Translated from English to Slovak - www.onlinedoctranslator.com

Indian J Med Res 164, september 2026, str. 341-348
DOI: 10.25259/IJMR_3658_2025

Pôvodný článok

Vplyv 5G frekvencií na parametre spermií, úspešnosť párenia a výsledky potomstva u potkanov

Atikah Hairulazam,[1]Siti Fatimah Ibrahim,[1]Chajrul Osman,[2]Mohd Helmy Mokhtar,[1]Aini Farzana Zulkefli,[1] Mohd Farisyam Mat Ros,[1]Norazurashima Jamaludin,[2]Syed Muhamad Asyraf Syed Taha,[1]Sivasatyan Vijay,[1] Zahriladha Zakaria,[3]Amyrul Azuan Mohd Bahar[4]a Farah Hanan Fathihah Jaffar[1]

[1]Katedra fyziológie, Lekárska fakulta a[2]Forenzný program, Centrum pre diagnostické, terapeutické a vyšetrovacie štúdie, Fakulta zdravotníckych vied, Universiti Kebangsaan Malajzia, Kuala Lumpur,[3]Fakulta elektroniky a výpočtovej techniky a inžinierstva, Universiti Teknikal Malaysia Melaka, Melaka a[4]Intel Corporation, Bayan Lepas, Pulau Pinang, Malajzia

Prijaté 26. decembra 2025; Akceptované 24. februára 2026; Pred tlačou 28. augusta 2026; Publikované 1. septembra 2026

Pozadie a ciele:Pokrok v technológii 5G je veľmi očakávaný kvôli rýchlejšiemu prenosu dát, no jej potenciálny vplyv na mužskú plodnosť zostáva nejasný. Táto štúdia hodnotila vplyv frekvencií 5G na frekvenciách 3,5 GHz a 24 GHz na parametre spermií, úspešnosť párenia a výsledky potomstva.

Metódy:Celkovo 18 samcov potkanov kmeňa Sprague Dawley (n=18) bolo rozdelených do troch skupín: kontrolná skupina, skupina s frekvenciou 3,5 GHz a skupina s frekvenciou 24 GHz (n=6). Kontrolná skupina bola simulovane vystavená žiareniu. Naproti tomu skupiny s frekvenciami 3,5 GHz a 24 GHz boli vystavené svojim príslušným frekvenciám 7 hodín denne počas 60 dní. Po 46 dňoch expozície sa uskutočnil párіaci postup 1:1. Samice potkanov (n=18) boli monitorované až do 28. dňa gravidity, aby sa vyhodnotila miera gravidity a metriky pôrodnosti. Neskôr boli samce potkanov usmrtené a bola vyhodnotená kvalita spermií.

Výsledky:Obe exponované skupiny vykazovali významný pokles koncentrácie a pohyblivosti spermií (P<0,001) v porovnaní s kontrolnou skupinou. Skupina s 24 GHz mala nižšiu mieru tehotenstiev, zatiaľ čo skupina s 3,5 GHz vykazovala nižšiu mieru živonarodených detí. V skupine s 3,5 GHz boli pozorované vrodené anomálie, zatiaľ čo skupina s 24 GHz mala výrazne nižšiu pôrodnú hmotnosť (P< 0,001).

Interpretácia a závery:Zistenia naznačujú, že dlhodobé vystavenie sa frekvenciám 5G môže mať negatívny vplyv na mužskú plodnosť, výsledky tehotenstva a pôrodné metriky.

Kľúčové slová Elektromagnetické polia; Plodnosť; Miera tehotenstva; Analýza spermií; Bezdrôtová technológia

Rýchle globálne zavádzanie technológie 5G je poháňané rýchlejším prenosom dát a nižšou latenciou.[1]Zároveň jeho implementácia vyvolala obavy týkajúce sa potenciálnych biologických a zdravotných účinkov, najmä na reprodukčné zdravie.[2]Zatiaľ čo predchádzajúce generácie bezdrôtových technológií boli rozsiahlo študované, najnovšia technológia 5G vytvára nové možnosti pre vedecký výskum jej biologického vplyvu.[3]

Na rozdiel od svojich predchodcov funguje 5G v nízkopásmovom (700 MHz), strednom pásme (3,5 GHz) a vysokopásmovom (24 GHz) pásme. Je pozoruhodné, že vysokopásmové po prvýkrát využíva milimetrové vlny (mmWaves) v bezdrôtovej komunikácii, čím stanovuje nový štandard pre ultra-rýchly prenos dát.[4]Vplyv tejto špičkovej technológie na zdravie je však stále predmetom diskusií kvôli obmedzenému pochopeniu jej potenciálnych účinkov na verejné zdravie.

