

## TUSKÓS FÉKEGYSÉG ERŐJÁTÉKÁNAK ANALITIKUS LEÍRÁSA, VERIFIKÁCIÓJA ÉS VALIDÁCIÓJA

### VERIFICATION AND VALIDATION OF ANALYTICAL DESCRIPTION OF TREAD BRAKE UNIT'S FORCEFLOW

Dr. Molnár Csaba, szenior szimulációs mérnök ([Csaba.drMolnar@knorr-bremse.com](mailto:Csaba.drMolnar@knorr-bremse.com));  
Dóczi Balázs, referens szimulációs mérnök ([Balazs.Doczi@knorr-bremse.com](mailto:Balazs.Doczi@knorr-bremse.com))

#### ÖSSZEFOGLALÁS

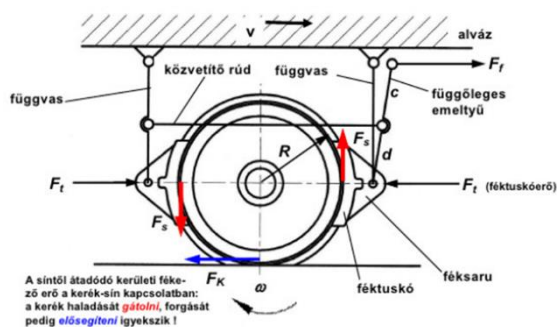
Jelen munkában a tuskós fékegység fékezés során létrejövő erőjátékának analitikus leírását, illetve annak verifikációját (nemlineáris végesesemes (VE) modell) és validációját (tesztorozat valós kerék-sín kapcsolattal) mutatjuk be.

#### ABSTRACT

In the present paper the verification (nonlinear finite element model) and the validation (test series with realistic wheel-track connection) of the analytical description of tread brake unit's force flow be presented.

#### 1. MOTIVÁCIÓ

A vasúti közlekedésben a legrégebben alkalmazott fékkonstrukció a tuskós fék, amelyet napjainkban is nagy számban találhatunk meg kötőpályás járműveken, pl.: mozdonyokon, tehervagonokon, metrókon stb. Felépítése egyszerű, a fékbetéttartót (vagy féksarut) a függvas rögzíti a fékegység házához vagy a forgóvázhoz, ahogy azt az 1. ábra is szemlélteti.



1. ábra. Két oldalról tuskós fékkel fékezett kerék szerkezeti vázlata az erőhatásokkal [1]

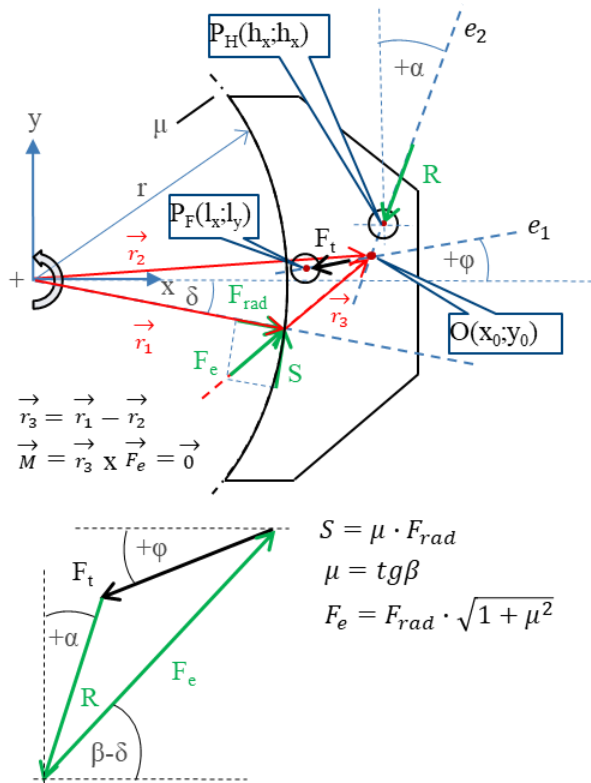
Egyszerű felépítése ellenére a fékezés közben létrejövő erőjáték pontos meghatározása számos kihívást rejt magában. A fékezés során fellépő egyik legjelentősebb hatás az ún. szervó-hatás. A függőleges álláshoz képest szögben álló függvas esetén a fékezés közben létrejövő reakcióerők nagysága a vasúti kerék forgásirányától függ, amit szükséges figyelembe venni a fejlesztési folyamat során.

