

A vasúti járművek ívbenhaladása során létrejövő energiadisszipációról

On energy-dissipation of railway vehicles running in curves

M. SZŰCS Máté, doktorandusz

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, Vasúti Járművek és Járműrendszeranalízis Tanszék, H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3., Magyarország, e-mail: mszucsmate@edu.bme.hu, web: <https://vjtt.kozlek.bme.hu/>

Abstract

Curving resistance is an additional resistance force at bearing via the railway vehicle is runs in curves. Approximately two centuries of history of the railways, many researches and experiments have aimed at a deeper understanding of the processes that take place during the phenomenon. Determining the energy-dissipation while running in a curve is a very complex task. The difficulty lies in the fact that its value and nature are affected by several factors. In my presentation I show the various empiric based and simulation results, I mark the direction of my future research.

Keywords: curve resistance, curving resistance, energy-dissipation, quasi-static curving

Kivonat

A vasúti járművek ívbenhaladásakor jelentkező járulékos ellenálláserő a pályaivékből származó görbületi ellenálláserő. A vasút közel két évszázados története alatt megannyi kutatás és kísérlet célul tűzte ki a jelenség során létrejövő folyamatok mélyebb megértését. Az ívbenhaladás közben disszipált energia meghatározása igen összetett feladat. A nehézség abban rejlik, hogy értékére és jellegére számos tényező hatással van. Az előadásomban bemutatom a különféle tapasztalati és szimulációs eredményeket, kijelölöm jövőbeni vizsgálódásom irányát.

Kulcsszavak: ívellenállás, görbületi ellenállás, energiadisszipáció, kvázistatikus ívbenhaladás

1. BEVEZETÉS

Az Európai Unió 2021-et a vasút évének választotta. [5] A fenntartható fejlődés érdekében az EU kitűzött célja, hogy 2050-ig klímasemlegessé váljon (gazdasági tevékenységeivel nem idéz elő üvegházhatásúgáz-kibocsátást). A közlekedés egyelőre 25%-os részesedéssel szerepel az üvegházhatású gázok kibocsátóinak listáján, ezért a jelenleg közúton továbbított áru 75%-át a jövőben vasúttal vagy belvízi szállítással kell megoldani. [1][4]

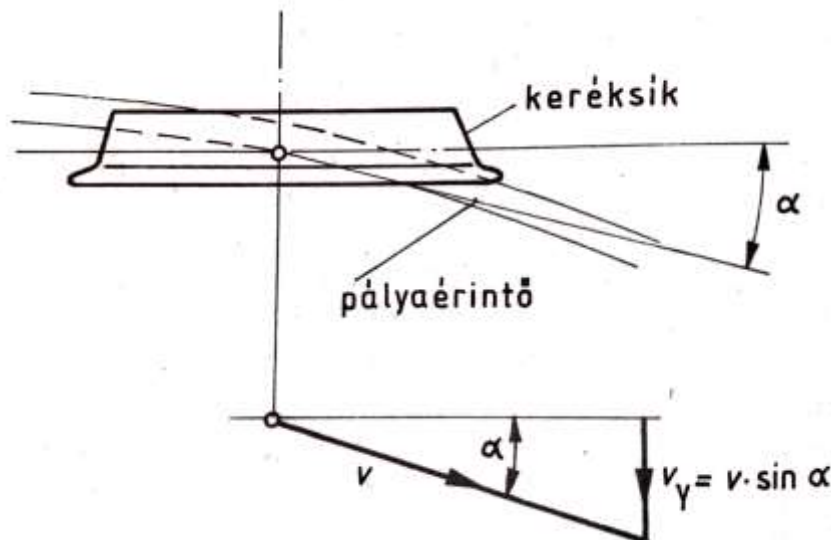
A vasúti kapacitások bővítése infrastruktúra- és járműfejlesztéssel, valamint a továbbított vonat(elegy)tömegek növelésével érhető el. A vasúti pálya-jármű rendszerben rejlő lehetőségek teljes kihasználásának feltétele a vonattovábbítás során jelentkező ellenállások minél pontosabb figyelembevétele mind a kutatások, mind az üzemeltetés során.

