Translated from English to Slovak - www.onlinedoctranslator.com

Recenzia

Psikiyatride Güncel Yaklaşımlar – aktuálne prístupy v psychiatrii 2026; 18(4):1552-1567

doi: 10.18863/pgy.1851473

Prenatálne a rané vystavenie elektromagnetickým poliam: vplyv na neurovývoj a správanie

Prenatálna a Erken Yaşamda Elektromanyetik Alanlara Maruziyet: Nörogelişim a Davranış Üzerindeki Etkileri

Neriman Ezgin[1,2]

[1]Univerzita Çukurova, Adana

[2]Belehradská univerzita, Belehrad, Srbsko

ABSTRAKT

Wi-Fi je bežným zdrojom vystavenia sa rádiofrekvenčnému elektromagnetickému poľu (RF-EMF) pracujúcemu na frekvenciách 2,4 GHz a 5 GHz. Rastúci počet experimentálnych dôkazov naznačuje, že vystavenie sa RF-EMF počas prenatálneho a skorého postnatálneho obdobia môže ovplyvniť neurologický vývoj a správanie. Táto recenzia skúma účinky vystavenia sa RF-EMF na učenie, pamäť, úzkostné správanie, motorickú aktivitu a prieskumné správanie. Štúdia je založená na 65 experimentálnych štúdiách identifikovaných prostredníctvom rešerše literatúry vykonanej v databázach PubMed, Web of Science a Scopus. Mechanistické štúdie naznačujú, že tieto účinky sú spojené so zvýšeným oxidačným stresom, zhoršenou synaptickou plasticitou a moduláciou neuronálnych signálnych dráh, čo môže ovplyvňovať neurogenézu, tvorbu dendritických chrbtíc a dozrievanie nervových obvodov. Zistenia zo štúdií na zvieratách sú heterogénne; zatiaľ čo niektoré štúdie uvádzajú mierne kognitívne a motorické poruchy, iné nepozorujú významné zmeny v správaní. Údaje o ľuďoch zostávajú obmedzené a kontroverzné a poskytujú len málo dôkazov o kognitívnych a behaviorálnych účinkoch. Napriek tomu je citlivosť vyvíjajúceho sa nervového systému na takéto vystavenie pozoruhodná. Súčasné dôkazy naznačujú, že vystavenie RF-EMF môže ovplyvniť neurologický vývoj a správanie prostredníctvom neurobiologických mechanizmov. Na dosiahnutie definitívnych záverov týkajúcich sa smeru a rozsahu týchto účinkov sú však potrebné ďalšie štandardizované, dlhodobé a viacrozmerné štúdie. Zdá sa, že kľúčovú úlohu zohrávajú faktory, ako je trvanie expozície, intenzita, vývojové štádium a pohlavie. **Kľúčové slová:**Expozícia Wi-Fi, synaptická plasticita, oxidačný stres, motorické a kognitívne funkcie

ÖZ

Wi-Fi, 2,4 GHz a 5 GHz frekvencia vysielania pre bežné elektronické (RF-EMF) pripojenie. Artan deneysel bulgular, prenatálna a postnatálna dönemde RF-EMF maruziyetinin nörogelişim a davranış üzerinde etkili olabileceğini göstermektedir. Bu derleme, RF-EMF maruziyetinin öğrenme, hafıza, kaygı benzeri davranışlar, motor activity ve keşif davranışları üzerindeki etkilerini incelemektedir. Çalışma, PubMed, Web of Science a Scopus veri tabanlarında yapılan literatür taraması sonucunda seçilen 65 deneysel araştırmaya dayanmaktadır. Mekanistika çalışmalar, bu etkilerin artmış oksidatif stress, bozulmuş sinaptik plastisite v nöronal sinyal yolaklarının modülasyonu ile ilişkili olduğunu v nörojenez, dendriken diken oluşıvrengunlaşin v si etkileyebileceğine işaret etmektedir. Hayvan çalışmalarında bulgular heterojendir; bazı çalışmalarda hafif bilişsel ve motor bozukluklar gözlemlenirken, diğerlerinde anlamlı davranışsal değişiklikler rapor edilmemiştir. İnsan verileri sınırlı ve tartışmalı olup, bilişsel ve davranışsal etkilere dair düşük düzeyde kanıt sunmaktadır. Bununla birlikte, gelişmekte olan sinir sisteminin bu maruziyetlere karşı hassasiyeti dikkat çekmektedir. Mevcut bulgular RF-EMF maruziyetinin nörobiyolojik mekanizmalar aracılığıyla nörogelişim ve davranışı etkileyebileceğini düşündürmektedir. Ancak bu etkilerin yönü ve büyüklüğü konusunda kesin sonuçlara ulaşmak için standartlaştırılmış, uzun dönemli ve çok boyutlu çalışmalara ihtiyaç vardır. Maruziyet süresi, yoğunluğu, gelişimsel dönem ve cinsiyet gibi faktörler önemli role oynamaktadır.
Anahtarove kamarátky: Wi-Fi pripojenie, sinaptik plastizit, oksidatif stres, motor a bilişsel fonksiyonlar

Adresa pre korešpondenciu: Neriman Ezgin, Univerzita Cukurova, Inštitút prírodných a aplikovaných vied, Katedra biotechnológie, Adana, Turecko**e-mail:**nerimnezgn@gmail.com **Prijaté:**29.12.2025 | **Prijaté:**30.04.2026

Úvod

Rozšírené používanie Wi-Fi (2,4 – 2,45 GHz) a iných rádiofrekvenčných elektromagnetických polí (RF EMF) vyvolalo obavy z potenciálnych vplyvov na vyvíjajúce sa organizmy, ktoré sú obzvlášť zraniteľné, pretože neurogenéza a synaptické dozrievanie stále prebiehajú (Çelik a kol. 2016, Deena a kol. 2025). RF-EMF zahŕňajú rôzne bezdrôtové signály, Wi-Fi pracuje vo frekvenčnom pásme 2,4 – 2,45 GHz, zatiaľ čo novšie technológie, ako napríklad Wi-Fi 6/6E a vyššie frekvenčné pásma, môžu zvýšiť kumulatívnu expozíciu (Prlić a kol. 2022). Experimentálne štúdie na hlodavcoch naznačujú, že prenatálna a raná expozícia Wi-Fi indukuje oxidačný stres, zvyšuje peroxidáciu lipidov, znižuje antioxidačnú obranyschopnosť v mozgu a pečeni a zvyšuje reaktívne formy kyslíka (ROS) a apoptózu v neuronálnych bunkách a mozgoch kuracích embryí (Çelik a kol. 2016, Deena a kol. 2025).

Tieto molekulárne a bunkové poruchy sú spojené s deficitmi v učení, pamäti, motorických funkciách a prieskumnom správaní a môžu tiež prispievať k úzkostným reakciám (Li a kol. 2020, Wu a kol. 2023). Stres matky tieto výsledky ďalej zhoršuje (Othman a kol. 2017, Wu a kol. 2023). Štúdie tiež preukazujú, že vystavenie RF-EMF môže narušiť tvorbu dendritických chrbtíc, zloženie synaptických receptorov a dlhodobú potenciáciu, čo ovplyvňuje nervové obvody dôležité pre kogníciu a emócie (Kim a kol. 2021, Eskandani a Zibaii 2024). Boli pozorované transgeneračné účinky, keďže vystavenie dospelých zebričiek Wi-Fi ovplyvňuje reprodukciu, vývoj a správanie (Mehta a kol. 2025).

Štúdie na ľuďoch zamerané na pozorovanie naznačujú potenciálne súvislosti medzi prenatálnym vystavením RF-EMF a jemnými emocionálnymi alebo behaviorálnymi zmenami, hoci dôkazy sú stále obmedzené a rôznorodé (Ishihara a kol. 2020, Benke a kol. 2024). Mechanistické štúdie naznačujú, že oxidačný stres, poškodenie DNA, apoptóza a neurozápal pôsobia spoločne a sprostredkovávajú tieto neurovývojové účinky (Yakymenko a kol. 2016, Vafaei a kol. 2020, Kilic a kol. 2023). Tieto zistenia spoločne zdôrazňujú, že vystavenie RF-EMF počas kritických vývojových okien môže modulovať synaptickú plasticitu, neurogenézu a kognitívno-behaviorálne výsledky, pričom účinky sú ovplyvnené parametrami expozície, vývojovým štádiom a biologickým pohlavím (Karimi a kol. 2018, Cordelli a kol. 2023).

Táto recenzia syntetizuje mechanistické, behaviorálne a epidemiologické dôkazy s cieľom objasniť potenciálne riziká vystavenia sa rádiofrekvenčným a elektromagnetickým poliam v ranom veku a poskytnúť základ pre budúci translačný výskum a usmernenia v oblasti verejného zdravia (Bodewein a kol. 2022, Lamzouri a kol. 2025).

Metóda

Táto naratívna analýza bola vykonaná s cieľom syntetizovať experimentálne dôkazy o neurovývojových a behaviorálnych účinkoch prenatálneho a raného detstva na vystavenie sa Wi-Fi a iným vysokofrekvenčným elektromagnetickým poliam. Hoci naratívne analýzy zvyčajne nedodržiavajú systematické protokoly, na zvýšenie transparentnosti a reprodukovateľnosti bol použitý štruktúrovaný prístup.

Pri vyhľadávaní literatúry boli prehľadané nasledujúce elektronické databázy: PubMed, Web of Science a Scopus. Vyhľadávanie prebiehalo do decembra 2025. Kľúčové slová a kombinácie zahŕňali: „Wi-Fi“, „rádiofrekvenčné elektromagnetické polia“, „RF-EMF“, „prenatálna expozícia“, „expozícia v ranom veku“, „neurologický vývoj“, „správanie“, „kognícia“, „úzkosť“, „motorická funkcia“ a súvisiace termíny. Na spresnenie vyhľadávania boli použité boolovské operátory (AND, OR).

Kritériá pre zaradenie boli: experimentálne štúdie skúmajúce prenatálne alebo skoré postnatálne vystavenie Wi-Fi alebo vysokofrekvenčným elektromagnetickým poliam, štúdie zaznamenávajúce výsledky týkajúce sa neurovývoja, kognitívnych funkcií, motorického správania, úzkostného správania alebo súvisiacich behaviorálnych ukazovateľov a štúdie na ľuďoch, zvieratách a in vitro publikované v angličtine. Štúdie v inom jazyku ako angličtina boli vylúčené.

Pre každú zahrnutú štúdiu boli extrahované a zhrnuté informácie o druhu/modele, frekvencii a intenzite expozície, trvaní, vývojovom štádiu, behaviorálnych alebo molekulárnych výsledkoch a kľúčových zisteniach. Celkovo bolo preskúmaných 65 experimentálnych štúdií vrátane modelov hlodavcov, štúdií zebričiek a neuronálnych modelov in vitro, ktoré pokrývali širokú škálu parametrov expozície RF EMF a behaviorálnych koncových bodov.

