

# Az egyenlőtlen környezeti terhelések hatása a rétegelt gumirugók üzemállapotára

Orbán Balázs Zsolt<sup>1</sup>

<sup>1</sup>doktorandusz, Vasúti Járművek és Járműrendszeranalízis Tanszék, Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

e-mail: orban.balazszsolt@edu.bme.hu

## Absztrakt

*A rétegelt gumirugók mechanikai jellemzői erősen hőmérsékletfüggők, így mindazon vasúti járműveknél, ahol a rugózásban ilyen elemek részt vesznek, az egyenlőtlen hőterhelés a futásbiztonságot degradálhatja. Jelen kutatás VEM segítségével vizsgálta a napsugárzásból eredő hőterhelés hatását a gumirugókra. A vizsgálat alapján a jármű két oldalán dolgozó gumirugók között 14-15°C átlaghőmérséklet-különbség is fellelhető. A kapott eredmények kisiklásbiztonsági vizsgálatok alapjául szolgálhatnak.*

**Kulcsszavak:** gumirugó, VEM, napsugárzás, hőmérsékletkülönbség, hőmérsékletfüggés, szimuláció

DOI: <https://doi.org/10.24228/KTSZ.2026.2.3>

## 1. BEVEZETÉS

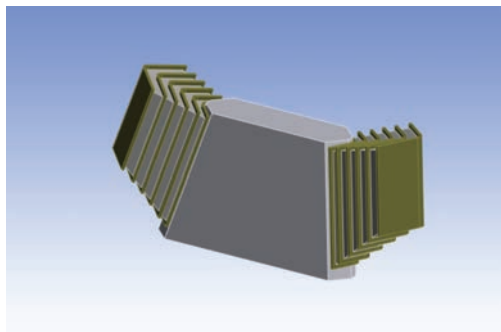
Alacsony sűrűségük, széles körű adaptálhatóságuk, csekély helyigényük és alacsony beszerzési árak okán a konstrukciós gyakorlat közel két évszázada alkalmazza a gumit – ideértve annak mind természetes, mind szintetikus formáját – olyan gépészeti feladatokra, mint a tömítés, a rezgésszigetelés, az energiatárolás vagy a rugalmas mechanikai kapcsolatok kialakítása. (Makhult, 1963) A vasúti járműszerkesztés gyakorlatában szintén évtizedes hagyománya van a gumielemek alkalmazásának, kiváltképp a rétegelt gumirugók használatának akár a primer, akár a szekunder rugózási lépcsőben. (Czére, 1975) Ezen gumielemek mechanikai viselkedésének modellezése ugyanakkor napjainkban sem tekinthető triviálisnak, legyen szó akár reológiai, akár végeleemes modellalkotásról. (Berg, 1998) A vasúti közlekedés sebességének

és biztonságának szimultán növelésére, valamint a hordmúelemek tönkremenetelének pontos előrejelzésére irányuló igény ugyanakkor megköveteli a gumirugók viselkedésének precíz leírását, valamint működésük vizsgálatát a vasútüzemre jellemző, szélsőséges környezeti hatásokat leíró peremfeltételek mellett is. (Ferencz & Fodor, 2025)

A gumielemek üzemének vizsgálata rendre kiterjedhet a szerkezetet érő terhelésegüttesek okozta kifáradásra, az üzemi hőmérséklet megváltozásának hatására vagy a pályahibák okozta terhelésegüttes-változás következményeire. (Luo et al., 2009) (Orbán, 2025) Kevésbé kutatottak ugyanakkor azon szcenáriók, melyek a gumielemeket érő hőterhelés aszimmetriájával járnak – értve ezalatt akár a fékezés, akár a napsugárzás okozta egyenlőtlenségeket.

