

Versenyautók delfinező rezgéseinek költséghatékony modellezése

Reduced order modelling of porpoising in race cars

BAUER Balázs¹, Dr. HABIB Giuseppe²

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Műszaki Mechanikai Tanszék,
MTA–BME Lendület Globális Dinamika, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.,
+36 1 463 1369¹, balazs.bauer@mm.bme.hu¹, +36 1 463 3678², habib@mm.bme.hu²

Abstract

The study examines „porpoising” in race cars, a motion caused by the nonlinearity of downforce by ground height leading to a fluid-structure interaction problem. A reduced-order model is proposed to investigate and potentially suppress this phenomenon through several approaches cost effectively. The model cannot fully represent porpoising but describes system dynamics until stability loss. In conclusion a suspension with nonlinear asymmetric damping characteristics effectively suppressed porpoising at high speeds.

Keywords: porpoising, aeroelasticity, Formula 1., race cars

Kivonat

Kutatásunk során a delfinezés „porpoising” jelenségét vizsgáltuk, melyet a hasmagasságtól függő nemlineáris leszorítóerőből adódó aerodinamikai hatások okoznak. A felépített alacsony dimenziójú modell célja a stabilitásvesztés jellegének reprezentálása volt, lehetővé téve a stabilizáló stratégiák széleskörű, költséghatékony tesztelését. Az eredmények alapján egy nemlineáris csillapító, nem folytonos karakterisztikával képes elnyomni a delfinezés rezgéseit és magasabb sebességekre emeli a stabilitás határát.

Kulcsszavak: delfinező rezgések, aeroelasztika, Formula 1., versenyautók

1. BEVEZETÉS

A delfinezés vagy „porpoising”, egy folyadék és egy jármű szerkezet közötti kapcsolt jelenség, amely a Formula 1 (F1) versenyben a 2022-es új szabályozások következményeképpen vált releváns problémává. Az új szabályozások ismét engedélyezték a Venturi-effektus kihasználását a leszorítóerő növelése érdekében. Ezáltal bevezettek egy, a hasmagassággal összefüggő nemlinearitást a dinamikába, mely a hasmagasság függvényében befolyásolja a rendszer stabilitását. A szakirodalomban fellelhető modellezési megközelítések közé tartoznak a negyedjáromú és felfüggesztés modellek [6], a teljeskörű áramlástani szimulációk numerikus szimulációk (CFD) [1], és az új Venturi szakasz CFD szimulációja [8]. A delfinezés jelensége kezdetben a hajózási- és a repülőiparban jelent meg. A jelenség gyakori és jelentős problémát okoz a vízre szálló repülőgépeknél. A hidrolánok stabilitásvesztésének típusai, valamint a stabilitási határ meghatározása már az 1944-es években is mérnöki kihívásként jelentek meg [5].

A kutatásunk célja az volt, hogy egy redukált dimenziójú modellt alkossunk, mely segítségével a jelenséget mérséklő-, valamint a stabilitást megőrző stratégiák tesztelése gyorsan és alacsony számítási költséggel elérhetőek. A modellépítést követően, a legnagyobb hangsúlyt a felfüggesztés pozíciófüggő, nemlineáris, nem folytonos csillapítására helyeztük.

A valós jelenség során különböző tranziens és aerodinamikai hatások befolyásolják a delfinező rezgéseket úgy, mint az aerodinamikai erők hiszterézise, az áramlás lamináris turbulens átmenete, az áramlás leválása, a dinamikus átesés, továbbá nagysúrlódású ütközések a talajjal. Ezek, bár fontos szerepet játszanak a komplex rezgési jelenségekben, nem befolyásolják a rendszer stabilitását és a stabilitásvesztés kritériumait a közegsebesség függvényében. Mivel a cél a stabilitásvesztés megértése, ezért a modell validitása csak a kritikus sebesség körüli tartományra terjed ki.

