren diametroa aldatu gabe, bestelako soluzioen bila badabiltza: abiadura angeluarra neurtzen duen ultra-doitasuneko sentsore bat jartzea (Abouzeid A. F., 2022); aurrez bibrazioaren maiztasun naturala ezagutuz gero Proportional-Resonant (PR) kontroladore bat definitzea (Abouzeid, 2022); edo gurpil zein balazta (Bieker, 2014) elastikoak erabiltzea, esate baterako.

Fenomenoa konplexua da, alor ezberdinak lotzen dituen: geometria, gurpil-errail elkar-ekintza, kontrol-logika, sistemaren moteltzea... Eta abar, izan ere, fenomenoak ezagutza-fasean dirau.

Ikerketa lan honek bihurtura-bibrazioen nondik-norakoak ezagutzea du jomuga, amaierako helburua ardatz-gurpil sistemen diseinua optimizatu eta homologazio saiakuntzak murriztea izanik. Hasierako fase honetan, tren ibilgailuen ardatzen bihurtura-bibrazioak aurreikusteko gaitasuna (erreminta) garatzea da. Ikus 1. Irudia, non proposaturiko metodologia eta ikerketaren testuingurua zein ekarpena laburbiltzen diren.

1. irudia. Proposatutako metodologia eta ikerketaren testuingurua eta ekarpena.



3. Ikerketaren muina

Atal honek bihurdura-bibrazioen xehetasunak azaldu eta bihurdura-momentua aurreikusteko metodologia baten urratsak azaltzea du helburu. Horretarako ondorengo gaiak landuko dira: fenomeno fisikoa, saiakuntzak eta, azkenik, bihurdura-momentua aurreikusteko proposaturiko metodologia.

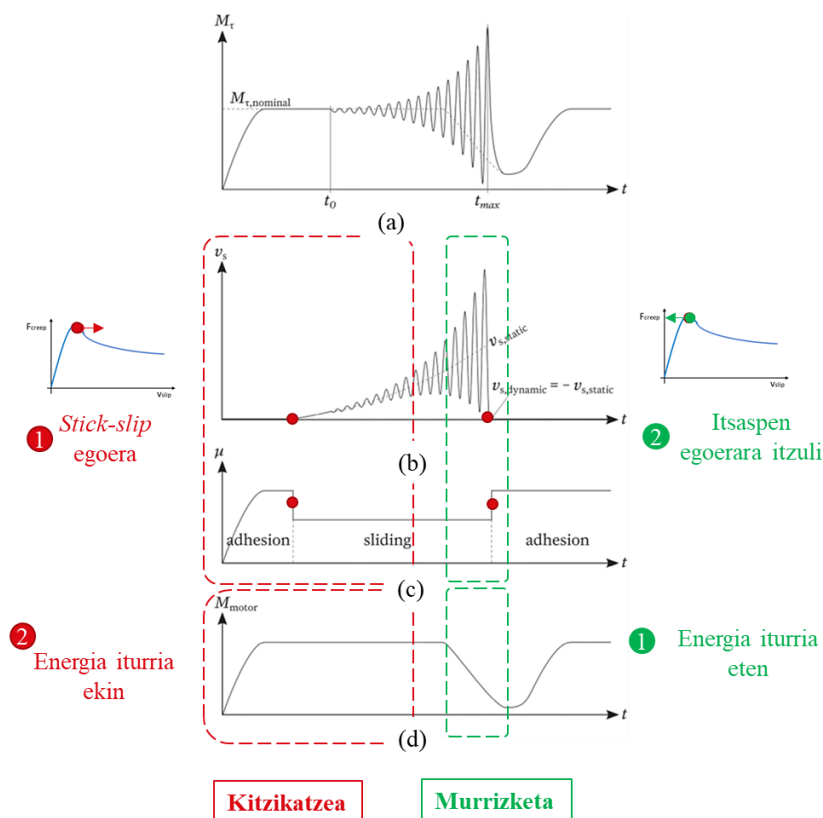
3.1 Fenomeno fisikoa

Bihurdura-bibrazioak izateko sistema ezegonkor bat behar da, energia jasotzeko gaitasuna duena (ondorioz, kanpo-energia iturri bat ere beharrezkoa da). Energia iturria trakzio indarretik dator, eta ezingorotasuna berriz, *stick-slip* fenomenotik edota itsaste-koefiziente handia izatetik. *Stick-slip*-a trenbideko gurpilak errailaren gainean itsastetik (indar-adhesio erlazioa positiboa izatetik) eta labaintzeare (adhesio txikia) arteko egoerari datza. Ezegonkortasuna *Stick-slip* fenomenotik datorrela suposatuz eta 2. irudia jarraituz, aztergai den fenomeno azalduko da.

