

37. OTDK

Biológia szekció

Az 5G technológia rádiófrekvenciás expozíciójának hatásai patkányok kognitív teljesítményére és általános jóllétére

Készítette: Ábel Zsóka Mária
biológia Msc 2024-es évfolyam

Témavezetők: Dr. Bali Zsolt Kristóf, Prof. Dr. Hernádi István

PTE TTK Biológia Intézet



2025.

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés	3
1.1.	<i>A rádiófrekvenciás elektromágneses sugárzás forrásai.....</i>	<i>3</i>
1.2.	<i>A mobilhálózatok fejlődése.....</i>	<i>4</i>
1.3.	<i>Az elektromágneses terek biológiai hatásai és dozimetria.....</i>	<i>5</i>
1.4.	<i>Kutatások a rádiófrekvenciás elektromágneses terek egészségügyi hatásairól.....</i>	<i>6</i>
2.	Célkitűzések.....	8
3.	Anyagok és módszerek:	9
3.1.	<i>A kísérleti állatok:</i>	<i>9</i>
3.2.	<i>A besugárzó rendszer és dozimetria.....</i>	<i>9</i>
3.3.	<i>A viselkedésteszt.....</i>	<i>10</i>
3.3.1.	<i>A nyíltporond teszt (Open Field, OF).....</i>	<i>10</i>
3.3.2.	<i>Az új tárgy felismerési teszt (novel object recognition, NOR).....</i>	<i>11</i>
3.3.3.	<i>A megemelt O-labirintus teszt (Elevated O-Maze; EOM)</i>	<i>12</i>
3.4.	<i>A kísérleti elrendezés.....</i>	<i>13</i>
3.5.	<i>Statisztikai analízis</i>	<i>14</i>
4.	Eredmények	15
4.1.	<i>A nyílt porond teszt eredményei</i>	<i>15</i>
4.2.	<i>Az új tárgy felismerési teszt eredményei.....</i>	<i>17</i>
4.3.	<i>A megemelt O-labirintus teszt eredményei.....</i>	<i>20</i>
5.	Diskusszió	21
6.	Irodalomjegyzék	24
7.	Köszönetnyilvánítás	29

1. Bevezetés

Napjainkban a telekommunikáció már alapvető szerepet játszik a társadalom működésében. A digitális kommunikáció elterjedése lehetővé tette az információ gyors, valós idejű áramlását, ami mind a gazdasági mind a magánszférában kényelmet hozott a felhasználók számára. Ennek köszönhetően a digitális és telekommunikációs technológiák fejlesztése az elmúlt években robbanás szerűen felgyorsult. Azonban ez a gyors fejlődés nemcsak kényelmet hozott, hanem kérdéseket és aggodalmat is felvetett a társadalom körében az ezen technológiák által használt rádiófrekvenciás elektromágneses sugárzások (RF-EMF) esetleges szervezetre gyakorolt egészségkárosító hatásaival kapcsolatban. Ennek következtében az elmúlt évtizedekben számos kutatás irányult ezen sugárzások egészségre gyakorolt hatásainak vizsgálatára. A kutatásokban kiemelten vizsgálták a rádiófrekvenciás sugárzások kognitív képességekre és mentális állapotra gyakorolt hatásait. Ennek háttérében az állhat, hogy a mobiltelefonok használata során az eszközt közvetlenül a fejünkhöz közel tartjuk, aminek következtében a telefon által kibocsájtott kimeneti energia legnagyobb részét a fej nyeli el (Gandhi, 2002). Bár a múltban számos kutatás vizsgálta a RF-EMF hatásait a szervezetre, többek között a kognitív képességekre nézve is, ezen technológiák gyors fejlesztése következtében kevés adat áll rendelkezésünkre a legújabb technológiák, mint például az 5. generációs mobilhálózat (5G) emberi szervezetre gyakorolt hatásairól.

1.1. A rádiófrekvenciás elektromágneses sugárzás forrásai

A rádiófrekvenciás elektromágneses mezők mindenhol jelen vannak környezetünkben (Eggert és mtsai., 2020). A rádiófrekvenciás tartományba (0,3MHz-300GHz) tartozó elektromágneses sugárzás származhat természetes vagy mesterséges forrásból (IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2013). A természetes RF expozíció egy része kozmikus háttérsugárzásból, más része a Napból ered, a mesterséges források emissziója azonban nagyságrendekkel meghaladja a természetesét (Thuróczy, 2002; World Health Organization. és mtsai., 2002). Ennek oka az, hogy az ezen frekvenciatartományba tartozó sugárzásokat használják a rádió- és televízió közvetítések, a mobiltelefon és WiFi hálózatok, valamint egyéb okoseszközök is (IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2013).

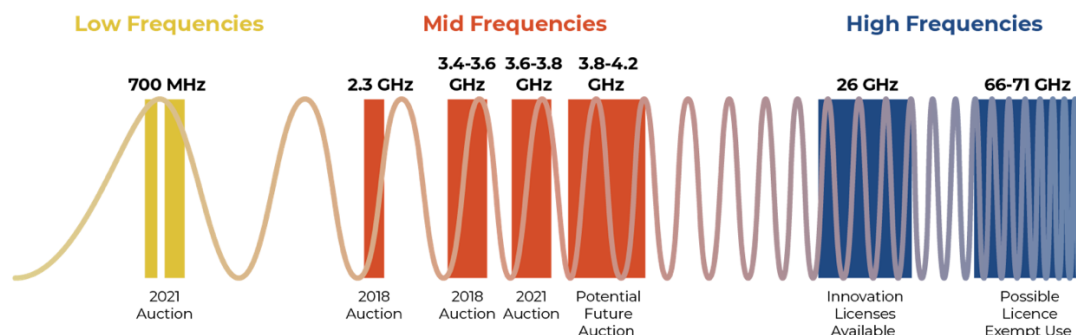
1.2. A mobilhálózatok fejlődése

A telekommunikációs technológiák az elmúlt évtizedekben jelentős fejlődésen mentek keresztül. A legutóbbi három évtized alatt ez a gyors fejlődés volt tapasztalható a vezeték nélküli kommunikáció területén is. Az 1970-es években megkezdődött az első generációs mobilhálózatok fejlesztése, azonban ez még a vezetékes telefon működésével analóg volt, rossz hangminőség és híváskiesések jellemezték. Az 1990-es évek elején megjelent a második generációs (2G) mobilhálózat, és ezt rövid időn belül követte a harmadik (3G) és negyedik generációs (4G) rendszerek fejlesztése. Az idő előrehaladtával a fejlődő mobilhálózatok egyre jobb minőséget és gyorsabb adatátvitelt biztosítottak a felhasználók számára. Az 5G a digitális átalakulás egyik pillére, valódi előrelépés az összes korábbi generációs mobilhálózathoz képest (Dangi és mtsai., 2021). Az 5G mobilhálózatok elterjedésének számos előnye van a többi mobilhálózat használatához képest, ezek közé tartozik: a nagy adatátviteli sebesség, a nagyon alacsony, milliszekundumos nagyságrendű késleltetési idő, és a nagyszámú csatlakoztatott eszköz elbírása a hálózat lassulása nélkül (Streetwave, 2024).

Az 5G mobilhálózatok elterjedése már 2018-ban elkezdődött az Amerikai Egyesült Államokban, azonban a hálózat telepítése 2019-ben indult be nagyobb mértékben köztük Európa számos államában is (European 5G Observatory, 2025).