## 1. 1. A napsugárzás szerepe

A napsugárzásból eredő hőterhelés, mint járműveket és közlekedési rendszereket befolyásoló tényező vizsgálata napjainkban egyre időszerűbb, amint azt számos globális környezeti folyamat alátámasztja. Ilyen folyamatok – többek között – a klímaváltozás, mely a globális átlaghőmérséklet emelkedését vonja magával, vagy a környezetvédelmi célok érdekében bevezetett korlátozások a károsanyag-kibocsátásban, mely a légkör tisztaságának javításával hozzájárul a földfelszint elérő hőáramsűrűség növekedéséhez. (Wild, 2009)



1. ábra: Végeselemes modell, az indokolt geometriai egyszerűsítések után  
(Forrás: saját szerkesztés)

## 1. 2. Aszimmetrikus hőterhelés kialakulása

Az aszimmetrikus kitettséget a vasúti jármű – a kocsiszekerény kiterjedésének, valamint a pálya vonalvezetésének függvényében vetett árnyékával – maga hozza létre, emiatt pedig a kitettség időbelisége a jármű üzemi állapotával együtt tág határok között változhat. Ennek fényében az egyenlőtlen felmelegedés szempontjából kritikus üzemi állapotnak a délelőtti, ill. délutáni közlekedési csúcspont között a forgalomból kiálló járművek délutáni szerelvényfordulójának kezdete tekinthető, kiváltképp a tárolóvágányok kelet – nyugati irányultsága mellett. A tárolásra használt, üzemi célú vágányhálózatokra jellemző kissugarú ívek, ill. síktorzulási hibák minde mellett már kis járműsebességnél is jelentősen megnövelik a jármű egyazon tengelyén ébredő kerékterhelések közötti különbséget, csökkentve a kisiklás elleni biztonságot.

## 2. ALKALMAZOTT MÓDSZERTAN

Mindezek fényében jelen kutatás különböző permfeltételek mellett kívánta vizsgálni az egy kerékpártengely megvezetését biztosító gumirugók felmelegedésének mértékét.

Ennek érdekében a vizsgálni kívánt Chevron rugópárt, valamint az ahhoz kapcsolódó csapágház tartalmazó CAD modellből a szükséges geometriai egyszerűsítések után az 1. ábrán bemutatott végeselemes modell (VEM) készült, ahol a rugót alkotó lemezek és vulkanizált gumirétegek termikus viselkedését az 1. táblázatban megadott szakirodalmi, ill. azok alapján beszült adatok jellemezték. A modell biztosította

a hőátadást az illeszkedő felületek között, valamint a hőáramlást a testek és a környezet között. A modell csomópontjainak száma 117.165 darab, elemszáma pedig 48.338 darab.

Anyagjellemező	Gumiréteg	Acéllap	Csapágytok
Sűrűség (kg/m <sup>3</sup> )	1000	7850	7850
Izotróp hővezető képesség (W/(m·K))	0,3	43	43
Izobár fajhő (J/(m·K))	2000	470	470
Abszorpciós együttható (-)	0,9	0,65	0,65
Hőátadási tényező (W/m <sup>2</sup> ·K)	10	8	10

1. táblázat: A termikus anyagmodellek és a leképzett felületek jellemzői (Forrás: saját szerkesztés, (Luo, Wu, & Mortel, 2005), (U. R. Lenel, 1984), és (T. Y. Elrasasi, 2022) alapján)

A vizsgálat alapfeltételezése szerint az összeállítást direkt napsugárzás annak felső vízszintes, ill. menetirány szerinti bal oldali függőleges felületein érthette, míg az alsó, ill. a jobb oldali felületeken csak a szórt, valamint a talajról és a terptárgyokról visszaverődő sugárzás jelent meg. A vizsgált összeállítás beépítési környezete alapján a csapágház belső oldalát erő visszavert, ill. diffúz sugárzás elhanyagolható volt, annak erős árnyékoltsága miatt.