Az ellenállásokat két részre lehet osztani. Sík, egyenes pályán haladás közben csak az alapmenetellenállás lép fel, a két járulékos ellenálláserőt pedig emelkedővel (lejtővel) és görbülettel bíró pálya esetében kell tekintetbe venni. [15] A cikk témája a vasúti járművek ívbenhaladásakor jelentkező járulékos ellenálláserő, a pályaivékből származó görbületi ellenálláserő.

2. A GÖRBÜLETI ELLENÁLLÁSERŐ SZÁRMAZTATÁSA

Az ellenállást célszerű energetikai alapú megközelítéssel tárgyalni. Az egyenes pályaszakaszokon jelentkező menetellenállás egy részét a kerék-sín kapcsolatnál jelentkező kúszási jelenségből lehet származtatni, ahol speciális gördülőkapsolat van: egyszerre van jelen adhézió és szlip, azaz csúszás. Ívbenhaladás során az egyenes pályához képest nagyobb értékkel jelentkezik az ún. futási szög, amely a

keréksík és a sín kerékkel való érintkezéséhez tartozó járósíkjával párhuzamos síkban fekvő érintője által bezárt szög (1. ábra). [11] Ekkor a kerék-sín kapcsolatban nagyobb keresztirányú v_y komponens többlet kúszást eredményez. Továbbá a gördülőköri átmérőkülönbségek is csúszást kényszerítenek ki a kerekeken. Az ívbenhaladás jellemzőitől függően, de az esetek túlnyomó részében egy vagy több kerék esetén nyomkarima érintkezés segítségével valósul meg a jármű haladása az ívben, ahol súrlódás jelentkezik. A keréktalpi csúszó-súrlódó és a nyomkarimák súrlódó kapcsolataiban erőátadás valósul meg, a sebességkülönbségek alapján pedig kiadódik egy disszipált munka, amely energiát vezet ki a rendszerből.



1. ábra. A futási szög értelmezése [11]

Az egyenletes sebességgel mozgó jármű esetében az ívbenhaladás dinamikáját befolyásoló legfontosabb jellemzők a következők: a pálya hosszirányú haladási sebesség, az ívsugar, a nyomtávolság, a túlemelés, a súrlódási (erőkapcsolati) tényezők a kerék-sín (futófelület és nyomkarima) kapcsolatban, a tengelytávolság, a keréksugar és a nyomkarima hajlásszöge, valamint a járműre ható külső erők összessége (például vonó- és ütközőkészüléken fellépő erők, szélérő stb.). További hatásokat kell figyelembe venni az ívben éppen gyorsító vagy fékező, esetleg elinduló járműveknél. [14]