A konstrukciós csoport részéről megfogalmazódott az igény a fejlesztési folyamat támogatására a tuskós fékegységek reakcióerőinek hatékony és pontos számításával. Jelen cikkünkben bemutatott analitikus leírás célja a fenti igény kielégítése.

#### 2. ANALITIKUS LEÍRÁS

A feladat megfogalmazásakor az a cél vezetett bennünket, hogy a tervezési folyamat kezdeti fázisában segítsünk a tervezőnek a konstrukció kialakításával kapcsolatos döntések meghozatalában, pl.: a bázis méretek behatárolása, az ébredő erők határértékei, a súrlódási tényező szerepe, a szervó-hatás mértéke, a betét kopási viszonyainak előrejelzése stb. Igyekeztünk a probléma lehető legáltalánosabb megfogalmazására, a széleskörű felhasználás szem előtt tartásával. Ugyanakkor élnünk kellett bizonyos egyszerűsítésekkel, amelyekkel a levezetések és a kapott összefüggések egyszerűsítésére törekedtünk.

A következőkben ezeket az egyszerűsítéseket vesszük sorra a 2. ábra segítségével, amely egy egy-tuskós fék erőjátékát szemlélteti „KOPOTT” állapotú fékbetét esetén.



2. ábra. Egy-tuskós fék erőjátéka „KOPOTT” állapotban

A 2. ábrán látható jelölések:

Bemenő paraméterek:

- $r$ : kerék rádiusz
- $P_F(l_x; l_y)$ :  $F_t$  támadáspontja
- $P_H(h_x; h_y)$ : függvas bekötési pontja
- $\alpha$  [°]: függvas szög
- $\varphi$  [°]:  $F_t$  hatásvonalának szöge
- $\mu$ : súrlódási tényező a kerék-betét kapcsolaton
- $F_t$ : féktuskó erő

Számított paraméterek:

- $O(x_0; y_0)$ : aktív erők hatásvonalainak ( $e_1$  és  $e_2$ ) metszéspontja
- $\delta$ : eredő erő határvonalának szöge
- $R$ : függvas erő
- $F_e$ : eredő erő
- $F_{rad}$ : radiális reakcióerő
- $S = F_{rad} \cdot \mu$ : súrlódó erő

A feladat általános megfogalmazásához az alábbi feltételezésekkel élünk:

- csak a fékerőt és a kerületi erőt vesszük figyelembe, az oldalirányú erőkkel nem számolunk,
- így a problémát 2D-s problémára vezethetjük vissza és síkbeli, egyensúlyi erőrendszerrel dolgozhatunk,

- a féktuskón egyenletes erő -és nyomáseloszlást tételezünk fel,
- konstans súrlódási tényezőt veszünk figyelembe a féktuskó-kerék kapcsolaton,
- az alkatrészeket merev testeknek tekintjük,
- az alkatrészek nyomatékmentes, ideális kapcsolatokkal rendelkeznek,
- a kerék forgásirányát a levezetésekben külön terhelési esetként kezeljük, így a szervó-hatás is vizsgálható.

A problémakör meghatározásánál a következő eseteket különböztetjük meg:

- egy-tuskós fékegység vizsgálata,
- két-tuskós fékegység vizsgálata,
- „ÚJ” állapot vizsgálata (új féktuskó, új kerék futófelület),
- „KOPOTT” állapot vizsgálata (mind a betét, mind pedig a kerék futófelülete kopott állapotban van),
- a haladási irány szerinti megkülönböztetés a levezetésekben,
- a függvas erő és a fékerő támadási pontjának egymáshoz viszonyított helyzete tetszőleges az adott (estünkben az  $xy$ ) síkban.