Minthogy az összeállítás modelljét rendelkezésre bocsátó Ganz Motor Kft. a vizsgált gumirugókat éghajlati, ill. környezeti paraméterekre való tekintet nélkül kívánja alkalmazni villamosvasúti jellegű forgóvázcsaládjában, így a vizsgálatot

különböző éghajlati viszonyok és jellemző ze-  
nitszögek mellett is szükséges volt lefolytatni.  
A választott, villamoshálózatot bíró városokat,  
valamint az azokhoz tartozó éghajlati, ill.  
sugárzási jellemzőket a 2. táblázat tartalmazza.

A napsugárzás modellezése az egyes felület-  
elemeket terhelő hőáramsűrűség megadásával  
történt. A hőáramsűrűségek meghatározása  
Aleksy Belsky és szerzőtársai munkája alapján  
valósult meg, a NASA POWER adatbázis ada-  
tainak felhasználásával. (Aleksy Belsky, 2023)  
A választott területekre jellemző hőmérsékleti  
szélsőértékek közé felvett 5°C lépésközű skála  
definiálta mindazon hőmérsékleteket, ame-  
lyek – mint napi csúcshőmérsékletek – mellett  
a napsugárzás jellemzői a már jelzett adatbá-  
zisz 2024-2025. évi adataiból azonosíthatók.  
Ezen jellemzők kiterjedtek az adott naptári nap-  
hoz tartozó zenit szögére, ( $\zeta$ ), globális vízszintes  
sugárzásra (GHI), területre jellemző albedóra  
( $\rho$ ), valamint a felszíni szórt sugárzásra (DHI),  
a nap egymást követő 3 legmelegebb órájában,  
átlagolva. Ezen jellemzőket szintén a 2. táblázat  
tartalmazza. Amennyiben az adatsor által lefe-  
dett két évben a vizsgált, szélsőségesen hideg  
vagy szélsőségesen meleg időjárás nem fordult  
elő, úgy az ahhoz tartozó napsugárzási jellem-  
zők a legmagasabb, ill. legalacsonyabb csúcshő-  
mérsékletű vizsgált nap napsugárzási jellemzői-  
nek lettek megfigyelve.

A nap, valamint a gumirugó napsugárzásnak  
kitett oldalának azimut szögének különbsége  
minden esetben zérusnak lett tekintve, felté-  
telezve, hogy a járműtől a napig húzott képze-  
letbeli egyenes a vízszintes síkban merőleges a  
jármű oldalfalának síkjára. Ezen egyszerűsíté-  
sek mellett a gumirugó direkt napfényel besu-  
gárzott felületeit érő sugárzásnak megfelelő hő-  
áramsűrűséget az

$$E_{\text{összes}} = (E_n + E_v + E_d) \cdot \eta \quad (1)$$

összefüggés határozta meg, ahol  $E_n$  a normál,  $E_v$   
a visszavert,  $E_d$  pedig a diffúz sugárzást jelenti.  
(Aleksy Belsky, 2023) A tagokat kifejtve a su-  
gárzásnak megfelelő hőáramsűrűsége az

$$\begin{aligned} E_{\text{összes}} = & \frac{GHI - DHI}{\cos \zeta} \cdot (\cos \zeta \cdot \cos \beta + \sin \zeta \cdot \sin \beta) \cdot \eta \\ & + \frac{1}{2} \cdot GHI \cdot \rho \cdot (1 - \cos \beta) \cdot \eta \\ & + \frac{1}{2} \cdot DHI \cdot (1 + \cos \beta) \cdot \eta \end{aligned} \quad (2)$$