Az 5G mobilhálózatok gyorsasága abból adódik, hogy ez a hálózat magasabb frekvenciákat használ, amelyek nagyobb sávzélességgel rendelkeznek szemben a korábbi technológiák alacsonyabb frekvenciáival. Az 5G spektrum több, különböző frekvenciatartományt is használ, köztük alacsony, közép, és magas frekvenciákat (*1. ábra*) Az alsó sáv legjellemzőbben használt frekvenciája 700 MHz (ez az USA-ban 600 MHz) a középső sáv esetén ez az érték 3,3-3,8 GHz (az USA-ban ez 2,6 GHz, illetve 3,7-4,98 GHz). A felső sáv általánosan használt frekvenciája 26 GHz (Japán, Dél-Korea és az USA kivételével, ahol ez 28 GHz). 2021 márciusának végére az 5G kereskedelmi szolgáltatásokat az EU 27 tagállamának 24 országában telepítették. A leggyakrabban használt frekvenciasávok a 700 MHz-es és a 3,3-3,8 GHz-es sáv, ez utóbbi az 5G elsődleges használati frekvenciájának minősül Európában (Streetwave, 2024; European 5G Observatory, 2025).

Az 5G mobilhálózatok elterjedése egyrészt kényelmet jelent a társadalom számára és nyilvánvaló előnyökkel jár, azonban aggodalomra is adhat okot a lakosság körében, hogy az egyre növekvő lefedettség milyen egészségügyi kockázatokkal járhat.



1.ábra. Az 5. generációs mobilhálózatok által használt frekvenciák és a bevezetésükütemezése. ¹

1.3. Az elektromágneses terek biológiai hatásai és dozimetria

A 0,3 MHz és 300GHz közötti sugárzások a rádiófrekvenciás tartományba esnek, ennek következtében ezek a sugárzások nem ionizálóak ugyanis energiájuk még 300GHz-nél is alacsonyabb a termikus energiánál, ez azt jelenti, hogy nem képesek az inter- és intramolekuláris kötések felhasítására, azaz ionizációra a szervezetben (Thuróczy, 2002). Ebből kifolyólag az szervezetben kialakuló intracelluláris hatások közvetetten jelentkezhetnek. Azonban az, hogy jelenleg nem áll rendelkezésre az RF-EMF biológiai rendszerekre gyakorolt hatását magyarázó általánosan elfogadott mechanizmus, kihívást jelent az EMF-vizsgálatok során nyert kísérleti adatok értelmezésében (Kocaman és mtsai., 2018). Egyes kutatások a termikus hatásokat, az oxidatív stresszt vagy más, nem termikus hatásokat találják a kiváltó okoknak (Singh és Kapoor, 2014).

A RF-EMF jellemzésére a villamosságban alkalmazott alapfogalmakat használják, mint az elektromos térerősség (E , V/m), a mágneses térerősség (H , A/m), valamint a teljesítménysűrűség (S , W/m² vagy mW/cm²). A biológiai testekben elnyelt dózis jellemzésére a fajlagos abszorpciós ráta (SAR: Specific Absorption Rate) használatos, amely megadja az egységnyi tömegben elnyelt teljesítmény nagyságát W/kg-ban (Thuróczy, 2002).

Az RF-EMF sugárzások lehetséges káros hatásainak megelőzése érdekében nemzetközi irányelveket hoztak létre olyan intézmények, mint a Nemzetközi Nem-Ionizáló Sugárzásvédelmi Bizottság (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, ICNIRP) a SAR segítségével. Az ICNIRP a 100 kHz és 300 GHz közötti, 6 percnél hosszabb

¹ Az ábra forrása: <https://streetwave.co/5g/5g-spectrum-mapping-explained/>

expozíció esetére, átlagos, teljes testre vonatkozóan 0,08 W/kg, fejre vonatkozóan 2 W/kg SAR értéket állapított meg alapvető korlátozásként (ICNIRP, 2020).

1.4. Kutatások a rádiófrekvenciás elektromágneses terek egészségügyi hatásairól

A RF-EMF szervezetre gyakorolt hatásainak vizsgálata már régóta kutatott terület. Ennek ellenére az, hogy a RF mezőknek való expozíció kockázatot jelenthet-e a közegészségügyre nézve, a kiterjedt epidemiológiai és kísérleti kutatások ellenére sem tisztázott teljesen (Sienkiewicz és van Rongen, 2019). A RF sugárzások hatásai sokfélék lehetnek. Vannak kutatások, amelyek az RF expozíciónak való kitettség genotoxikus hatását azonosították (Hussein és mtsai., 2016; Sahin és mtsai., 2016), ezzel szemben mások nem találták az expozíció ilyenfajta következményeit (Belyaev és mtsai., 2006). Egyéb lehetséges biológiai hatásokat is kimutattak a RF sugárzásoknak való kitettség következtében, mint a vér-agy gát permeabilitás változása. Egyes kutatások eredménye alapján az RF-EMF expozíció következtében a vér-agy gát permeabilitása nőtt (Eberhardt és mtsai., 2008; Nittby és mtsai., 2009), ezzel szemben voltak, akik nem mutattak ki semmilyen hatást erre nézve (Masuda és mtsai., 2009). Továbbiakban jelentős számú kutatás és metaanalízis született az ezen sugárzásoknak való kitettség és a rák kialakulásának kockázata között. Bár számos epidemiológiai tanulmány eredménye ellentmondásos volt az RF-EMF sugárzások hosszútávú következményeivel kapcsolatban, a legtöbb vizsgálat eredménye nem támasztja alá a mobilhasználat és a felnőttkori rák kialakulásának összefüggését (Repacholi és mtsai., 2012). Mindezek ellenére azonban a Nemzetközi Rákkutatási Ügynökség az embereken és állatokon tapasztalt rákkeltő hatás korlátozott bizonyítékai alapján a RF-EMF-kat az emberre nézve potenciálisan rákkeltőnek (2B csoport) minősítette (Baan és mtsai., 2011).

Az elmúlt években nagy számú kutatás foglalkozott a 2G-4G mobilhálózatok által használt RF sugárzások kognitív képességekre és általános jóllétre gyakorolt hatásaival. Egyes kutatási eredmények a hosszútávú 900 MHz-es rádiófrekvenciás sugárzásnak kitett állatok memóriájának leromlását mutatták ki, valamint a hippocampus sejtjeinek degradációját oxidatív stressz következtében (Sharma és Shukla, 2020). Más kutatások a krónikus 900 MHz-es RF-EMF-nek kitett állatok átmeneti, expozíció alatti memória romlását tapasztalták, ami az expozíció leteltével helyreállt (Tafakori és mtsai., 2020). Megint mások már rövidtávú 2100 MHz-es sugárzásnak akután kitett állatok memóriájában is romlást azonosítottak (Gökçek-Saraç, 2020). Ezzel szemben sok kutatás során nem tapasztaltak romlást a memóriában. A 900 MHz-es sugárzásnak hosszútávon kitett patkányok esetében nem regisztráltak memória romlást

(Keleş és mtsai., 2018). Maaroufi és mtsai. kísérlete során a hosszútávú 900 MHz-es sugárzásnak kitett patkányok esetében sem tapasztaltak változást a kognitív képességekben (Maaroufi és mtsai., 2014). A legújabb kutatások már a jelenleg legmodernebb 5G mobilhálózatok által használt RF sugárzások kognitív következményeinek összefüggésében végeztek kísérleteket. Quin és mtsai. nem találtak változást a 4,9 GHz-es 5G sugárzásnak kitett állatok memóriájában és szorongásszerű viselkedésében (Qin és mtsai., 2024). Más kutatások is hasonló következtetésre jutottak 5G expozíciónak kitett patkányok memóriájának vizsgálata során (Krivova és mtsai., 2024). Ezzel szemben számos esetben kimutatták azt, hogy az 5G-nek való kitettség különböző következményekkel járhat a szervezet egészségére nézve (Kostoff és mtsai., 2020; Simkó és Mattsson, 2019). Jelenleg azonban még nem áll rendelkezésre elegendő mennyiségű adat és kutatás ahhoz, hogy az 5G technológia által használt RF hullámoknak való hosszútávú kitettség kognitív képességekre gyakorolt lehetséges hatásairól egyértelmű következtetéseket vonhassunk le.