2. ALAPFELTEVÉSEK

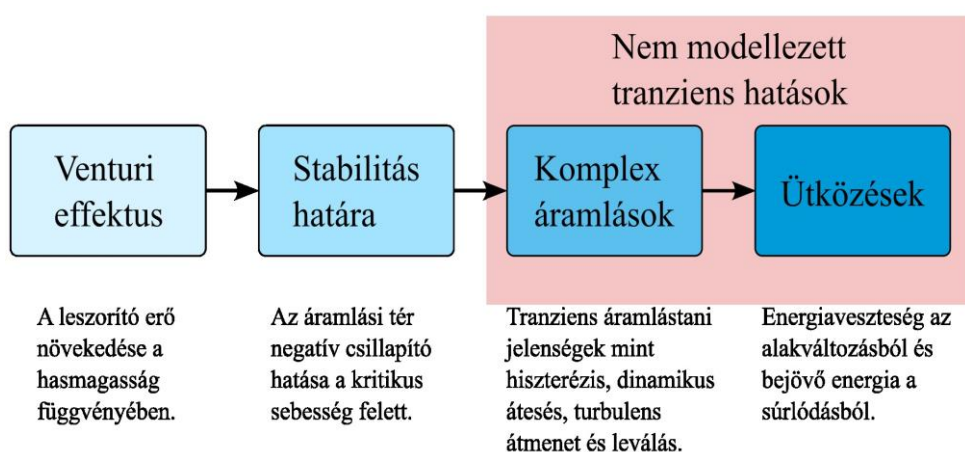
A numerikus szimulációk az 1. táblázatban egy általánosított versenyautó adatain alapszanak, melyet az F1-ben, 2022 után tapasztalt kritikus sebességhez és jellemzőkhöz hangoltunk be. Az elemzést és mérnöki megoldásokat bármilyen egyéb valós értékekre ki lehet terjeszteni, bár az F1-re jellemző értékek nem állnak rendelkezésre a titoktartási megállapodások miatt. A modellredukció során a mechanikai rendszerben a felfüggesztést egyszerű rugó- és csillapítóelemként modelleztük [2], míg az itt használt ekvivalens értékeket, a delfinező rezgésekre jellemző frekvencia tartománynak megfelelően hangoltuk be, ezzel a lineáris rugó sajátfrekvenciáját kiválasztva f_n -nek. Ez a feltételezés reális értékeket ad a felfüggesztések merevségére is, mely feltételezhetően 200 [kN/m] körül van.

Az 1. ábra összefoglalja a delfinező rezgések fő elemeit, valamint bemutatja a jelenlegi redukált modellben felhasznált elemeket.

Egy általánosított versenyautó mechanikai jellemzői

1. táblázat

Jelölés	Megnevezés	Mennyiség
L	tengelyek közötti távolság	3.5 [m]
f_n	a felfüggesztés csillapítatlan sajátfrekvenciája	5.5 [Hz]
V_∞^{max}	maximális közeg sebesség	360 [km/h] (100 [m/s])
V_∞^{krit}	a közeg kritikus sebessége	250 [km/h] (69.4 [m/s])
m	a jármű átlagos tömege	850 [kg]
ζ	a felfüggesztés egyenértékű csillapítási tényezője	0.7 [1]
e	az aerodinamikai erők dimenziótlan excentricitása	0.05 [1]
α_0	az autónak megfelelő szárnyprofil kezdeti szöge	0.4 [°]



1. ábra. A delfinező rezgések alkotórészei és a redukált modell vázlatja.

3. AERODINAMIKAI MODELLEK

A számítási költség, valamint a komplexitás csökkentése első sorban az áramlástani modellek egyszerűsítésével érhető el. Ez a versenyautó körüli légáramlás nemlineáris hatásainak a mechanikai modellbe integrálásával történt meg. Az eredményül kapott nemlineáris görbe és az áramlási paraméterek hatása a Theodorsen elmélet továbbgondolása egy rezgő szárnyprofilra [3, 4]. Elsőként megállapítható volt, hogy a Reynolds szám a kritikus érték alatt maradt a versenyautó alsó részén kialakított Venturi szakaszon, így a feltételezett nemlineáris görbe jó közelítést nyújt a pontos CFD eredményekhez. A légáram által hozzáadott tömeg hatását szintén nem vettük figyelembe, mivel ez legalább egy nagyságrenddel kisebb, mint a mechanikai tehetetlenség.