Helsinki				
Napi csúcshő- mérséklet (°C)	GHI (W/m <sup>2</sup> )	DHI (W/m <sup>2</sup> )	$\zeta$ (°)	$\rho$ (-)
-25	96	63	82	0,33
-20	96	63	82	0,33
-15	96	63	82	0,33
-10	200	73	76	0,26
-5	200	73	76	0,26
0	385	73	67	0,23
5	610	275	55	0,33
10	700	384	46	0,1
15	760	320	41	0,1
20	775	150	38	0,1
25	650	170	42	0,1
Budapest				
Napi csúcshő- mérséklet (°C)	GHI (W/m <sup>2</sup> )	DHI (W/m <sup>2</sup> )	$\zeta$ (°)	$\rho$ (-)
-15	175	109.48	70	0,12
-10	175	109.48	70	0,12
-5	175	109.48	70	0,12
0	280	164	68	0,18
5	310	190	66	0,13
10	430	175	59,5	0,15
15	660	270	46	0,13
20	730	270	35	0,15
25	750	270	28	0,16
30	865	180	26	0,16
35	840	170	27	0,17
Palermo				
Napi csúcshő- mérséklet (°C)	GHI (W/m <sup>2</sup> )	DHI (W/m <sup>2</sup> )	$\zeta$ (°)	$\rho$ (-)
10	435	100	59,5	0,05
15	575	115	53,5	0,04
20	834	118	37	0,03
25	845	155	32	0,02
30	935	140	19	0,03
35	930	138	22	0,03
40	930	138	22	0,03
45	930	138	22	0,03

2. táblázat: A vizsgált helyszínek, és az azokat érő  
napsugárzás adatai (Forrás: saját szerkesztés,  
(Aleksy Belsky, 2023) alapján)

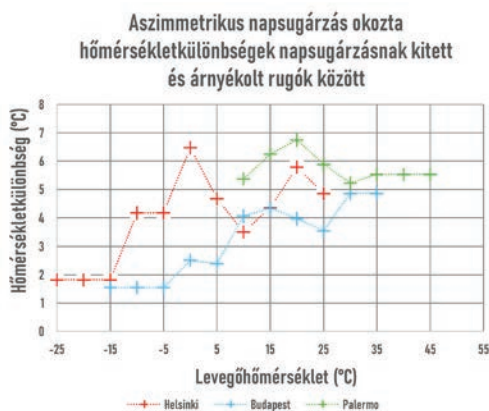
összefüggés adódott, ahol  $\beta$  a gumirugó adott  
felületének dőlésszöge,  $\eta$  pedig a felületek ab-  
szorpciós együtthatója, elhanyagolva annak hő-  
mérsékletfüggését. (Aleksy Belsky, 2023) Az  
árnyékolt oldalt terhelő hőáramsűrűség az  $E_v$   
és az  $E_d$  tagok összegeként adódott. A gumi-  
rugókat a vizsgálat során 3 órán keresztül érte  
konstans hőáram. A szimulációs vizsgálatok

a napsugárzásnak kitett, ill. árnyékolt rugók maximum- és minimum hőmérsékleteinek változása mellett azok hálólelemek térfogatával súlyozott átlaghőmérsékletére is kiterjedtek – ezek differenciája határozta meg a napsugárzás okozta hőmérséklettöbbletet. Kivételt képezett mindezek alól azon üzemeltetési szituáció, melyben kellően alacsony, de nemnegatív környezeti hőmérséklet mellett a jármű árnyékos oldalát részben jég borította, míg a napsugárzással érintett oldaláról az leolvadt vagy eltávolították; ebben az esetben a hőmérséklettöbbletet a napsugárzás által melegített és a konstans 0°C hőmérsékleten tartott gumirugó átlaghőmérsékletének differenciája adta meg. A választott, praktikus alacsony hőmérséklet a vizsgálatok során 0°C és 5°C volt. Megemlítenő továbbá, hogy a vizsgált területek közül Palermo esetében a magas zenitshög miatt a jármű a napsugárzásnak kitett oldalán dolgozó gumirugókra is feltételezhetően árnyékot vet, melynek figyelembevétele a gumielemelek hajlásszögének kismértékű, a napsugárzás irányával ellentétes megváltoztatásával történt – ezáltal meghatározva azt a legkisebb beesési szöget, amelyben a napsugárzás a gumirugó felső felületeit is elérheti.