2. Célkitűzések

Az elmúlt években tehát számos kutatás célja volt feltárni a RF-EMF-ek egészségre gyakorolt lehetséges hatásait, azonban a legtöbb tanulmány fő célja ezen sugárzások egészséges, felnőtt szervezetre gyakorolt következményeinek vizsgálata volt. Kevesebb kutatás irányult a lehetséges következmények tanulmányozására a társadalom érzékenyebb rétegeiben, mint például a fejlődő szervezetekben (Marino és mtsai., 2011). Azonban az évek során a kommunikációs technológiák fejlődésével a fiatalabb generációk már egyre korábban egyre hosszabb időtartamú RF expozíciónak vannak kitéve (Kheifets és mtsai., 2005). Továbbá lehetséges, hogy vékonyabb koponyájuk miatt ezen sugárzások nagyobb hatást gyakorolnak a gyermekek szervezetre, kiemelten a kognitív képességeikre (Wiert és mtsai., 2008). Ennek következtében különösen fontos kérdés az, hogy ez az expozíció milyen hatásokkal járhat a fejlődő szervezetre, kiváltképp a kognitív képességeikre és az idegrendszerük fejlődésére. Ezek alapján megalapozott lenne több kutatást végezni az RF expozíció hatásairól a fiatal szervezetek összefüggéseiben.

A dolgozat célja az, hogy megvizsgáljuk a krónikus 5G 3500MHz-es rádiófrekvenciás sugárzás krónikus, egy hónapon keresztül tartó expozíciójának hatásait fejlődő szervezetekre. A kísérlet során tesztek végeztünk fiatal korú, serdülő (adoleszcens, 4-7 hetes) patkányok deklaratív memóriájának és általános jóllétének vizsgálatára a 4 hetes expozíció következményeinek feltárása céljából.

Konkrét kérdéseink a következők voltak:

1. Van-e hatása a krónikus 5G expozíciónak adoleszcens korú (4-7 hetes) patkányok deklaratív memóriájára?
2. Van-e hatása a krónikus 5G sugárzásnak az adoleszcens korú patkányok általános jóllétére, kiemelten a motoros aktivitásra, az exploratív és szorongásszerű viselkedésre nézve?

3. Anyagok és módszerek

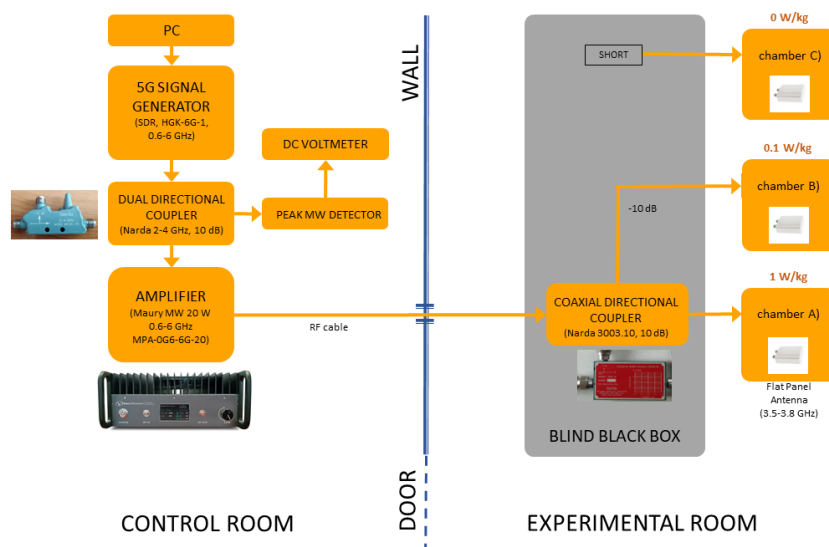
3.1. A kísérleti állatok

A kísérlet során 36 darab Lister Hooded patkányt vizsgáltunk, amelyek a kísérlet kezdetén 5 hetes korúak voltak. Az állatokat a Pécsi Tudományegyetem Szentágothai János Kutatóközpontjának (PTE SZKK) állatházában tartottuk 36 cm × 23 cm × 21 cm méretű műanyag ketrecekben, ketrecenként hármassával. Az állatházban a hőmérséklet és páratartalom szabályozott volt, és a megvilágítás 12 órás világos és 12 órás sötét ciklusban váltakozott. Az állatoknak az élelemhez és a vízhez ad libitum hozzáférésük volt. Az állatok tartását és az állatkísérleteket a magyar kormány 40/2013. (II. 14) számú rendeletében és az EU 2010/63/EU direktívájában foglalt állatkísérletekre vonatkozó szabályozásoknak megfelelően végeztük a Pécsi Tudományegyetem Állatjóléti Bizottsága és az Agrárminisztérium Állatkísérleti Tudományos Etikai Tanácsa által jóváhagyott és a Baranya Vármegyei Kormányhivatal által kiadott állatkísérletes kutatási engedély alapján (nyilvántartási szám: BA02/2000-47/2023).

3.2. A besugárzó rendszer és dozimetria

Az 5G jelet egy szoftver-vezérelt rádió szolgáltatotta (software defined radio – SDR) amely 3,5 GHz-es 5G FDD jelet szolgáltatott 60 MHz sáv szélességgel. Az 5G NR jel 20 W-os RF teljesítményerősítővel (Maury Microwaves, USA) lett erősítve. A bemeneti jelet (input) egy vak fekete doboz osztotta szét három irányba, eltérő kimeneti teljesítményekkel, ezek a kimenetek az állatketrecek tartalmazó három besugárzó kamra tetején helyezkedtek el. Egy irányított kapcsoló a feketedobozon belül a jelet két irányba továbbította. Az egyik irányba azonos nagysággal továbbította a jelet ez volt az „A” kamra, míg a „B” kamrába -10 dB-es jel lett továbbítva. A „C” kamrába nem továbbított teljesítményt a fekete doboz. A fekete doboz teljesen zárt volt, belseje kívülről nem látható, így a kísérletet végzők nem ismerték az egyes kamrák által kapott teljesítményeket. A besugárzó kamrák abszorbens anyaggal lettek borítva, hogy elnyeljék és csökkentsék a visszavert RF teljesítményt. Az expozíciós kamra tetején három Flap Panel antenna (L-com, USA) 10 dBi erősítéssel, 2 port ± 45 ferde polarizációval, 3,5-3,8 GHz, 60 fokos HPBW-vel (half power beam width), 50 cm-re volt elhelyezve az állatketrecek aljától. A ferde polarizáció során, az antenna polarizációja szöget zár be a függőleges és vízszintes polarizációkkal. Ha a 2 antenna elemet jobbra és balra döntjük 45 fokkal, a továbbított és fogadott jelek szintjeinek egyenletessége javítható. Aminek következtében jobb lefedettséget, és homogénebb SAR értéket biztosíthatunk a szabadon mozgó állatok esetében. Az erősítő kimeneti teljesítményét folyamatosan ellenőriztük egy

egyenfeszültségmérőhöz csatlakoztatott RF-csúcsdetektorral. A maximális SAR csúcsérték 1 W/kg, 0,1 W/kg, 0 W/kg volt. Egy expozíciós kamrába két állatketrecet helyeztünk bennük három-három patkánnyal. A besugárzó rendszer felépítése a 2. ábrán látható.

