Translated from English to Slovak - www.onlinedoctranslator.com

sustainability

MDPI

Článok

Nepretržité monitorovanie magnetických polí v elektrických železničných systémoch AC/DC: Porovnávacia analýza expozície cestujúcich v ľahkej a ťažkej železničnej doprave

Liran Shmuel Raz-Steinkrycer[1] Stelian Gelberg[2] Ehud Neeman[2] a Boris A. Portnov[1,*]

[1] Katedra prírodných zdrojov a environmentálneho manažmentu, Univerzita v Haife, Haifa 3498838, Izrael; lraz06@campus.haifa.ac.il
[2] Oddelenie pre neionizujúce žiarenie, Ministerstvo ochrany životného prostredia, Jeruzalem 9195021, Izrael
* Korešpondencia: portnov@research.haifa.ac.il

Abstrakt

Elektrifikácia verejnej dopravy je kľúčová pre udržateľný rozvoj miest, no zároveň prináša s sebou vystavenie cestujúcich extrémne nízkofrekvenčným magnetickým poliam (ELF-MF), ktoré Medzinárodná agentúra pre výskum rakoviny (IARC) klasifikuje ako potenciálne karcinogénne pre ľudí (skupina 2B). Táto štúdia predstavuje systematické porovnanie expozície ELF-MF v systémoch ľahkej železnice s jednosmerným (DC) a ťažkej železnice striedavým (AC) prúdom, ktoré fungujú v rámci jedného národného regulačného rámca. Počas 23. – 26. novembra 2025 bolo zhromaždených celkovo 9100 kontinuálnych meraní počas 28 jázd na ľahkej železnici Tel Aviv Red Line (1500 V DC) a v koridore Izraelských železníc Tel Aviv–Binyamina (25 kV, 50 Hz AC) pomocou kalibrovaných gaussmetrov Tenmars TM-192D. Priemerná hustota magnetického toku na sedadle cestujúcich bola 0,226.±0,147μT (2,26±1,47 mG) pre jednosmerný systém a 0,900±0,606μT (9,00±6,06 mG) pre systém striedavého prúdu. Rozdiel bol vysoko významný (Welchov t = −73,06, p<0,001). Expozícia ľahkej železničnej dopravy v DC zostala trvalo pod izraelskou preventívnou úrovňou 0,4μPrahová hodnota T (4 mG) pre nepretržitú expozíciu verejnosti, zatiaľ čo priemerné úrovne striedavého prúdu v ťažkej železničnej doprave prekročili túto prahovú hodnotu pri každej monitorovanej jazde, pričom zostali hlboko pod referenčnými úrovňami pre verejnosť podľa ICNIRP. Tieto zistenia zdôrazňujú „zelenú dilemu“ v politike udržateľnej dopravy: environmentálne prínosy elektrifikácie železníc musia byť vyvážené obozretným riadením elektromagnetickej expozície v jurisdikciách uplatňujúcich prísne preventívne limity.

Kľúčové slová: striedavý prúd; jednosmerný prúd; ENF-MF; vystavenie cestujúcich; zásada preventívnej opatrnosti; verejné zdravie; elektrifikácia železníc; udržateľná mestská doprava

Check for updates

Akademický redaktor: Shuhua Fang

Prijaté: 23. februára 2026
Revidované: 24. apríla 2026
Schválené: 15. mája 2026
Publikované: 17. júna 2026

Autorské práva: © 2026 autori. Držiteľ licencie MDPI, Bazilej, Švajčiarsko. Tento článok je článok s otvoreným prístupom distribuovaný podľa podmienok Licencia Creative Commons Attribution (CC BY).

1. Úvod

Globálny prechod na elektrifikovanú verejnú dopravu predstavuje základný kameň udržateľného rozvoja miest a priamo prispieva k Cieľom udržateľného rozvoja OSN – konkrétne k Cieľu udržateľného rozvoja č. 3 (Dobré zdravie a pohoda) a Cieľu udržateľného rozvoja č. 11 (Udržateľné mestá a komunity) [1]. Nahradením cestnej dopravy závislej od fosílnych palív elektrifikované železničné systémy znižujú emisie skleníkových plynov a znečistenie ovzdušia v mestách. Tento prechod však súčasne zvyšuje vystavenie cestujúcich a obyvateľstva extrémne nízkofrekvenčným magnetickým poliam (ELF-MF) generovaným trakčnými energetickými systémami, čo predstavuje to, čo možno charakterizovať ako „zelenú dilemu“ na priesečníku environmentálnej udržateľnosti a ochrany verejného zdravia [2,3].

Medzinárodná agentúra pre výskum rakoviny (IARC) klasifikovala magnetické polia ELF ako „potenciálne karcinogénne pre ľudí“ (skupina 2B) v roku 2001, predovšetkým na základe epidemiologických súvislostí medzi dlhodobým vystavením magnetickému poľu v obytných priestoroch približne nad 0,3 – 0,4μT a detská leukémia [4–7Táto klasifikácia nestanovuje deterministický vplyv na zdravie pri tejto úrovni expozície; skôr identifikuje úroveň dôkazov dostatočnú na odôvodnenie preventívnych politík riadenia expozície.

Nedávne systematické prehľady a združené analýzy naďalej uvádzajú súvislosť okolo 0,4μrozsah expozície T, hoci kauzálna interpretácia zostáva diskutovaná. Seomun a kol. (2021) uviedli pomer šancí 1,72 (95 % CI: 1,25 – 2,35) pre detskú leukémiu pri expozíciách ELF-MF.≥0,4μT [8]. Brabant a kol. (2022) podobne zistili súvislosť nad 0,4.μT (OR = 1,37, 95 % CI: 1,05 – 1,80) v systematickom prehľade 38 štúdií [9]. Zároveň nedávne združené analýzy a odborné posudky zdôrazňujú neistotu týkajúcu sa kauzality, metrík expozície a biologických mechanizmov [10–13]. Preto sa tento článok zaoberá hodnotou 0,4μ Prahová hodnota T ako preventívne kritériá, nie ako definitívny prah ujmy.

Tento regulačný kontext je kľúčový pre elektrifikáciu železníc. Usmernenia Medzinárodnej komisie pre ochranu pred neionizujúcim žiarením (ICNIRP) z roku 2010 stanovili referenčnú úroveň pre verejnosť na 200μT pre magnetické polia s frekvenciou 50 Hz, odvodené zo zavedených akútnych neurostimulačných účinkov [14]. Naopak, niektoré jurisdikcie uplatňujú dodatočné preventívne limity rádovo pod touto hodnotou. Izraelské ministerstvo ochrany životného prostredia uplatňuje preventívnu hranicu 0,4.μT (4 mG) pre nepretržitú expozíciu verejnosti [15], Švajčiarsko uplatňuje 1,0μPreventívny limit T pre definované citlivé použitia [16] a Taliansko uplatňuje 3,0μCieľ kvality T pre nové rezidenčné developerské projekty [17].

Expozícia cestujúcich v elektrických železničných systémoch závisí nielen od toho, či je trakcia striedavá alebo jednosmerná, ale aj od úrovne napätia, dopytu po trakčnom prúde, geometrie spätného prúdu, konštrukcie koľajových vozidiel, umiestnenia zariadení, cyklov zrýchlenia a brzdenia, odstupu a blízkosti susedných koľají pod napätím. Medzinárodné štúdie uvádzajú značné rozdiely medzi železničnými systémami: Loizeau a kol. (2024) merali ELF-MF počas 348 jázd vo Švajčiarsku, pričom medián expozície vlakov bol približne 0,40.μT [18 rokov]; Merania v európskych električkách uvádzali priemernú expozíciu cestujúcich približne 0,48 – 0,85μT [19]; Merania v torontskom metre uviedli priemernú hodnotu približne 3,00μT [20]; a hodnotenia električkových tratí v Spojenom kráľovstve uvádzali typické expozície okolo 1,50μT [21].