Cieľom bolo poskytnúť komplexnú syntézu potenciálnych neurovývojových a behaviorálnych účinkov a zároveň uznať heterogenitu experimentálnych prístupov.

Tabuľka 1. Typy rádiofrekvenčných elektromagnetických polí (RF-EMF) a kontexty expozície relevantné pre neurovývojové štúdie

Typ RF-EMF / Zdroj	Typické Frekvencia Rozsah y	Bežné Aplikácie	Vystavenie Charakteristiky	Kľúčové biologické Úvahy	Zástupca e Referencie
Nízko- frekvencia RF-EMF (mobilné telefón, 2G)	~900 MHz	Mobilné telefóny GSM telefóny	Prevažne expozícia blízkemu poľu; lokalizovaná expozícia k hlave/telu; občasné používanie	Hlbšia penetrácia tkaniva; spojená s oxidačným stresom, zmenenou neurogenézou a učením zmeny v zvieracích modeloch	Pooam a kol. 2022, Henz a ďalší al. 2018
Stredne pokročilý- frekvencia RF-EMF (mobilné telefón, GSM)	~1800 MHz	GSM / skorý mobilný siete	Blízke pole expozícia; premenná SAR v závislosti od používanie zariadenia	Modulácia synaptickej receptory, neuronálne vzrušivosť a prieskumné správanie; účinky závisia od trvania expozície a intenzita	Pooam a kol. 2022, Henz a ďalší al. 2018
Wi-Fi RF- Elektromagnetické pole	2,4 GHz	Wi-Fi routery, bezdrôtové lokálne sieťové siete	Vzdialené pole, nízke intenzita, kontinuálne alebo polo- nepretržitý pozadie vystavenie	Nižšia hodnota SAR pre celé telo; potenciálne účinky počas chronických alebo vývojových expozičných období	Prlić a kol. 2022, Foster & Tvarovač, 2013
Pokročilé Wi-Fi Wi-Fi (Wi-Fi) 5/6/6V)	5–6 GHz	Moderné bezdrôtový komunikácia n systémov	Vzdialené pole environmentálny expozícia; predĺžená frekvenčné pásma	Povrchnejšie ukladanie energie; obmedzené údaje o dlhodobom vývoji k dispozícii	Prlić a kol. 2022, Foster a frézovač 2013
Experimentálne RF-EMF Vystavenie Systémy	2,45 GHz, 3 GHz, iní	Laboratórium signál generátory, vystavenie komory	Presne kontrolované SAR, výkon hustota a trvanie	Vysoká reprodukovateľnosť; obmedzená ekologická validita v porovnaní s expozíciou v reálnom svete	Mevissen a kol. 2025, ICNIRP, 2020

GHz: gigahertz; GSM: Globálny systém mobilnej komunikácie; RF-EMF: rádiofrekvenčné elektromagnetické pole; SAR: špecifická miera absorpcie

Typy rádiofrekvenčných elektromagnetických polí a kontext expozície

RF-EMF zahŕňajú neionizujúce elektromagnetické žiarenie v rozsahu 30 kHz – 300 GHz, generované prírodnými aj človekom vytvorenými zdrojmi a široko používané v moderných komunikačných technológiách (ICNIRP, 2020). Rôzne zdroje RF-EMF sa líšia frekvenciou, výkonom, moduláciou a geometriou expozície, čo vedie k variabilným biologickým interakciám (Pooam a kol. 2022). Wi-Fi pracuje primárne na frekvenciách 2,4 GHz a 5 GHz a vyžaruje kontinuálne alebo polokontinuálne žiarenie pozadia, na rozdiel od mobilných telefónov, ktoré produkujú expozície blízkeho poľa (Dongus a kol. 2022, Prlić a kol. 2022). Nové technológie, ako napríklad Wi-Fi 6/6E, sa rozširujú do vyšších frekvenčných pásiem, čo vyvoláva nové otázky týkajúce sa dlhodobej expozície (Prlić a kol. 2022). Experimentálne štúdie využívajú systémy kontrolovanej expozície na reguláciu SAR, hustoty výkonu a trvania, hoci tieto nemusia úplne replikovať podmienky v reálnom svete (ICNIRP 2020, Dongus a kol. 2022). RF-EMF sa tiež líšia v penetrácii tkaniva a absorpcii energie, ktoré sú ovplyvnené vlnovou dĺžkou, vlastnosťami tkaniva a veľkosťou organizmu (Karipidis a kol. 2023). Rozdiely v trvaní expozície, kumulatívnej dávke a individuálnej citlivosti ďalej ovplyvňujú biologické výsledky, čo zdôrazňuje potrebu štandardizovaných protokolov a starostlivého zváženia scenárov z reálneho sveta. Typy RF-EMF žiarenia a úrovne expozície, ktoré sa skúmajú v neurovývojových štúdiách, sú zhrnuté v tabuľke 1.

Biologické mechanizmy vplyvu Wi-Fi a RF-EMF na vyvíjajúci sa mozog

Bolo hlásené, že prenatálne a rané vystavenie sa rádiofrekvenčným elektromagnetickým poliam (RF-EMP) vrátane frekvencií Wi-Fi moduluje neurologický vývoj a správanie prostredníctvom komplexnej súhry molekulárnych a bunkových mechanizmov (Wu a kol., 2023). Vyvíjajúce sa nervové tkanivo je obzvlášť zraniteľné počas kritických období neurogenézy a synaptogenézy a vystavenie sa rádiofrekvenčným elektromagnetickým poliam môže tieto procesy narušiť na viacerých úrovniach (Chen a kol., 2014).

Jeden z primárnych mechanizmov zahŕňa zhoršenie rastu neuritov a tvorbu dendritických chrbtíc. Včasné postnatálne hipokampálne neuróny vystavené vysokofrekvenčnému elektromagnetickému žiareniu vykazujú zníženú dendritickú arborizáciu, zníženú hustotu hubovitých chrbtíc a nižšiu expresiu proteínu postsynaptickej hustoty 95 (PSD95), čo ohrozuje synaptickú konektivitu a funkčnosť siete (Chen a kol. 2014, Kim a kol. 2021, Nowak-Terpilowska a kol. 2023, Kim a kol. 2024). Tieto štrukturálne zmeny sú sprevádzané zmenenou dynamikou cytoskeletu a zníženou reguláciou kľúčových riadiacich molekúl, ako je receptor 5 pre efrín typu A (EPHA5), ako aj downstream efektorov vrátane proteínu viažuceho element cAMP (CREB) a člena rodiny homológov Ras A (RhoA), ktoré sú nevyhnutné pre predlžovanie neuritov a synaptické dozrievanie (Kim a kol. 2021, Eskandani a Zibaii 2024).

Súbežne s tým vystavenie vysokofrekvenčným elektromagnetickým poliam ovplyvňuje zloženie a plasticitu synaptických receptorov. Zmeny v podjednotkách receptorov N-metyl-D-aspartátu (NMDA) a kyseliny α-amino-3-hydroxy-5-metyl-4-izoxazolpropiónovej (AMPA) spolu so zníženými hladinami neuroligínu a neurexínu zhoršujú excitačnú neurotransmisiu a dlhodobú potenciáciu (LTP), čo poskytuje mechanistický základ pre deficity v učení a pamäti pozorované v experimentálnych modeloch. Tieto účinky boli pozorované v štúdiách, kde boli vyvíjajúce sa myši vystavené vysokofrekvenčným elektromagnetickým poliam s frekvenciou 1850 MHz so špecifickou absorpciou (SAR) 4,0 W/kg počas 5 hodín denne počas 4 týždňov (Kim a kol. 2021, Kim a kol. 2024). Elektrofyziologické štúdie primárnych hipokampálnych neurónov ďalej preukázali, že vystavenie vysokofrekvenčnému elektromagnetickému žiareniu s frekvenciou 3 GHz zvyšuje neuronálnu excitabilitu, mení pokojové membránové potenciály a znižuje amplitúdy akčného potenciálu, čo naznačuje priame narušenie funkcie iónových kanálov a neuronálnej signalizácie (Henz a kol. 2018, Pophof a kol. 2021, Echchgadda a kol. 2022). Tieto funkčné poruchy môžu destabilizovať vyvíjajúce sa nervové obvody a prispievať ku kognitívnym a behaviorálnym zmenám.

Oxidačný stres predstavuje ďalšiu ústrednú dráhu, ktorou RF EMP ovplyvňujú neurovývoj. Expozícia zvyšuje hladinu ROS a peroxidáciu lipidov, pričom znižuje antioxidačnú obranu, ako je glutatión (GSH) a superoxiddismutáza (SOD), čím narúša bunkovú redoxnú homeostázu (Yakymenko a kol. 2016, Jeong a kol. 2018, Narayanan a kol. 2019, Hu a kol. 2021, Kilic a kol. 2023). Zvýšené hladiny ROS môžu zhoršiť funkciu mitochondrií, aktivovať signálne kaskády citlivé na stres, ako je mitogénom aktivovaná proteínkináza (MAPK) a nukleárny faktor kappa B (NFκB), a spustiť apoptózu v nervových progenitorových bunkách. Mitochondriami sprostredkované apoptotické dráhy zahŕňajú zvýšenú reguláciu proapoptotických proteínov Bax a kaspázy-3 a zníženie regulácie antiapoptotického Bcl-2, čím sa znižujú neuronálne populácie v kritických oblastiach mozgu, ako je hipokampus a kôra (Kilic a kol. 2023, Kim a kol. 2024). Doplnkové štúdie ukázali, že vystavenie vysokofrekvenčným elektromagnetickým poliam tiež narúša procesy opravy DNA v placentárnom a nervovom tkanive, čo môže ďalej zhoršovať vývojovú zraniteľnosť (Vafaei a kol. 2020).

Neurozápalové mechanizmy sú čoraz viac uznávané ako modulátory neurovývojových zmien vyvolaných RF EMP. Potomstvo vystavené RF EMP v prenatálnom alebo ranom veku vykazuje aktiváciu mikroglií a zvýšenú expresiu prozápalových cytokínov vrátane TNF-α a IL-6 v hipokampálnych a kortikálnych oblastiach, čo môže synergicky pôsobiť s oxidačným stresom a narušiť synaptickú plasticitu a neuronálnu konektivitu (Foster a Moulder, 2013, Mevissen a kol. 2025). Tieto molekulárne a bunkové zmeny spoločne prispievajú k dlhodobým poruchám učenia, pamäte, motorickej koordinácie a úzkostnému správaniu pozorovanému na zvieracích modeloch.