Hoci sú frekvencie 5G klasifikované ako neionizujúce žiarenie,[4]Rastúca hustota základňových staníc 5G môže viesť k väčšiemu potenciálu chronického vystavenia vysokofrekvenčným rádiofrekvenčným elektromagnetickým poliam (RF-EMF).[2]Zatiaľ čo predchádzajúce štúdie skúmali vplyv RF-EMF na mužskú plodnosť, špecifické účinky frekvencií súvisiacich s 5G, najmä na reprodukčné zdravie mužov a ich následný vplyv na výsledky tehotenstva, zostávajú do značnej miery nepreskúmané.[3,5]

Ako citovať tento článok: HairulazamA, Ibrahim SF, Osman K, Mokhtar MH, Zulkefli AF, Mat Ros MF,*a kol.*Vplyv 5G frekvencií na parametre spermií, úspešnosť párenia a výsledky potomstva u potkanov.*Indický J Med Res*. 2026;164:341-8. doi: 10.25259/IJMR_3658_2025

© 2026 Indian Journal of Medical Research, vydáva Scientific Scholar pre generálneho riaditeľa Indickej rady pre lekársky výskum
Táto publikácia s otvoreným prístupom je chránená licenciou CC-BY-NC-SA 4.0.

Vystavenie RF-EMF môže zhoršiť kvalitu spermií, pričom najzávažnejšie znižuje ich pohyblivosť a životaschopnosť.[6]Je dobre známe, že reprodukčné zdravie mužov zohráva kľúčovú úlohu pri určovaní úspešnosti počatia a celkového zdravia potomstva.[7] Faktory ako miera tehotenstva, miera živonarodených detí, pomer pohlaví a pôrodná hmotnosť dieťaťa sú kľúčovými ukazovateľmi reprodukčného úspechu a blaha potomstva.[8]Obmedzené štúdie však skúmali potenciálne účinky RF-EMF pri vystavení sieti 5G na mužskú plodnosť a to, ako by toto vystavenie mohlo ovplyvniť výsledky tehotenstva u samíc páriacich sa s vystavenými samcami.

Aby sa táto medzera vyriešila, táto štúdia skúmala vplyv vystavenia frekvencii 5G na kvalitu spermií u samcov potkanov a jej následné účinky na výsledky párenia. Merali sa kľúčové reprodukčné parametre vrátane miery tehotenstva, miery živonarodených detí, pomeru pohlaví a pôrodnej hmotnosti detí. Pochopením týchto výsledkov si tento výskum kladie za cieľ poskytnúť cenné poznatky do širšej diskusie o bezpečnosti technológie 5G a jej dôsledkoch pre reprodukčné zdravie.

Metódy

Túto štúdiu uskutočnila katedra fyziológie Lekárskej fakulty Univerzity Kebangsaan Malaysia v Kuala Lampur v Malajzii. Štúdia sa uskutočnila od októbra 2023 do apríla 2025 po etickom schválení. Štúdiu schválila Inštitucionálna etická komisia pri Etickej komisii pre zvieratá UKM.

*Zvieratá*Celkovo bolo odobratých 36 (N=36) potkanov kmeňa Sprague Dawley, z ktorých 18 bolo samcov a 18 samíc (~Z jednotky pre zvieratá boli získané 8 týždňové potkany s hmotnosťou 200 ± 50 g. Samce potkanov boli získané o mesiac skôr, aby sa umožnila ich expozícia technológii 5G. Všetky zvieratá boli umiestnené v individuálne vetraných klietkach s zabezpečeným krmivom a vodou.*ad libitum*, 12-hodinový cyklus svetlo-tma a okolitá teplota 22 ± 5 °C.

Samce potkanov boli náhodne rozdelené do troch skupín (n=6) v každej skupine: kontrolná skupina s falošne vystaveným signálom a dve expozičné skupiny, ktoré dostávali signály 3,5 GHz a 24 GHz. Veľkosť vzorky bola určená na základe testovacej smernice OECD 407.[9] Expozičný postup sa vykonával v ožarovacej miestnosti 7 hodín denne počas 60 dní. Počas experimentálnych postupov sa nepoužilo žiadne zaslepenie. Všetky hodnotenia sa vykonali so znalosťou rozdelenia do skupín z dôvodu logistických obmedzení.