A delfinező rezgések egy adott kritikus áramlási sebesség felett fordulnak elő. A modellezési megközelítést, valamint az instabilitás jellegét főként az áramlási sebesség, a szárnyprofil karakterisztikus hossza és az oszcilláció frekvenciája határozza meg. Az ezen mennyiségekből számolt arány kulcsszerepet játszik az aeroelasztikus modellezésben, melyet redukált frekvenciának neveznek. Ennek értéke alapján a delfinező rezgések során a dinamikát erősen instabil aerodinamika jellemzi, mely természetes határt képez a modell validitásában, de megengedi a modell alkalmazhatóságát a stabilitás elvesztéséig.

Az leszorítóerő számításához a C_L dimenziótlan tényezőt kell meghatározni, melyhez az effektív bólintási szög szükséges:

$$\alpha^{eff} = \left(\alpha - \frac{y'_G}{V_\infty} - \frac{1}{4} \frac{\alpha'}{V_\infty} \right), \quad (1)$$

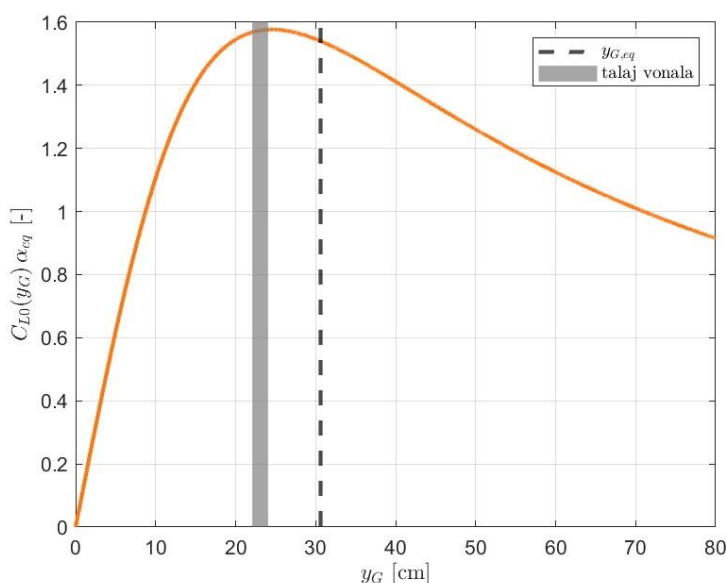
amelynek felhasználásával a teljes leszorító erő tényező

$$C_L(V_\infty, y_G, \alpha, y'_G, \alpha') = C_{L0}(y_G) \alpha^{eff}. \quad (2)$$

A $C_{L0}(y_G)$ görbe a nemlineáris aerodinamikai erőket reprezentálja, melyeket főként a Venturi-effektus határoz meg. Feltételeztük, hogy ez az alábbi, legegyszerűbb formát veszi fel:

$$C_{L0} = \frac{a_2 y_G^2 + a_1 y_G}{a_3 y_G^2 + 1}, \quad (3)$$

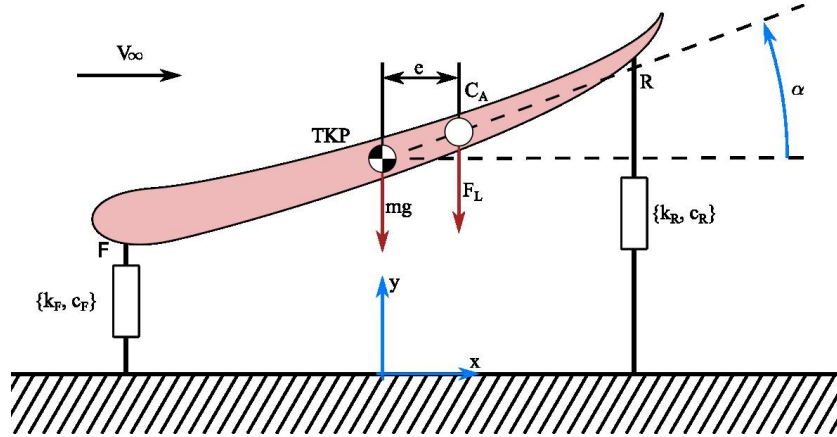
ahol $\{a_1, a_2, a_3\}$ hangolható paraméterek. A 2. ábrán látható a nemlineáris görbe a talaj és a tömegközéppont (TKP) közötti távolság szerint, melynek paramétereit a stabilitásvesztés tulajdonságaihoz hangoltuk, ezek az 1. táblázatban kerültek összefoglalásra. Ezek alapján $y_{G,eq}$ egyensúlyi távolság a talaj és a talajjal való ütközési határ láthatók a 2. ábrán. Fontos megjegyezni, hogy ezen görbe értelmezési tartománya csupán a talaj vonaláig tart. A $C_{L0}(y_G)$ szerepe a bólintási szöggel kapcsolatos meredekség megadása, adott TKP magasság függvényében, melyet a 2. ábra az egyensúlyi bólintási szöggel szorozva ábrázol.