Celkovo dôkazy naznačujú, že vystavenie Wi-Fi a vysokofrekvenčným elektromagnetickým poliam počas kritických vývojových období môže narušiť neuronálnu morfológiu, synaptickú konektivitu, elektrofyziologické vlastnosti, oxidačnú rovnováhu, apoptotické dráhy a neurozápalovú signalizáciu. Tieto mechanizmy fungujú spoločne a modulujú tvorbu a funkciu nervových obvodov, čím poskytujú mechanistický základ pre behaviorálne a kognitívne deficity zdokumentované v štúdiách prenatálnej a rannej expozície. Závažnosť a povaha týchto účinkov

sú ovplyvnené parametrami expozície, načasovaním vývoja a ďalšími environmentálnymi stresormi, čo zdôrazňuje dôležitosť štandardizovaných experimentálnych protokolov pre úplné objasnenie neurobiologického vplyvu vysokofrekvenčných elektromagnetických polí (Chen a kol. 2014, Jeong a kol. 2018, Narayanan a kol. 2019, Hu a kol. 2021, Nowak-Terpilowska a kol. 2023).

Tabuľka 2. Molekulárne a bunkové mechanizmy účinkov RF-EMF na vyvíjajúci sa mozog

Mechanizmus	Molekulárne/bunkové Zmeny	Postihnutý mozog Procesy	Pozorované Výsledky	Kľúčové referencie
Poškodený neurit Výrastok a Synaptogenéza	↓ Dendritický arborizácia, ↓ hríbová chrbtica hustota, ↓ PSD95, ↓ EPHA5, ↓ CREB, ↓ RhoA	Neuronálny diferenciácia, tvorba synapsií	Znížená synaptická konektivita, narušená sieť funkcia	Chen a kol. 2014, Kim a kol. 2021, Nowak-Terpilowska a kol. 2023, Kim a kol. 2024
Zmenená synaptika Plasticita	Zmeny v receptoroch NMDA a AMPA podjednotky, ↓ neuroligín a neurexín	Dlhodobé potenciácia (LTP), excitačný neurotransmisia	Učenie a poruchy pamäti	Kim a spol. 2021, Kim a kol. 2024
Elektrofyziologické Narušenie	↑ neuronálna excitabilita, zmenený pokojový stav membránový potenciál, ↓ akčný potenciál amplitúda	Iónový kanál funkcia, neuronálna signalizácia	Nestabilita obvodu, zmenené nervové komunikácia	Henz a kol. 2018, Echchgadda a kol. 2022, Pophof a kol. 2021
Oxidačný stres	↑ ROS, ↑ lipidov peroxidácia, ↓ GSH, ↓ SOD	Bunková redoxná reakcia rovnováha, mitochondriálny funkcia	Poškodenie buniek, zhoršený neurovývoj	Jakymenko a kol. 2016, Jeong a kol. 2018, Narayanan et al. 2019, Hu a kol. 2021, Kilic a kol. 2023
Mitochondriálny Dysfunkcia a Apoptóza	↑ Bax, ↑ kaspáza-3, ↓ Bcl-2	Prežitie buniek cesty	Zvýšené neuronálne bunková smrť (hipokampus, kôra)	Kilic a kol. 2023, Kim a kol. 2024
Poškodenie DNA a Oprava poškodenia	Narušenie DNA opravné mechanizmy	Genomická stabilita	Zvýšené vývojový zraniteľnosť	Vafaei a kol. 2020
Neurozápal	Aktivácia mikroglií, ↑ TNF-α, ↑ IL-6	Imunitná signalizácia v mozgu, synaptické modulácia	Narušené konektivita, behaviorálny úpravy	Foster a Moulder, 2013, Mevissen a kol. 2025
Cytoskeletálny Úpravy	Zmeny v dynamike cytoskeletu	Predĺženie neuritov, štrukturálna integrita	Poškodené neuronálne morfológia	Kim a kol. 2021, Eskandani a Zibaii, 2024
Kombinované/Systémové Úrovňové efekty	Interakcia oxidačného stresu, zápalu, apoptóza, synaptická dysfunkcia	Neurónový obvod formácia a dozrievanie	Kognitívne deficity, úzkostlivý správanie, motorika poruchy	Wu a kol. 2023, Nowak-Terpilowska a kol. 2023

AMPA (kyselina α-amino-3-hydroxy-5-metyl-4-izoxazolpropiónová); Bax (proteín X asociovaný s Bcl-2); Bcl-2 (B-bunkový lymfóm 2); CREB (proteín viažuci cAMP responzívny element); EPHA5 (receptor efrínu typu A 5); GSH (glutatión); IL-6 (interleukín-6); LTP (dlhodobá potenciácia); NMDA (N-metyl-daspartát); PSD95 (proteín postsynaptickej hustoty 95); RF-EMF (rádiofrekvenčné elektromagnetické pole); RhoA (člen rodiny A homológu Ras); ROS (reaktívne formy kyslíka); SOD (superoxiddismutáza); TNF-α (tumor nekrotizujúci faktor alfa)

Kľúčové molekulárne a bunkové účinky vystavenia RF-EMF na vyvíjajúci sa mozog sú zhrnuté v tabuľke 2, pričom sa zdôrazňujú mechanizmy, ako je oxidačný stres, apoptóza, porucha synaptickej plasticity a neurozápal, ktoré prispievajú k neurovývojovým a behaviorálnym výsledkom.

Vývojové, kognitívne a behaviorálne následky prenatálnej a ranej expozície RF-EMF

Účinky na embryonálny/neurovývojový vývoj

Bolo hlásené, že prenatálne a skoré postnatálne vystavenie sa Wi-Fi a iným RF-EMP ovplyvňuje vývoj embrya a neurovývoj prostredníctvom viacerých bunkových a molekulárnych dráh. Experimentálne štúdie naznačujú, že oxidačný stres je kľúčovým mediátorom týchto účinkov. Prenatálne vystavenie sa Wi-Fi s frekvenciou 2,45 GHz u potkanov významne zvýšilo ROS a peroxidáciu lipidov v mozgovom aj pečeňovom tkanive potomstva, pričom znížilo kľúčové antioxidanty, ako sú GSH a SOD, čo naznačuje zvýšenú zraniteľnosť vyvíjajúceho sa nervového tkaniva (Çelik a kol. 2016). Doplnkové štúdie preukázali, že krátkodobé vystavenie sa frekvencii 2,4 GHz zvýšilo ROS a apoptózu v neuronálnych bunkách SH-SY5Y a vo vyvíjajúcich sa mozgoch kuracích embryí, čo naznačuje, že oxidačný stres priamo ovplyvňuje životaschopnosť buniek počas kritických vývojových okien (Deena a kol. 2025). Podobne vystavenie sa elektromagnetickým vlnám Globálneho systému pre mobilnú komunikáciu (GSM EMW) v pečeni plodu potkana zvýšilo markery oxidačného stresu, čo ďalej podporuje citlivosť tkanív plodu na RF-EMP (Salameh a kol. 2023).

Expozícia RF-EMF môže tiež narušiť mechanizmy opravy DNA a vyvolať apoptózu, ako sa pozorovalo u placent gravidných myší, kde vystavenie Wi-Fi znížilo expresiu génov na opravu DNA a zvýšilo apoptotické markery, čo potenciálne ohrozilo vývoj plodu (Vafaei a kol. 2020). Môže byť zapojená aj epigenetická regulácia, pričom dôkazy naznačujú, že elektromagnetické polia môžu modulovať expresiu génov a vývojové programovanie, čo potenciálne ovplyvňuje neurobehaviorálne výsledky (Sage a Burgio, 2018).

Na neurovývojovej úrovni sa preukázalo, že vysokofrekvenčné elektromagnetické polia narúšajú neurogenézu a synaptickú plasticitu, ktoré sú kľúčové pre kognitívne a behaviorálne funkcie. Potkany vystavené prenatálnemu mikrovlnnému žiareniu s frekvenciou 2,45 GHz vykazovali dysfunkciu hipokampu, zhoršenú dlhodobú potenciáciu a deficity v úlohách učenia a pamäte, čo naznačuje narušenie tvorby nervových obvodov (Karimi a kol., 2018). Naproti tomu sa ukázalo, že skoré postnatálne vystavenie rádiofrekvencii u myší indukuje synaptickú dysfunkciu v kortikálnych neurónoch, čo vedie k zmenám učenia a pamäte počas neonatálneho obdobia (Kim a kol., 2024). Tieto neurovývojové deficity zodpovedajú zníženému počtu granulárnych buniek v gyrus dentatus hipokampu, čo naznačuje zhoršenú neurogenézu v behaviorálnych výsledkoch súvisiacich s pamäťou a učením (Sienkiewicz a kol., 2005, Odacı a kol., 2008). Elektrofyziologické štúdie primárnych hipokampálnych neurónov ďalej preukázali zmenenú excitabilitu po vystavení rádiofrekvenčnému žiareniu s frekvenciou 3,0 GHz, čo naznačuje funkčné zmeny na neurónovej úrovni, ktoré môžu byť základom kognitívnych deficitov (Echchgadda a kol. 2022).

Prenatálna a ranná expozícia Wi-Fi tiež ovplyvnila neurovývojové míľniky a správanie u potkanov, vrátane jemných motorických a kognitívnych zmien, potenciálne sprostredkovaných oxidačným stresom, apoptózou a narušeným synaptickým dozrievaním (Wu a kol. 2023). Zmenená expresia neurotransmiterových receptorov hipokampu a synaptických proteínov sú základom zmien v kognitívnom spracovaní, pozornosti a exploračnom správaní (Li a kol. 2020), zatiaľ čo zmeny hladín BDNF a iných neurotrofických faktorov naznačujú narušenie synaptickej plasticity a vývoja neurónovej siete (DastAmooz a kol. 2023).

V zvieracích modeloch boli hlásené transgeneračné a dlhodobé účinky RF-EMP. Systematické prehľady a metaanalýzy naznačujú, že vystavenie počas kritických vývojových období môže zvýšiť riziko štrukturálnych a funkčných abnormalít u potomstva vrátane spomalenia rastu a zmenených neurobehaviorálnych výsledkov (Kashani a kol. 2023, Lamzouri a kol. 2025). Tieto zistenia potvrdzujú štúdie na zebričkách, kde vystavenie rodičov RF-EMP zhoršilo vývoj a správanie potomstva, čo zdôrazňuje potenciál dlhodobých a viacgeneračných účinkov (Wu a kol. 2023).

Tieto štúdie spoločne poskytujú silné dôkazy o tom, že vystavenie sa Wi-Fi a RF-EMF počas embryonálneho a skorého postnatálneho vývoja môže modulovať oxidačný stres, opravu DNA, apoptózu, neurogenézu, synaptické nervy.

plasticitu a neurotransmisiu, čím sa vytvára mechanické prepojenie s pozorovanými zmenami v správaní a kognitívnymi funkciami. Závažnosť a povaha týchto účinkov sú ovplyvnené frekvenciou expozície, trvaním, vývojovým štádiom a prítomnosťou ďalších environmentálnych stresorov.