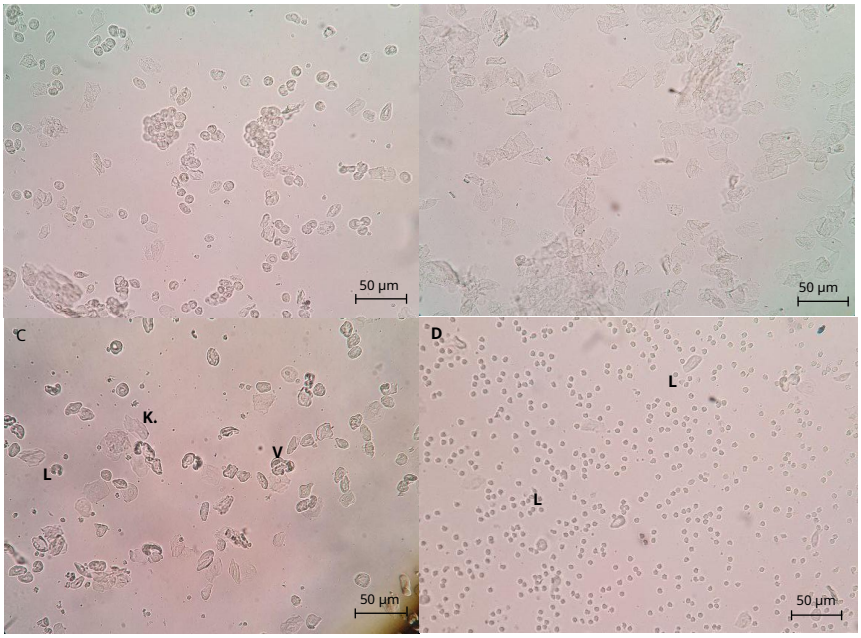
Na konci experimentálnych postupov boli všetky zvieratá utratené*cez*intraperitoneálne predávkovanie (>0,1 ml/100 g) kokteilu ketamínu (3,34 mg/kg, Ilium, USA), xylazínu (3,34 mg/kg, Ilium, USA) a zoletil-50 (1,66 mg/kg, Virbac, Austrália) (KTX). Úmrtie bolo potvrdené absenciou rohovkového reflexu, stratou reflexu štipnutia chvosta, pedálneho reflexu predných a zadných končatín.

*Nastavenia expozície*Expozičný model bol navrhnutý tak, aby simuloval realistické podmienky prostredia 5G.[10] s využitím frekvencií spektra 3,5 GHz (stredné pásmo) a 24 GHz (vysoké pásmo) pridelených pre 5G komunikáciu.[10] Obe frekvencie boli vybrané, aby sa umožnilo porovnávacie vyhodnotenie ich biologických účinkov, pretože žiadna predchádzajúca štúdia neskúmala výsledky tehotenstva po vystavení otca týmto frekvenciám.

Kontrolná skupina bola umiestnená v ožarovacej miestnosti s anténou alebo zariadením použitým na expozíciu nastaveným na neaktívny režim. Skupina s frekvenciou 3,5 GHz bola vystavená pomocou všesmerovej mikropáskovej antény.**(Doplnkový obr. 1)**, pracujúci s výstupným výkonom 22 dBm. Anténu poskytla Fakulta elektroniky a počítačových technológií a inžinierstva, Universiti Teknikal Malaysia Melaka. Skupina vystavená 24 GHz využívala 24 GHz WiFi Smart Human Presence Detector (Shenzhen, Čína), vybavený anténou LD2420 24G mmWave schopnou vysielať signál 24 GHz. Táto anténa pracuje s výstupným výkonom 11 dBm a predstavuje hornú hranicu spektra technológie 5G, pôsobiac v rozsahu žiarenia mmWaves.

Expozičné zariadenie bolo umiestnené 20 cm od klietok pre zvieratá.**(Doplnkový obr. 2)**, čo je v súlade s predchádzajúcimi štúdiami na hlodavcoch.[6]Táto vzdialenosť bola navyše v súlade s medzinárodnými bezpečnostnými pokynmi Federálnej komunikačnej komisie Spojených štátov (US FCC) a Medzinárodnej komisie pre ochranu pred neionizujúcim žiarením (ICNIRP).[11, 12] Kovové držiaky na potraviny boli nahradené plastovými nádobami, aby sa minimalizovalo elektromagnetické rušenie, a pred expozíciou bol do klietky umiestnený merač žiarenia EXA Signal Analyzer N9010A (Keysight, USA), aby sa overila prítomnosť a sila signálu.

*Stanovenie estrálneho cyklu samice*Estrusový cyklus samíc potkanov bol monitorovaný analýzou vaginálneho steru pred párením. Vzorky vaginálneho výplachu boli odobraté medzi 7:00 a 10:00.[13]a skúmané pod poľným mikroskopom Olympus BX51 pri 20-násobnom zväčšení objektívu, aby sa určilo štádium estrusového cyklu. Estrálny cyklus sa vyznačuje štyrmi fázami: proestrus, ruja, metestrus a dioestrus (**Obr. 1**). Tieto fázy sú identifikované na základe



Obr. 1. Vzhľad buniek vo vaginálnej cytológii počas hodnotenia estrálneho cyklu pod svetelným mikroskopom s objektívnym zväčšením 20-násobným.**(A)**proestrus (**B.**ruja, ()**C**) metestrus, (**D**) dioestrus. K tu označuje keratinizované bunky; E epitelové bunky; L leukocyty. Obrázok bol zachytený pomocou fotoaparátu Olympus BX51 (Olympus, Japonsko).