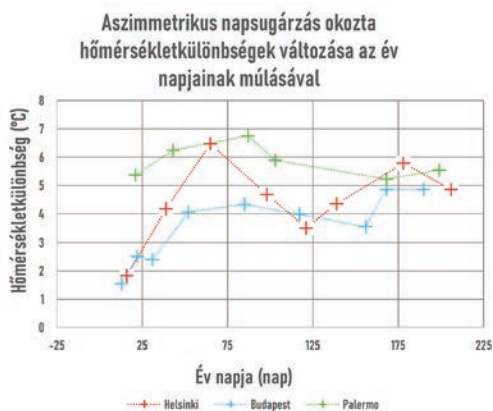
## 3. EREDMÉNYEK

A vizsgált környezeti feltételek mellett a jármű két oldalán dolgozó gumirugók közötti hőmérsékletkülönbségeket a környezeti hőmérséklet változása mellett szemléltető 2. ábra alapján a legnagyobb eltérés 6,75°C, míg a legkisebb 1,55°C volt. Amint az a 2. ábrán látható, a vázolt közelítések alkalmazása mellett a hőmérsékletkülönbség, valamint a környezeti hőmérséklet egymástól független jellemzők, hiszen adott napsugárzási jellemzők, de eltérő környezeti hőmérsékletek mellett a gumirugók hőmérsékletkülönbsége nem változik.

A levegő-hőmérsékletkülönbség görbék alapjaiban hasonló jellege ennek értelmében nem a külső hőmérséklet emelkedésével alakul ki, hanem a napsugárzás intenzitásának, ill. zenit szögének változásával, mely szorosan függ az év napjainak múlásától – amint azt a 3. ábra görbéinek mintázata is szemlélteti.

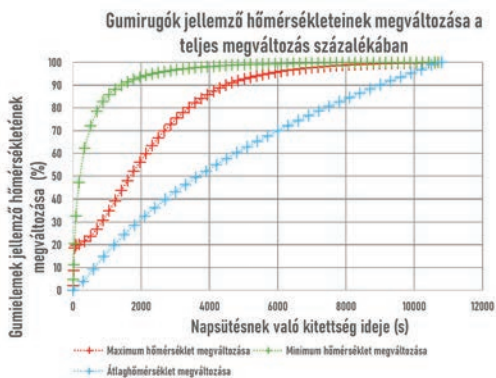


2. ábra: Az aszimmetrikus napsugárzás okozta hőmérsékletkülönbségek (Forrás: saját szerkesztés)



3. ábra: A hőmérsékletkülönbségek változása az év napjainak múlásával (Forrás: saját szerkesztés)

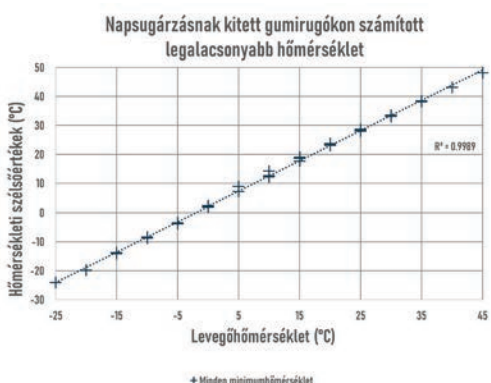
A hőmérsékletkülönbségekkel ellentétben a gumielemezen számított hőmérsékleti szélsőértékek nem bizonyultak függetlennek a környezeti hőmérséklettől; azzal lineárisan változnak, amint azt maximumok esetén, vizsgált területekre bontva a 4. ábra, míg minimumok esetén a különböző vizsgált területek hőmérsékletét az azok közötti differencia elhanyagolható volta okán egy adatsorként kezelve az 5. ábra mutatja be, a pontfelhőkre felvett egyenesek illeszkedését leíró  $R^2$  értékekkel együtt.