Niektoré štúdie uvádzajú minimálne, neutrálne alebo dokonca adaptívne účinky vystavenia sa vývojovým RF-EMF. Napríklad Wu a kol. (2023) pozorovali zlepšené priestorové učenie a pamäť u samčích potomkov spolu so zvýšenými hladinami BDNF a p-CREB v hipokampe bez dôkazov neurodegenerácie (Wu a kol., 2023). Podobne Poulletier de Gannes a kol. (2012) uviedli, že nezaznamenali žiadnu významnú prenatálnu alebo postnatálnu vývojovú toxicitu u potkanov vystavených Wi-Fi pri štandardných úrovniach SAR. Boli tiež zdokumentované adaptívne bunkové reakcie, ako napríklad zvýšená aktivita antioxidačných enzýmov po vystavení sa nízkym úrovniam RF, čo naznačuje potenciálne ochranné mechanizmy proti oxidačnému stresu (Mortazavi a kol., 2017). U myší Zheng a kol. (2023) zistili minimálne účinky na priestorovú pamäť a obmedzené zmeny v správaní podobnom úzkosti po vystavení sa EMR s frekvenciou 2650 MHz, bez vplyvu na správanie súvisiace s depresiou. Tieto zistenia zdôrazňujú, že účinky RF-EMF závisia od kontextu a môžu sa líšiť v závislosti od parametrov expozície, načasovania vývoja a pohlavia.

Kognitívne a behaviorálne účinky

Prenatálne a rané vystavenie RF-EMP, vrátane Wi-Fi frekvencií, bolo skúmané z hľadiska potenciálnych vplyvov na vývoj správania na zvieracích modeloch. Hoci literatúra vykazuje heterogenitu výsledkov, experimentálne štúdie poskytujú dôkazy o tom, že vývojové vystavenie RF-EMP môže modulovať kognitívne, motorické a emocionálne správanie u potomstva prostredníctvom neurobiologických zmien (Broom a kol. 2019, Li a kol. 2020, Wu a kol. 2023). Hoci viaceré štúdie uvádzajú zmeny správania po prenatálnom a ranom vystavení RF-EMP, výsledky sa líšia v závislosti od druhu, frekvencie expozície, trvania a metód hodnotenia. Preto by sa literatúra mala interpretovať s dôkladným zvážením týchto metodologických faktorov.

Experimentálne dôkazy naznačujú, že prenatálne vystavenie RF-EMP môže zmeniť procesy učenia a pamäte. Li a kol. (2020) preukázali, že potkany vystavené Wi-Fi RF-EMP s frekvenciami 1800 MHz aj 2,4 GHz vykazovali zmeny v expresii podjednotiek hipokampálneho N-metyl-D-aspartátového receptora (NMDAR) so zníženou reguláciou NR2A a NR2B a zvýšenou reguláciou NR1, NR2C, NR2D, NR3A a NR3B, čo sú vzorce spojené so zmeneným synaptickým prenosom a kognitívnymi funkciami. Tieto molekulárne zmeny boli sprevádzané behaviorálnymi rozdielmi vo výkone v Y-bludisku a otvorenom poli, vrátane zmenenej dĺžky dráhy a vzorcov prieskumu, čo naznačuje zhoršené priestorové poznávanie a pozornosť (Li a kol. 2020). Iné štúdie však pozorovali minimálny alebo žiadny vplyv na učenie a pamäť, čo zdôrazňuje variabilitu medzi modelmi a testovacími paradigmami (Wu a kol. 2023, Zheng a kol. 2023). Tieto kontrastné výsledky naznačujú, že kognitívne výsledky môžu byť vysoko závislé od intenzity expozície, načasovania a reakcií špecifických pre pohlavie. Systematické prehľady štúdií RF-EMF na zvieratách poukazujú na možné škodlivé účinky na učenie a pamäť, hoci istota týchto dôkazov je nízka kvôli metodologickej variabilite. Metaanalýzy naznačujú, že vystavenie RF-EMF in utero môže mierne zhoršiť učenie sa v bludisku a zvýšiť latenciu úniku u potomstva, čo naznačuje zhoršené schopnosti priestorového učenia (Cordelli a kol. 2023). Okrem toho, novorodené potkany vystavené RF-EMF vykazujú znížené hladiny mozgového neurotrofického faktora (BDNF) v hipokampe, kritického mediátora synaptickej plasticity, učenia a pamäte, čo poskytuje mechanistickú vierohodnosť pre pozorované kognitívne deficity (DastAmooz a kol. 2023).

Okrem týchto molekulárnych mechanizmov niekoľko štúdií dokumentovalo zmeny správania vo viacerých doménach po expozícii RF-EMF počas vývoja. Aldad a kol. (2012) preukázali, že vystavenie plodu RF žiareniu z mobilných telefónov viedlo u myší k hyperaktivite, zhoršenému učeniu a zmenenému správaniu podobnému úzkosti, čo je spojené s narušením glutamátergickej signalizácie v prefrontálnom kortexe. Je pozoruhodné, že niektoré výskumy zaznamenali iba malé zmeny v správaní podobnom úzkosti alebo dokonca adaptívne výsledky, pričom zdôraznili, že účinky RF EMF nie sú univerzálne škodlivé a môžu sa líšiť v závislosti od experimentálneho dizajnu a druhu (Ishihara a kol. 2020, Pophof a kol. 2024). Podobne Zhang a kol. (2015) uviedli, že prenatálne vystavenie mikrovlnám zhoršilo exploračné správanie a priestorové učenie u potomstva. Postnatálne a adolescentné vystavenie tiež vyvoláva pretrvávajúce účinky: Zhang a kol. (2017)

pozorovali deficity v priestorovej pamäti a zvýšené správanie podobné úzkosti, zatiaľ čo Wang a kol. (2017) preukázali poruchy v pamäti rozpoznávania nových objektov, čo odráža deficity v asociatívnom učení. Chronické vystavenie sa Wi-Fi sa navyše spája so zmenami v exploračnej aktivite a emocionálnej regulácii (Sharaf a kol., 2019). Prehľad literatúry od Attaha a kol. (2022) ďalej potvrdzuje, že vystavenie RF-EMP môže ovplyvniť učenie, pamäť, pohybovú aktivitu a správanie súvisiace so stresom na viacerých zvieracích modeloch, čo poskytuje konvergentné dôkazy o rozsiahlych neurobehaviorálnych vplyvoch vystavenia RF-EMP na vývoj.

Tieto zistenia naznačujú, že vystavenie RF-EMP vo vývojovom štádiu môže ovplyvniť široké spektrum kognitívneho, emocionálneho a motorického správania, pričom vystavenie sa RF-EMP v prenatálnom aj ranom štádiu života môže spôsobiť trvalé neurobehaviorálne zmeny. Napriek určitej heterogenite v literatúre, zhodné dôkazy zdôrazňujú dôležitosť zváženia načasovania, trvania a intenzity expozície pri hodnotení potenciálnych behaviorálnych dôsledkov RF-EMP. Celkovo literatúra poukazuje na komplexný a kontextovo závislý vzorec účinkov. Variabilita môže vyplývať z rozdielov vo frekvencii RF, trvaní expozície, hodnotách SAR, vývojovom štádiu pri expozícii, pohlaví potomstva a protokoloch behaviorálneho testovania. Na vyvodenie vyvážených záverov týkajúcich sa potenciálnych neurobehaviorálnych vplyvov je potrebné holistické hodnotenie týchto faktorov.

Je pozoruhodné, že nie všetky štúdie uvádzajú škodlivé účinky. Pophof a kol. (2024) nezistili žiadne významné zmeny v pozornosti, rýchlosti spracovania informácií alebo motorickom výkone po krátkodobom vystavení RF-EMF u ľudí. Podobne Ishihara a kol. (2020) uviedli minimálne účinky RF-EMF na kognitívne funkcie u detí a dospievajúcich, pričom štatisticky významné súvislosti boli obmedzené a závislé od kontextu. Niektoré štúdie na zvieratách tiež pozorovali adaptívne alebo neutrálne výsledky: Wu a kol. (2023) uviedli zlepšené priestorové učenie a pamäť u samčích potomkov spolu so zvýšenými hladinami BDNF a p-CREB v hipokampe bez dôkazov neurodegenerácie. Zheng a kol. (2023) zistili iba minimálne účinky na priestorovú pamäť a obmedzené zmeny správania podobné úzkosti u myší vystavených 2650 MHz EMR, bez vplyvu na správanie súvisiace s depresiou. Okrem toho Mortazavi a kol. (2017) preukázali, že vystavenie nízkoúrovňovému RF môže zvýšiť aktivitu antioxidačných enzýmov, čo naznačuje potenciálne ochranné bunkové reakcie. Tieto zistenia zdôrazňujú, že účinky RF-EMF na kognitívne a behaviorálne výsledky závisia od kontextu a môžu sa líšiť v závislosti od intenzity expozície, vývojového štádia a biologického pohlavia.

Motorické funkcie a prieskumné správanie

Vývojová expozícia RF-EMF ovplyvňuje aj motorickú aktivitu a prieskumné správanie. Niekoľko štúdií uvádza zmenenú lokomotorickú aktivitu, pričom vystavení potomkovia vykazovali rozdiely v pohybe na otvorenom poli, aktivite v centrálnej zóne a čase strávenom v stacionárnom stave v porovnaní s kontrolnou skupinou. V skupine vystavenej frekvencii 1800 MHz + Wi-Fi potomkovia vykazovali zvýšenú priemernú rýchlosť a predĺžené stacionárne obdobia v chybových ramenách bludiska, čo naznačuje zmeny v prieskumných a motorických stratégiách (Li a kol., 2020).

Iné práce naznačujú, že prenatálne vystavenie vysokofrekvenčným elektromagnetickým poliam môže ovplyvniť motorickú koordináciu a rovnováhu, najmä v kombinácii s materskými stresormi. Napríklad Hosseini a kol. (2022) preukázali, že úzkostné správanie vyvolané materským stresom u potomkov samíc potkanov bolo zhoršené žiarením elektromagnetického poľa. Podobne Cordelli a kol. (2024) vykonali systematický prehľad, ktorý ukázal, že vystavenie vysokofrekvenčným elektromagnetickým poliam môže ovplyvniť samčiu plodnosť u cicavcov okrem človeka a ľudských spermií in vitro, pričom zdôraznil širšie biologické účinky vysokofrekvenčných elektromagnetických polí, ktoré môžu interagovať s prenatálnymi stresormi. Potomkovia potkanov vystavení Wi-Fi sieti s frekvenciou 2,45 GHz počas tehotenstva vykazovali zmenené neuromotorické dozrievanie a výkon v testoch lúčov alebo koordinácie v porovnaní s kontrolnou skupinou, hoci výsledky sa môžu líšiť v závislosti od intenzity expozície a stresového kontextu (Othman a kol. 2017).