Az alábbiakban egy egy-tuskós fékegység példáján mutatjuk be röviden a keresett erők meghatározására szolgáló összefüggéseket, a „KOPOTT” állapot figyelembevételével. A 2. ábra szerint a síkbeli erőrendszert három erő alkotja: féktuskóerő ( $F_t$ ), függvas erő ( $R$ ) és az eredő erő ( $F_e$ ). A három erő egyensúlyi erőrendszert alkot, tehát felírható a két vetületi és a nyomatéki egyenlet:

$$\sum F_x = 0, \quad (1)$$

$$\sum F_y = 0, \quad (2)$$

$$\sum M_z = 0. \quad (3)$$

Egyensúlyi erőrendszerek esetében a vektor sokszög zárt és a vetületi egyenletek ennek alapján is felírhatók (2. ábra). A nyomatékok egyensúlyából a 2. ábrán látható  $\delta$  szög határozható meg.

Mellőzve a részletes levezetést és a szükséges matematikai átalakításokat, a súrlódó erőre ( $S$ ) illetve a függvas erőre ( $R$ ) az alábbi összefüggéseket kapjuk:

$$S = \frac{\mu \cdot F_t}{\cos(\beta - \delta) \cdot \sqrt{1 + \mu^2}} = \frac{\mu \cdot F_t}{1 + \mu \cdot \operatorname{tg} \delta} < \mu \cdot F_t = F_s, \quad (4)$$

$$R = F_t \cdot \operatorname{tg}(\beta - \delta) = \mu \cdot F_t \cdot \frac{1 - \operatorname{tg} \delta}{1 + \mu \operatorname{tg} \delta} < \mu \cdot F_t, \quad (5)$$

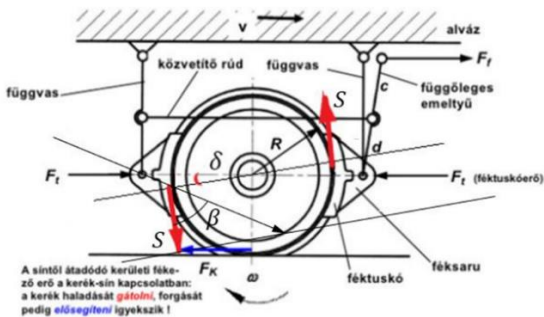
ahol  $F_t$  a féktuskóerő,  $\mu$  a fékbetét és a kerék közti súrlódási tényező, a  $\beta$  szög pedig kifejezhető, mint:

$$\beta = \arctan(\mu). \quad (6)$$

A (4) összefüggésből jól látható, hogy az általánosan ismert

$$\mu \cdot F_t = F_s \quad (7)$$

formulával meghatározott súrlódási erővel ( $F_s$ ) szemben a valóságban kisebb súrlódási erő ( $S$ ) ébred (3. ábra), amit alátámasztanak az ATLAS tesztek eredményei is, amelyről részletesebben a 3. fejezetben értekezünk.



3. ábra. Két oldalról tuskós fékkel fékezett kerék szerkezeti vázlatja a valós erőhatásokkal

A kapott eredmények felhasználásával elérhető, hogy elkerüljük a szerkezet túlméretezettségét, azaz a szükségesnél nagyobb biztonsági tényezőket.