prítomnosť troch typov buniek: jadrové epitelové bunky (okrúhle a jadrové), leukocyty (malé a okrúhle) a zrohovatené keratinizované bunky (bez jadier a nepravidelného tvaru). Samice potkanov v proestrálnej alebo rujovej fáze boli považované za pripravené na párenie.[14]

*Postup párenia*Párenie začína v 7. týždni expozície, jeden týždeň pred koncom expozičného obdobia, aby sa znížila pravdepodobnosť zotavenia po ukončení expozície. Samce a samice žili spolu v pomere 1:1 a denne sa odoberali vaginálne výtery a mikroskopicky sa skúmali na prítomnosť spermií.[13] Detekcia kopulačnej zátky alebo spermií vo vaginálnych steroch sa považovala za deň tehotenstva 0,[15]a všetky samice potkanov boli jednotlivo oddelené v monitorovacích klietkach až do pôrodu alebo až na 30 dní.

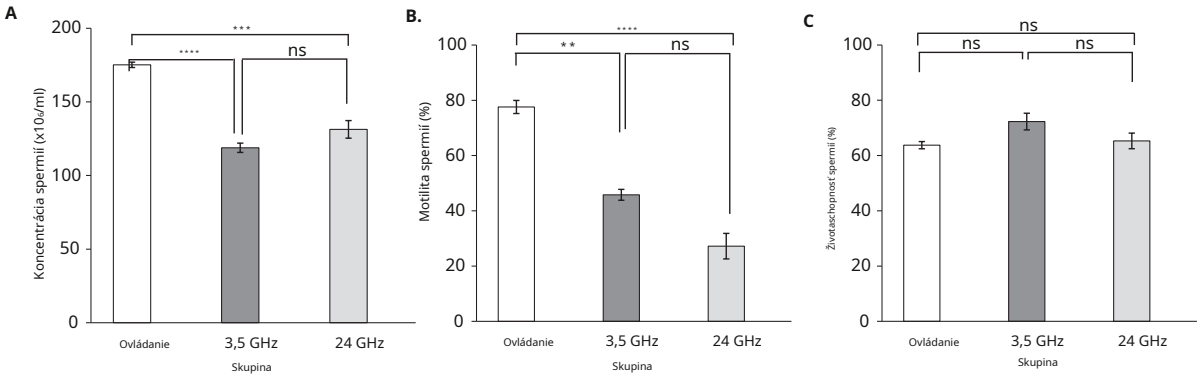
*Vyhodnotenie parametrov spermií*Po párení boli samce potkanov utratené a ich semenníky boli odobraté. Cauda epididymis bola starostlivo oddelená a rozdrvená v 2 ml predhriateho fosfátom pufrovaného fyziologického roztoku pre vzorku spermií. Zmes bola inkubovaná pri teplote 37 °C počas 40 minút, čo umožnilo spermiám vyplávať na odber.

*Koncentrácia spermií*Kvapka 10 µl suspenzie spermií bola umiestnená do Maklerovej komory. Spermie Koncentrácia sa počítala ako priemer z piatich riadkov pri 10-násobnom zväčšení.

*Pohyblivosť spermií*Na podložné sklíčko mikroskopu sa umiestnila kvapka 10 µl suspenzie spermií a 200 spermií sa spočítalo duplicitne pri 40-násobnom zväčšení. Motilita spermií sa stanovila podľa smerníc WHO, ktoré sú: A: rýchlo progresívne pohyblivé (RP), B: pomaly progresívne (SP), C: neprogresívne pohyblivé (NP) a D: nepohyblivé (IM).[16]Motilita bola vypočítaná ako percento celkového počtu pohyblivých spermií (A + B + C/celkový počet spočítaných spermií) x 100.

*Životaschopnosť spermií*Na stanovenie životaschopnosti spermií sa použil test hypoosmotického napučania (HOST). Suspenzia spermií sa zmiešala s hypoosmotickým roztokom (1:10), inkubovala sa pri teplote 37 °C počas 30 minút. Približne 10 µl zmesi sa nanieslo na podložné sklíčko mikroskopu, rozotrelo, vysušilo na vzduchu pri izbovej teplote a zafarbilo sa súpravou Diff-Quik Stain Kit (Epredia, USA) na zlepšenie viditeľnosti spermií pod svetlopoľným mikroskopom. Životaschopné spermie sa spočítali duplicitne pri 40-násobnom zväčšení, pričom sa skúmalo 200 spermií na vzorku.