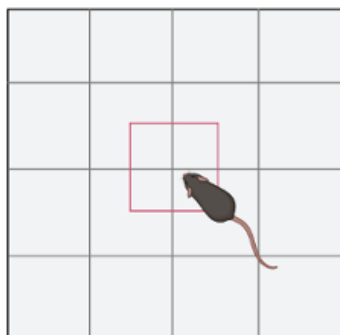


2. ábra. A 3,5 GHz-es 5G RF expozíciós rendszer blokksémája (ábra: Vecsei Zs. NNGYK).

3.3. A viselkedésteszték

3.3.1. A nyíltporond teszt (Open Field, OF)

A nyílt porond teszt (OF) az állatok általános aktivitásának és szorongásszerű viselkedésének vizsgálatára lehetőséget adó kísérleti paradigma. A teszt alapjául az szolgál, hogy a rágcsálók alapvetően kerülnek a nagy, világos, ismeretlen nyitott tereket (Choleris, 2001). Ezért a teszt során tanúsított egyes viselkedési elemek jó indikátorai az általános aktivitásnak és a szorongásszerű viselkedésnek is. Az OF tesztet egy szürke 50x50 cm-es dobozban végeztük, amely 4x4 darab négyzetre lett osztva, a középső négy négyzetet belső zónának neveztük (3. ábra). A teszt során az állatot a dobozba helyezve 5 percre engedték felfedezni a környezetét. Közben mértük a vonalátlépések számát, a belső zónába való belépések számát és a felágaskodások számát. A vonal átlépések számából és a felágaskodások számából az általános aktivitásra és a vertikális explorációra, míg a belső zónába való belépések számából a szorongás mértékére következtethetünk. Minden egyes patkány után a dobozt alaposan megtisztítottuk 20%-os etanollal.



3.ábra. A nyílt porond teszt (Biorender)

3.3.2. Az új tárgy felismerési teszt (novel object recognition, NOR)

Az új tárgy felismerési teszt (NOR) a rágcsálók deklaratív nem-térbeli memóriájának vizsgálatára szolgál. A teszt a rágcsálók új dolgok iránti veleszületett, természetes érdeklődésén alapul (Ennaceur és Delacour, 1988). A NOR teszt során az OF tesztben alkalmazott dobozt használtuk, valamint az OF teszt minden esetben a NOR teszt előtt volt elvégezve, így az állatok már ismerték a környezetet. Az NOR teszt két próbából áll (Ennaceur és Delacour, 1988). Az első próba alkalmával minden patkány 3 percig vizsgálhat két, az arénában elhelyezett teljesen ugyanolyan tárgyat. A két próba között 24 óra késleltetést alkalmaztunk. A 24 óra leteltével végeztük a második próbát, melynek során az arénában az előző próbában már vizsgált tárgyat és egy teljesen ismeretlen tárgyat helyeztünk el, a tárgyakat a patkányok újabb 3 percig vizsgálhatták (4.ábra). Minden egyes patkány után a dobozt és a tárgyakat is alaposan megtisztítottuk 20%-os etanollal. A kísérlet során négy különböző tárgypárt használtunk, amelyeket véletlenszerűen osztottunk el az állatok és a kísérleti ülések között (latin-négyzet elrendezés). Mindkét próba során rögzítésre került az egyes tárgyak vizsgálatával töltött idő. A tárgy vizsgálatának tekintettük, ha az állat az adott tárgyat szagolta, vagyis felé fordult és az orrát hozzádugta. Az egyes tárgyak felfedezésével töltött idő alapján diszkriminációs indexet számoltunk, amely segítségével következtettünk a deklaratív memória állapotára. A diszkriminációs index kiszámítása:

$$DI = \frac{T_{(új)} - T_{(régi)}}{T_{(összes)}}$$

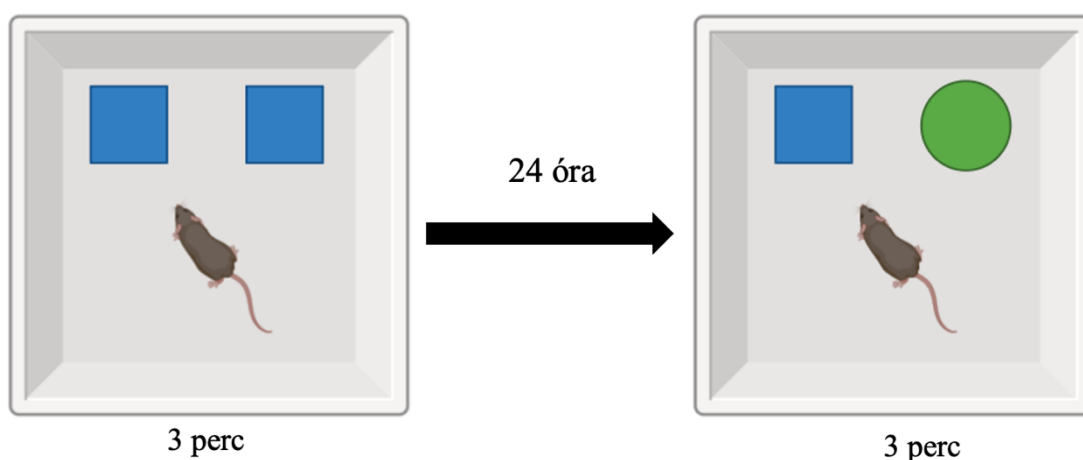
ahol:

$T_{(új)}$: az új tárgy vizsgálatával töltött idő (s)

$T_{(régi)}$: a régi tárgy vizsgálatával töltött idő (s)

$T_{(összes)}$: a két tárgy vizsgálatával töltött idő összege (s)

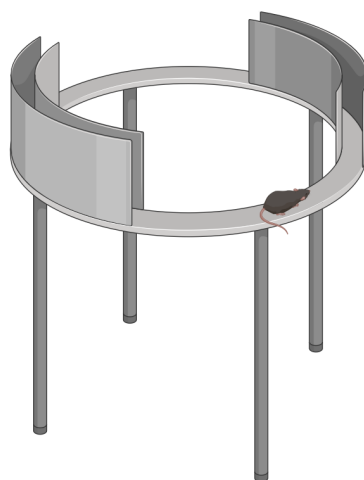
A diszkriminációs index értékei +1 és -1 között mozoghatnak. A diszkriminációs index pozitív szám, ha az új tárgy felfedezésével az állat több időt töltött, negatív, ha a régi tárgyat vizsgálta tovább. A diszkriminációs index 0 körüli értéke azt jelenti, hogy az állat mindkét tárgyat egyenlő ideig figyelte meg. Az adatok kiértékelése előtt ki lettek zárva azok az egyedek amelyek a második próba során nem mutattak exploratív aktivitást minimum 5 másodpercig a két tárgy felé összesen, illetve azok, amelyek csak az új (DI=1) vagy csak a régi (-1) tárgyat vizsgálták. Ha az állat diszkriminációs indexe a +1 felé közelít, abból a deklaratív memória épségére következtethetünk, amennyiben az érték a nullához, illetve a -1-hez esik közel akkor a deklaratív memória romlását feltételezzük.