2. ábra. A leszorítóerő Venturi-effektusból eredő nemlineáris alakja az egyensúlyi szöggel beszorozva.

4. MECHANIKAI MODELL

A rendszert egy 2 dimenziós fordított szárny alakú, L (tengelyek közötti távolság) hosszúságú testként modelleztük, ehhez a tehetetlenségi nyomatékot egy L hosszúságú rúddal közelítettük. A szerkezet egy m tömegű, a két végponton (F – elől „front”, és R – hátul „rear”) felfüggesztéssel rögzített test, melyhez képest a közeg V_∞ sebességgel mozog, ahogyan azt a 3. ábra szemlélteti. Az így kialakított 2 szabadságfokú rendszert az α dőlésszög (pozitív az óramutató járásával ellentétesen) és az y_G TKP helyzete írja le.



3. ábra. A delfinező rezgések modellezési lépései és a jelenlegi modell vázlatja.

Ennek a rendszernek a dimenziótlan mozgásegyenlete azonos felfüggesztési paraméterekkel:

$$\begin{cases} y_G'' + 2\zeta (y_R' + y_F') + k (\Delta y_R + \Delta y_F) = -F_G - F_L \\ \alpha'' + 12\zeta \alpha' + 6k (\Delta y_R - \Delta y_F) = -12F_L e \end{cases} \quad (4)$$

ahol az F_G a dimenziótlan súlyerő, melyet állandónak tekintünk, és F_L a dimenziótlan leszorítóerő. A merev test dinamikájából és a kis dőlésszögekből az egyensúly körül

$$\begin{aligned} \Delta y_F &= y_G - \frac{\alpha}{2} - y_{F0}, \Delta y_R = y_G + \frac{\alpha}{2} - y_{R0}, \\ y_F' &= y_G' - \frac{\alpha'}{2}, y_R' = y_G' + \frac{\alpha'}{2} \end{aligned} \quad (5)$$

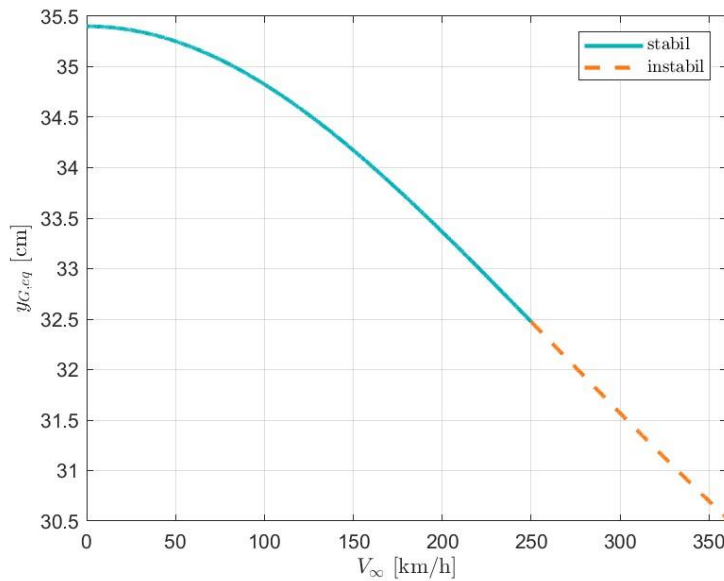
érvényesnek tekinthető, ahol a ($'$) a dimenzió nélküli idő szerinti differenciálást jelenti f_n felhasználásával.