3. A GÖRBÜLETI ELLENÁLLÁSERŐ JELENTŐSÉGE

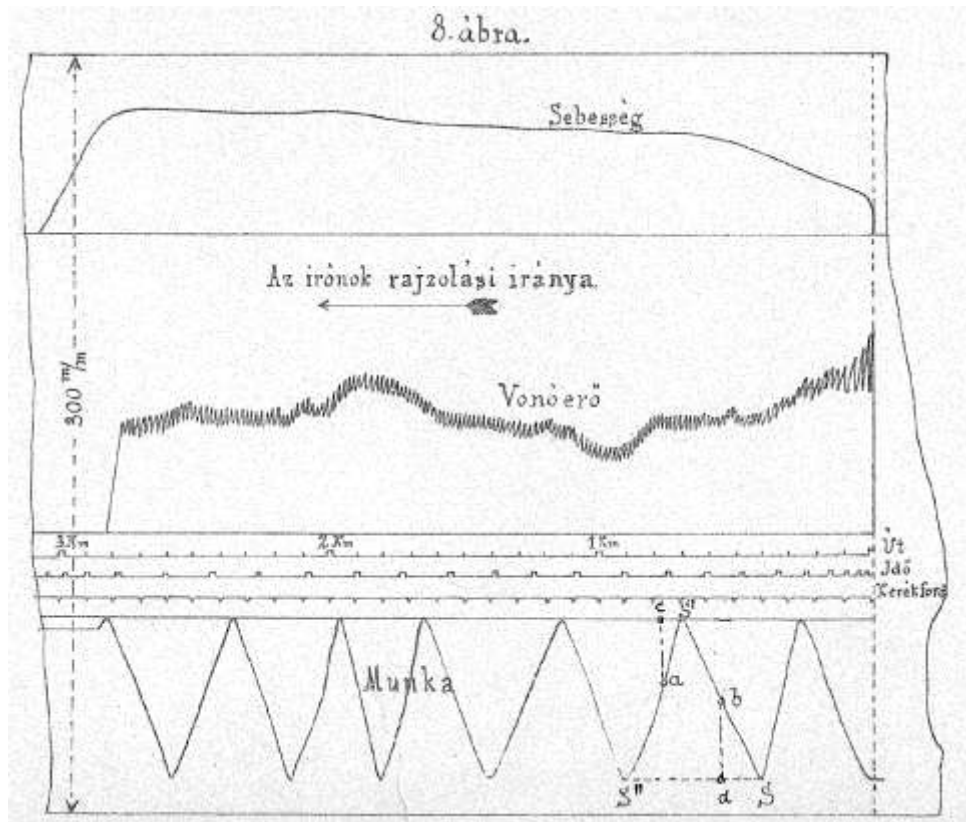
A görbületi ellenállaserő mélyebb megértésére való törekvésnek számos oka van. A görbületi ellenállás meghatározása fontos a kerék-sín kapcsolati erők és kúszási jellemzők vizsgálatánál; ezzel összefüggésben a kerék- és sínkopás előrejelzésénél; a vonat, mint hosszdinamikai lengőrendszer számításainál; a továbbítható legnagyobb elegytömegek megállapításánál; a vonatmozgás energetikai szükségletének, az energia fogyasztás szimulációjánál; a futásstabilitás ellenőrzésekor; valamint a futásbiztonsági vektor összetevőinek, a kisiklási hajlam és veszély elemzésében. Tehát mind a vasúti járművek üzemszerű haladásának, mind az esetleges nem kívánt helyzetek megértéséhez szükséges.

4. KÍSÉRLETI TAPASZTALATOK

Szinte a vasúttal egyidősek a menetellenállással kapcsolatos kísérletek. Az Amerikai Egyesült Államokban már az 1850-es években végeztek tesztek. T. S. Isaac az 1859-ben megjelent írásában [12] hivatkozik a Baltimore és Ohio Vasúttársaság B. H. Latrobe nevű főmérnökére, aki az 1853-as jelentésében leírja korábbi tapasztalatait az ívellenállásról: az egyenes pályaszakaszokhoz képest kétszer nagyobb egy közel 120 m (400 ft - láb) sugarú ív ellenállása a teljes szerelvényt tekintve, és valószínűsíthetően a mozdony ellenállása fajlagosan nagyobb, mint a kocské. Isaac megemlíti, hogy tudomása szerint nem végeztek célzott kísérleteket külön, kifejezetten a mozdony ellenállásának meghatározására.

A Magyar Királyi Államvasutak 1900-ból származó dokumentumai szerint történtek vonatellenállási kísérletek rakott és üres teherkocsiból álló vonatokkal. A vonatellenállás megállapítására készítettek egy „dynamometrikus készüléket”, mely mérte és felrajzolta a vonóerőt, a sebességet, regisztrálta az összegzett

munkát (felhasznált energia), jegyezte a kocsikerék fordulatait és így a megtett utat, valamint mérte az időt. A készülék által készített diagram a 2. ábra-n látható. A mérési eredmények azt mutatták, hogy az üres kocsik fajlagos ellenállása 30-33 %-kal nagyobb, mint a rakott kocsiké az adott, ívben fekvő pályaszakaszokon. [7][8]



2. ábra. A dynamometrikus készülék által regisztrált diagram [7]

Schmidt tanulmányában [3] (1927) öt különböző összeállítású szerelvényt több, mint 100 elvégzett kísérletről számol be. A kísérletsorozat célkitűzése a fajlagos görbületi ellenállás megállapítása volt, melynek eredménye a legszélesebb körben használt képlet: $\omega = k/R$, ahol ω a fajlagos görbületi ellenálláserő $N/(k)N$ alakban, az R az ívsugár méterben, a k pedig járműfüggő konstans. A fajlagosított ellenálláserők megadása a vontatási gyakorlatban rendszerint súlyegységre vonatkoztatva történik, mégpedig N/kN alakban: a szerelvény 1 kN súlyához tartozó ellenálláserő mértéke *Newton*-ban.