Napriek týmto dôkazom žiadna predchádzajúca štúdia systematicky neporovnávala vystavenie ELF-MF na sedadlách pre cestujúcich medzi elektrifikačnými platformami s jednosmerným a striedavým prúdom prevádzkovanými v rámci toho istého národného regulačného rámca s použitím kontrolovaného dizajnu poľa s opakovanými meraniami. Ciele tejto štúdie sú preto trojaké: (1) kvantifikovať a porovnať vystavenie ELF-MF na sedadlách pre cestujúcich v systéme ľahkej železničnej dopravy s jednosmerným prúdom napätím 1500 V a systéme ťažkej železničnej dopravy s striedavým prúdom napätím 25 kV a frekvenciou 50 Hz prostredníctvom nepretržitého monitorovania v reálnom čase; (2) vyhodnotiť namerané úrovne expozície v porovnaní s izraelským preventívnym rámcom a vybranými medzinárodnými referenčnými úrovňami; a (3) interpretovať zistenia v kontexte inžinierstva železničných systémov, hodnotenia expozície cestujúcich a plánovania udržateľnej dopravy.

2. Materiály a metódy

2.1. Návrh štúdie a výber postupu

Cieľom tejto štúdie je kvantifikovať a porovnať vystavenie cestujúcich extrémne nízkofrekvenčným magnetickým poliam v izraelských systémoch ľahkej železničnej dopravy s jednosmerným napätím 1500 V a ťažkej železničnej dopravy s striedavým napätím 25 kV a frekvenciou 50 Hz pomocou nepretržitého monitorovania vo vozidlách pozdĺž reprezentatívnych koridorov v metropolitnej oblasti Tel Avivu. Štúdia sa ďalej zameriava na vyhodnotenie súladu nameraných úrovní expozície s izraelským viacúrovňovým preventívnym rámcom a vybranými medzinárodnými usmerneniami a na zaradenie izraelských zistení do globálnej literatúry o ELF-MF.

expozícia v elektrifikovanej železničnej doprave. Na dosiahnutie týchto cieľov sa v dňoch 23. – 26. novembra 2025 uskutočnila medziplatformová observačná štúdia. Boli vybrané dva reprezentatívne koridory elektrických železníc v metropolitnej oblasti Tel Avivu (obrázok1):

- Systém DC (ľahká železničná doprava): Červená linka Tel Avivu, prevádzkovaná systémom metropolitnej hromadnej dopravy NTA, s dĺžkou 24 km a 34 stanicami medzi Petah Tikvou a Bat Yamom. Systém využíva nízkopodlažné vozidlá CRRC Changchun poháňané trolejovým vedením s jednosmerným napätím 1500 V.
- Systém striedavého prúdu (ťažká železnica): Medzimestský koridor Tel Aviv Savidor Center–Binyamina spoločnosti Izraelské železnice s dĺžkou približne 60 km. Vlaky premávajú pod trolejovým vedením striedavého prúdu 25 kV a 50 Hz.

Obrázok 1. Kombinovaná mapa trás Tel Aviv Red Line LRT (Petah Tikva–Bat Yam) a Izraelskej pobrežnej trate (Tel Aviv Savidor Center–Binyamina) zobrazujúca meracie koridory v rámci širšej národnej železničnej siete.

2.2. Protokol merania a prístrojové vybavenie

Merania hustoty magnetického toku sa uskutočnili pomocou trojosového ELF gaussmetra Tenmars TM-192D (Tenmars Electronics Co., Ltd., Taipei, Taiwan) (rozsah merania: 2–200μT (20 – 2 000 mG); frekvenčná odozva: 30 – 2 000 Hz; rozlíšenie: 0,0001μT (0,01 mG). Prístroj bol pred meracou kampaňou kalibrovaný z výroby a spĺňa špecifikácie uvedené v norme IEEE Std 644-2019 pre meranie magnetického poľa sieťovej frekvencie [22]. TM-192D zaznamenáva výslednú hustotu magnetického toku v širokopásmovom priemysle v špecifikovanom frekvenčnom rozsahu, ale neposkytuje dekompozíciu vo frekvenčnej doméne, ako je napríklad analýza rýchlou Fourierovou transformáciou (FFT). Sekundárny osobný expozimeter Emdex Snap (Enertech Consultants, Campbell, CA, USA) slúžil ako záložný nástroj na účely krížovej validácie. Frekvenčne selektívne overenie dominantnej zložky výkonovej frekvencie sa vykonalo dodatočne pomocou spektrálneho analyzátora Aaronia Spectran NF-5035 (Aaronia AG, Strickscheid, Nemecko).

Zariadenie TM-192D bolo umiestnené vo výške sedadla pre cestujúcich (približne 0,6 m nad podlahou), čo predstavuje expozíciu hornej časti trupu sediaceho cestujúceho. Merania sa vykonávali vo vzdialenosti najmenej 1 m od viditeľných elektrických panelov a krytov hlavných trakčných zariadení, kde to bolo možné, v súlade s izraelským ministerstvom ochrany životného prostredia.

návod na meranie [15]. Protokol zámerne použil pevnú referenčnú polohu sedenia na podporu porovnateľnosti medzi jazdami a systémami; preto necharakterizuje stojacich cestujúcich, cestujúcich pohybujúcich sa vo vozni ani sedadlá umiestnené priamo nad trakčným zariadením. Prístroj zaznamenával výslednú hustotu magnetického toku (vektorovú magnitúdu) v kontinuálnom intervale vzorkovania približne 10 s počas každej jazdy. Hodnoty sú uvádzané predovšetkým v mikroteslach (μT), pričom miligauss (mG) je uvedený v zátvorkách, ak je to užitočné pre regulačnú interpretáciu; 1μT = 10 mG.

2.3. Harmonogram zberu údajov

Merania sa vykonávali počas štyroch po sebe nasledujúcich pracovných dní za reprezentatívnych prevádzkových podmienok od rannej do večernej prevádzky:

- Ľahká železnica DC: 14 jázd (A1–G2) 23. – 24. novembra 2025; 14 jázd za 2 dni v smere na východ aj na západ.
- AC Heavy Rail: 14 spojov (K1–R2) 25. – 26. novembra 2025; 14 spojov za 2 dni na trase Tel Aviv–Binyamina.

Každá cesta priniesla približne 324 – 326 individuálnych meraní, čím sa vytvoril celkový súbor údajov 9100 vzoriek (4536 jednosmerných; 4564 striedavých).

2.4. Štatistická analýza

Všetky štatistické analýzy boli vykonané pomocou programu IBM SPSS Statistics (verzia 29). Deskriptívna štatistika (priemer, štandardná odchýlka, medián, minimum, maximum, 95. percentil) bola vypočítaná pre každú cestu a pre každý agregovaný systémový súbor údajov. Porovnania medzi systémami boli vykonané pomocou Welchovho dvojvýberového testu.*t*-test, ktorý nepredpokladá rovnaké rozptyly. Opakovateľnosť v rámci systému bola hodnotená porovnaním meraní z 1. a 2. dňa pre každý systém s použitím nezávislých vzoriek*t*-testy. Na posúdenie celkovej štruktúry rozptylu bola vo všetkých 28 skupinách jázd použitá jednosmerná analýza rozptylu (ANOVA). Štatistická významnosť bola stanovená na α = 0,05. Všetky zaznamenané merania vrátane prechodných vrcholov boli zachované; neboli použité žiadne kritériá vylúčenia odľahlých hodnôt, pretože vrcholy zrýchlenia a brzdenia predstavujú skutočné podmienky expozície cestujúcich. Vzhľadom na veľkú veľkosť vzorky (N > 4500 na systém) sú parametrické priemerné porovnania odolné voči nenormalite podľa centrálnej limitnej vety. Napriek tomu môže kontinuálny 10-sekundový odber vzoriek zaviesť autokoreláciu; preto sú výsledky interpretované s dôrazom na veľkosť efektu a konzistenciu opakovaných jázd okrem nominálnej hodnoty.*p*-hodnoty.