5. STABILITÁSVIZSGÁLAT

A modell stabilitását a mozgásegyenletek \mathbf{J} Jakobi mátrixával vizsgáltuk. A rendszer egyensúlyi megoldásait zárt formában meg lehetett határozni, és felhasználni a paraméterhangolásban. A kutatáshoz használt paraméterhalmaz használatával az egyensúlyi helyzet az ábrázoltak szerint változott (4. ábra).

A rendszer stabilitását a \mathbf{J} mátrix sajátértékei határozzák meg. Mikor két sajátérték áthalad a képzetes tengelyen nem nulla sebességgel és képzetes résszel, a rendszer egy szuperkritikus Hopf-bifurkáción megy keresztül, melynek hatására egy stabil határciklus jelenik meg és az eddigi stabil egyensúlyi helyzet lineárisan instabillá válik. Az öngerjesztett rezgések a redukált modellben a stabilitásvesztést követően 6 [Hz] körüli frekvencián rezgő megoldást adnak, hozzávetőleg 2 [g] gyorsulás amplitúdóval.

A szerkezeti csillapítás növelése képes eltolni a stabilitásvesztést magasabb sebességekre. Azonban a stabilitás elemzése bonyolult a $C_L(V_\infty, y_G, \alpha, y_G', \alpha')$ függő paraméterei miatt. A stabilitási határ nagymértékben függ a dinamikus aerodinamikai mennyiségektől, mint például a leszorítóerő excentricitása, melyeket a gyakorlatban aero-térképekkel vesznek figyelembe.



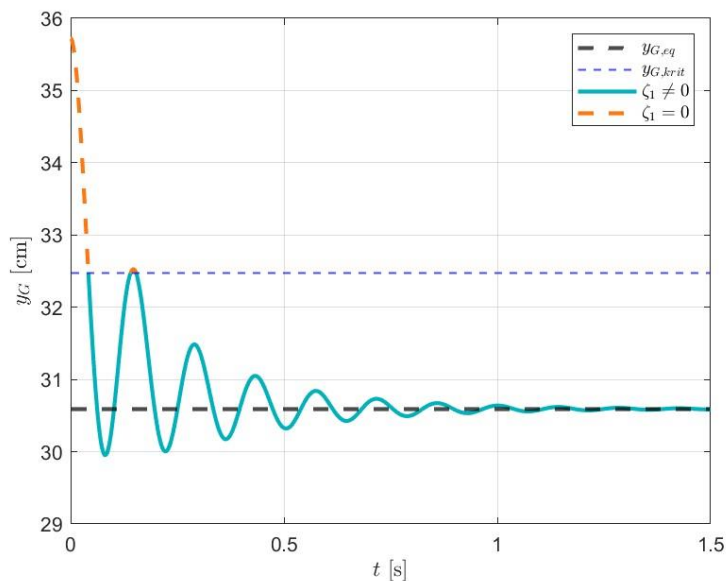
4. ábra. Az egyensúlyi hasmagasság alakulása a közeg sebesség függvényében.

6. NEM FOLYTONOS CSILLAPÍTÁS

Az eredeti mozgásegyenletet kiegészítettük a nem folytonos csillapítási együtthatóval, amely

$$\zeta(y_G) = \begin{cases} \zeta_0 + \zeta_1 y_G, & y_G < y_{G,krit} \\ \zeta_0, & y_G \geq y_{G,krit} \end{cases}, \quad (6)$$

ahol $y_{G,krit}$ egy előre meghatározott TKP érték, mely közel van az egyensúlyi állapothoz a kritikus sebességnél, így praktikusán a kritikus sebesség után játszik csak szerepet. A nem folytonos karakterisztika praktikussága abban mutatkozik meg, hogy a kritikus sebességig az egyéb jellemzőknek megfelelően beállított ζ_0 konstans értéket adja, azonban ezen felül az egyensúlyi hasmagasság csökkenése miatt automatikusan aktiválódik a ζ_1 magasságfüggő tag. Mindez lehetővé teszi a maximális sebesség elérését a stabilitás megőrzése mellett, nem befolyásolva a többi sebesség esetében a performanciát. Ez a megoldás hatékonynak bizonyult, ahogyan az 5. ábra is mutatja, továbbá gyakorlati implementálására lehetőség van passzív eszközökkel is.