4.ábra. Az új tárgy felismerési teszt menete (saját ábra -Biorender)

3.3.3. A megemelt O-labirintus teszt (Elevated O-Maze; EOM)

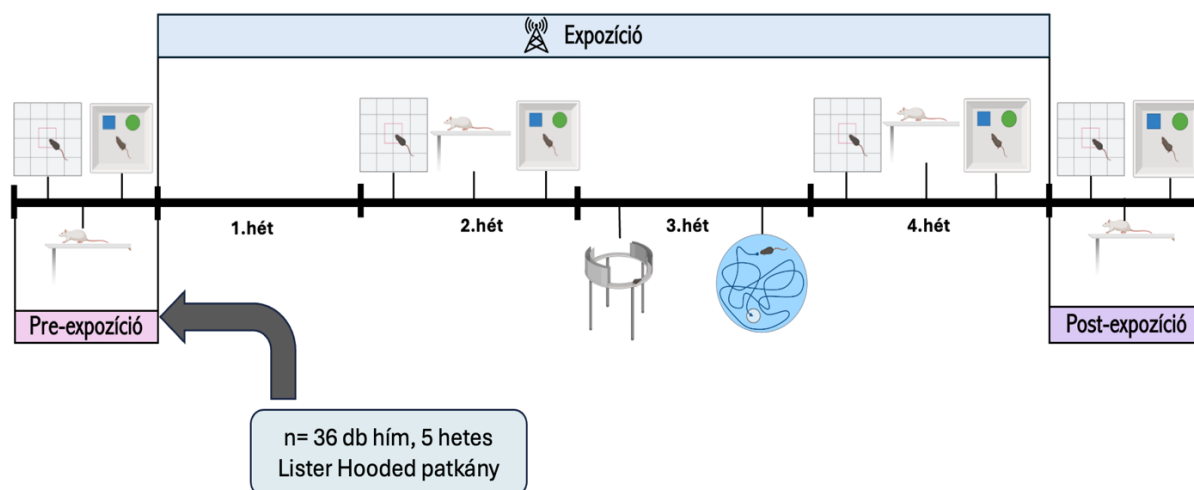
Az általános jóllét vizsgálata során a szorongásszerű viselkedés elemzésére a megemelt O-labirintus tesztet (EOM) alkalmaztuk. Az EOM teszt a szintén szorongásszerű viselkedés elemzésére használt megemelt keresztpalló teszt (EPM) módosított változata: mivel ez az apparátus nem tartalmaz központi platformot, lehetőséget ad a szorongásszerű viselkedés pontosabb mérésére (Shepherd és mtsai., 1994). Az apparátus egy 61 cm magas állványokon elhelyezett kör alakú platformból állt. A labirintus átmérője 100 cm, a platform szélessége 10 cm volt, amely négy negyedre volt osztva (5.ábra). A platform két negyedét 30cm-es falakkal körülvevett zárt zóna tette ki, míg két negyedét nem vették körül falak (nyitott zónák) (Bali és mtsai., 2022). A teszt kezdetén a patkányokat az egyik zárt zónába helyeztük, majd 5 percig figyeltük meg a viselkedésüket. Minden patkány után az apparátus 20%-os etanollal való fertőtlenítése következett. Az 5 perces időintervallum során rögzítésre került a nyitottzónában töltött idő. Ezekből a paraméterekből következtettünk a szorongásszerű viselkedés mértékére.



5. ábra. A megemelt O-labirintus teszt (saját ábra - Biorender)

3.4. A kísérleti elrendezés

Az állatokat 3 egyenlő csoportra osztottuk ($n=12$), egy 30 W/m^2 ($\text{SAR} \sim 1 \text{ W/kg}$) besugárzási dózisú, egy 3 W/m^2 ($\text{SAR} \sim 0.1 \text{ W/kg}$) besugárzási dózisú, valamint egy álbesugárzott csoportra (0 W/kg , $\text{SAR}=0 \text{ W/kg}$). A krónikus expozíció során minden patkányt 4 héten keresztül naponta 1 órán át tettünk ki 5G sugárzásnak (6. ábra). Annak érdekében, hogy kizárjuk a mérések során felmerülő emberi torzításokat a kísérletet kettős vak elrendezésben végeztük. A besugárzás megkezdése előtt (0. hét) preexpoziációs kísérleteket végeztünk, mely során felmértük az állatok alap kognitív teljesítményét, általános neurológiai állapotát és az általános aktivitásukat. Az általános aktivitás vizsgálatára OF tesztet, a memória állapotának felmérésére az NOR tesztet alkalmaztuk, az általános neurológiai állapot felmérésére egy neurológiai állapot felmérő teszt sorozatot (Modified Neurological Severity Score; mNSS) alkalmaztunk. A következő héten megkezdjük az 5G expozíciót. A besugárzás 2. hetén elvégeztük az első, expozíció közbeni viselkedési teszteket, amikor megismételtük az OF, a mNSS és a NOR teszteket. Az expozíció harmadik hetén a szorongásszerű viselkedés elemzésére elvégeztük a EOM tesztet. A kísérlet 4. hetén megismételtük az OF, mNSS és a NOR tesztet. Az expozíció leteltével 12 patkányt feláldoztunk, hogy vér és agymintáikat további vizsgálatoknak vethessük alá. A további 24 patkánnyal post-expoziációs kísérleteket végeztünk, a besugárzás utolsó napja után két héttel. Ekkor újabb OF, neurológiai állapotfelmérő és NOR tesztek következtek. A kísérletek után az állatok feláldozásra kerültek, további agy és vérminták begyűjtése céljából.



6. ábra. A kísérleti elrendezés hetekre lebontva. (saját ábra - Biorender)