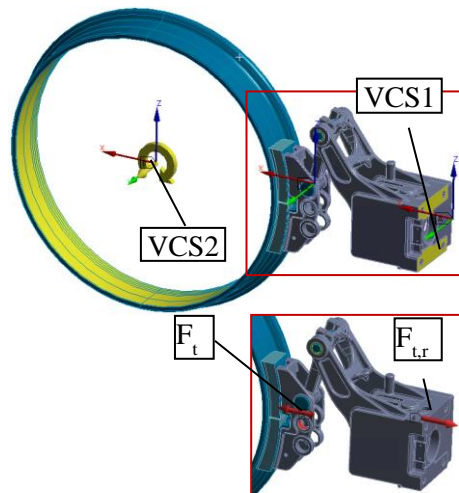
### 3. VERIFIKÁCIÓ ÉS VALIDÁCIÓ

Jelen fejezetben az előzőekben bemutatott analitikus számítási módszer verifikációjának és validációjának mentetét és eredményeit részletezzük.

3.1. Tuskós fékegység nemlineáris VE modellje  
Az analitikus számítási módszer verifikációjára egy nemlineáris VE modellt hoztunk létre.

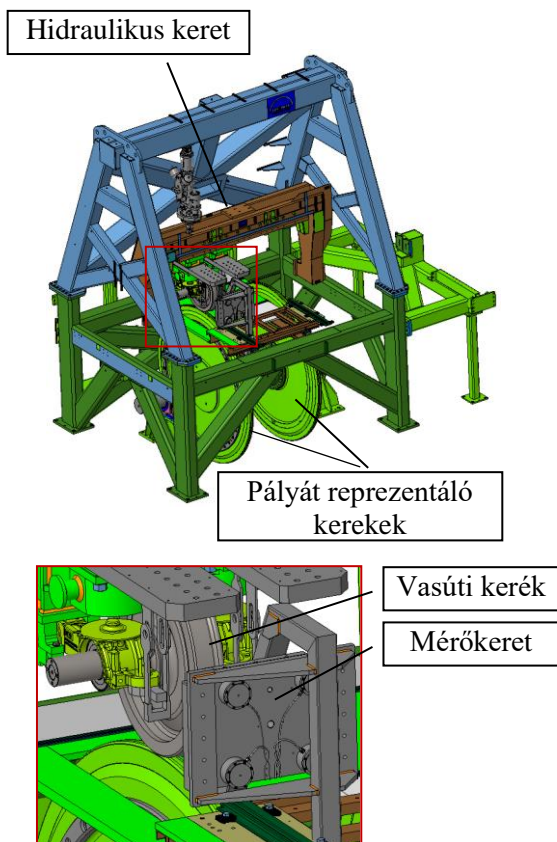
A modell tartalmazza a tuskós fékegység legfontosabb alkatrészeit (ház, függvas, fékbetéttartó, fékbetét és az ezek közötti kapcsolatot biztosító csapok, perselyek és csavarkötések), valamint egy vasúti kereket. A modellben található alkatrészekhez lineáris, homogén és izotróp anyagmodelleket párosítottunk, kivéve a vasúti kereket, amelyet merev testként modelleztünk. A modell nemlinearitását az alkatrészek között modellezett, hézagokat és túlfedéseket figyelembe vevő súrlódásos kapcsolatok és a kerék nagyfokú, merevtest-szerű forgatásából eredő geometriai nemlinearitás adják.

A modellezés során a fékegység házának csatlakozó felületéhez egy vezérlő csomópontot (VCS1) kötöttünk merev elemekkel. Ennek a vezérlő csomópontnak minden szabadságfokát megfogtuk ( $U_x=U_x=U_z=R_x=R_y=R_z=0$ ), így modellezve a ház rögzítését. A fékbetéttartó megfelelő felületein definiáltuk a féktuskóerőt ( $F_t$ ), a fékegység házának belső csatlakozófelületein pedig a féktuskóerő reakcióerejét ( $F_{t,r}$ ). A vasúti kerék középpontjában szintén egy vezérlő csomópontot (VCS2) definiáltunk, amit merev elemekkel kötöttünk ki a modellezett kerék belső hengerfelületéhez. A vezérlőcsomópont  $R_y$  szabadságfokának megadásával modelleztük a kerék forgását, míg a többi szabadságfokot megfogtuk ( $U_x=U_y=U_z=R_x=R_z=0$ ). A VE modellt a 4. ábrán szemléltetjük.