2.5. Etické vyhlásenie

Táto štúdia nebola podrobená etickej kontrole a schváleniu, pretože zahŕňala výlučne merania environmentálnej expozície elektromagnetickým poliam v systémoch verejnej dopravy bez priameho zásahu človeka alebo zhromažďovania akýchkoľvek osobných údajov.

3. Výsledky

3.1. Systém ľahkej železničnej dopravy s jednosmerným prúdom (1500 V jednosmerný prúd)

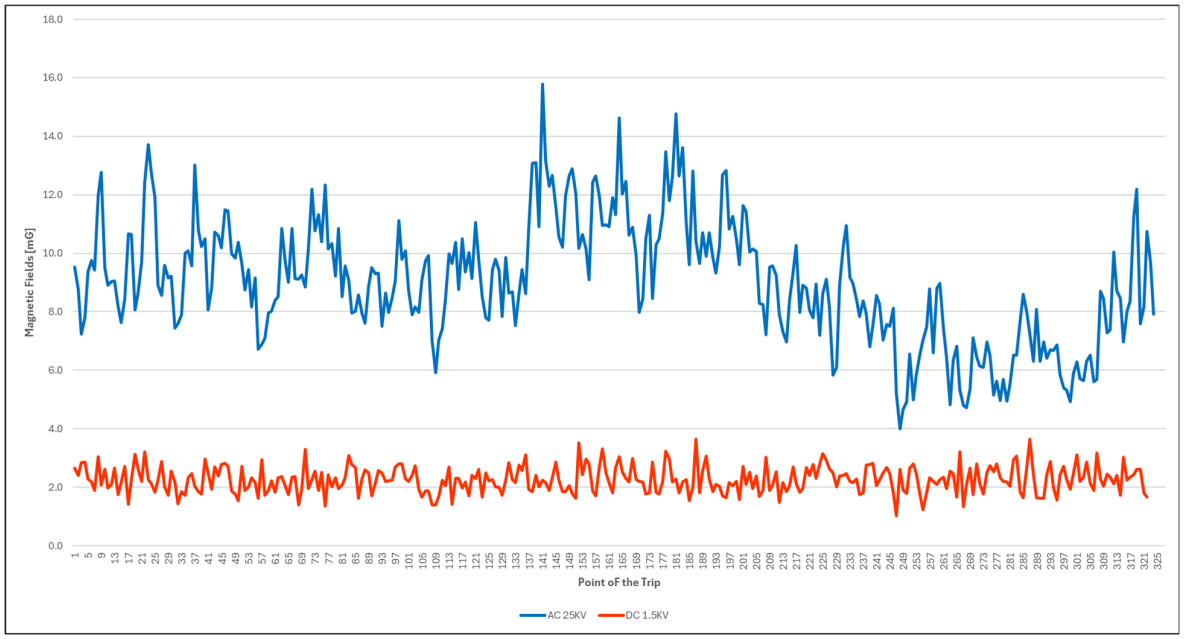
14 monitorovacích sedení ľahkej železnice v DC (cesty A1 – G2, 23. – 24. novembra 2025) prinieslo 4536 individuálnych meraní. Systém DC vykazoval celkový priemer 0,226.μT (2,26 mG) s celkovou štandardnou odchýlkou 0,147μT (1,47 mG). Medián bol 0,208μT (2,08 mG) a 95. percentil bol 0,516μT (5,16 mG). Maximálne maximálne hodnoty počas všetkých cyklov sa pohybovali od 0,537 do 0,793μT (5,37 – 7,93 mG). Všetkých 14 priemerov ciest kleslo pod 0,4μPreventívny prah T (4 mG) s minimálnou variabilitou medzi špičkou a mimošpičkou.

3.2. Systém ťažkých koľajníc na striedavý prúd (25 kV, 50 Hz striedavý prúd)

14 monitorovacích sedení ťažkej koľajnice s klimatizáciou (cesty K1–R2, 25. – 26. novembra 2025) prinieslo 4564 individuálnych meraní. Systém s klimatizáciou dosiahol celkový priemer 0,900.μT

(9,00 mG) s celkovou štandardnou odchýlkou 0,606µT (6,06 mG). Medián bol 0,736µT (7,36 mG) a 95. percentil bol 2,176µT (21,76 mG). Maximálne hodnoty píkov sa pohybovali od 2,584 do 4,636µT (25,84–46,36 mG), pričom maximum agregovaného súboru údajov dosiahlo 4,636µT (46,36 mG). Prevádzková variabilita bola úzko spojená so stavom trakcie; epizódy rýchlej akcelerácie a regeneratívneho brzdenia spôsobili prechodné výkyvy magnetického poľa.

Obrázok2predstavuje časové rady profilov hustoty magnetického toku meranej na úrovni sedadla pre cestujúcich v reprezentatívnych cestách ľahkej železničnej dopravy s jednosmerným prúdom a ťažkej železničnej dopravy striedavým prúdom. Systém striedavého prúdu 25 kV vykazuje podstatne vyššie a premenlivejšie úrovne magnetického poľa s opakovanými prechodovými vrcholmi nad 1,0µT (10 mG), zatiaľ čo systém s jednosmerným prúdom 1,5 kV si udržiava nižší a relatívne stabilný profil, vo všeobecnosti okolo 0,2 – 0,3µT (2–3 mG) počas celej cesty.



Obrázok 2. Porovnávacie profily časových radov magnetického poľa pre reprezentatívne cesty jednosmernou ľahkou železnicou (červená) a striedavou ťažkou železnicou (modrá). DC = jednosmerný prúd; AC = striedavý prúd; LRT = ľahká železničná doprava; µ T = mikrotesla; mG = miligauss.

3.3. Štatistické porovnanie medzi systémami

Tabuľka1predstavuje agregované deskriptívne štatistiky a výsledky štatistických testov pre systémy aj pre porovnania medzi systémami. Hodnoty sú uvedené predovšetkým vµT, pričom ekvivalenty mG boli uvedené tam, kde to bolo užitočné na porovnanie s izraelskými regulačnými prahmi. Rozdiel v priemernej expozícii bol 0,674µT (6,74 mG) s 95 % intervalom spoľahlivosti 0,656 – 0,692µT (6,56 – 6,92 mG). NS = nevýznamné (α = 0,05).

Prevádzkový kontext a variabilita. Keďže koridor ťažkej železničnej dopravy AC spoločnosti Izraelské železnice premáva na viacerých paralelných tratiach s heterogénnou zmesou dopravy a nerovnomernými dĺžkami vlakov, môže dochádzať k súčasnému pohybu vlakov na susedných tratiach, čo vedie k väčšej priestorovo-časovej variabilite magnetického poľa. Naproti tomu červená trať jednosmernej rýchlostnej železnice (LRT) vedie po vyhradenom priestranstve s jednou koľajou na smer a pevným 6-minútovým odstupom medzi vlakmi. Táto prevádzková stabilita prináša stacionárnejší profil expozície a pomáha vysvetliť, prečo je variabilita pre LRT nižšia v porovnaní s koridorom ťažkej železničnej dopravy.

Analýza opakovateľnosti v rámci systému nepotvrdila žiadny významný rozdiel medzi po sebe idúcimi dňami merania pre systém s jednosmerným prúdom ($t(4209,5) = 1,48$, $p=0,139$). V prípade klimatizačného systému bol pozorovaný malý, ale štatisticky významný efekt dňa ($t(4533,2) = 2,67$, $p=0,008$), čo pravdepodobne odráža bežnú prevádzkovú variabilitu v dopyte po trakcii počas dní merania, a nie systematické skreslenie v protokole merania.