Bár az 1960-as években a Szovjetunióban végzett, teherkocsikat használó mérések alapján kifejlesztettek részletesebb összefüggést a görbületi ellenállásra, a mai napig Európában a legszélesebb körben alkalmazott képletek Schmidt 1927-es tanulmányát veszik alapul, más-más konstansokkal, az ívsugár függvényében lépcsősen megadva. [10]

Az igencsak költséges valós kísérletek és tesztek alternatíváját jelentheti a modellek használata. A szakirodalomban egyetlen publikációt találni: Tepić és társai 1:87 méretarányú járművekkel vizsgálták a sebesség és a vonattömeg hatását az ívellenállásra. [13]

5. SZIMULÁCIÓS EREDMÉNYEK

A görbületi ellenállás elvi megközelítése az ívben létrejövő súrlódási folyamat és a disszipált energia növekmény kapcsolatba hozásával értelmezi az ívellenállást. A vasúti járművek ívbenhaladásának erőtani vizsgálatának első közelítő megoldását Heumann adta 1950-ben. [6] Ez egy elsőrendben linearizált, kvázistatikus modell több ésszerű elhanyagolással és közelítéssel. A számítástechnika fejlődésével azonban növekedtek a számítási kapacitások, a vasút oldaláról pedig a követelmények. A Heumann-féle módszer pontatlansága miatt a keresztirányú erőszámítást úgy kell megoldani, hogy tekintetbe kell venni a kerék és a sín érintkezési felületénél keletkező rugalmas deformációk hatását is. [2]

Zobory I. és Békefi E. cikkében ismerteti a kiterjesztett a Heumann-féle modellt, kevesebb elhanyagolással és másodrendű nem-lineáris geometria figyelembevételével. [14] Az ebben bemutatott

modellnek számos továbbfejlesztési lehetősége van, utalva az előző bekezdésre: a jármű keresztirányú tulajdonságainak figyelembevétele, az egyszerűsített kerék-sín kapcsolat helyett részletes kontaktmechanikai modell alkalmazása és az ideális pálya helyett pályaeigenetlenségek beépítése. A keresztirányú erőjáték szimulációja segít az érintkezés helyek pontosabb meghatározásában; a kontaktmechanika alkalmazása pedig lehetővé tudja tenni a lokális erőtani folyamatok értelmezését.

A problémakör modern vizsgálatára a saját fejlesztésű szoftverek mellett többtest-dinamikai szimulációs rendszerek (MBS) és végeselemes modellező rendszerek (FEM) állnak rendelkezésre. A kerék-sín érintkezéssel kapcsolatos problémák megoldásában mindkét rendszer igen népszerű, használatuk indokolt saját fejlesztésű rendszerek választása esetén is, annak validációjára. Ennek oka, hogy ugyan hagyományosan a számítási eredmények validációjára elsődlegesen mérési eredményeken alapszik, azok költségvonzata miatt erre a célra elfogadottak a széleskörben alkalmazott kereskedelmi szoftverek. Nagy könnyebbséget jelent a szimulációs környezetben a vasúti járművekkel kapcsolatos specifikus problémák megoldására létrehozott, előre beépített modellek megléte, valamint a beépülő modulként hozzáférhető szoftverek. E beépülő modulok közé tartozik többek között a Kalker-féle CONTACT, ami széleskörben elfogadott a vasúti kerék-sín erőkapcsolat számítását tekintve, bár nagy kalkulációs mennyiség igénye miatt jellemzően ellenőrzésre használják. [9]