*Výsledky tehotenstva*Všetky samice potkanov boli monitorované počas celého obdobia gravidity a bola zaznamenávaná dĺžka gravidity každého zvieraťa. Index párenia[17]a miera tehotenstiev[18 rokov]boli vypočítané pomocou nasledujúcich vzorcov:



Obr. 2. Analýza parametrov spermií v každej skupine. Údaje boli generované pomocou softvéru GraphPad Prism 10 a prezentované ako priemer ± SEM.**A**) koncentrácia spermií v každej skupine.****Predstavuje významný rozdiel medzi skupinou s frekvenciou 3,5 GHz a kontrolnou skupinou s*P*<0,0001. ***Predstavuje významný rozdiel medzi skupinou s frekvenciou 24 GHz a kontrolnou skupinou s*P*= 0,0002 ns, nepredstavujú žiadny významný rozdiel medzi exponovanými skupinami. (**B)**Percentuálny podiel celkového počtu pohyblivých spermií v každej skupine.**Predstavuje významný rozdiel medzi skupinou s frekvenciou 3,5 GHz a kontrolnou skupinou s*P*= 0,0010.****Predstavuje významný rozdiel medzi skupinou s frekvenciou 24 GHz a kontrolnou skupinou s*P*<0,0001.**(C)**Percento životaschopných spermií v každej skupine. Nebol zaznamenaný žiadny významný rozdiel.

$$\text{Index párenia (\%)} = \frac{\text{Počet spárených samíc}}{\text{Počet samíc umiestnených so samcami}} 100 \text{ x}$$

$$\text{Miera tehotenstva (\%)} \quad \frac{\text{Počet gravidných samíc potkanov}}{\text{Úplný úspech pri plne spárených samiciach potkanov}} \quad 100$$

Metriky pôrodnosti

Pôrodná hmotnosť, miera živonarodených mláďat a pomer pohlaví mláďat: 24 hodín po prirodzenom pôrode bola každá matka vyšetrená, aby sa zaznamenal celkový počet mláďat na vrh, mŕtvo narodené mláďatá a akékoľvek pozorované anomálie. Okrem toho boli všetky mláďatá individuálne odvážené pomocou váh s citlivosťou 0,01 g a miera živonarodených mláďat bola stanovená pomocou nasledujúceho vzorca.[19]

$$\text{Miera pôrodnosti živých detí \%} = \frac{\text{Počet živých mláďat}}{\text{Celkový počet narodených šteniat}} 100 \text{ x}$$

Pomer pohlaví bol tiež zaznamenaný po 24 hodinách od pôrodu a vypočítaný pomocou nasledujúceho vzorca:

$$\text{Pomer pohlaví} = \frac{\text{Počet živých samčích mláďat}}{\text{Počet živých samičích mláďat}}$$

Všetky mláďatá a matky boli po zbere údajov utratené.

*Štatistická analýza*Všetky výsledky boli vyjadrené ako priemer ± štandardná odchýlka (priemer ± SD). Na porovnanie významnosti parametrov spermií a pôrodnej hmotnosti mláďat bola použitá jednofaktorová ANOVA. Na analýzu doby gravidity bol použitý Kruskal-Wallisov test.

Štatistická analýza sa vykonala pomocou softvéru GraphPad Prism 10 (GraphPad Software, USA) s *P* <0,05 sa považuje za významné.

Výsledky

*Parametre spermií*Zistenia ukázali, že 3,5 GHz (119,2 x 10_6/ml ± 4,22,*P*<0,001) a 24 GHz (131,3 x 10_6/ml ± 8,55,*P*Skupiny vystavené vplyvu <0,001) preukázali významný pokles koncentrácie spermií v porovnaní s kontrolnou skupinou (175,5 x 10_6/ml ± 2,31) (**Obr. 2A**). Rozdiely medzi exponovanými skupinami neboli štatisticky významné (*P*= 0,31).

3,5 GHz (43,6 % ± 2,77,*P*=0,001) a 24 GHz (27,3 % ± 7,58,*P* Skupiny vystavené vplyvu <0,001) tiež vykazovali významný pokles percenta pohyblivosti spermií v porovnaní s kontrolnou skupinou (75,6 % ± 3,12).**(Obr. 2B)** ale žiadny významný rozdiel medzi týmito dvoma exponovanými skupinami (*P*= 0,0822). Percento životaschopnosti spermií zostalo v celej skupine nezmenené (**Obr. 2C**).

*Výsledky párenia*Dve samice v kontrolnej skupine vykazovali nepravidelné estrálne cykly. Táto variabilita je však u hlodavcov uznávaným biologickým javom.[20]V dôsledku toho kontrolná skupina dosiahla index párenia iba 66,7 %, zatiaľ čo obe exponované skupiny dosiahli index párenia 100 % (**Tabuľka I**).

Najvyššie obdobie párenia bolo zaznamenané v kontrolnej skupine (3,00 ± 1,16 dňa), nasledovaná skupinou s frekvenciou 24 GHz (2,5 ± 1,22 dňa) a skupinou s frekvenciou 3,5 GHz (2,17 ± 0,41 dňa), pričom medzi skupinami nebol zaznamenaný žiadny významný rozdiel (*P*= 0,50).