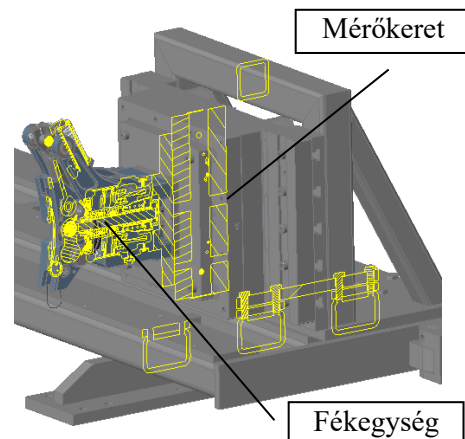
4. ábra. Tuskós fékegység VE modellje  
3.2. Tuskós fékegység fékezés közben fellépő reakcióerőit vizsgáló tesztorozat

Az analitikus leírás, és egyben a VE modell validációjára kiváló lehetőséget adott a Knorr-Bremse müncheni központjában elvégzett tesztsorozat, amelynek célja a tuskós fékegységek fékezés során fellépő reakcióerőinek vizsgálata volt. A tesztsorozat az ún. Advanced Test Laboratory for Adhesion Based Systems (ATLAS) tesztberendezésen került lebonyolításra, amely jelenleg a cégcsoport legmodernebb tesztelési eszköze. A 15 méter magas, 760 tonnás tesztberendezéssel lehetőség nyílik valós kerék-sín kapcsolat mellett vizsgálni a különböző fékegységek teljesítményét. A vasúti pályát kettő, egyenként 16 tonnás, 3 méter átmérőjű kerék reprezentálja, amik egy 2,5 MW-os elektromos motor segítségével 350 km/h-ás sebességre gyorsíthatók fel. A pályát reprezentáló kerekre egy komplett vasúti kerékpárt lehet ültetni egy komplex, adott vasúti kocsis és forgóváz dinamikáját szimulálni képes hidraulikus kerettel. A teljes tesztberendezés egy klíma kamrában kapott helyett, ahol  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  és  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$  közötti hőmérsékleteken lehet elvégezni a különböző tesztek. Az ATLAS tesztberendezés az 5. ábrán látható.



5. ábra. ATLAS tesztberendezés sematikus ábrája

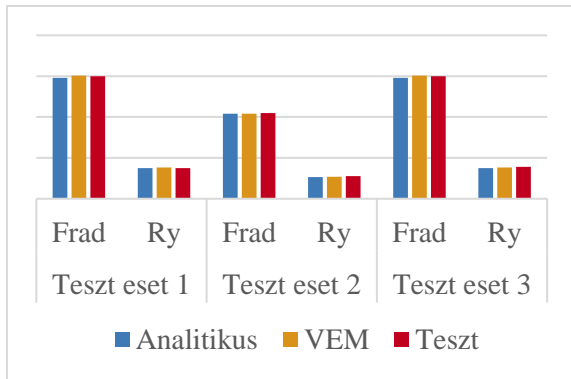
Esetünkben a kiválasztott tuskós fékegységet számos tesztben vizsgálták, különböző sebességek, oldalirányú mozgások (szinuszfutás, váltón való áthaladás stb.) és hőmérsékletek esetén. A tesztek során a fékegységet egy speciális mérőkeretre rögzítették, ami lehetőséget adott a fékezés során fellépő erők és nyomhatékok mérésére mindhárom irányban. A tesztek során alkalmazott mérőkeret és fékegység a 6. ábrán látható.