2. irudian lau diagrama ikus daitezke: bihurdura-momentua, irristatze-abiadura, marruskadura-koefiziente eta motorrak eragiten duen indarra, hurrenez hurren. Era berean, bi fase bereiz daitezke: ezkerrekoak kitzikatze edota oszilazioa hasteari dagokio; eskuinekoak, berriz, murrizketa edo oszilazioaren eteteari. Aipatu bezala, bibrazioa hasteko kanpo-energia baten beharra dago, motorra aktibatuta dago (ikus 2.irudia d) eta gainera gurpila saturazio-puntua pasata irristatzen ari da (ikus 2.irudia b,c). Bibrazioa eteteko, berriz, kanpo-energia eten beharra dago, kasu honetan, motorraren indarra gutxitu da (ikus 2.irudia d). Honek *Stick-slip* irudian saturazio-puntutik ezkerrera pasa da, itsasgarritasuna berreskuratuz (ikus 2.irudia b, c) eta, ondorioz, bibrazioa guztiz motelduz (ikus 2.irudia a).

Baina bihurdura-momentuaren (2. irudiko a diagrama) anplitudea zerk zehazten duen ez da ezaguna, badirudi irristatze-abiadurak, marruskadura-koefizienteak eta trakzio-kontrolak eragina dutela (Trimpe F., 2020). Baina nola? Eta ba al da beste aldagai garrantzitsurik? Ikerketa lan honen helburuetako bat galdera horiek erantzutea da.

2. irudia. Bihurdura-bibrazioaren kitzikatzeko prozesua. Abzisa-ardatzak denbora adierazten du, ordenatu-ardatzak berriz: (a) bihurdura-momentua, (b) irristatze-abiadura, (c) marruskadura-koefizientea eta (d) trakzio motorraren konsigna indarra (Trimpe F., 2020).



3.2 Saiakuntzak

Bihurdura-bibrazioentzat araudiak homologazio-prozesurako zehazten duen ildo ez da ohi bezain zehatza (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2013), (Die Bahnindustrie, 2021). Laburbilduz, bi fase bereiz daitezke: lehenengoan, ingurumen baldintzen (errail-irrigazioa) zein ibilgailuaren konfigurazioaren (zama-maila, abiadura, akats-erak) ekorketa zabala egin behar da eta bihurdura-momentu altueneko mutur-egoera zehaztu. Bigarrenengoan, berriz, mutur-egoera horretako konfigurazioa erabiliz, bateratasun-irizpidea bete arte saiakuntza gehiago egitea eskatzen da. Esan bezala, araudiak ez du pautu zehatzik ematen, bihurdura-momentu maximoa neurtzeko muturreko egoera zein den ez da zehazten, hortaz, in situ saio eta hutsegite bidezko saiakuntzak egitea beharrezkoa da.

Bihurdura-momentuak ezin dira zuzenean neurtu, bihurdura-tentsioak neurtu eta ardatzaren geometria eta materiala ezagutuz, bihurdura-momentua kalkulatu egiten da. Horretarako ardatzean pegatina erako galga deritzon gailu batzuk kokatzen dira, puntu ezberdinetan eta normalean elkarrekiko 45° -tara orientatuz, honela bihurdura-indarrek eragindako deformazio txikiak neurtuz. Homologazio-araudiak neurketa hauek laborategi-akreditatuek bakarrik egin ditzaketela dio.

Ibilgailua zerbitzuan jarri aurreko homologazio-saiakuntza guztien kronologia, tokia eta iraupena urte bete baino gehiagoko aurrerapenarekin planifikatzen dira. Azken finean, logistika konplexua da eta Europa mailan ez dira horrenbeste toki, zein laborategi, homologaziorako akreditatuak daudenak. Aurrez, bihurdura-momentu altuena emango duen mutur-egoera zein den jakin ezean, hauen iraupena aurreikustea ia ezinezkoa da. Egia esan, saiakuntza hauek penalizazioez gain homologazio kostu osoaren bostena dira, hortaz, iraupena murriztu edo akotatzea lortuz gero, proiektuan inpaktu handia izango luke.