Tabuľka I. Index párenia, miera gravidity a obdobie gravidity samíc potkanov

Parametre	Ovládanie	3,5 GHz	24 GHz
Počet samíc umiestnené so samcami	6	6	6
Počet spárených samíc	4	6	6
Počet samíc tehotná	4	6	5
Index párenia (%)	66,7	100	100
Páriace obdobie (dni)	3,00±1,155	2,167±0,408	2,5±1,22
Miera tehotenstva (%)	100	100	83,3
Obdobie tehotenstva (Dni)	23±0	23±0	22±0,37

Údaje sú prezentované ako priemer ± štandardná odchýlka pre obdobie párenia a ako medián ± stredná chyba priemeru (SEM) pre obdobie gravidity. Index párenia (%) = (Počet spárených samíc/Počet samíc umiestnených k samcom) × 100. Miera gravidity (%) = (Počet gravidných samíc potkanov/Celkový počet úspešne spárených samíc potkanov) × 100

Tabuľka II. Metriky narodenia mláďat

Parametre	Ovládanie	3,5 GHz	24 GHz
Počet narodených šteniatok			
Naživo	38	53	46
Mŕtvy	0	10	0
Celkom	38	63	46
Miera pôrodnosti (%)	100	84,13	100
Počet živých šteniat			
Muž	21	29	22
Žena	17	24	14
Pomer pohlaví	1,24	1.21	1,60
Hmotnosť pri narodení	7,312±0,74	7,210±0,60	6,707±0,49*

Údaje o hmotnosti pri narodení sú uvedené ako priemer ± štandardná odchýlka. Miera pôrodnosti živých mláďat (%) = (Počet živých mláďat/Počet všetkých narodených mláďat) × 100
Pomer pohlaví = Počet živých samčích mláďat/Počet živých samičích mláďat (v deň 0 po pôrode)

*Predstavuje významný rozdiel v porovnaní s kontrolnou skupinou

Kontrolná skupina aj skupina s frekvenciou 3,5 GHz vykazovali 100 % mieru gravidity. Skupina s frekvenciou 24 GHz však mala zníženú mieru gravidity, a to 83,3 %, pričom jedna samica potkana neoplodnila napriek prítomnosti spermií vo vaginálnej zátke. Obdobie gravidity nevykazovalo žiadny významný rozdiel medzi skupinami (P= 0,05).

Metriky pôrodnosti:

Celkový počet a hrubé anomálie doručených mláďat*:* Kontrolná skupina porodila 38 mláďat, skupina s frekvenciou 3,5 GHz 63 mláďat a skupina s frekvenciou 24 GHz 46 mláďat.**(Tabuľka II)**Žiadne mŕtvo narodené deti ani hrubé anomálie v kontrolnej skupine a skupine vystavenej frekvencii 24 GHz. Avšak 10 mláďat zo skupiny s frekvenciou 3,5 GHz sa narodilo mŕtvo s rozsiahlymi anomáliami vrátane deformácie hlavy a tela a dve mláďatá vykazovali aj prítomnosť brušného hematómu. **(Doplnkový obrázok 3)**.

Pôrodná hmotnosť, miera živonarodených mláďat a pomer pohlaví mláďat: Miera živonarodených mláďat bola 100 % v kontrolnej skupine a skupine s frekvenciou 24 GHz, ale nižšia v skupine s frekvenciou 3,5 GHz (84,13 %). Hmotnosť mláďat sa v skupine vystavenej frekvencii 24 GHz významne znížila v porovnaní s kontrolnou skupinou (P< 0,001, 6,71 ± 0,49) **(Tabuľka II)**.

Medzitým bol pomer pohlaví (samice:samice) v kontrolnej skupine 1,24, v skupine s frekvenciou 3,5 GHz 1,21 a v skupine s frekvenciou 24 GHz 1,60.**(Tabuľka II)** bez štatisticky významného rozdielu medzi skupinami.

Diskusia

Vystavenie RF-EMF sa spája so zhoršenou spermatogenézou,[6]poškodenie DNA spermií,[21]a znížené hladiny testosterónu.[22]Predchádzajúce štúdie sa však zameriavali predovšetkým na konvenčné technológie 3G a 4G. Podľa našich najlepších vedomostí je toto prvá štúdia, ktorá skúma vplyv najnovšej technológie 5G využívajúcej signály strednej frekvencie (3,5 GHz) a vysokej frekvencie (24 GHz) na kvalitu spermií a výsledky tehotenstva.

Táto štúdia zistila významný pokles koncentrácie aj motility spermií po vystavení frekvenciám 3,5 GHz a 24 GHz, čo je v súlade s predchádzajúcimi štúdiami.[6]Pri frekvencii 3,5 GHz môžu byť tieto účinky sprostredkované *cez*dve dráhy: tepelný efekt, kde absorpcia mikrovlnného RF-EMF zvyšuje teplotu semenníkov[23]a prerušuje signalizáciu, ktorá je kľúčová pre spermatogenézu,[24]čím sa zhoršuje koncentrácia spermií. Na druhej strane, netermálny účinok zahŕňa rozvoj oxidačného stresu v semenníkoch[25]ktoré môžu indukovať peroxidáciu lipidov a apoptózu,[26]čo v konečnom dôsledku spôsobuje poškodenie DNA spermií. Bolo tiež dokázané, že oxidačný stres semenníkov spôsobuje dysreguláciu intracelulárneho vápnika.$_{2+}$signalizácia, zmeny v expresii proteínov a mitochondriálna dysfunkcia.[27]
Keďže produkcia mitochondriálneho ATP a integrita membrány sú kľúčové pre pohyb spermií, poškodenie mitochondrií sprostredkované ROS môže viesť k zníženej pohyblivosti spermií.