Tabuľka 1. Agregovaná deskriptívna štatistika a štatistické testy pre jednosmerné a striedavé železničné systémy.

Parameter	Ľahká železnica na jednosmerný prúd (1500 V)	Ťažká koľajnica striedavého prúdu (25 kV, 50 Hz)
Počet jázd	14	14
Celkový počet vzoriek (N)	4536	4564
Priemer (μT/mG)	0,226/2,26	0,900/9,00
Štandardná odchýlka (μT/mG)	0,147/1,47	0,606/6,06
Medián (μT/mG)	0,208/2,08	0,736/7,36
Minimálne (μT/mG)	0,005/0,05	0,035/0,35
Maximálne (μT/mG)	0,793/7,93	4,636/46,36
95. percentil (μT/mG)	0,516/5,16	2,176/21,76
95 % CI pre priemer (μT/mG)	(0,222, 0,230)/(2,22, 2,30)	(0,883, 0,918)/(8,83, 9,18)
Šikmosť	0,94	1,56
Kurtóza	0,99	2,92
V rámci systému (1. deň vs. 2. deň)	t(4209,5) = 1,48,p=0,139 (neúplné)	t(4533,2) = 2,67,p=0,008 *
Medzisystémový (Welchov t-test)		t(5102,4) = −73,06,p<0,001 ***
Cohenovo d (veľkosť efektu)		d = 1,53 (veľmi veľké)
Mann-Whitneyho U (neparametrické)		U = 1 383 911,p<0,001 ***
Všetkých 28 ciest ANOVA		F(27, 9072) = 201,13,p<0,001 ***

* p<0,05; ***p<0,001; NS = nevýznamné.

3.4. Posúdenie súladu s predpismi

Tabuľka2predstavuje hodnotenie súladu s viacúrovňovým izraelským regulačným rámcom a vybranými medzinárodnými referenčnými alebo preventívnymi normami.

Tabuľka 2. Posúdenie súladu s predpismi: Izraelské a medzinárodné normy ELF-MF.

Štandard	Prahová hodnota	Súlad s predpismi DC LRT	Súlad s predpismi pre ťažkú železničnú dopravu s AC
Izraelský preventívny štandard (nepretržitá verejná expozícia)	0,4μT (4 mG)	✓ Všetkých 14 jázd znamená pod prahovou hodnotou	✗Všetkých 14 ciest prekročilo prahovú hodnotu
Izraelská okupácia (8-hodinová expozícia)	1,0μT (10 mG)	✓ Priemerne hlboko pod	✓ Celkový priemer 0,900μT mierne pod
Izraelský akútny/vrcholový	100μT (1000 mG)	✓ Max. 0,793μT	✓ Max. 4,636μT
ICNIRP 2010 (verejnosť, 50 Hz)	200μT (2000 mG)	✓	✓
Švajčiarske preventívne opatrenie (NISV/ORNI)	1,0μT (10 mG)	✓	✓ Veľký priemer mierne pod
Cieľ talianskej kvality (nový obytný dom)	3.0μT (30 mG)	✓	✓ Veľký priemer hlboko pod

✓=v súlade (namerané hodnoty pod stanovenou prahovou hodnotou);✗ =nevyhovujúce (namerané hodnoty presahujú stanovenú prahovú hodnotu).

Oba systémy spĺňajú referenčné úrovne ICNIRP 2010 s veľkým rozdielom. Systém DC tiež spĺňa všetky izraelské regulačné úrovne vrátane prísnej úrovne 0,4.μT (4 mG) je preventívna prahová hodnota pre nepretržitú verejnú expozíciu. Systém klimatizácie spĺňa akútne a pracovné prahové hodnoty a zostáva hlboko pod referenčnou úrovňou pre verejnosť podľa ICNIRP, ale jeho priemerné hodnoty presahujú izraelskú preventívnu prahovú hodnotu pre nepretržitú expozíciu. Toto prekročenie by sa malo interpretovať ako spúšťač preventívneho hodnotenia a zmierňovania, nie ako dôkaz bezprostredného alebo deterministického biologického poškodenia.

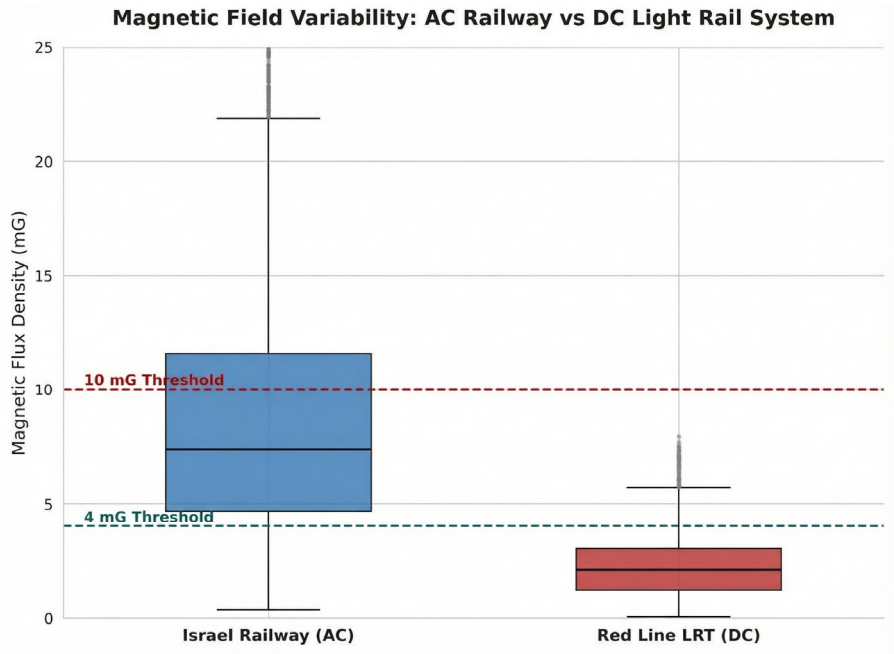
3.5. Medzinárodné benchmarkingové porovnávanie

Tabuľka3Správy uvádzajú priemernú expozíciu cestujúcich extrémne nízkofrekvenčným magnetickým poliam v rôznych elektrifikovaných systémoch verejnej dopravy na celom svete, pričom sumarizujú typ systému, trakčné napätie a priemernú hustotu magnetického toku pre každý koridor. Zistenia o izraelskej ľahkej železničnej doprave na jednosmerný prúd a ťažkej železničnej doprave na striedavý prúd sa v nich porovnávajú s medzinárodnými meraniami zo Švajčiarska, Spojeného kráľovstva, Kanady, Spojených štátov, Južnej Kórey, Talianska, Švédska a Turecka. Celkovo izraelská ľahká železničná doprava na jednosmerný prúd vykazuje jedny z najnižších hlásených priemerných úrovní, zatiaľ čo izraelská ťažká železničná doprava na striedavý prúd zostáva výrazne pod oveľa vyššími úrovňami expozície pozorovanými na niektorých zahraničných koridoroch striedavého prúdu.

Tabuľka 3. Medzinárodné porovnanie priemernej expozície ELF-MF cestujúcich v elektrických železničných systémoch.