Tieto štúdie naznačujú, že vystavenie sa vývojovému RF EMF môže modulovať motorickú aktivitu a prieskumné správanie, hoci tieto účinky nie sú konzistentné. Rozdiely v pohybe, nehybnosti a koordinácii zrejme závisia od frekvencie expozície, intenzity a prítomnosti materských alebo environmentálnych stresorov. Napríklad zvýšená rýchlosť spolu s predĺženým časom v pokoji (Li a kol., 2020) naznačuje, že RF EMF môžu skôr meniť stratégie prieskumu, než len zvyšovať alebo potláčať aktivitu. Podobne aj interakcia medzi prenatálnym vystavením sa RF EMF a materským stresom (Hosseini a kol., 2022).

zdôrazňuje, že behaviorálne výsledky sa môžu zosilniť v stresových podmienkach. Celkovo tieto zistenia zdôrazňujú komplexnú a kontextovo závislú povahu účinkov RF EMF na motorické a exploratívne správanie, čo naznačuje, že k pozorovaným zmenám prispievajú tak priame neurovývojové vplyvy, ako aj nepriame systémové faktory.

Je dôležité poznamenať, že medzi štúdiami existuje určitá variabilita, pokiaľ ide o smer a rozsah motorických a exploračných účinkov. Tieto rozdiely môžu byť dôsledkom zmien v expozičných parametroch (frekvencia, intenzita, trvanie), experimentálnom dizajne, vývojovom štádiu, pohlaví potomstva a prítomnosti materských alebo environmentálnych stresorov. Napríklad, zatiaľ čo niektoré štúdie uvádzajú zvýšenú pohybovú aktivitu, iné pozorujú predĺženú nehybnosť alebo zmenenú koordináciu. To naznačuje, že vysokofrekvenčné elektromagnetické pole nevyvoláva jednotné účinky a že pozorované výsledky pravdepodobne odrážajú komplexné interakcie medzi priamymi neurovývojovými účinkami a nepriamymi systémovými alebo kontextovými vplyvmi.

Emocionálne a úzkostné správanie

Behaviorálne testy emocionality, ako sú testy s otvoreným poľom a vyvýšeným bludiskom, odhaľujú zmiešané dôkazy o úzkostných reakciách po vystavení sa vývojovému RF-EMP. Niektoré štúdie naznačujú zvýšené úzkostné správanie a zníženú exploratívnu aktivitu u potomstva vystaveného Wi-Fi alebo RF-EMP, zatiaľ čo iné nachádzajú minimálne alebo nekonzistentné účinky, pričom zdôrazňujú vplyv expozičných parametrov, trvania a testovacích podmienok (Cordelli a kol. 2023).

Experimentálne dôkazy podporujú tvrdenie, že vystavenie extrémne nízkofrekvenčným EMF (ELF-EMF) môže vyvolať anxiogénne účinky. Djordjevic a kol. (2017) uviedli, že potkany vystavené ELF-EMF vykazovali zvýšené správanie podobné úzkosti, so skráteným časom stráveným v otvorených ramenách vyvýšeného plusového bludiska a menším počtom vstupov do stredu otvoreného poľa. Tieto zmeny správania boli spojené so zvýšeným oxidačným stresom, čo naznačuje potenciálny neurobiologický mechanizmus, ktorý je základom úzkosti vyvolanej EMF.

Naopak, niekoľko štúdií nezistilo žiadne významné zmeny v správaní súvisiacom s úzkosťou po vystavení sa elektromagnetickým poliam. Cosquer a kol. (2005) preukázali, že vystavenie celého tela elektromagnetickým poliam s frekvenciou 2,45 GHz nezmenilo výkonnosť potkanov v zdvíhanom plus bludisku a Salunke a kol. (2015) zistili, že vystavenie vysokofrekvenčným elektromagnetickým poliam nemalo merateľný vplyv na prieskum otvoreného poľa alebo správanie podobné úzkosti u myší. Tieto zistenia zdôrazňujú, že existencia a rozsah účinkov podobných úzkosti sú vysoko závislé od typu expozície, intenzity a protokolov behaviorálneho testovania.

Nedávne dôkazy tiež začali odhaľovať molekulárne mechanizmy, ktoré sú základom úzkosti vyvolanej EMF. Xue a kol. (2024) ukázali, že vystavenie dvojfrekvenčným EMF aktivovalo endokanabinoidný systém, čo prispelo k rozvoju správania podobného úzkosti u myší. Farmakologická modulácia tohto systému zmiernila zmeny správania, čím sa zdôraznila špecifická neurobiologická dráha, prostredníctvom ktorej môžu EMF ovplyvňovať emocionálnu reguláciu.

Okrem toho, stres matky môže zhoršiť úzkostné správanie u potomstva vystaveného RF-EMP, pričom samice mláďat vykazujú vyššiu zraniteľnosť, čo naznačuje neurobehaviorálne účinky špecifické pre pohlavie (Hosseini a kol. 2022, Hosseini a Kianifard 2023). Tieto zistenia spoločne ukazujú, že vystavenie RF-EMP vo vývoji môže modulovať emocionálne a úzkostné správanie, ale tieto účinky sú heterogénne a ovplyvnené parametrami expozície, biologickým pohlavím, vývojovým štádiom a základnými molekulárnymi mechanizmami.

Podobne, nezrovnalosti v hlásených úzkostných reakciách môžu odrážať rozdiely v type expozície, intenzite, trvaní, paradigmách behaviorálneho testovania a zraniteľnosti špecifickej pre pohlavie. Niektoré štúdie ukazujú zvýšenú úzkosť a znížené skúmanie, zatiaľ čo iné uvádzajú minimálne alebo žiadne účinky. Tieto nezrovnalosti zdôrazňujú, že emocionálne výsledky vyvolané EMP sú vysoko závislé od kontextu a porovnávacia interpretácia naznačuje, že k heterogénnym behaviorálnym výsledkom pozorovaným v rôznych štúdiách prispievajú tak molekulárne mechanizmy (napr. oxidačný stres, aktivácia endokanabinoidov), ako aj environmentálne alebo materské faktory.

Tabuľka 3. Behaviorálne účinky prenatálneho a raného vystavenia RF-EMF

Behaviorálne Doména	Pozorované účinky	Experimentálne Dôkazy	Základné mechanizmy	Kľúčové referencie
Kognitívne Funkcia (Učenie a Pamäť)	Zhoršené priestorové vnímanie učenie, znížené pamäť výkon	Nedostatky v bludisku úlohy (napr. bludisko v tvare Y, Morrisov vodný bludisko) u exponovaných potomkov	Synaptická plasticita poškodenie, zmenené signalizácia NMDA/AMPA, oxidačný stres	Kim a spol. 2021, Kim a kol. 2024, Wu a kol. 2023
Funkcia motora a koordinácia	Znížený motor koordinácia, zmenený pohybový systém aktivita	Zhoršený výkon v rotarode a lokomočné testy	Cerebelárna a kortikálna dysfunkcia, strata neurónov	Narayanan a kol. 2019, Hu a kol. 2021
Úzkostlivosť Správanie (Zvýšené)	↑ Úzkostné správanie, ↓ prieskum	Skrátený čas v otvorených ramenách (zvýšené plus bludisko), menej stredísk záznamy (otvorené pole)	Oxidačný stres, neurozápal	Djordjevič a kol. 2017, Cordelli a ďalší al. 2023
Úzkostlivosť Správanie (Žiadne/Minimálne Účinok)	Žiadne významné zmena správania	Normálny výkon v otvorené pole a vyvýšené plus bludisko	Nedostatok detekovateľných neurobiologické narušenie pri určitej expozícii podmienky	Cosquer a kol. 2005, Salunke a ďalší al. 2015
Emocionálne Regulácia (Mechanistický Dôkazy)	Úzkostlivosť správanie spojené s molekulárne zmeny	Zmeny správania po dvojitom frekvencia elektromagnetického poľa vystavenie	Endokanabinoidný systém aktivácia	Xue a kol. 2024
Pohlavne špecifické Účinky	Samice ukazujú vyššia úzkosť zraniteľnosť	Zvýšená úzkosť reakcie u žien potomstvo	Hormonálne vplyvy, citlivosť na stres	Hosseini a kol. 2022, Hosseini a Kianifard, 2023
Materská a Environmentálne Modulácia	Zhoršené behaviorálny úpravy	Silnejšia úzkosť správanie pod materský stres podmienky	Interakcia stresu a EMF, vývoj programovanie	Hosseini a kol. 2022
Celkové správanie Variabilita	Zmiešané a nekonzistentný zistenia naprieč štúdie	Rozdiely medzi druh, expozícia protokoly a behaviorálne testy	Interakcia oxidačného stresu, synaptických zmien a faktorov prostredia	Cordelli a kol. 2023, Kashani a ďalší al. 2023

AMPA (kyselina α-amino-3-hydroxy-5-metyl-4-izoxazolpropiónová); BDNF (mozgový neurotrofický faktor); GHz (gigahertz); GSH (glutatión); IL-6 (interleukín-6); LTP (dlhodobá potenciácia); NMDA (N-metyl-D-aspartát); RF-EMF (rádiofrekvenčné elektromagnetické pole); ROS (reaktívne formy kyslíka); SOD (superoxiddismutáza); TNF-α (tumor nekrotizujúci faktor alfa)

Celkové dôkazy a neistoty

Systematické analýzy štúdií RF EMF v prenatálnom období a v ranom veku zdôrazňujú značnú heterogenitu v expozičných parametroch, zvieracích modeloch, behaviorálnych hodnoteniach a dizajne štúdie (Cordelli a kol. 2023, Kashani a kol. 2023). Frekvencie, intenzity, trvanie a typ vlny expozície sa medzi štúdiami značne líšia, čo komplikuje priame porovnania. Rozdiely medzi druhmi a pohlaviami spolu s variáciami v načasovaní vývoja ďalej prispievajú k nekonzistentným výsledkom. Behaviorálne paradigmy, ako sú otvorené pole, vyvýšené plus bludisko, Y bludisko alebo testy motorickej koordinácie, majú rôznu citlivosť a interpretačné rámce, čo vedie k variabilným zisteniam v rôznych štúdiách. Okrem toho, stres matky, environmentálny kontext a kumulatívne expozičné faktory môžu interagovať s účinkami RF EMF, čím zosilňujú alebo zmierňujú pozorované výsledky (Hosseini a kol. 2022, Hosseini a Kianifard 2023). Tieto metodologické a biologické zdroje variability spoločne obmedzujú dôveru v hlásené účinky, najmä pokiaľ ide o učenie, pamäť, motorické funkcie a správanie podobné úzkosti. Budúce štúdie by mali prijať štandardizované metódy.

expozičné protokoly, zahŕňajú pohlavie a vývojové štádium ako kľúčové premenné a kombinujú behaviorálne, molekulárne a elektrofyziologické koncové body s cieľom zlepšiť reprodukovateľnosť a mechanistické pochopenie účinkov RF EMF na neurologický vývoj.

Ako je uvedené v tabuľke 3, prenatálna a ranná expozícia RF-EMF ovplyvňuje kognitívne, motorické, koordinačné a emocionálne/úzkostné správanie, pričom konzistentne pôsobí na neurobiologické systémy, ktoré sú základom kognície a emocionálnej regulácie.