4. ábra: A napsugárzásnak kitett gumirugókon számított legmagasabb hőmérsékletek (Forrás: saját szerkesztés)



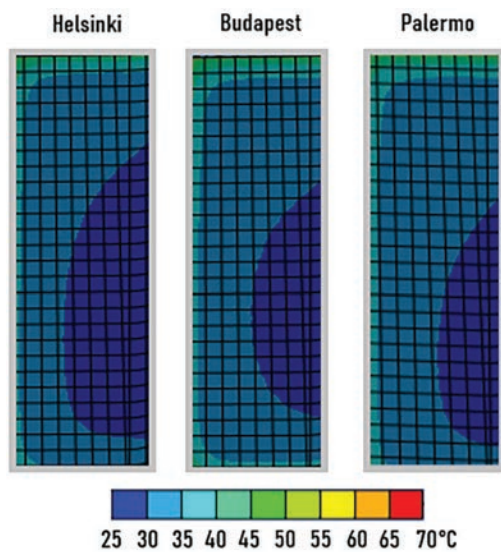
6. ábra: A gumirugók jellemző hőmérsékleteinek megváltozása (Forrás: saját szerkesztés)



5. ábra: A napsugárzásnak kitett rugókon számított legalacsonyabb hőmérsékletek (Forrás: saját szerkesztés)

A gumielemelek hőmérsékletének átlagát és szélsőértékeit a napsugárzásnak való kitettség időtartamának függvényében vizsgálva megállapítható, hogy bár a gumielemelek maximális, ill. minimális hőmérséklete közel 60 perc után már rendre meghaladta a 3 óra kitettség során elért maximális, ill. minimális hőmérséklet 80%-át, ugyanakkor az átlaghőmérséklet lényegesen nagyobb időállandóval változott. A 6. ábra a jellemző hőmérsékletértékek megváltozását a 3 óra időtartamú kitettség során elért értékek százalékában, a kitettség idejének függvényében, 25°C környezeti hőmérséklet mellett, Palermo esetében mutatja be.

Mint hogy a rugók oldalait érő terhelések a vizsgált területek földrajzi elhelyezkedésével és lokális környezeti jellegzetességeivel együtt változnak, így azonos környezeti hőmérsékletek mellett a rugók hőmérsékleteloszlásának jellege is lényegi eltéréseket mutat. Megfigyelhető továbbá a 7. ábrán, hogy a gumielemelek felső felületét érintő sugárzás az anyagot nagyobb mélységben melegíti fel, így a gumielemelek hőhatás okozta degradációja ezen a területen hamarabb jelentkezhet, mint a függőleges oldalakon.



7. ábra: Napsugárzásnak kitett gumielem hőmérsékletének eloszlása a lemezekkel párhuzamos síkban, az anyagvastagság felénél (Forrás: saját szerkesztés)

A jármű két oldalán működő gumirugók közötti hőmérsékletkülönbség maximuma azon vizsgálati esethez tartozott, melyben a jármű árnyékolt oldalát jég borította. E szcenáriókban a számítások Helsinki, ill. Budapest napsugárzási és környezeti jellemzői mellett a 3. táblázatban található adatokat szolgáltatták.

	Helsinki		Budapest	
Környezeti hőmérséklet (°C)	0	5	0	5
Hőmérsékletkülönbség (°C)	7,82	14,15	4,86	10,03

3. táblázat: A gumielemelek átlaghőmérsékletének különbsége aszimmetrikus eljegesedés esetén (Forrás: saját ábra)