Krajina/región	Typ systému	Napätie	Priemer (μT)	Referencia
Izrael (táto štúdia)	Ľahká železnica DC	1500 V jednosmerného prúdu	0,226	Táto štúdia (2026)
Izrael (táto štúdia)	Ťažká železnica striedavého prúdu	25 kV striedavého prúdu	0,900	Táto štúdia (2026)
Švajčiarsko	Ťažká železnica striedavého prúdu	15 kV striedavého prúdu	0,40 (stredné)	Loizeau a kol., 2024 [18 rokov
Spojené kráľovstvo	Ľahká železnica DC (električka)	750 V jednosmerného prúdu	1,50	Chadwick a Lowes, 1998 [21Gryz
EÚ (električka)	Ľahká železnica DC (električka)	600 – 750 V jednosmerného prúdu	0,48 – 0,85	a kol., 2022 [19Havas a kol., 2004
Kanada (Toronto)	Ľahká železnica DC (metro) Ťažká	600 V jednosmerného prúdu	3,00	[20] DOT/FRA, 2006 [23] Jung a
USA (severovýchodný koridor)	železnica AC	12,5 – 25 kV striedavý prúd	10,00	kol., 2015 [24] Contessa a kol.,
Južná Kórea	Ťažká železnica na striedavý prúd/jednosmerné metro	25 kV AC/1500 V DC	1,04	2010 [25] Nordenson a kol., 2001
Taliansko	Ťažká železnica na striedavý prúd/jednosmerné metro	25 kV AC/3000 V DC	1,00 – 2,00	[26] Albayrak a kol., 2024 [27]
Švédsko	Ťažká železnica na striedavý prúd (prímestský) Elektrický	15 kV AC	2–15	
Turecko (Samsun)	autobus na striedavý prúd	600 V jednosmerného prúdu	0,48 – 1,93	

Priemerná expozícia izraelského systému ľahkej železničnej dopravy DC je 0,226μT predstavuje jednu z najnižších hodnôt zaznamenaných medzi porovnateľnými systémami na celom svete, približne 13-krát nižšiu ako v torontskom metru a 6,6-krát nižšiu ako v britských električkách. Priemerná hodnota pre ťažkú železničnú dopravu striedavého prúdu je 0,900.μT je mierne nad mediánom švajčiarskych železníc, ktorý je 0,40μT, ale podstatne pod 10μHladiny T zaznamenané v severovýchodnom koridore USA (obrázok3).



Obrázok 3.Škatuľovitý graf porovnávajúci rozloženie meraní hustoty magnetického toku medzi systémami ľahkej železničnej dopravy na jednosmerný prúd (červená) a ťažkej železničnej dopravy na striedavý prúd (modrá). Stredové značky označujú stredné hodnoty; hranice škatuľiek predstavujú 25. a 75. percentil (IQR); fúzy siahajú až do 1,5.×IQR; body za fúzikmi predstavujú prechodné vrcholové odchýlky. DC = jednosmerný prúd; AC = striedavý prúd;μT = mikrotesla; mG = miligauss; IQR = interkvartilový rozsah.

4. Diskusia

4.1. Dichotómia jednosmerného/striedavého prúdu: Technológia elektrifikácie a profily expozície

Výsledky odhaľujú jasnú dichotómiu v elektromagnetickom prostredí medzi týmito dvoma elektrifikačnými platformami. Systém ľahkej železničnej dopravy na jednosmerný prúd si udržiaval stabilný profil magnetického poľa s nízkou intenzitou s celkovou priemernou hodnotou 0,226.µT (2,26 mG), štandardná odchýlka 0,147µT (1,47 mG) a maximálne hodnoty obmedzené na približne 0,7 – 0,8µT (7–8 mG). Táto stabilita je v súlade s architektúrou trakčného systému s jednosmerným napätím 1500 V, relatívne stabilným odberom prúdu, krátkym zložením vozidiel, kontrolovanými prevádzkovými vzdialenosťami a relatívne kompaktnou geometriou návratu prúdu.

Naproti tomu systém ťažkej železničnej dopravy striedavého prúdu vykazoval prostredie s vyššou variabilitou expozície s celkovým priemerom 0,900.µT (9,00 mG) a štandardná odchýlka 0,606µT (6,06 mG), čo je viac ako štvornásobok variability jednosmerného systému. Tieto rozdiely by sa nemali pripisovať výlučne fyzickému rozdielu medzi striedavým a jednosmerným prúdom. Odrážajú aj technické a prevádzkové požiadavky 25 kV jednofázovej ťažkej železničnej trakcie vrátane vysokých zrýchľovacích prúdov, dlhších vlakových zložení, dlhších napájacích úsekov, širších slučiek spätného prúdu a prítomnosti viacerých susedných koľají pod napätím. Tieto faktory môžu spôsobiť prechodové špičky presahujúce 3–4µT (30–40 mG) počas zrýchľovania alebo brzdenia, s maximom 4,636µT (46,36 mG) v agregovanom súbore údajov o striedavom prúde.

4.2. Regulačné dôsledky a preventívny rámec

Regulačný význam týchto zistení sa nesústreďuje na riziko akútnej expozície – dokonca ani na najvyšší zaznamenaný vrchol 4,636µT (46,36 mG) je hlboko pod 100µT (1000 mG) izraelský limit akútnej bezpečnosti a 200µReferenčná úroveň pre verejnosť podľa ICNIRP – ale na základe chronických alebo opakovaných vzorcov expozície relevantných pre denných dochádzajúcich. Priemerná hodnota cesty ťažkou železnicou s klimatizáciou prekročila izraelskú hodnotu 0,4.µT (4 mG) je preventívna prahová hodnota pre nepretržitú expozíciu verejnosti, zatiaľ čo priemerná hodnota cesty ľahkou železnicou DC to neznamenala. Hodnota 0,4µReferenčnú hodnotu T je preto najlepšie chápať ako spúšťač preventívneho plánovania a riadenia expozície, nie ako prahovú hodnotu, pri ktorej nevyhnutne dôjde k poškodeniu. Okrem toho, keďže hodnota 0,4µPrahová hodnota T je určená pre nepretržitú 24-hodinovú expozíciu v domácnostiach, prechodné prekročenia počas denného dochádzania by sa nemali zamieňať s bezprostredným klinickým rizikom.

Táto interpretácia je v súlade so širšou vedeckou literatúrou. Metaanalýzy preukázali súvislosti medzi dlhodobou expozíciou ELF-MF nad približne 0,4µT a detská leukémia [8,9,28,29], zatiaľ čo odborné orgány naďalej zdôrazňujú neistotu týkajúcu sa kauzality a mechanizmov [4,13,30,31]. Súčasné zistenia preto podporujú preventívne inžinierske preskúmanie prostredí vystavených striedavému prúdu ťažkej koľajnice, najmä tam, kde denné alebo vysokofrekvenčné dochádzanie môže viesť k opakovaným epizódam expozície.

Relevantnou exponovanou populáciou v tejto štúdii sú sediaci cestujúci na monitorovaných trasách, nie celá populácia a nie zamestnanci. Výsledky môžu byť najrelevantnejšie pre častých dochádzajúcich a potenciálne zraniteľné skupiny vrátane tehotných žien, dojčiat, malých detí a používateľov aktívnych implantovateľných zdravotníckych pomôcok [32–34Keďže súčasný protokol nezhromažďoval denníky správania, históriu jednotlivých ciest ani 24-hodinovú dozimetriu, nemôže odhadnúť kumulatívnu osobnú dávku ani odvodiť zdravotné riziko pre celú populáciu. Budúce štúdie by preto mali kombinovať merania na palube so záznamami o aktivite cestujúcich a modelovaním rekonštrukcie dávky.

4.3. Medzinárodný kontext a porovnávanie

V medzinárodnom kontexte sú izraelské zistenia pozoruhodné. Priemerná expozícia systému ľahkej železničnej dopravy v DC je 0,226.µT je najnižšia spomedzi porovnateľných systémov zdokumentovaných na celom svete (Tabuľka3), približne 13-krát nižšie ako metro v Toronte

(3,00µT) a 6,6-krát nižšie ako električky v Spojenom kráľovstve (~1,50µT). Táto mimoriadne nízka úroveň odráža moderné inžinierske štandardy nedávno spusteného systému Tel Aviv Red Line vrátane optimalizovaného riadenia spätného prúdu a moderného dizajnu vozidiel.