Interpretácia vývojových účinkov RF-EMF

Ako už bolo uvedené, prenatálne a rané vystavenie RF-EMP môže modulovať neurologický vývoj, kognitívne funkcie, motorickú aktivitu a emocionálne správanie u zvieracích modelov. Táto recenzia zdôrazňuje, že prenatálne a rané vystavenie Wi-Fi a iným RF-EMP môže mať molekulárne aj behaviorálne účinky na neurologický vývoj. Mechanistické štúdie naznačujú, že vystavenie ovplyvňuje neurologický vývoj prostredníctvom viacvrstvovej kaskády udalostí: oxidačný stres, zvýšená produkcia ROS, poškodenie DNA a apoptóza, po ktorých nasleduje porucha synaptickej plasticity, strata dendritických chrbtíc a neurozápal, čo v konečnom dôsledku prispieva k zmenám v učení, pamäti, motorických funkciách a správaní podobnom úzkosti (Kim a kol. 2021, Echchgadda a kol. 2022, Kilic a kol. 2023, Eskandani a Zibaii, 2024). Napríklad pozorované zmeny v podjednotkách receptorov NMDA a AMPA narúšajú synaptický prenos, čo poskytuje mechanistický základ pre zmenený výkon v testoch Y-bludiska a otvoreného poľa (Li a kol. 2020, DastAmooz a kol. 2023). Pozorované deficity v učení a pamäti, ako je opísané vyššie, sú v súlade so synaptickou dysfunkciou a zhoršenou neurogenézou.

Rozdiely v literatúre možno do značnej miery pripísať rozdielom v trvaní expozície, frekvencii, intenzite, pohlaví a druhu. Zmenené lokomotorické a exploratívne správanie ďalej podporuje predtým opísané vplyvy na neurovývoj. Niektoré štúdie uvádzajú minimálne zmeny správania po krátkodobej alebo nízkointenzívnej expozícii RF-EMF, zatiaľ čo dlhodobá alebo vysokointenzívna expozícia je spojená s výraznejšími kognitívnymi a motorickými deficitmi (Cordelli a kol. 2023, Othman a kol. 2017). Rozdiely špecifické pre pohlavie sú významné, samičie potomstvo často vykazuje vyššiu náchylnosť na správanie podobné úzkosti po expozícii (Hosseini a kol. 2022, Hosseini & Kianifard, 2023). Zdá sa, že správanie podobné úzkosti súvisí s oxidačným stresom v ranom veku a synaptickými zmenami opísanými predtým. Druhové rozdiely ďalej komplikujú interpretáciu, pretože účinky pozorované u hlodavčích modelov sa nemusia priamo preniesť na zebričky alebo iné modelové organizmy kvôli rozdielom v neurovývojových dráhach a metódach hodnotenia správania (Wu a kol. 2023, Mehta a kol. 2025).

Pozorovacie štúdie na ľuďoch

Dôkazy zo štúdií na ľuďoch skúmajúcich vystavenie vysokofrekvenčným elektromagnetickým poliam a používanie digitálnych zariadení u detí a dospievajúcich ukazujú heterogénne výsledky v behaviorálnych, kognitívnych a neurovývojových oblastiach. Napríklad Guxens a kol. (2019) uviedli, že vyššie vysokofrekvenčné elektromagnetické polia z mobilných základňových staníc v domácnostiach boli spojené so zvýšenými emocionálnymi symptómami hlásenými matkami u päťročných detí, zatiaľ čo prítomnosť bezdrôtových telefónov doma bola spojená s nižšou pravdepodobnosťou určitých problémov so správaním (Guxens a kol. 2019). Podobne Ishihara a kol. (2020) preskúmali 12 štúdií o vysokofrekvenčných vysokofrekvenčných elektromagnetických poliach a kognícii u účastníkov vo veku 4 – 17 rokov a zistili, že 86 % hlásených súvislostí nebolo štatisticky významných, hoci potenciálne negatívne účinky boli pozorované za obmedzených podmienok, ako je objektívne meraná expozícia u starších detí (Ishihara a kol. 2020). V súlade s týmito zisteniami Divan a kol. (2008) zistili, že používanie mobilných telefónov matkou prenatálne a postnatálne bolo u dánskych detí spojené s vyššou pravdepodobnosťou problémov so správaním, vrátane emocionálnych problémov a hyperaktivity (Divan a kol. 2008).

Okrem toho Birks a kol. (2020) modelovali integrovanú dávku rádiofrekvenčného žiarenia u 8 358 európskych detí a dospievajúcich a ukázali, že hovory z mobilných telefónov v sieťach 2G boli hlavnými prispievateľmi k dávke rádiofrekvenčného žiarenia v mozgu, najmä v temporálnych a frontálnych lalokoch, zatiaľ čo používanie tabletov a notebookov dominovalo celotelovej expozícii (Birks a kol. 2020). Choi a kol. (2017) sledovali 1 198 párov matka-dieťa až do 36 mesiacov a nezistili žiadnu priamu súvislosť medzi prenatálnou expozíciou rádiofrekvenčnému žiareniu a skorým neurovývojom, hoci interakcie s materským vplyvom...

boli navrhnuté možnosti expozície (Choi a kol., 2017). Okrem toho Setia a kol. (2025) syntetizovali dôkazy o intervenciách digitálnej detoxikácie, ktoré naznačujú, že dobrovoľné zníženie používania zariadení môže zlepšiť výsledky v oblasti duševného zdravia, pričom účinnosť je ovplyvnená vekom, závažnosťou základných symptómov a vzormi používania (Setia a kol., 2025).

Bodewein a kol. (2022) však systematicky preskúmali 42 epidemiologických a 11 experimentálnych štúdií a dospeli k záveru, že celkové dôkazy o účinkoch vystavenia sa vysokofrekvenčným elektromagnetickým poliam na subjektívne symptómy, kogníciu a správanie u detí a dospievajúcich sú nízke až nedostatočné kvôli metodologickým obmedzeniam a heterogenite (Bodewein a kol., 2022). Nakoniec, Benke a kol. (2024) vykonali systematický prehľad a metaanalýzu observačných štúdií na ľuďoch, pričom zistili veľmi nízke až nízke dôkazy o malej až žiadnej súvislosti medzi vystavením sa vysokofrekvenčným elektromagnetickým poliam a učením, pamäťou, výkonnými funkciami a komplexnou pozornosťou u detí, pričom nebol identifikovaný žiadny vzťah medzi expozíciou a reakciou a výrazne chýbali údaje o globálnych kognitívnych funkciách (Benke a kol., 2024).

Tieto štúdie spoločne zdôrazňujú potenciálnu zraniteľnosť detí a dospievajúcich voči vystaveniu vysokofrekvenčným elektromagnetickým poliam a používaniu digitálnych zariadení, avšak variabilita v hodnotení expozície, výsledných meraniach a mätúcich faktoroch obmedzuje schopnosť vyvodiť definitívne závery.

Obmedzenia a budúce smery

Napriek rastúcemu počtu experimentálnych a epidemiologických dôkazov o neurovývojových a behaviorálnych účinkoch prenatálnej a ranej expozície RF-EMF, interpretácia, reprodukovateľnosť a translačná relevantnosť súčasných zistení sú obmedzené niekoľkými dôležitými obmedzeniami. Jedným z hlavných obmedzení je značná heterogenita expozičných parametrov v rôznych štúdiách vrátane frekvencie, intenzity, trvania a modulačných vzorcov, čo komplikuje priame porovnávanie a metaanalýzu. Lamzouri a kol. (2025) zdôrazňujú, že nedostatok štandardizovaných expozičných metrík a metodologická variabilita v systematických prehľadoch znižuje spoľahlivosť syntetizovaných záverov týkajúcich sa vývojových výsledkov (Lamzouri a kol., 2025).

Väčšina dôkazov pochádza zo zvieracích a in vitro modelov, predovšetkým z hlodavcov, zebričiek a ľudských bunkových kultúr, ktorých neurovývojové časy, reprodukčné systémy a behaviorálne repertoáre sa líšia od ľudí, čím sa obmedzuje priama extrapolácia. Experimentálne štúdie často používajú intenzity RF-EMF a špecifické absorpčné rýchlosti (SAR), ktoré presahujú typické environmentálne expozície, čím sa znižuje ekologická validita (Bodewein a kol. 2022, Cordelli a kol. 2024). Okrem toho sa behaviorálne a kognitívne koncové body v jednotlivých štúdiách značne líšia a používajú sa paradigmy s rôznou citlivosťou a reprodukovateľnosťou, čo prispieva k nekonzistentným výsledkom (Bodewein a kol. 2022).

Pohlavne špecifické účinky sú často nedostatočne preskúmané, hoci nové dôkazy naznačujú rozdielnu náchylnosť medzi mužskými a ženskými potomkami. Napríklad vystavenie RF-EMF môže odlišne ovplyvniť reprodukčné parametre mužov, ako naznačujú systematické prehľady kvality spermií a plodnosti v experimentálnych štúdiách na zvieratách aj na ľuďoch (Cordelli a kol. 2024, Kenny a kol. 2024). Podobne aj neurovývojové účinky môžu vykazovať pohlavne špecifické zraniteľnosti, ktoré nie sú dostatočne charakterizované (Bodewein a kol. 2022).

Dlhodobé a transgeneračné výsledky boli hodnotené len v niekoľkých štúdiách a väčšina experimentálnych výskumov využíva intenzity expozície vyššie ako tie, s ktorými sa stretávame v typickom ľudskom prostredí, čo vyvoláva obavy o relevantnosť zistení pre scenáre expozície v reálnom svete (Melnick a kol. 2025, Lamzouri a kol. 2025). Pozorovacie štúdie na ľuďoch sú obmedzené mätúcimi faktormi vrátane genetiky, životného štýlu, socioekonomického statusu a súbežných environmentálnych expozícií. Chýbajú štandardizované protokoly na meranie expozície Wi-Fi alebo RF-EMP v reálnom svete, hoci kohortové štúdie, ako napríklad španielska kohorta INMA pri narodení, začali systematicky charakterizovať osobnú a environmentálnu expozíciu neionizujúcim EMP (Gallastegi a kol. 2016).

Aby sa zlepšila spoľahlivosť a translačná relevantnosť výskumu expozície RF-EMF počas citlivých vývojových období, budúce štúdie by mali prijať štandardizované expozičné protokoly zahŕňajúce viacero zdrojov RF-EMF vrátane Wi-Fi aj mobilných komunikačných technológií. Pozdĺžne a

Na posúdenie pretrvávajúcich alebo oneskorených účinkov sú potrebné viacgeneračné návrhy. Štúdie by mali zahŕňať pohlavie ako biologickú premennú a mali by zahŕňať podrobné neurovývojové, behaviorálne a molekulárne koncové body. Integrácia translačných modelov, ktoré lepšie napodobňujú scenáre expozície u ľudí, ako aj multiomické prístupy, môže objasniť základné mechanizmy a vzťahy medzi dávkou a odozvou. Takéto metodologické vylepšenia spoločne zvýšia interpretovateľnosť, reprodukovateľnosť a relevantnosť výskumu RF-EMF v oblasti vývojovej neurobiológie a reprodukčného zdravia pre reálny svet (Bodewein a kol. 2022, Cordelli a kol. 2024, Melnick a kol. 2025, Lamzouri a kol. 2025).