Hoci milimetrové vlnové žiarenie má plytšiu penetráciu ako mikrovlnné frekvencie, biologické

Účinky sa môžu prejavovať aj mimo kože. Lokalizované zahrievanie s následným prenosom tepla, oxidačným stresom a nepriamym narušením bunkovej signalizácie by mohli pravdepodobne ovplyvniť koncentráciu a pohyblivosť spermií.[28] Aj minimálna penetrácia do biologických tkanív môže vyvolať tepelné účinky, čo vedie k lokálnemu zahrievaniu, ktoré mení funkciu blízkych orgánov, najmä semenníkov.[29]

Avšak 3,5 GHz preukázala 100 % mieru tehotenstva napriek zníženej kvalite spermií, čo je v súlade s predchádzajúcimi správami.[30] Rozdiel medzi zníženou kvalitou spermií a nezmenenou mierou tehotenstva môže byť spôsobený vysokou produkciou spermií u hlodavcov.[27] Funkčná rezerva produkcie spermií teda dokáže udržať počatie napriek zvýšenej apoptóze buniek alebo poškodeniu DNA.[27]

Obe exponované skupiny vykazovali vyššie indexy párenia a kratšie obdobia párenia ako kontrolná skupina. Nižší index párenia a predĺžené obdobie párenia v kontrolnej skupine boli pripísané nepravidelnému estrálnemu cyklu u dvoch samíc, čo naznačuje, že neúspešné párenie môže byť spôsobené skôr samicou ako samcom. Naproti tomu samice spárované so skupinami s frekvenciami 3,5 GHz a 24 GHz vykazovali pravidelné estrálne cykly, čo viedlo k úspešnému páreniu. Na prekonanie tohto obmedzenia je najlepšie spárovať každého samca s viacerými samicami, aby sa v budúcnosti dosiahli presnejšie posúdenia reprodukčného výkonu samcov a minimalizoval vplyv variability samičieho cyklu.

Skupina vystavená frekvencii 3,5 GHz vykazovala závažné hrubé abnormality a mŕtvo narodené deti u potomstva. Naproti tomu skupina vystavená frekvencii 24 GHz vykazovala nižšiu mieru tehotenstva a nižšiu pôrodnú hmotnosť, čo naznačuje, že vystavenie vysokofrekvenčným elektromagnetickým poliam s vyššou frekvenciou môže narušiť skorý embryonálny vývoj a viesť k neúspešnému počatiu napriek prítomnosti spermií.[31] alebo narušiť rast plodu.

Tieto zistenia ďalej naznačujú, že RF-EMF poškodzuje DNA spermií, vedie k narušeniu embryonálneho vývoja a má nepriaznivé výsledky pri pôrode.[30]

Hoci poškodenie DNA spermií nebolo v tejto štúdii hodnotené, v mikrovlnných štúdiách bola hlásená zvýšená fragmentácia DNA spermií.[27,29] Okrem toho nedávna štúdia mmWaves pri 35,5 GHz zaznamenala zvýšené poškodenie DNA spermií, markery oxidačného stresu semenníkov a zníženie antioxidačných obranných schopností.[30] Budúce štúdie by mali korelovať oxidačný stres semenníkov, fragmentáciu DNA spermií a výsledky tehotenstva, aby sa overili základné mechanizmy.

U potomstva F1 exponovanej skupiny došlo k nárastu pomeru samcov a samíc, čo je v súlade s predchádzajúcou správou.[30] Mechanizmus zostáva nejasný, ale narušenie reprodukčných hormónov[32] hrá kľúčovú úlohu pri zvyšovaní pomeru pohlaví potomstva. Tepelné účinky alebo oxidačný stres vyvolaný vystavením RF-EMF môžu rozdielne ovplyvniť spermie s chromozómom X a Y, čím sa zvýhodní prežitie alebo schopnosť oplodnenia spermií Y. Na objasnenie základných mechanizmov sú potrebné ďalšie mechanistické štúdie.