Priemerná hodnota ťažkej koľajnice striedavého prúdu je 0,900µT je mierne nad mediánom švajčiarskych železníc, ktorý je 0,40µT uvádza Loizeau et al. (2024) [18 rokov] ale podstatne pod 10µHladiny testosterónu zdokumentované v severovýchodnom koridore USA [23]. Pridanie údajov o tureckých elektrických autobusoch (Albayrak a kol., 2024) ukazuje, že aj mestské dopravné systémy s nižším jednosmerným napätím (600 V) môžu produkovať priemerné expozície 0,48 – 1,93.µT – výrazne vyššia ako izraelská ľahká železnica DC [27].

4.4. Inžinierska interpretácia variability expozície

Pozorovaná variabilita v striedavom systéme má jasný elektromechanický základ. Trakčné systémy ťažkých koľajníc pracujúce na striedavom napätí 25 kV odoberajú počas zrýchľovania značné prúdy, najmä pri zrýchľovaní naložených vlakov zo zastávok. Tieto prúdové prepätia sa šíria cez trolejové vedenie a spätný obvod, čím vytvárajú zvýšené magnetické polia v priestore pre cestujúcich. Geometria spätnej dráhy, prepojenie, umiestnenie transformátora, podlahové zariadenia a blízkosť susedných koľají môžu ďalej ovplyvniť vystavenie sedadiel cestujúcich. Naproti tomu napájanie jednosmerného systému s napätím 1500 V vytvára nižší a stabilnejší profil expozície za prevádzkových podmienok meraných v tomto dokumente, hoci vozidlá s jednosmerným prúdom môžu stále generovať lokalizované polia v blízkosti trakčných meničov, motorov a podlahovej kabeláže.

4.5. Obmedzenia

Treba uznať niekoľko obmedzení.

(a) Merania sa vykonali na jednej reprezentatívnej trase a jednom hlavnom type vozidla pre každé nástupište (Alstom Citadis 302 pre DC LRT a štandardné vozne Israel Railways pre koridor AC). Výsledky by sa preto nemali mechanicky zovšeobecňovať na všetky železničné systémy alebo konštrukcie koľajových vozidiel.

(b) Štúdia merala expozíciu vo vozidle iba počas prepravy. Komplexné posúdenie expozície dochádzajúcich by si vyžadovalo 24-hodinovú osobnú dozimetriu, záznamy o frekvencii ciest a rekonštrukciu kumulatívnej expozície v mikroprostredí domu, práce a dopravy.

(c) Kampaň trvala štyri po sebe nasledujúce pracovné dni koncom novembra 2025. Nebola zachytená sezónna variabilita, variabilita súvisiaca s cestovným poriadkom, zaťažením cestujúcimi a variabilita podmienok údržby.

(d) Merania sa vykonávali v pevnej referenčnej polohe sedenia. Priestorové gradienty medzi rôznymi sedadlami, polohami státia, oblasťami dverí a miestami priamo nad trakčným zariadením neboli systematicky mapované.

(e) TM-192D zaznamenáva výslednú hustotu magnetického toku v širokopásmovom pásme v špecifikovanom frekvenčnom rozsahu, ale neposkytuje rozklad frekvenčnej domény. Treba poznamenať, že vzhľadom na špecifikovanú frekvenčnú odozvu prístroja (30 – 2 000 Hz) predstavujú údaje zachytené pre jednosmerný systém časovo premenné zložky ELF-MF, a nie primárne statické magnetické pole. Súčasná analýza preto nedokáže rozlíšiť základnú zložku s frekvenciou 50 Hz od harmonických, zvlnenia súvisiaceho s meničom, impulznej modulácie alebo iných frekvenčne špecifických príspevkov.

(f) Použitie Welchovho *t*-test predpokladá nezávislé pozorovania. Keďže merania boli zaznamenávané v približne 10-sekundových intervaloch, časová autokorelácia môže podhodnotiť štandardné chyby. Veľmi veľká veľkosť efektu (Cohenovo d = 1,53), dizajn s opakovanými jazdami a konzistentnosť rozdielov na úrovni ciest však naznačujú, že kontrast medzi systémami je robustný.

4.6. Budúce smery

Budúci výskum by mal rozšíriť túto prácu v niekoľkých smeroch: longitudinálne štúdie s využitím osobných dozimetrov, ktoré nosia ľudia, ktorí denne dochádzajú do práce; frekvenčne rozlíšené merania pomocou spektrálnych analyzátorov schopných FFT alebo ekvivalentnej spektrálnej analýzy; trojrozmerné volumetrické mapovanie priestorov pre cestujúcich na charakterizáciu gradientov medzi sedadlami a v stoji; porovnávacie merania medzi modelmi a výrobcami koľajových vozidiel; posúdenie technických zmierňujúcich opatrení vrátane elektromagnetických tieniacich materiálov, optimalizovaných konfigurácií spätného prúdu, premiestnenia zariadení a systémov aktívneho potlačenia poľa; a rozšírenie porovnania medzi platformami na ďalšie izraelské železničné systémy. Osobitná pozornosť by sa mala venovať hodnoteniu expozície medzi častými dochádzajúcimi a zraniteľnými skupinami vrátane detí, tehotných žien a osôb s aktívnymi implantovateľnými zdravotníckymi pomôckami.

5. Závery

Táto štúdia poskytuje kontrolované porovnanie expozície ELF-MF na sedadlách cestujúcich v systémoch ľahkej železničnej dopravy s jednosmerným prúdom a ťažkej železničnej dopravy s striedavým prúdom prevádzkovaných v rámci jednotného národného regulačného rámca. Približne štvornásobný rozdiel v priemernej hustote magnetického toku (DC: 0,226μT vs. AC: 0,900μT; Welchov t = −73,06, p<0,001) ukazuje, že elektrifikačná platforma, architektúra systému a prevádzkové podmienky sú hlavnými faktormi ovplyvňujúcimi vystavenie cestujúcich, čo má dôsledky pre dodržiavanie predpisov a politiku udržateľnej dopravy.

Systém ľahkej železničnej dopravy DC dôsledne dodržiava izraelskú normu 0,4μPreventívny prah T ho stavia do popredia ako priaznivý model pre elektrifikáciu mestskej dopravy s nízkou expozíciou. Systém ťažkej železničnej dopravy so striedavým prúdom prekročil tento preventívny prah vo všetkých monitorovaných cestách, pričom zostal hlboko pod akútnymi referenčnými úrovňami a referenčnými úrovňami ICNIRP. Tento vzorec neznamená bezprostredné zdravotné riziko, ale odôvodňuje preventívne inžinierske preskúmanie, pokračujúce monitorovanie a opatrenia na zníženie expozície tam, kde je to technicky a ekonomicky uskutočniteľné.

Tieto zistenia majú dôsledky pre plánovanie udržateľnosti dopravy: elektrifikácia železníc môže prispieť k cieľom v oblasti klímy a kvality ovzdušia a zároveň si vyžaduje starostlivé riadenie elektromagnetickej expozície. Začlenenie inžinierskych znižovaní expozície počas projektovania, obstarávania a modernizácie môže pomôcť zosúladiť environmentálne prínosy s preventívnymi opatreniami pre verejné zdravie, najmä pre častých dochádzajúcich a zraniteľné skupiny obyvateľstva. „Zelená dilema“, ktorú sme tu identifikovali, je preto zvládnuteľná prostredníctvom monitorovania založeného na dôkazoch, transparentnej regulačnej interpretácie a cieleného technického zmierňovania.

Doplnkové materiály: Nasledujúce podporné informácie si môžete stiahnuť na adrese:https: //www.mdpi.com/article/10.3390/su18126227/s1Tabuľka S1: Harmonogram na úrovni jázd spoločnosti Red Line LRT (DC) a úplná popisná štatistika (14 jázd, 4536 vzoriek). Tabuľka S2: Harmonogram na úrovni jázd spoločnosti Israel Railways (AC) a úplná popisná štatistika (14 jázd, 4564 vzoriek). Kompletné nespracované údaje o meraniach – systém DC (4536 záznamov) a systém AC (4564 záznamov).