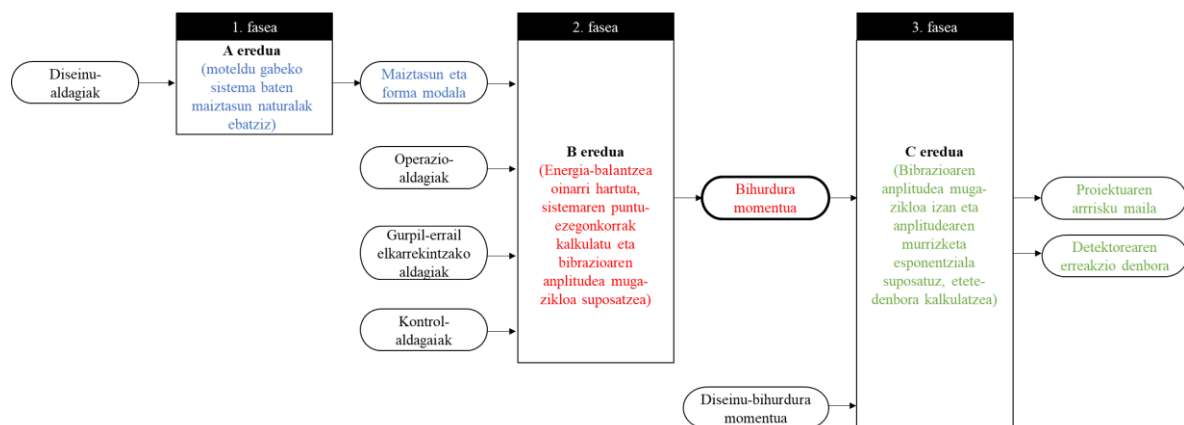
3.3 Proposaturiko metodologia

Lehen aipatu bezala, tren ibilgailuen ardatzen bihurdura-bibrazioak autonomoak eta autokitzikatuak dira. Hau da, oszilazio-maiztasuna ez da kanpo eragilean menpekoa (sistema berarena baizik); eta kanpo-energia behar du kitzikatua izateko. Hortaz, proposaturiko metodologiaren lehen urratsak bi ezaugarri horietan oinarritu dira, non lehen-fasea maiztasuna zehaztea den, eta bigarren-fasea, kanpo-aldagaien ondoriozko bihurdura-momentua estimatzea den.

Gainera, fase berri bat gehitu zaio, 3.fasea deritzona, bertan, aurreikusitako momentua eta diseinu-momentua alderatu eta elkarren arteko aldea ikusiz proiektuaren arrisku maila ebaluatzen da. Azken fase honetan ere, ardatzaren kolapsoaren arriskua agerikoa bada, ardatzaren diametroa aldatu gabe lehen aipaturiko soluzioetako bat nola aplikatu daitekeen ebaluatzen da. Abiadura-angeluarra neurtzen duen ultra-doitasuneko sentsore bat jartzea erabakitzen bada, haren erreakzio denbora zenbatekoa izan behar duen kalkulatu daiteke proposaturiko metodologiarekin.