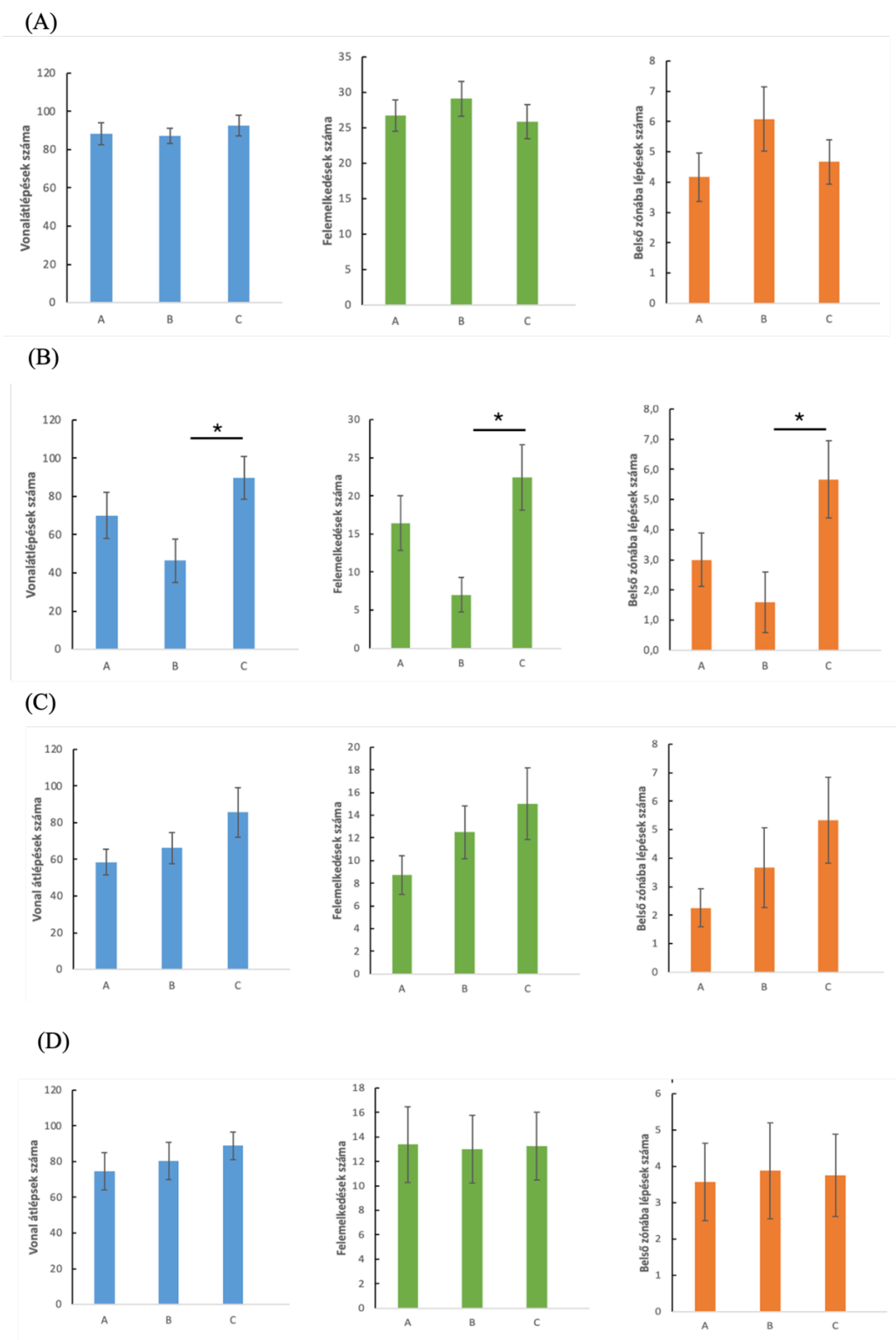
3.5. Statisztikai analízis

Az adatok statisztikai kiértékelését a Jamovi statisztikai szoftver (version 2.3.28) segítségével végeztük, az eredmények ábrázolására Microsoft Excel-t alkalmaztunk. Az OF teszt eredményeit egy utas nem parametrikus (Kruskal-Wallis) ANOVA segítségével végeztük, ha az eredmények szignifikáns különbséget mutattak a csoportok között, post-hoc tesztként a Dwass-Steel-Critchlow-Fligner pairwise tesztet alkalmaztuk. A NOR teszt diszkriminációs index értékei egy mintás t-teszt segítségével lettek elemezve, ahol hipotetikus értéknek 0-t adtunk meg, az egyes tárgyak vizsgálatával töltött idő elemzésére páros t-próbát, a diszkriminációs indexek összehasonlítására parametrikus ANOVA-t alkalmaztunk. Az EOM teszt eredményeinek analízise egy utas parametrikus ANOVA segítségével történt. Az elemzések során a $p < 0,05$ értéket statisztikailag szignifikánsnak tekintettük. A mennyiségi adatokat átlag $\pm$ standard hiba ($\pm$ S.E.M) formájában tüntetünk fel.

4. Eredmények

4.1. A nyílt porond teszt eredményei

A pre-expozíciós teszt ($n=12$) eredményei nem mutattak statisztikailag szignifikáns különbséget az általános aktivitás és szorongásszerű viselkedés tekintetében sem, a csoportok egyes paraméterei hasonlóak voltak (7.ábra. (A)). Az expozíció közepén végzett kísérletek ($n=12$) során azonban szignifikáns különbséget tapasztaltunk az álbesugárzott (0 W/m^2) és a 3 W/m^2 -es teljesítménysűrűségű sugárzást kapott csoport között a vonalátlépések számában ($p=0,047$), a felemelkedések számában ($p=0,014$) és a belső körbe való belépések számában ($p=0,021$). Ez azt jelzi, hogy a sugárzás második hetében a besugárzott csoport általános aktivitása csökkent, a szorongás mértéke azonban emelkedett (7.ábra. (B)). Az expozíció utolsó hetében végzett teszt ($n=12$) eredményei bár nem mutatnak statisztikailag szignifikáns különbségeket a csoportok között, markáns tendencia mutatkozik mindhárom paraméter esetében, ahol általánosságban elmondható, hogy a legaktívabb csoport minden esetben az álbesugárzott volt, a legkevésbé aktív pedig a magas dózissal, 30 W/m^2 -es teljesítménysűrűségű besugárzást kapott csoport mutatkozott (7.ábra. (C)). A poszt-expozíciós kísérlet ($n=8$) eredményei tekintetében sem mutattunk ki szignifikáns különbségeket az egyes csoportok között, a vonalátlépések számában még megfigyelhető az expozíció közepén látható tendencia, azonban ez a másik két paraméter esetében nem elmondható (7.ábra. (D)).



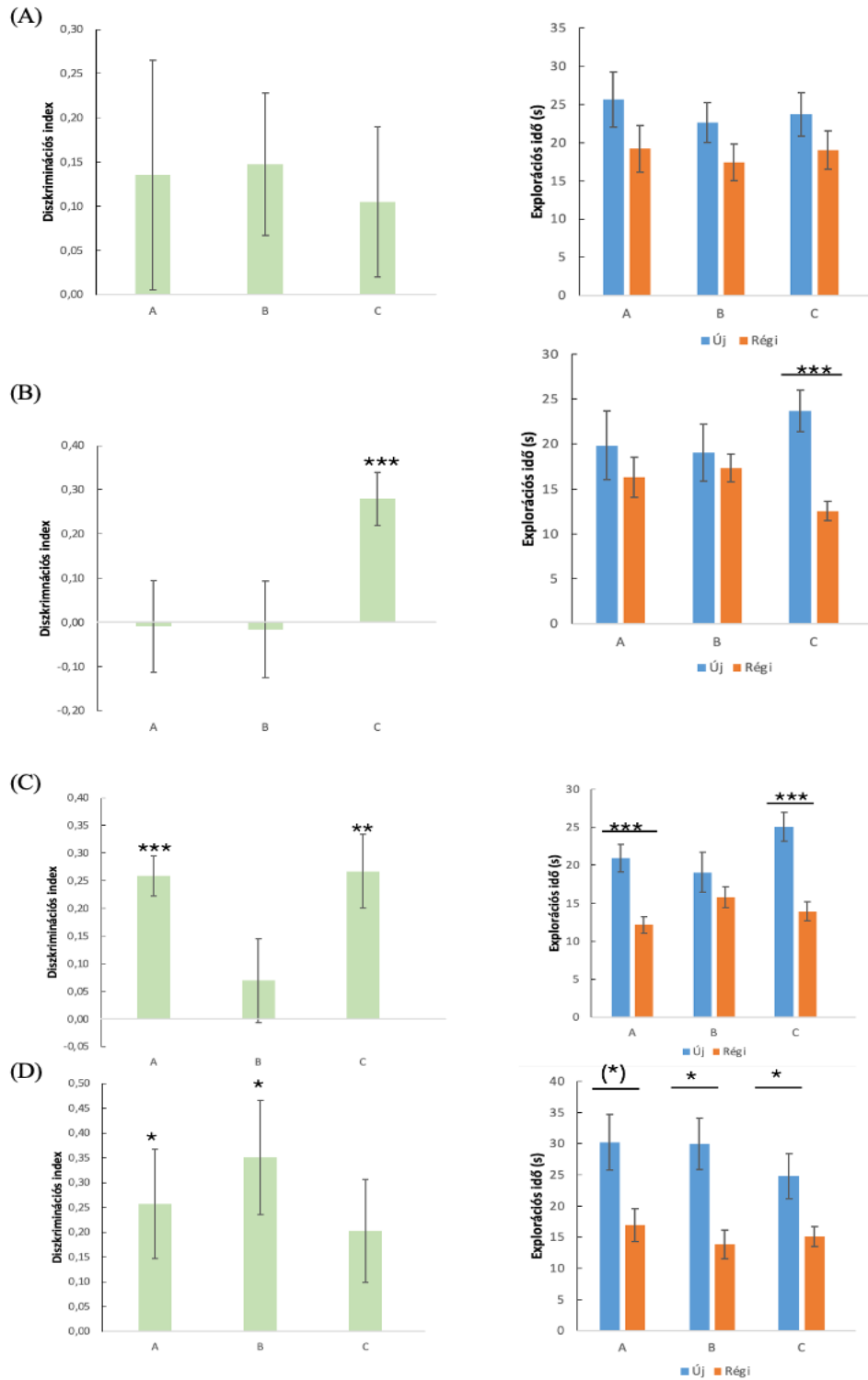
7.ábra. Az egyes csoportok nyílt porond teszt eredményeinek összehasonlítása a vonalátlépések számának, a felemelkedések számának és a belső zónába lépések számának tekintetében az egyes kísérleti hetek lebontásában: (A) preexpozíció ($n=12$), (B) expozíció közepe ($n=12$), (C) expozíció vége ($n=12$), (D) poszt-expozíció ($n=8$). A: 30 W/m^2 ($\sim 1 \text{ W/kg}$) B: 3 W/m^2 ($\sim 0.1 \text{ W/kg}$), C: álbesugárzott (0 W/kg) csoport. * $p<0,05$