Celkovo zistenia súčasnej štúdie naznačujú rozdielny negatívny vplyv na výsledky tehotenstva po párení s mužskými partnermi vystavenými RF-EMF. Budúce štúdie by mali tiež využívať dizajny párenia, ktoré menia expozíciu medzi partnermi a hodnotia ich vplyv na tehotenstvo a výsledky potomstva. Okrem toho by bola prospešná aj väčšia vzorka na identifikáciu jemných rozdielov medzi podmienkami expozície 3,5 GHz a 24 GHz. Zaslepenie nebolo v tejto štúdii použité z dôvodu praktických obmedzení pri vykonávaní experimentu, čo môže viesť k skresleniu pozorovateľa pri hodnotení výsledkov.

Tieto zistenia môžu informovať o potenciálnych rizikách pre mužské reprodukčné zdravie v dôsledku vystavenia ľudí zariadeniam vysielajúcim rádiofrekvenčné elektromagnetické žiarenie s podobnými frekvenciami. K prenosu na ľudské reprodukčné zdravie by sa však malo pristupovať opatrne, pretože scenáre expozície v reálnom svete sú zložité a ich presná replikácia v kontrolovaných experimentálnych prostrediach je stále náročná.

Príspevky autorov AH, FHFJ, SFI, MHM: Navrhli štúdiu; AH, AFZ, MFMR, NJ, SMAST, SV: Vykonali zber údajov, interpretáciu a analýzu; ZZ, AAMB: návrh expozičného zariadenia a poskytnutie antény; AH: Písanie rukopisu; FHFJ, SFI, KO: Dohľad, písanie rukopisu. Všetci autori si prečítali a schválili finálnu tlačenú verziu rukopisu.

Finančná podpora a sponzorstvo Táto štúdia bola podporené v rámci grantovej schémy pre základný výskum (číslo grantu FRGS/1/2022/SKK06/UKM/03/2), financovanej Ministerstvom vysokoškolského vzdelávania Malajzie. Túto prácu podporil aj grant pre základný výskum Lekárskej fakulty Univerzity Kebangsaan v Malajzii (číslo grantu FF-2023-176).

Konflikty záujmov Žiadne.

Využitie technológií s podporou umelej inteligencie (AI) na prípravu rukopisu Autori potvrdzujú, že pri písaní rukopisu nebola použitá žiadna technológia s podporou umelej inteligencie a žiadne obrázky neboli pomocou umelej inteligencie manipulované.

5G फ्रीक्वेंसी मखुय इस्मोल तजे इंटरनटे ीिबतर स्त रुकावट के काललगं, और स्ाट्टडडवाइससे को आपस्मे लए डकया जाता ह।ै इस अध्यमथ ंयंयंय

26. Dutta S, Majzoub A, Agarwal A. Oxidačný stres a funkcia spermií: Systematický prehľad hodnotenia a liečby. *Arab J Urol.*2019;17:87–97.
27. Yan S, Ju Y, Dong J, Lei H, Wang J, Xu Q,*a kol.*Vystavenie otcovskému rádiofrekvenčnému elektromagnetickému žiareniu spôsobuje u potomkov myší rozdiely v trajektórii telesnej hmotnosti a metabolizme glukózy medzi pohlaviami.*Predné verejné zdravie.* 2022;10: 872198.
28. Ploskonos MV, Zulbalaeva DF, Kurbangalieva NR, Ripp SV, Neborak EV, Blagonravov ML,*a kol.*Posúdenie biologických účinkov mikrovlnného ožiarenia na ľudské spermie in vitro a určenie úlohy polyamínov semennej plazmy v tomto procese. *Spoločnosť Biomed Rep.*2022;16:38.
29. Kesari KK, Agarwal A, Henkel R. Žiarenie a mužská plodnosť. *Reprod Biol Endocrinol.*2018;16:118.
30. Pandey N, Giri S, Sharma G. Účinky vystavenia otcovho dieťaťa rádiofrekvenčnému žiareniu na spermie a integritu semenníkov u samcov švajčiarskych albínskych myší F1. 2024. Dostupné z: *http://biorxiv.org/lookup/doi/10.1101/2024.01.23.576880*, prístup 27. apríla 2025.
31. Cordelli E, Ardoino L, Benassi B, Consales C, Eleuteri P, Marino C,*a kol.* Účinky vystavenia rádiofrekvenčnému elektromagnetickému poľu (RF-EMF) na výsledky tehotenstva a pôrodu: Systematický prehľad experimentálnych štúdií na cicavcoch okrem človeka.*Medzinárodné prostredie*2023;180:108178.
32. Li JH, Jiang DP, Wang YF, Yan JJ, Guo QY, Miao X,*a kol.*Vplyv elektromagnetického impulzu na pomer pohlaví potomstva samcov myší BALB/c.*Environ Toxicol Pharmacol.*2017;54:155–61.

Pre korešpondenciu: Dr Farah Hanan Fathihah Jaffar, Katedra fyziológie, Lekárska fakulta, Universiti Kebangsaan Malajzia, Cheras 560 00, Kuala Lumpur, Malajzia *e-mail:*farahhanan@ukm.edu.my

Doplnkové súbory sú k dispozícii na adrese:https://doi.org/10.25259/IJMR_3658_2025