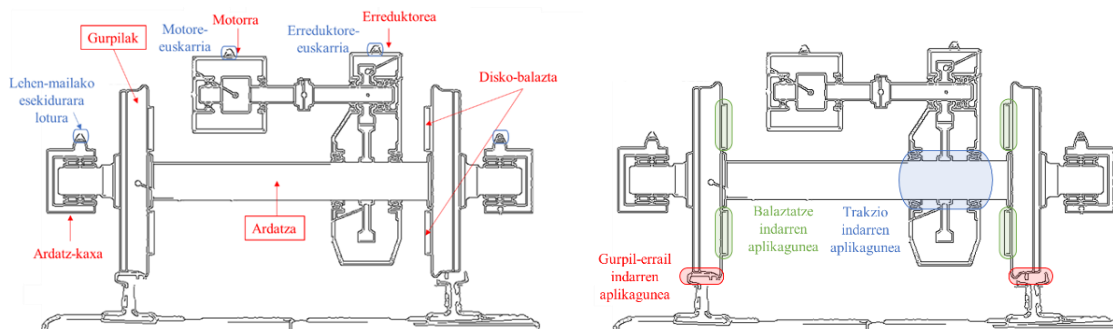
3. irudiak ikerketa lan honetan proposatu den metodologia laburbiltzen du, fase bakoitzaren sarrera eta irteera parametroak adieraziz. Batetik, bihurdura-bibrazioaren maiztasuna kalkulatzeko erabili den A eredu, motore-ardatz sistema baten masa eta malgukietan oinarrituriko eredu mekaniko bat garatu eta moteldu gabeko sistema baten maiztasun-naturalak ebatzi dira. Bestetik, bihurdura-momentua kalkulatzeko, energia-oreka printzipioa jarraituz eta irristatze-abiadura aldatuz, sistemaren puntu ezegonkorak bilatu dira; izan ere, bihurdura-bibrazioak sistema ezegonkorra denean soilik garatu ahal izango dira. Era berean, trenaren kontrola mespretxatuz, bihurdura-bibrazioaren anplitude maximoa muga-zikloa izango dela suposatu da, honela, bihurdura-momentua kalkulatu. Azkenik, C eredu, bibrazioaren anplitudeak diseinuzko bihurdura-momentura iristeko behar duen denbora aurreikus daiteke, hazkunde-prozesua esponentziala dela suposatuz. Honela, doitasun-altuko sentsoreak bibrazio-maila hori jaso, eta treneko trakzio konsignak esfortzua eteteko, beharko lukeen denbora estima daiteke.

3. irudia. Tren ibilgailuen ardatzen bihurdura-bibrazioak aurreikusi eta ebaluatzeko proposatu den metodologia.



Laguntze aldera, nahiz eta tren ibilgailuak aski ezagunak izan, proiektu honetan eragin handiena duten elementuak jarraian labur azalduko dira. Batetik, 4a. irudian bihurdurazko maiztasun-naturalean eragin handiena izan dezaketen motore-ardatz baten elementuak adierazi dira: *ukaezinak* -ardatza, gurpilak, gurpil-errail kontaktua eta trakzio-balaztatze indarrak (GEE-A) -, *eztabaidagarriak* -motore eta erreduktorea eta *ahaztuak* -lotura eta euskarriak -. Bestetik, 4b.irudiak kanpo-energien iturri diren indarren aplikaguneak definitzen ditu: gurpil-errail kontaktutik eratorritakoak eta trakzio- indarrak zein balaztatze- indarrak.

4. irudia. Motore-ardatz baten (a) funtsezko elementuak eta (b) kanpo indarren aplikazio guneak.



Izendatu berri diren aldagaiekin batera, ardatzen bihurtura-bibrazioetan garrantzia izan dezaketen beste zenbait aldagai 1.taulan laburbildu dira: Diseinu-Aldagaiak, Operazio-Aldagaiak, Gurpil-Errail Elkarrekintzako Aldagaiak, Kontrol-Aldagaiak.

1. taula. Proposatutako ereduaren aldagaiak

DISEINU-ALDAGAILAK	
Gurpilen kanpo-diametroa	[mm]
Ardatzaren kanpo-diametroa	[mm]
Erreduktorearen posizioa	[mm]
OPERAZIO-ALDAGAIK	
Trenaren abiadura	[km/h]
Ardatz-zama	[Ton]
GURPIL-ERRAIL ELKARREKINTZAKO ALDAGAIK	
Lehen gurpileko marruskadura-koefizientea	[-]
Biharren gurpileko marruskadura-koefizientea	[-]
Ibilgailuaren Itsaspen-kurba	
KONTROL-ALDAGAIK	
Irristatze-abiadura maximoa	[m/s]
esfortzu maximoa	[kN]

Proposatu den metodologia probatze aldera, 1.taulan ageri diren aldagaiei sentikortasun-analisi kualitatiboa egin da:

- Lehen taldeko aldagaiei izenak dion bezala, diseinu fasean zehazten dira eta, nahiz eta ardatzaren diametroa handituz gero bihurtura-momentua handiagoak jasan ditzakeen, honek elementu ugariaren berdimentsionatzea dakar eta ondorioz, proiektuaren fase aurreratueta ekin nahi izaten da.
- Operazio-aldagaiei dagokionez, badirudi zama gutxiagorekin bihurtura-bibrazioak kitzikatzea errazagoa dela, zama altuagoek berriz, bihurtura-momentu altuagoak eragin ditzakete.
- Gurpil-errail elkarrekintzako aldagaiei ondorio nagusia, oszilazioa has dadin gutxieneko marruskadura-koefizientea behar dela da. Dena den, proiektutik proiektura haren balioa aldatzen da eta zehaztu beharra dago.