Záver

Táto recenzia sumarizuje experimentálne dôkazy o prenatálnej a ranej expozícii Wi-Fi a iným vysokofrekvenčným elektromagnetickým poliam a ich vplyve na neurologický vývoj a správanie. Štúdie na zvieratách ukazujú, že expozícia počas kritických vývojových období narúša reguláciu oxidačného stresu, apoptózu, opravu DNA, synaptickú plasticitu a neurozápal, čo vedie k zmenám v správaní, ako sú poruchy učenia, pamäte, motoriky a úzkosti. Výsledky sa líšia v závislosti od expozície, načasovania, pohlavia a druhu. Niektoré štúdie vykazujú jemné účinky, zatiaľ čo iné uvádzajú výrazné neurobehaviorálne zmeny vrátane transgeneračných vplyvov u zebričiek a hlodavcov. Hoci extrapolácia na ľudí je obmedzená, tieto zistenia zdôrazňujú zraniteľnosť vyvíjajúceho sa nervového systému a podporujú preventívne opatrenia počas citlivých období. Budúci výskum by sa mal zamerať na dlhodobé behaviorálne výsledky, vzťahy medzi dávkou a reakciou a štandardizované protokoly naprieč druhmi.

Okrem toho sú na objasnenie mechanistických dráh potrebné štúdie integrujúce molekulárne, bunkové a behaviorálne koncové body. Skúmanie pohlavne špecifickej náchylnosti, potenciálnych interakcií s inými environmentálnymi stresormi a scenárov expozície v reálnom svete zlepší hodnotenie rizika. Spolupráca viacerých laboratórnych štúdií a vývoj jednotných smerníc pre podávanie správ môže zvýšiť reprodukovateľnosť a uľahčiť prenos zistení zo zvierat do kontextu ľudského zdravia.

Referencie

Aldad T, Gan G, Gao XB, Taylor HS (2012) Vystavenie plodu rádiofrekvenčným lúčom z mobilných telefónov s frekvenciou 800 – 1900 MHz ovplyvňuje... neurovývoj a správanie u myší. Sci Rep, 2:312.

Attah TA, Ayantunji B, Adamu A, Omede A, Leleji J, Hussiani S a kol. (2022) Biologické účinky vysokofrekvenčného žiarenia na wistar potkany: prehľad literatúry. Journal of Public Health International, 5(2):1–31.

Benke G, Abramson MJ, Brzozek C, McDonald S, Kelsall H, Sanagou M a kol. (2024) Účinky vystavenia rádiofrekvenčnému žiareniu na kogníciu: systematický prehľad a metaanalýza observačných štúdií na ľuďoch. Environ Int, 188:108779.

Birks LE, van Wel L, Liorni I, Pierotti L, Guxens M, Huss A a kol. (2021) Rádiofrekvenčné elektromagnetické polia z mobilu komunikácia: opis modelovanej dávky v oblastiach mozgu a tela u európskych detí a dospievajúcich. Environ Res, 193:110505.

Bodewein L, Dechent D, Graefrath D, Kraus T, Krause T, Driessen S (2022) Systematický prehľad fyziologických a zdravotne súvisiacich faktorov Účinky vystavenia rádiofrekvenčnému elektromagnetickému poľu z bezdrôtových komunikačných zariadení na deti a dospievajúcich v experimentálnych a epidemiologických štúdiách na ľuďoch. PLoS One, 17:e0268641.

Broom KA, Findlay R, Addison DS, Goiceanu C, Sienkiewicz Z (2019) Vystavenie pulzným rádiofrekvenčným poliam LTE v ranom veku spôsobuje pretrvávajúce zmeny aktivity a správania u myší C57BL/6 J. Bioelectromagnetics, 40:498–511.

Çelik Ö, Kahya MC, Nazıroğlu M (2016) Oxidačný stres mozgu a pečene sa zvyšuje vystavením potkanov Wi-Fi (2,45 GHz) počas... tehotenstvo a vývoj novorodencov. J Chem Neuroanat, 75:134–139.

Chen C, Ma Q, Liu C, Deng P, Zhu G, Zhang L a kol. (2014) Vystavenie rádiofrekvenčnému žiareniu s frekvenciou 1800 MHz zhoršuje rast neuritov. embryonálne nervové kmeňové bunky. Sci Rep, 4:51033.

Choi KH, Ha M, Ha EH, Park H, Kim Y, Hong YC a kol. (2017) Neurologický vývoj počas prvých troch rokov po prenatálnom používaní mobilného telefónu používanie, rádiofrekvenčné žiarenie a vystavenie olovu. Environ Res, 156:810–817.

Cordelli E, Ardoino L, Benassi B, Consales C, Eleuteri P, Marino C a kol. (2023) Účinky rádiofrekvenčného elektromagnetického poľa (RF-EMF) expozícia na výsledky tehotenstva a pôrodu: systematický prehľad experimentálnych štúdií na cicavcoch okrem človeka. Environ Int, 180:108-178.

Cordelli E, Ardoino L, Benassi B, Consales C, Eleuteri P, Marino C a kol. (2024) Účinky rádiofrekvenčného elektromagnetického poľa (RF-EMF) expozícia na mužskú plodnosť: systematický prehľad experimentálnych štúdií na cicavcoch okrem človeka a ľudských spermiách in vitro. Environ Int, 185:108509.

Cosquer B, Galani R, Kuster N, Cassel JC (2005) Celotelové vystavenie elektromagnetickým poliam s frekvenciou 2,45 GHz nemení úzkosť. reakcie u potkanov: štúdia s bludiskom v tvare plus vrátane validácie testu. Behav Brain Res, 156:65–74.

DastAmooz S, Broujeni ST, Sarahian N (2023) Primárna štúdia o vývoji plodu u potkanov a hladinách neurotrofických faktorov odvodených z mozgu pod kontrolou elektromagnetických polí. J Public Health Afr, 14:2347.

Deena K, Maadurshni GB, Manivannan J, Sivasamy R. (2025) Krátkodobá expozícia 2,4 GHz elektromagnetickému žiareniu na celulárnom ROS generácia a apoptóza v bunkovej línii SH-SY5Y a vplyv na vyvíjajúce sa mozgové tkanivo kuracích embryí. Mol Biol Rep, 52:144.

Djordjevic NZ, Paunović MG, Peulić AS (2017) Úzkostné behaviorálne účinky extrémne nízkofrekvenčného elektromagnetického poľa u potkanov. Environ Sci Pollut Res Int, 24:21693–21699.

Divan HA, Kheifets L, Obel C, Olsen J (2008) Prenatálne a postnatálne vystavenie používaniu mobilných telefónov a problémy so správaním u detí. Epidemiológia, 19:523–529.

Dongus S, Jalilian H, Schürmann D, Röösli M (2022) Zdravotné účinky žiarenia WiFi: prehľad založený na systematickom hodnotení kvality. Crit Rev Environ Sci Technol, 52:3547–3566.

Echchgadda I, Cantu JC, Tolstykh GP, Butterworth JW, Payne JA, Ibey BL (2022) Zmeny v excitabilite primárneho hipokampu neuróny po vystavení rádiofrekvenčným elektromagnetickým poliam s frekvenciou 3,0 GHz. Sci Rep, 12:3506.

Eskandani R, Zibaii MI (2024) Odhalenie biologických účinkov rádiofrekvenčných a extrémne nízkofrekvenčných elektromagnetických polí na funkciu centrálneho nervového systému. Bioimpacts, 14:30064.

Foster KR, Moulder JE (2013) Wi-Fi a zdravie: prehľad súčasného stavu výskumu. Health Phys, 105:561–575.

Gallastegi M, Guxens M, Jiménez-Zabala A, Calvente I, Fernández M, Birks L a kol. (2016) Charakterizácia expozície neionizujúcim Elektromagnetické polia v španielskej kohorte INMA: protokol štúdie. BMC Public Health, 16:167.

Guxens M, Vermeulen R, Steenkamer I, Beekhuizen J, Vrijkotte TGM, Kromhout H a kol. (2019) Rádiofrekvenčné elektromagnetické polia, čas strávený pred obrazovkou a emocionálne a behaviorálne problémy u 5-ročných detí. Int J Hyg Environ Health, 222:188–194.

Henz D, Schöllhorn WI, Poeggeler B (2018) Čipy mobilných telefónov znižujú zvýšenie mozgovej aktivity EEG vyvolané žiarením vyžarovaným mobilnými telefónmi. elektromagnetické polia. Front Neurosci, 12:295091.

Hosseini E, Farid Habibi M, Babri S, Mohaddes G, Abkhezr H, Heydari H (2022) Úzkostné správanie vyvolané stresom u matky zhoršené žiarením elektromagnetických polí u potomkov samíc potkanov. PLoS One, 17:e0273206.

Hosseini E, Kianifard D (2023) Vplyv prenatálneho stresu a extrémne nízkofrekvenčných elektromagnetických polí na správanie podobné úzkosti u samíc potkanov: s dôrazom na prefrontálny kortex a hipokampus. Brain Behav, 13:e2949.

Hu C, Zuo H, Li Y (2021) Účinky rádiofrekvenčného elektromagnetického žiarenia na neurotransmitery v mozgu. Front Public Health. 9:691880.

ICNIRP (2020) Pokyny pre obmedzenie vystavenia elektromagnetickým poliam (100 kHz až 300 GHz). Health Phys, 118:483-524.

Ishihara T, Yamazaki K, Araki A, Teraoka Y, Tamura N, Hikage T a kol. (2020) Vystavenie rádiofrekvenčnému elektromagnetickému poľu v Vysokofrekvenčné pásmo a kognitívne funkcie u detí a dospievajúcich: prehľad literatúry. Int J Environ Res Public Health, 17:9179.

Jeong YJ, Son Y, Han NK, Choi HD, Pack JK, Kim N a kol. (2018) Vplyv dlhodobého RF-EMF na oxidačný stres a neurozápal. v starnúcich mozgoch myší C57BL/6. Int J Mol Sci, 19:2103.

Karipidis K, Brzozek C, Mate R, Bhatt CR, Loughran S, Wood AW (2023) Aké dôkazy existujú o vplyve antropogénneho... Vplyv rádiofrekvenčných elektromagnetických polí na zvieratá a rastliny v prostredí: systematická mapa. Environ Evid, 12:9.

Karimi N, Bayat M, Haghani M, Saadi HF, Ghazipour GR (2018) Mikrovlnné žiarenie s frekvenciou 2,45 GHz zhoršuje učenie, pamäť a hipokamp. synaptická plasticita u potkanov. Toxicol Ind Health, 34:873–883.