Príspevky autorov: Konceptualizácia, LSR-S. a BAP; metodológia, LSR-S. a SG; validácia, SG a EN; formálna analýza, LSR-S.; skúmanie, LSR-S.; zdroje, SG a EN; kurátorstvo údajov, LSR-S.; písanie – príprava pôvodného návrhu, LSR-S.; písanie – kontrola a úprava, BAP, SG a EN; vizualizácia, LSR-S.; dohľad, BAP; administrácia projektu, LSR-S. a
BAP Všetci autori si prečítali a súhlasia s publikovanou verziou rukopisu.

Financovanie: Tento výskum nezískal žiadne externé financovanie.

Vyhlásenie inštitucionálnej revíznej komisie: Neuplatňuje sa.

Vyhlásenie o informovanom súhlase: Neuplatňuje sa.

Vyhlásenie o dostupnosti údajov: Nespracované namerané údaje podporujúce závery tohto článku sú k dispozícii od príslušného autora na základe odôvodnenej žiadosti. Súhrnné štatistiky za všetkých 28 monitorovacích relácií sú uvedené v doplnkových materiáloch (tabuľky S1 a S2).

Poďakovanie: Autori s vďakou ďakujú Ministerstvu ochrany životného prostredia (Izrael), Arthurovi Kolganevovi a Gilovi Cohenovi za ich podporu. Poďakovanie patrí aj spoločnosti Razore Engineering & Consulting Ltd., Yaakov Tamam, za umožnenie realizácie tohto výskumu. Liran Raz (Razore Engineering & Consulting Ltd.) ďakuje Borisovi Portnovovi, Stilianovi Gelbergovi a Zamirovi Shalitovi za ich akademické vedenie a mentorstvo a Moshemu Netzerovi za jeho profesionálnu podporu. Taktiež ďakuje svojim učiteľom, Drorovi Yehi Shalomovi, Moshemu Landsmanovi a Zvi Elimelechovi Horowitzovi. Osobitné poďakovanie patrí jeho rodičom, Michaelovi a Yehudit, a jeho manželke Shani za ich neustálu podporu. Počas prípravy tohto rukopisu autori použili generatívne nástroje umelej inteligencie (OpenAI ChatGPT-4o, Anthropic Claude 3.5, Perplexity AI 2026) na jazykovú úpravu, formátovanie referencií a pomoc so štatistickou vizualizáciou. Autori skontrolovali a upravili všetky výstupy s pomocou umelej inteligencie a preberajú plnú zodpovednosť za obsah tejto publikácie.

Konflikty záujmov: Autori vyhlasujú, že nemajú žiadny konflikt záujmov.

Skratky

V tomto rukopise sa používajú nasledujúce skratky:

Klimatizácia	Striedavý prúd
ANOVA	Analýza rozptylu
BfS	Nemecký federálny úrad pre ochranu pred žiarením
DC	Jednosmerný prúd
DPCM	Dekrét predsedu Rady ministrov (Taliansko)
DOT/FRA	Ministerstvo dopravy USA, Federálna správa železníc, Extrémne
ELF-MF	nízkofrekvenčné magnetické pole
Elektromagnetické pole	Elektromagnetické pole
IARC	Medzinárodná agentúra pre výskum rakoviny
ICNIRP	Medzinárodná komisia pre ochranu pred neionizujúcim žiarením Inštitút
IEEE	elektrotechnických a elektronických inžinierov
IMEP	Medzikvartilový rozsah izraelského ministerstva ochrany
IQR (interaktívny rizikový faktor)	životného prostredia
Ľahká preprava	Ľahká železničná doprava
NISV/ORNI	Nariadenie o ochrane pred neionizujúcim žiarením (Švajčiarsko) NTA
NTA	Metropolitný systém hromadnej dopravy
SCHEER	Vedecký výbor pre zdravie, životné prostredie a vznikajúce riziká (Európska komisia)
Cieľ udržateľného rozvoja	Cieľ trvalo udržateľného rozvoja Švédsky
Jednotný menový systém (SSM)	úrad pre radiačnú bezpečnosť Svetová
SZO	zdravotnícka organizácia

Referencie

1. Organizácia Spojených národov. *Transformácia nášho sveta: Agenda 2030 pre trvalo udržateľný rozvoj*; Valné zhromaždenie OSN: New York, NY, USA, 2015.
2. Raz-Steinkrycer, LS; Gelberg, S.; Portnov, BA Emocionálna pohoda a citlivosť na prostredie: Prípadová štúdia vystavenia ELF-MF. *Udržateľnosť***2026**, *18 rokov*, 620. [CrossRef]
3. Raz-Steinkrycer, LS; Gelberg, S.; Portnov, BA Expozícia ELF-MF, skutočná a vnímaná, a súvisiace zdravotné symptómy: Prípadová štúdia kancelárskej budovy v Tel Avive-Jafe, Izrael. *Udržateľnosť***2022**, *14*, 11065.
4. Medzinárodná agentúra pre výskum rakoviny (IARC). *Neionizujúce žiarenie, časť 1: Statické a extrémne nízkofrekvenčné (ELF) elektrické a magnetické polia*Monografie IARC o hodnotení karcinogénnych rizík pre ľudí; IARC: Lyon, Francúzsko, 2002; Zväzok 80.
5. Svetová zdravotnícka organizácia. *Extrémne nízkofrekvenčné polia*; Monografia kritérií environmentálneho zdravia č. 238; WHO: Ženeva, Švajčiarsko, 2007.