## KONKLÚZIÓ

A kutatás eredményei rávilágítottak, hogy a rétegelt gumirugókat érő egyenlőtlen napsugárzás valóban lényegi átlaghőmérséklet-különbségeket indukálhat a vasúti jármű két oldalán működő gumielemelek között. A közreadott ábrák alapján elmondható, hogy a hőmérsékletkülönbség a külső hőmérséklettől adott közelítések mellett független, ennél fogva az egyenlőtlen hőterhelés hatásait éghajlati jellemzőkre való tekintet nélkül vizsgálni szükséges mindazon járműveknél, melyeknél a futásbiztonságot és -jóságot a gumielemelek mechanikai tulajdonságainak akár kismértékű megváltozása is jelentősen befolyásolhatja. Megfigyelhető továbbá, hogy a napsugárzásnak kitett gumirugók hőmérsékleti szélsőértékei lényegesen kisebb időállandóval bírnak, míg az átlaghőmérséklet beállása jelentősen lassabban következik be. E folyamat a vizsgált, 3 órát felölelő időkeretnél hosszabb időtartamot vehet igénybe, így egyes forgalmi szituációkban a gumirugók közötti hőmérsékletkülönbség akár a jelen kutatásban meghatározottnál magasabb értékeket is felvehet. A kutatás eredményei mindezek fényében bemeneti paraméterként szolgálhatnak a vasúti járművek kisiklás elleni biztonságát, ill. futásbiztonságát elemző vizsgálatokhoz.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerző ezúton fejezi ki köszönetét és háláját a Ganz Motor Kft. felé a gumirugó CAD modelljének, valamint az üzemeltetési körülményeket leíró adatsoroknak a rendelkezésre bocsátásáért.

## FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Aleksey Belsky, D. G. (2023) Estimation of hourly solar irradiation on tilted surfaces. Bulletin of Electrical Engineering and Informatics, pp. 3202-3214. DOI: <https://doi.org/10.11591/eei.v12i6.6513>
- [2] Berg, M. (1998) A Non-Linear Rubber Spring Model for Rail Vehicle Dynamics Analysis. Vehicle System Dynamics, 30, pp. 197-212. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423119808969447>
- [3] Czére, B. (1975) A vasúti technika kézikönyve I. Budapest: Műszaki Könyvkiadó.
- [4] Ferencz, P., Fodor, G. (2025) Impacts of implementing stochastic excitation to assess anomalies on railway vehicle dynamic model. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 63, pp. 691-700. DOI: <https://doi.org/10.15632/jtam-pl/205727>
- [5] Makhult, M. (1963) Gumirugók. Budapest: Műszaki Könyvkiadó.
- [6] Orbán, B. Z. (2025) Concerning purchase and retrofit overhaul of a used Electric Multiple Unit fleet intended to continue operation. International Conference on Transport Sciences. Győr: Széchenyi István Egyetem Közlekedési Tanszék.
- [7] R. K. Luo, W. X. (2005) A method to predict the heat generation in a rubber spring used in the railway industry. Journal of Rail and Rapid Transit, pp. 239-244. DOI: <https://doi.org/10.1243/095440905X8862>
- [8] R.K. Luo, W. M. (2009) Fatigue design and test on Chevron rubber springs used in rail vehicles. In M. K. Gert Heinrich, Constitutive Models for Rubber VI. London: CRC Press.
- [9] T. Y. Elrasasi, B. A. (2022) Structure, Optical properties, and Thermal stability of Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-Silicone Rubber as a solar selective absorber for solar thermal energy conversion. Journal of Basic and Environmental Sciences, 9, pp. 49-56. DOI: <https://doi.org/10.21608/jbes.2022.372065>
- [10] U. R. Lenel, P. R. (1984) A Review of Materials for Solar Heating. Solar Energy, pp. 109-120. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(84\)90054-9](https://doi.org/10.1016/0038-092X(84)90054-9)
- [11] Wild, M. (2009) Global dimming and brightening: A review. Journal of Geophysical Research, 14. DOI: <https://doi.org/10.1029/2008JD011470>



## Effects of uneven environmental loads on the operating conditions of layered rubber springs

*Keywords: rubber spring, FEA, solar radiation, temperature difference, temperature dependency, simulation*

The mechanical properties of layered rubber springs are highly temperature-dependent; therefore, in railway vehicles where such parts are used in running gears, uneven thermal loading may degrade running safety. This study used FEM to assess the effect of solar-induced thermal loading on rubber springs. Results indicate average temperature differences up to 14-15 °C between springs on opposite sides of the vehicle. The results may provide a basis for further analyses of safety against derailment.