5. ábra. A numerikus szimuláció eredménye a maximális közegsebesség mellett indított nagy kitérés esetén. A diagramon a kék szaggatott vonallal jelölt $y_{G,krit}$ határt átlépve a nem konstans csillapítás bekapcsol, melyet a $\zeta_1 \neq 0$ jelöl és a rendszer az egyensúlyi megoldásba tartott.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatásunk megmutatta, hogy létezik olyan paraméter megválasztás, amikor a delfinező rezgések frekvenciája, a stabilitásvesztés sebessége és a modellezett aerodinamikai leszorítóerő mértéke egy általánosított F1-es autó valós értékeihez közelít. Így igazoltuk, hogy egy redukált dimenziójú költséghatékony modell képes kielégítően szimulálni az F1-ben tapasztalt delfinezés jelenségét. A vizsgált rendszer delfinező rezgései a csillapítást csökkentő aerodinamikai hatásokból erednek, melyek a stabilitásvesztésig meghatározzák a rendszer dinamikáját. Az öngerjesztő rezgések további tranziens jelenségekhez vezetnek, melyeket a stabilitás szempontjából elhagytunk. A kutatás eredményeképpen megállapítható, hogy az aerodinamikai tulajdonságok jelentős hatással vannak a kritikus sebességre, azonban a változtatható paraméterek, mint az excentricitás értéke egyéb megfontolásokból kötöttek, így nem alkalmazhatóak a stabilitásvesztés problémájának megoldására. A redukált dimenziójú modell analitikus és numerikus elemzése azt mutatta, hogy a kritikus sebességet az aerodinamika mellett a szerkezeti csillapítás határozza meg, amely a megoldási stratégiák kulcsfontosságú elemévé vált.

Az eredmények tükrében lehetséges úgy hangolni nemlineáris csillapítási karakterisztikát, hogy az F1-es járművek maximális sebessége mellett a rendszer stabil legyen. A nem folytonos karakterisztika célja, hogy az extra csillapítás az egyensúlyi magasság függvényében csak a delfinezés kritikus sebessége után módosítsa a rendszer dinamikáját. Egy ilyen nem folytonos nemlineáris csillapítóelem mérnöki megoldást kínál az F1-ben tapasztalt delfinező stabilitásvesztés problémájára.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Gadola, M., et al. *Analyzing Porpoising on High Downforce Race Cars: Causes and Possible Setup Adjustments to Avoid It*. Energies 15.18, 2022, 6677.
- [2] Horvath, H. Zs., and Takacs D. *Stability and local bifurcation analyses of two-wheeled trailers considering the nonlinear coupling between lateral and vertical motions*. Nonlinear Dynamics, 2022, 1-18.
- [3] Molina, J., Zhang, X., and Alomar A. *Aerodynamics of a pitching and heaving airfoil in ground effect*. AIAA Journal 54.4, 2016, 1158-1171.
- [4] Nitti, A., et al. *Spatially localized vibrations in a rotor subjected to flutter*. Nonlinear Dynamics 103, 2021, 309-325.
- [5] Smith, A. G., and White H. *A review of porpoising instability of seaplanes.*, 1944.
- [6] Suárez M. I., Timoteo B. B. *Simulating Porpoising Effect on Quarter-car Suspension Model*. 1, Zenodo, 2022., doi:10.5281/zenodo.6504247.
- [7] Vogt, D. M. *Experimental research on aeroelasticity*. Structural Design of Aircraft Engines: Key Objectives and Techniques, 2008.
- [8] Zhu, Z. *Cause and Analysis of 2022 Formula 1 'Porpoising'*. Highlights in Science, Engineering and Technology 46, 2023, 19-27.