4.2. Az új tárgy felismerési teszt eredményei

Az expozíció előtti NOR tesztben ($n=12$) a csoportok diszkriminációs indexei nem különböztek szignifikánsan a 0 értéktől (8.ábra (A)). Az álbesugárzott csoport (C) esetében: $0,14 \pm 0,13$ ($t=1,04$, $df=10$, $p=0,32$), a 3 W/m^2 -es dózisú csoportban (B): $0,15 \pm 0,08$ ($t=1,83$, $df=11$, $p=0,095$) a 30 W/m^2 -es csoport (A) esetében $0,10 \pm 0,09$ ($t=1,23$, $df=11$, $p=0,243$). Nem volt szignifikáns különbség az egyes tárgyak vizsgálatával eltöltött idő tekintetében sem (álbesugárzott csoport: $t=1,45$; $p=0,18$; 3 W/m^2 -es dózisú csoport: $t=1,67$; $p=0,12$, 30 W/m^2 -es dózisú csoport: $t=1,14$; $p=0,28$), (8.ábra (A)). Az expozíció közepén végzett kísérletek ($n=12$) során az álbesugárzott csoport diszkriminációs indexe szignifikánsan különbözött nullától: $0,28 \pm 0,06$ ($t=4,67$, $df=11$, $p<0,001$), azaz az állatok különbséget tudtak tenni a régi és az új tárgy között. Ez az eredmény tükröződik az explorációs idők tekintetében is, ahol ez a csoport szignifikánsan több időt töltött az új tárgy vizsgálatával, mint a régiével ($t=5$; $p<0,001$). A két besugárzott csoport esetében a diszkriminációs index nem különbözött 0-tól. A 3 W/m^2 csoport esetében a diszkriminációs index: $-0,02 \pm 0,11$ ($t=0,52$, $df=11$, $p=0,61$), míg a 30 W/m^2 csoportban $-0,01 \pm 0,10$ ($t=0,08$, $df=11$, $p=0,94$) volt. Az explorációs idők analízise sem mutatott különbséget a régi és az új tárgy vizsgálatával töltött idő tekintetében, sem az alacsony dózisú 3 W/m^2 -es csoportban ($t=0,8$; $p=0,44$), sem a magas dózisú 30 W/m^2 -es csoportban ($t=1,09$; $p=0,3$). Mindez azt mutatja, hogy a besugárzott csoportok nem tudtak különbséget tenni a régi és az új tárgyak között (8.ábra (B)). Az expozíció végén végzett OF teszt ($n=12$) során az álbesugárzott és a 30 W/m^2 -es csoport diszkriminációs indexe is szignifikánsan különbözött a hipotetikus 0 értéktől: az álbesugárzott csoport esetében $0,27 \pm 0,07$ ($t=4,003$, $df=11$, $p=0,002$), a 30 W/m^2 csoportban $0,26 \pm 0,04$ ($t=7,14$, $df=11$, $p<0,001$) volt, míg a 3 W/m^2 csoportban nem mutatkozott szignifikáns különbség a diszkriminációs indexben: $0,07 \pm 0,08$ ($t=0,918$, $df=11$, $p=0,387$). Ez az eredmény az explorációs idők tekintetében is tükröződik, ahol az álbesugárzott csoport ($t=4,70$; $p<0,001$) és a 30 W/m^2 -es csoport ($t=5,69$; $p<0,001$) esetében is az állatok szignifikánsan több időt töltöttek az új tárgy vizsgálatával, míg a 3 W/m^2 -es csoport esetén ez nem volt elmondható ($t=1,25$; $p=0,24$) (8.ábra (C)). A poszt-expozíciós kísérletekben ($n=8$) mindkét expozíciós csoportban a diszkriminációs index szignifikánsan különbözött 0-tól, a 3 W/m^2 -es csoportban: $0,35 \pm 0,11$ ($t=3,06$, $df=7$, $p=0,018$), a 30 W/m^2 -es csoportban: $0,26 \pm 0,11$ ($t=2,34$, $df=7$, $p=0,05$). Az álbesugárzott csoport esetében az elemzés nem mutatott ki statisztikailag szignifikáns különbséget a hipotetikus értéktől $0,20 \pm 0,10$ ($t=1,95$, $df=6$, $p=0,099$). A régi és az új tárgy vizsgálatával töltött idő analízise azt mutatta, hogy az expozíció

végére mindhárom csoport szignifikánsan többet foglalkozott az új tárgy felfedezésével, mint a régiével. Bár a 30 W/m^2 -es teljesítmény sűrűséggel besugárzott csoport esetében a szignifikancia marginálisnak tekinthető ($t=2,25$; $p=0,059$), a másik két csoportokban ez egyértelműen szignifikáns különbség (álbesugárzott csoport: $t=2,99$; $p=0,02$, 3 W/m^2 -es csoport: $t=2,96$; $p=0,02$) (8. ábra(D)).

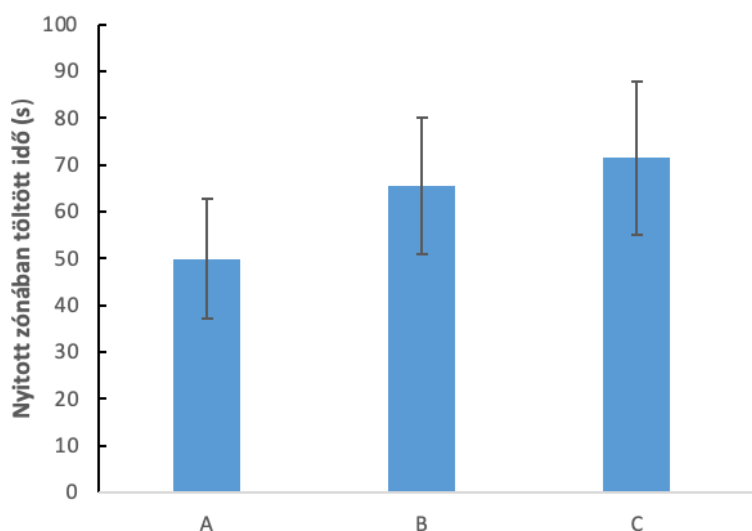
A diszkriminációs indexek tekintetében nem volt szignifikáns különbség az egyes csoportok között, egyik hét során sem (preexpozió: $F=0,21$; $p=0,9$; expozió közepe: $F=2,8$; $p=0,083$; expozió vége: $F=2,63$; $p=0,097$; poszt-expozió: $F=0,44$; $p=0,65$)



8.ábra. Az egyes csoportok új tárgy felismerési teszt eredményeinek összehasonlítása a diszkriminációs indexek és explorációs idő tekintetében az egyes kísérleti hetek lebontásában: (A) preexpozíció (n=12), (B) expozíció közepe (n=12), (C) expozíció vége (n=12), (D) poszt-expozíció (n=8). A: 30 W/m² (~1 W/kg) B: 3 W/m² (~0.1 W/kg), C: álbesugárzott (0 W/kg) csoport (*p<0,05, **p<0,01, ***p<0,001, (*) p=0,059).