Kashani ZA, Pakzad R, Fakari FR, Haghparast MS, Abdi F, Kiani Z a kol. (2023) Vystavenie elektromagnetickým poliam u plodu a detstva abnormality: systematický prehľad a metaanalýza. Open Med, 18:20230697.

Kim JH, Chung KH, Hwang YR, Park HR, Kim HJ, Kim HG a kol. (2021) Vystavenie RF-EMF mení postsynaptickú štruktúru a bráni... prerastanie neuritov vo vyvíjajúcich sa neurónoch hipokampu u myší v ranom postnatálnom štádiu. Int J Mol Sci, 22:5340.

Kim JH, Seok JY, Kim YH, Kim HJ, Lee JK, Kim HR (2024) Vystavenie rádiofrekvencii indukuje synaptickú dysfunkciu v kortikálnych neurónoch. spôsobujúce zmeny učenia a pamäte u myší v ranom postnatálnom štádiu. Int J Mol Sci, 25:8589.

Kilic A, Ustunova S, Bulut H, Meral I (2023) Prenatálne a postnatálne vystavenie elektromagnetickým poliam s frekvenciou 900 MHz vyvoláva zápal a oxidačný stres a meniť zložky renín-angiotenzínového systému odlišne u samčích a samičích potomkov. Life Sci, 321:121627.

Lamzouri O, Ahl Laamara R, Drissi LB (2025) Vplyv vystavenia elektromagnetickému poľu na reprodukčné zdravie: zastrešujúci prehľad a metaanalýza systematických prehľadov. Middle East Fertil Soc J, 30:42.

Li ZQ, Zhang Y, Wan YM, Zhou Q, Liu C, Wu HX a kol. (2020) Testovanie behaviorálneho a kognitívneho vývoja u potkanov po prenatálnom období vystavenie rádiofrekvenčným poliam s frekvenciou 1800 a 2400 MHz. J Radiat Res, 61:197–206.

Kenny O, Ahl Laamara R, Drissi LB (2025) Vplyv vystavenia elektromagnetickému poľu na reprodukčné zdravie: zastrešujúci prehľad a metaanalýza systematických prehľadov. Middle East Fertil Soc J, 30:42.

Mehta J, Khira R, Fumakiya S, Sharma P, Punekar A, Jain C a kol. (2025) Od dospelých k potomkom: Expozícia dospelých rádiofrekvenčnému a elektromagnetickému žiareniu cez Wi-Fi zebrička dravá zhoršuje reprodukciu a transgeneračne ovplyvňuje vývoj a správanie potomstva. Sci Total Environ, 1008:180982.

Melnick RL, Moskowitz JM, Héroux P, Mallery-Blythe E, McCredden JE, Herbert M a kol. (2025) Systematický systém zadaný WHO Prehľady o účinkoch rádiofrekvenčného žiarenia na zdravie neposkytujú žiadnu záruku bezpečnosti. Environ Health, 24:70.

Mevissen M, Ducray A, Ward JM, Kopp-Schneider A, McNamee JP, Wood AW a kol. (2025) Účinky rádiofrekvenčného elektromagnetického žiarenia Vplyv poľnej expozície na rakovinu v štúdiách na laboratórnych zvieratách: systematický prehľad. Environ Int, 109482.

Mortazavi SMJ, Mostafavi-Pour Z, Daneshmand M, Zal F, Zare R, Mosleh-Shirazi MA (2017) Adaptívna reakcia vyvolaná preexpozíciou do rádiofrekvencie 915 MHz: možná úloha antioxidačnej enzýmovej aktivity. J Biomed Phys Eng, 7:137–142.

Narayanan SN, Jetti R, Kesari KK, Kumar RS, Nayak SB, Bhat PG (2019) Behaviorálne správanie vyvolané rádiofrekvenčným elektromagnetickým žiarením zmeny a ich možné príčiny. Environ Sci Pollut Res Int, 26:30693–30710.

Nowak-Terpiłowska A, Górski R, Marszałek M, Wosiński S, Przesmycki R, Bugaj M et al. (2023) Účinky rádiofrekvencie 2,4 GHz elektromagnetické pole (RF-EMF) na glioblastómových bunkách (U-118 MG). Ann Agric Environ Med, 30:763–772.

Odaci E, Bas O, Kaplan S (2008) Účinky prenatálneho vystavenia elektromagnetickému poľu s frekvenciou 900 MHz na gyrus dentatus potkanov: a stereologická a histopatologická štúdia. Brain Res, 1238:224–229.

Othman H, Ammari M, Rtibi K, Bensaid N, Sakly M, Abdelmelek H (2017) Postnatálny vývoj a behaviorálne účinky in utero vystavenie potkanov rádiofrekvenčným vlnám vysielaným z konvenčných WiFi zariadení. Environ Toxicol Pharmacol, 52:239–247.

Pophof B, Burns J, Danker-Hopfe H, Dorn H, Egblomasse-Roidl C, Eggert T a kol. (2021) Vplyv vystavenia rádiofrekvencii Vplyv elektromagnetických polí na kognitívny výkon v experimentálnych štúdiách na ľuďoch: protokol pre systematický prehľad. Environ Int, 157:106783.

Pophof B, Kuhne J, Schmid G, Weiser E, Dorn H, Henschenmacher B a kol. (2024) Vplyv vystavenia rádiofrekvencii Vplyv elektromagnetických polí na kognitívny výkon v experimentálnych štúdiách u ľudí: systematický prehľad a metaanalýzy. Environ Int, 191:108899.

Poulletier de Gannes F, Haro E, Hurtier A, Taxile M, Athane A, Ait-Aissa S a kol. (2012) Vplyv vystavenia sa Wi-Fi v maternici na pre- a postnatálny vývoj potkanov. Birth Defects Res B Dev Reprod Toxicol, 95:130–136.

Pooam M, Jourdan N, Aguida B, Dahon C, Baouz S, Terry C a kol. (2022) Expozícia rádiofrekvenčnému poľu s frekvenciou 1,8 GHz moduluje ROS v ľudské bunky HEK293 ako funkcia amplitúdy signálu. Commun Integr Biol, 15:54–66.

Prlić I, Šiško J, Varnai VM, Pavelić L, Macan J, Kobešćak S a kol. (2022) Technológia Wi-Fi a vplyv na ľudské zdravie: stručný prehľad súčasné poznatky. Arh Hig Rada Toksikol, 73:94–106.

Pw Kenny R, Johnson EE, Adesanya AM, Richmond C, Beyer F, Calderon C a kol. (2024) Účinky vystavenia rádiofrekvenčnému žiareniu na mužov plodnosť: systematický prehľad observačných štúdií u ľudí s metaanalýzou závislosti odpovede od dávky. Environ Int, 190:108817.

Salameh M, Zeitoun-Ghandour S, Sabra L, Daher A, Khalil M, Joumaa WH (2023) Vplyv vystavenia GSM-EMW na markery oxidačný stres v pečeni plodu potkana. Sci Rep, 13:17806.

Salunke BP, Umathe SN, Chavan JG (2015) Behaviorálna neúčinnosť vysokofrekvenčného elektromagnetického poľa u myší. Physiol Behav, 140:32–37.

Sage C, Burgio E (2018) Elektromagnetické polia, pulzné rádiofrekvenčné žiarenie a epigenetika: ako môžu bezdrôtové technológie ovplyvňujú vývoj v detstve. Child Dev, 89:129–136.

Setia MS, Natesan R, Samant P, Mhapankar S, Kumar S, Singh IV a kol. (2025) Vysielanie elektromagnetického poľa rádiofrekvencie a neurovývojové výsledky u dojčiat: prospektívna kohortová štúdia. Cureus, 17:e87671.

Sharaf NE, Galal AF, El-Sawy MS, Shalby AB, Sayed AH, Ahmed HH (2019) Úloha navrhnutých biogeometrických foriem v antagonizácii Neurobehaviorálna záťaž Wi-Fi žiarenia: experimentálna štúdia založená na dôkazoch. Biomed Pharmacother J, 12:1217–1234.

Sienkiewicz Z, Jones N, Bottomley A (2005) Neurobehaviorálne účinky elektromagnetických polí. Bioelektromagnetics, Suppl 7:S116–126.

Vafaei H, Kavari G, Izadi HR, Dorahi ZZ, Dianatpour M, Daneshparvar A a kol. (2020) Wi-Fi (2,4 GHz) ovplyvňuje antioxidačnú kapacitu, DNA Expresia opravných génov a apoptóza u gravidných myších placent. Iran J Basic Med Sci, 23:833.

Wang K, Lu JM, Xing ZH, Zhao QR, Hu LQ, Xue L a kol. (2017) Vplyv 1,8 GHz rádiofrekvenčného elektromagnetického žiarenia na nový objekt asociatívna rozpoznávacia pamäť u myší. Sci Rep, 7:44521.

Wu H, Min D, Sun B, Ma Y, Chen H, Wu J a kol. (2023) Vplyv vystavenia WiFi signálu v maternici a v ranom veku na neurologický vývoj a správanie potkanov. Environ Sci Pollut Res, 30:95892–95900.

Xue T, Ma RH, Xu C, Sun B, Yan DF, Liu XM a kol. (2024) Endokanabinoidný systém sa podieľa na správaní podobnom úzkosti vyvolanom dvojfrekvenčným elektromagnetickým žiarením 2,65/0,8 GHz u myší. Front Mol Neurosci, 17:1366855.

Yakymenko I, Tsybulin O, Sidorik E, Henshel D, Kyrylenko O, Kyrylenko S (2016) Oxidačné mechanizmy biologickej aktivity nízko-intenzita rádiofrekvenčného žiarenia. Electromagn Biol Med, 35:186–202.

Zhang JP, Zhang KY, Guo L, Chen QL, Gao P, Wang T a kol. (2017) Účinky rádiofrekvenčných polí s frekvenciou 1,8 GHz na emocionálne správanie a priestorová pamäť dospievajúcich myší. Int J Environ Res Public Health, 14:1344.

Zhang Y, Li Z, Gao Y, Zhang C (2015) Účinky vystavenia plodu mikrovlnnému žiareniu na správanie potomstva u myší. J Radiat Res, 56:261–268.

Zheng R, Zhang X, Gao Y, Gao D, Gong W, Zhang C, Dong G, Li Z (2023) Biologické účinky vystavenia elektromagnetickému žiareniu s frekvenciou 2650 MHz žiarenia na správanie, učenie a pamäť myší. Brain Behav, 13:e3004.

Príspevky autorov: Autor(i) vyhlasujú, že významne vedecky prispeli k štúdii a pomohli pri príprave alebo revízii rukopisu.

Odborné hodnotenie: Externe recenzované.
Etické schválenie:Táto recenzná štúdia nevyžaduje etické schválenie. **Konflikt záujmov:**Nebol deklarovaný žiadny konflikt záujmov. **Finančné zverejnenie:**Na túto štúdiu nebola deklarovaná žiadna finančná podpora.