- Kontrol-aldagaiak, ardatza beraren edota gurpil-ardatz lotura kolapsatzearen arrisku-maila jaisteko gako dira, esfortzua zein irristatze abiadura maximoak murriztuz, bihurtura-momentuaren anplitudea jaisten baita.

Analisiaren ondorioek agerian utzi dute ardatzaren diseinuak eta kontrolak ez ezik, marruskadura-koefizienteak zein operazio-aldagaiak bihurtura-bibrazio fenomenoan eragin nabarmena dutela, bai haren agerkunde zein magnitudean ere.

4. Ondorioak

Tren-ibilgailuen ardatzen bihurtura-bibrazio fenomenoaren inguruko enpresa-barneko ezagutza zabaldu da. Batetik, fenomeno fisikoan eragina izan dezaketen zeinbait faktore/aldagai identifikatu dira eta haren eragin kualitatiboa aztertu da. Bestetik, literaturan oinarrituz eta eredu propioak garatuz, bihurtura-bibrazioen momentuaren anplitudea aurreikusteko metodologia/erreminta garatu da.

Proposaturiko metodologiak, saiakuntzetara joan aurretik bihurtura-momentu maximoaren magnitudea aurreikustea ahalbidetzen du. Era honetan, ardatzaren diseinua optimizatzea eta bihurtura-momentu altueneko mutur-egoera identifikatzea ahalbidetzen du, hau da, homologazio-saiakuntzera joan aurretik mutur-egora zein edo zeintzuk izan daitezkeen akotatzeko balio du. Era honetan, saiakuntzen denbora aurreikus eta murriztu daiteke.

5. Etorkizunerako planteatzeko den norabidea

Hurrengo urratsa, proposaturiko metodologia proiektu erreal bateko emaitzekin alderatzea litzateke. Era honetan, metodologia balioztatu eta lortutako ondorioak enpresa-barnean aplikatzeaz gain, komunitate zientifikoarekin elkar-banatzea litzateke helburu.

6. Erreferentziak

- Abouzeid, A. F. (2022). Co-simulation-based verification of torsional vibration protection of electric-driven railway vehicle wheelsets. *Vibration*, 5(3), 613-627.
- Abouzeid, A. F.-M.-A.-I. (2022). Torsional vibration suppression in railway traction drives. *IEEE*, 10, 32855-32869.
- Bieker, G. D. (2014). Bremsscheibe als Tilger für Radsatz-torsionsschwingungen. *ZEV rail Glasers Annalen*, (págs. 138(9), 381-387).
- Die Bahnindustrie. (2021). *VDB-Schrift 003 - Anforderungen an die Nachweise zu Radsatz-Torsionsschwingungen*. Berlin.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2013). *DIN Taschenbuch 491/1 – Schienenfahrzeuge 1* –. Berlin: Beuth: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- Saur, F. &. (17.-19. Sept. 2023). Berechnungsmethoden zur Ermittlung des maximalen dynamischen Radsatz-Torsionsmomentes. *48. Tagung Moderne Schienenfahrzeuge* (págs. 164-171). TU Graz: Jahrgang .
- Saur, F. &. (2021). Analytische Berechnung des maximalen, dynamischen Radsatz-Torsionsmoments von Schienenfahrzeugen mit Tatzlagerantrieb. *Eisenbahntechnische Rundschau*, (págs. (4), 69-73.).
- Trimpe F., S. C. (2020). Wheel–rail adhesion during torsional vibration of. *Vehicle System Dynamics*, 59(5), 785-799.
- Trimpe, F. L. (2020). Simulation of torsional vibration of driven railway wheelsets respecting the drive control response on the vibration excitation in the wheel-rail contact point. *Vibration*, 4(1), 30-48.

7. Eskerrak eta oharrak

Eskerrak eman nahi dizkiegu Ibon Eziolaza, Alexander Imaz eta Alex Goya-ri, lan honetan lagundu izanagatik.