6. ábra. ATLAS tesztek során alkalmazott mérőkeret és fékegység

### 3.3. Verifikáció és validáció eredményei

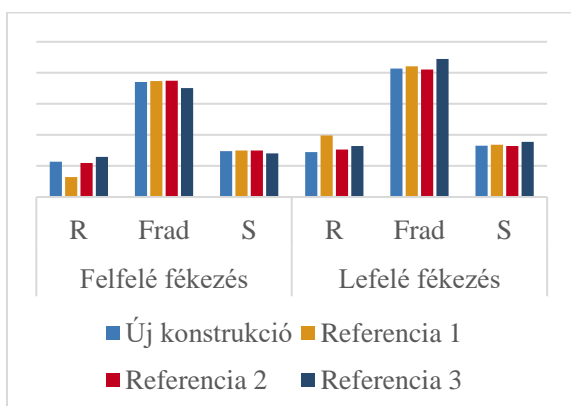
Az előző fejezetben bemutatott analitikus számítási módszer verifikációja és validációja során az analitikus számítás által adott reakcióerőket hasonlítottuk össze a VE analízis által számított-, és az ATLAS tesztsorozaton mért reakcióerőkkel. Az összehasonlítás során figyelembe kellett vennünk az analitikus számítás, a VE modell és a teszt bizonytalanságait is. Ezek közül a fékezés során kialakuló reakcióerőkre a legnagyobb hatással a fékbetét és a kerék közti súrlódási tényező ( $\mu$ ) volt. Az analitikus számítás és a VE modell is konstans  $\mu$ -t alkalmaz, azonban a tesztek a valós viselkedésnek megfelelően megmutatták a  $\mu$  hőmérséklet és sebesség függőségét is. Az eredmények pontosítása céljából az analitikus számításban és a VE modellben alkalmazott  $\mu$ -t a teszteredmények alapján kalibráltuk. Az analitikus számítás, a VE modell és a teszt eredményei között jó korrelációt figyeltünk meg, ami alapján az analitikus számítás (és a VE modellt) validált számítási módszernek tekinthetjük. Az eredmények összehasonlítását a 7. ábrán szemléltetjük.



7. ábra. Verifikáció és validáció eredményei

#### 4. AZ ANALITIKUS SZÁMÍTÁSI MÓDSZER GYAKORLATI ALKALMAZÁSA

Egy új tuskós fékegység fejlesztési folyamatában lehetőség nyílt az előzőekben bemutatott analitikus számítási módszer gyakorlati alkalmazására. Az analitikus számítás segítségével gyorsan és hatékonyan tudtuk meghatározni az új konstrukció reakcióerőit több különböző üzemállapotban, különböző függvas állások mellett. Ez egyben lehetőséget biztosított arra is, hogy ezeket a reakcióerőket összehasonlítsuk más, már jelentős ideje a szerelvényeken működő fékegységek reakcióerőivel. Ezáltal az új konstrukció könnyen elhelyezhetővé vált a cégcsoport termékpalettáján. Az analitikus módszer használatával a konstrukciós csoport már a fejlesztés korai szakaszában pontos képet kapott arról, hogy az új tuskós fékegység esetében számíthatnak-e jelentősen eltérő reakcióerőkre. A különböző konstrukciók reakcióerőinek összehasonlítása a 8. ábrán látható.



8. ábra. Új és referencia konstrukciók reakcióerőinek összehasonlítása

#### 5. ÖSSZEFOGLALÁS

A jelen cikkben bemutatott analitikus számítási módszer segítségével kellő pontossággal határozhatóak meg a tuskós fékegységen fékezés közben fellépő reakcióerők. A módszer verifikálva (nemlineáris VE modell) és validálva (ATLAS tesztsorozat) lett. A módszer az új tuskós fékegység fejlesztési folyamatában hatékony eszköznek bizonyult a konstrukciós osztály támogatására. A kiváló verifikációs és validációs eredményeknek köszönhetően nemcsak a konstrukciós osztályt támogató számítási eszközként, de a tuskós fékegységek komplex, nemlineáris VE modelljeinek verifikációs számításaként is alkalmazható.

#### 6. IRODALOM

[1] Zobory I., Gáti B., Kádár L., Hadházi D.: Járművek és mobil gépek I. Egyetemi tananyag, BME KJK, 2012.