6. TOVÁBBI VIZSGÁLATI LEHETŐSÉGEK

Az idő előrehaladtával a valós járművekkel végzett kísérleteket felváltották a jóval költségkímélőbb szimulációk. Ezek vitathatatlan előnye, hogy sokkal egyszerűbb változtatni a befolyásoló paramétereket. A szakirodalomban nem jellemzőek a modellekkel végzett kísérletek, azonban jó köztes megoldást és kutatási irányt jelenthetnek: költségigényük töredéke a valóságos teszteknek, valamint nehézség nélkül módosíthatók a környezeti feltételek.

A szimulált energiaveszteségen alapuló ellenállás-erő új közelítésű meghatározásának célja, hogy a szimulációkban megbízhatóbb ellenállásfüggvény legyen alkalmazható. A kerék-sín kapcsolat pontosabb modellezéshez jó eszköztárat biztosíthat a CONTACT algoritmus vagy véges elemes modellek alkalmazása a már meglévő kvázistatikus modellek felhasználásával együtt.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Damiano S.: *2021: European Year of Rail*. Európai Parlament Kutatási Szolgálatának Blogja, <https://epthinktank.eu/2020/11/06/2021-european-year-of-rail/> (Utolsó letöltés: 2021. 02.10).
- [2] Dung N. H. *Vasúti jármű szekrényfelfüggesztés dinamikai és üzemeltetési szempontból kedvező paramétereinek meghatározása*. Kutatási jelentés, Budapesti Műszaki Egyetem Járműgépészeti Intézete, Vasúti járművek Tanszéke, Budapest, 1983.
- [3] E. C. Schmidt *Freight train curve resistance on a one-degree curve and on a three-degree curve*. University of Illinois Engineering Experiment Station, Bulletin No. 167, 1927.
- [4] Európai Bizottság *2050-ig szóló, hosszútávú stratégia*. https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_hu (Utolsó letöltés: 2020.01.31.).
- [5] Európai Unió *European Year of Rail*, https://europa.eu/year-of-rail/index_en (Utolsó letöltés: 2021.01.23.).
- [6] Heumann H. *Grundzüge der Führung der Schienenfahrzeuge, Elektrische Bahnen*, Verlag Oldenburg, 1950-1953.
- [7] Magyar Királyi Államvasutak. *A vonatellenállás megállapítására szolgáló dynamometrikus készülék leírása*. 30 H. p.
- [8] Magyar Királyi Államvasutak. *Vonatellenállási kísérletek rakott és üres teherkocsiból álló vonatokkal a Fiume-Plase-i és a Brajdica-i alagútban [1900. április havában.]*, 36518/1900.
- [9] Parázsó J. *Dinamikai szimulációs programrendszerek alkalmazása vasúti járműdinamikai problémák megoldásában*, Tanulmányok a Vasúti Járművek és a Járműrendszer-analízis Témaköréből, Budapest, 2014.
- [10] Saprónova S., Tkachenko V., Fomion O., Kulbovskiy I., Zub E. *Rail Vehicles: The resistance of the movement and the controllability. Monograph*. Dnipro State University of Infrastructure and Technology, Dnipro, 2017.
- [11] Sostarics Gy., Balogh V. A. *Vasúti Járművek*, Takönyvkiadó, Budapest, 1991.
- [12] T. S. Isaac: *On the use of locomotive power on gradients of 1 in 17, and curves of 300 feet radius, on railways in America*. Minutes of the Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Volume 18, Issue 1859, 51-62.
- [13] Tepić J., Kostelac M., Herold Z. *Methodology for determining of train curving resistances with respect to vehicle mass and speed*, Strojarstvo, 2007, 51(6), 641-647.
- [14] Zobory I., Békefi E. *Thoughts on the classical theory of steady curving of traditional running gears*. Proceedings of Bogie '01, the 5th Mini Conference on Railway Bogies and Running Gears, Budapest, 2001, 239-251.
- [15] Zobory I. *Járműdinamika és Hajtástechnika jegyzet*, BME KSK, Budapest, 2012.