6. Ahlbom, A.; Day, N.; Feychting, M.; Roman, E.; Skinner, J.; Dockerty, J.; Linet, M.; McBride, M.; Michaelis, J.; Olsen, JH; a kol. Súhrnná analýza magnetických polí a detskej leukémie. *Br. J. Rakovina* **2000**, *83*, 692–698. [CrossRef] [ ]PubMed]
7. Greenland, S.; Sheppard, AR; Kaune, WT; Poole, C.; Kelsh, MA Súhrnná analýza magnetických polí, drôtových kódov a detskej leukémie. *Epidemiológia* **2000**, *11*, 624–634. [CrossRef] [ ]PubMed]
8. Seomun, G.; Lee, J.; Park, J. Vystavenie extrémne nízkofrekvenčným magnetickým poliam a rakovina u detí: Systematický prehľad a metaanalýza. *PLoS ONE* **2021**, *16*, e0251628. [CrossRef] [ ]PubMed]
9. Brabant, C.; Geerinck, A.; Beaudart, C.; Tirelli, E.; Geuzaine, C.; Bruyère, O. Vystavenie magnetickým poliam a detská leukémia: Systematický prehľad a metaanalýza. *Rev. Environment. Zdravie* **2022**, *38*, 229–253. [CrossRef] [ ]PubMed]
10. Amoon, AT; Crespi, CM; Ahlbom, A.; Bhatnagar, M.; Bray, I.; Bunch, KJ; Clavel, J.; Feychting, M.; Hémon, D.; Johansen, C.; a kol. Blízkosť nadzemného elektrického vedenia a detská leukémia: Medzinárodná súhrnná analýza. *Br. J. Rakovina* **2018**, *119*, 364–373. [CrossRef] [ ]PubMed]
11. Grellier, J.; Ravazzani, P.; Cardis, E. Potenciálne zdravotné vplyvy vystavenia obyvateľstva extrémne nízkofrekvenčným magnetickým poliam v Európe. *Medzinárodné životné prostredie* **2014**, *62*, 55–63. [CrossRef] [ ]PubMed]
12. Brabant, C.; Honvo, G.; Demonceau, C.; Tirelli, E.; Léonard, F.; Bruyère, O. Účinky extrémne nízkofrekvenčných magnetických polí na rakovinu zvierat a poškodenie DNA: Systematický prehľad a metaanalýza. *Prog. Biofyz. Mol. Biol.* **2025**, *195*, 137–156. [CrossRef] [ ] PubMed]
13. SCHEER. *Stanovisko k potrebe revízie príloh k odporúčaniu Rady 1999/519/ES a smernici 2013/35/EÚ vzhľadom na najnovšie dostupné vedecké dôkazy týkajúce sa nízkofrekvenčných (1 Hz – 100 kHz) elektromagnetických polí*; Európska komisia: Brusel, Belgicko, 2024.
14. Medzinárodná komisia pre ochranu pred neionizujúcim žiarením (ICNIRP). Usmernenia pre obmedzenie vystavenia časovo premenlivým elektrickým a magnetickým poliam (1 Hz až 100 kHz). *Zdravotná fyzika.* **2010**, *99*, 818–836. [CrossRef] [ ]PubMed]
15. Izraelské ministerstvo ochrany životného prostredia. *Pokyny na obmedzenie vystavenia verejnosti extrémne nízkofrekvenčným magnetickým poliam z elektrických inštalácií*; IMEP: Jeruzalem, Izrael, 2005.
16. Švajčiarska federálna rada. *Nariadenie o ochrane pred neionizujúcim žiarením (NISV/ORNI)*; SR 814.710 (zmenené a doplnené v roku 2022); Švajčiarska federálna rada: Bern, Švajčiarsko, 1999.
17. Talianska vláda. Dekrét predsedu Rady ministrov (DPCM). *Úradný vestník*, 8. júla 2003.
18. Loizeau, N.; Haas, D.; Zahner, M.; Stephan, C.; Schindler, J.; Gugler, M.; Fröhlich, J.; Ziegler, T.; Röösli, M. Extrémne nízkofrekvenčné magnetické polia (ELF-MF) vo Švajčiarsku: Od monitorovania expozície k denným expozičným scenárom. *Medzinárodné životné prostredie* **2024**, *194*, 109181. [CrossRef] [ ]PubMed]
19. Gryz, K.; Karpowicz, J.; Zradziński, P. Komplexné elektromagnetické problémy spojené s používaním elektrických vozidiel v mestskej doprave. *Senzory* **2022**, *22*, 1719. [CrossRef] [ ]PubMed]
20. Havas, M.; Shum, S.; Dhalla, R. Vystavenie cestujúcich magnetickým poliam vo vlakoch Go-Trains a autobusoch, električkách a metre prevádzkovaných Dopravnou komisiou v Toronte, Toronto, Kanada. In Zborník z 3. medzinárodného workshopu, Kos, Grécko, 4. – 8. októbra 2004; Zväzok 4, s. 1065 – 1071.
21. Chadwick, P.; Lowes, F. Magnetické polia v britských vlakoch. *Ann. Occup. Hyg.* **1998**, *42*, 331–335. [CrossRef] [ ]PubMed]
22. Rathebe, PC; Kholopo, M. Prístroje a meracie techniky na hodnotenie extrémne nízkofrekvenčných elektromagnetických polí. *Senzory* **2025**, *25*, 4866. [CrossRef] [ ]PubMed]
23. Ministerstvo dopravy USA; Federálna správa železníc. *Monitorovanie elektromagnetického poľa v severovýchodnom koridore spoločnosti Amtrak a hodnotenie vystavenia elektromagnetickému poľu v severovýchodnom koridore*; Správa DOT/FRA; FRA: Washington, DC, USA, 2006.
24. Jung, D.-K.; Jung, J.-S.; Lee, K.-M.; Park, H.-K.; Lee, J.-W.; Seo, C.-Y.; Lee, W.-S.; Kwon, O.-S.; Gu, J.-H. Charakteristiky a súčasný stav extrémne nízkofrekvenčných magnetických polí metropolitného metra. *J. Zápach vnútorného prostredia.* **2015**, *14*, 7–15. [CrossRef]
25. Contessa, GM; Falsaperla, R.; Brugaletta, V.; Rossi, P. Vystavenie magnetickým poliam rušňovodičov železničných lokomotív: Prípadová štúdia v Taliansku. *Radiat. Prot. Dosim.* **2010**, *142*, 160–167. [CrossRef] [ ]PubMed]
26. Nordenson, I.; Mierna, KH; Järventaus, H.; Hirvonen, A.; Sandström, M.; Wilén, J.; Blix, N.; Norppa, H. Chromozomálne aberácie v periférnych lymfocytoch rušňovodičov. *Bioelektromagnetika* **2001**, *22*, 306–315. [CrossRef] [ ]PubMed]
27. Albayrak, ZE; Kurnaz, C.; Karadag, T.; Cheema, AA Komplexná analýza hustoty magnetického toku a vystavenia RF-EMF v elektrických autobusoch: Prípadová štúdia zo Samsunu v Turecku. *Senzory* **2024**, *24*, 5634. [CrossRef] [ ]PubMed]
28. Mancini, M.; Hémon, D.; Faure, L.; Clavel, J.; Goujon, S. Vystavenie magnetickému poľu v domácnostiach spôsobenému vedením vysokého napätia a riziko detskej leukémie v kontinentálnom Francúzsku – prípadovo-kontrolná štúdia GEOCAP, 2002 – 2010. *Environmentálny výskum.* **2025**, *278*, 121638. [CrossRef] [ ]PubMed]
29. Malagoli, C.; Malavolti, M.; Wise, LA; Balboni, E.; Fabbi, S.; Teggi, S.; Palazzi, G.; Cellini, M. Vystavenie magnetickým poliam z vysokonapäťových elektrických vedení v domácnostiach a riziko detskej leukémie. *Environmentálny výskum.* **2023**, *232*, 116320. [CrossRef] [ ]PubMed]
30. Švédsky úrad pre radiačnú bezpečnosť. *2025:04 Nedávny výskum elektromagnetických polí a zdravotných rizík – devätnásta výročná správa*; SSM: Štokholm, Švédsko, 2025.

31. Švédsky úrad pre radiačnú bezpečnosť.*2026:03 Nedávny výskum elektromagnetických polí a zdravotných rizík – dvadsiata výročná správa*; SSM: Štokholm, Švédsko, 2026.
32. Sandoval-Diez, N.; Loizeau, N.; Huss, A.; Röösli, M.; Vienneau, D. Dlhodobé vystavenie magnetickému poľu v obytných priestoroch a úmrtnosť na neurodegeneratívne ochorenia: 18-ročná celoštátna kohortová štúdia vo Švajčiarsku.*Medzinárodné životné prostredie***2026**,*208*, 110145. [CrossRef] [ ] PubMed]
33. Liimatainen, A.; Roivainen, P.; Juutilainen, J.; Höytö, A.; Naarala, J. Štúdia kohorty o Alzheimerovej chorobe vo vzťahu k rezidenčným magnetickým poliam z vnútorných transformačných staníc.*Bioelektromagnetika***2025**,*46*, e70031. [CrossRef] [ ]PubMed]
34. Huss, A.; Spoerri, A.; Egger, M.; Röösli, M. Bývanie v blízkosti elektrického vedenia a úmrtnosť na neurodegeneratívne ochorenia.*Am. J. Epidemiol.***2009**, *169*, 167–175. [PubMed]

Vyhlásenie/Poznámka vydavateľa: Vyhlásenia, názory a údaje obsiahnuté vo všetkých publikáciách sú výlučne názormi jednotlivých autorov a prispievateľov a nie názormi MDPI a/alebo redaktora/editorov. MDPI a/alebo redaktor/editori sa zriekajú zodpovednosti za akékoľvek zranenie osôb alebo ujmu na majetku vyplývajúcu z akýchkoľvek nápadov, metód, pokynov alebo produktov uvedených v obsahu.