4.3. A megemelt O-labirintus teszt eredményei

Az EOM teszt során a nyitott zónában töltött időt elemeztük statisztikailag. Az analízis azt mutatta, hogy nem volt különbség a csoportok között a besugárzás 3. hetén végzett teszt eredményeiben ($n=12$; $F=0,609$; $p=0,553$). Azonban a nyitott zónában töltött idő tekintetében hasonló tendencia mutatkozik, mint a besugárzás 2. hetén végzett OF teszt eredményeiben, azaz az álbesugárzott csoport töltötte a legtöbb időt a nyílt téren, míg a legkevesebbet a 30 W/m^2 -es csoport (nyitott zónában töltött idő: 30 W/m^2 : $49,9 \pm 12,8$; 3 W/m^2 : $65,6 \pm 14,6$; álbesugárzott: $71,5 \pm 16,4$), (9.ábra).



9.ábra. A megemelt O-labirintus teszt eredményei. A nyitott zónában töltött idők csoportonként $n=12$. A: 30 W/m^2 ($\sim 1 \text{ W/kg}$) B: 3 W/m^2 ($\sim 0,1 \text{ W/kg}$), C: álbesugárzott (0 W/kg) csoport.

5. Diskusszió

Az elmúlt évtizedekben a digitális eszközök nagymértékű térnyerése következtében az ezen technológiák által használt RF-EMF szintje emelkedett a környezetben. A mindennapos mobiltelefon-használat következtében nem csak a környezet RF expozíciója emelkedett, hanem a személyes expozíció mértéke is. Ennek köszönhetően a lakosság körében egyre több kérdés vetődik fel a telekommunikációs technológiák által használt RF-EMF egészségre gyakorolt hatásaival kapcsolatban. Mivel a mobiltelefonokat használatukból adódóan a fejhez közel tartjuk, így az általuk kibocsátott sugárzás elsődlegesen a fejben nyelődik el. Ennek tükrében az expozíció logikus következménye lehet, hogy ezek hatással vannak az idegrendszer állapotára és a kognitív képességekre. Napjainkban a fiatalabb generáció már születésétől fogva ki van téve egyre emelkedő RF expozíciónak, valamint azon tény miatt, hogy a fejlődő szervezetek érzékenyebben reagálnak bizonyos környezeti terhelésekre, különösen fontos vizsgálni az RF sugárzások lehetséges hatásait a fiatalok kognitív képességeire nézve.

Jelen kutatás során, annak érdekében, hogy megállapítsuk, milyen következményekkel jár a krónikus 5G sugárzásnak való kitettség a fejlődő szervezetekre nézve, kísérleteket végeztünk az expozíció kognitív képességekre és általános jóllétre gyakorolt hatásaival kapcsolatban. A kísérlet során 36 db fiatal (5 hetes) Lister Hooded patkányt tettünk ki 4 héten keresztül 3500 MHz-es, különböző teljesítménysűrűségű RF expozícióknak. Az állatok kognitív képességeit, kiemelten a memóriát a NOR teszt segítségével elemeztük, míg az általános jóllét keretein belül az általános aktivitás és a szorongásszerű viselkedés vizsgálatára az OF és az EOM teszteket használtuk.

Az OF tesztet 4 különböző alkalommal végeztük el. Az expozíció előtt végzett teszt során a célunk volt felmérni az egyes csoportok alapvonali memóriaképességét. Az eredmények azt mutatják, hogy a csoportok memóriaképességei közt nem volt különbség. Bár a diszkriminációs indexeik tekintetében az tükröződött, hogy nem voltak képesek a két tárgy között különbséget tenni, ez azzal magyarázható, hogy a NOR teszt eredményei esetében életkor függőség is szerepet játszik. Tehát a fiatalabb állatok kisebb hatékonysággal képesek megkülönböztetni az új tárgyat a már ismerttől, aminek hátterében elsősorban az egyes agyi struktúrák éretlensége áll (Reger és mtsai., 2009), míg felnőtt korban már konstansan különbséget tudnak tenni ezek közt. Az expozíció közepén és végén végzett NOR tesztek eredményeiben az látszik, hogy az expozíció közepén kimutatott deficit az expozíció végére helyreállt a magasabb dózisú csoport esetén. A poszt-expozíciós kísérletnél a célunk volt megvizsgálni azt, hogy a sugárzás által kiváltott hatások fennállnak-e az RF sugárzás befejeztével is. Az eredményeinkben már az

tükröződik, hogy mindhárom csoport képes volt megkülönböztetni egymástól a régi és az új tárgyat, azaz a pre-expozíciós kísérletek során mutatott gyenge kontextuális memória teljesítmény feljavult mindegyik csoport esetében a felnőtt állatokra jellemző szintre. Ezekből a tendenciákból arra következtethetünk, hogy a krónikus 5G sugárzásnak való kitettség potenciálisan késleltetheti a megfelelő agyi fejlődést, ami tükröződik a memória állapotában is. Gökçek-Saraç kísérlete során hasonló memória deficitet tapasztalt a 2,1 GHz-es különböző dózisú (45 és 65 V/m-es) 1 hetes RF expozíció során a NOR teszt eredményeiben. (Gökçek-Saraç,2020)

Az OF teszt során az állatok általános aktivitását és szorongásszerű viselkedését vizsgáltuk. Az expozíció előtt végzett teszt eredményei nem mutattak különbséget a csoportok közt egyik paraméterben sem. Az expozíció 2. hetén végzett tesztben azonban megfigyelhető különbség állt fent mindhárom paraméter esetében az álbesugárzott és a 3 W/m²-es csoport között, azaz az exponált állatok általános aktivitása csökkent, szorongás szintje nőtt. A besugárzás 4. hetében végzett kísérlet eredményeiben megfigyelhetünk egy tendenciát, mely szerint a legaktívabb csoport minden esetben az álbesugárzott legkevésbé aktív a 30 W/m²-es csoport volt. Ez a tendencia a besugárzás utáni teszt során csak a vonalátlépések számában volt érzékelhető, továbbá a többi paraméter esetében sem mutatkozott szignifikáns különbség a csoportok között. Összességében elmondhatjuk, hogy a hosszútávú RF expozíció előrehaladtával az általános aktivitás csökkent, a szorongásszerű viselkedés nőtt a besugárzott csoportokban, azonban ezek a különbségek csak tendenciaszerűen láthatóak.

Az EOM teszt eredményei is alátámasztják az OF tesztben tapasztaltakat. A csoportok között nem volt különbség a nyílt zónában töltött idő tekintetében, de hasonló tendencia mutatkozik meg, mint az OF teszt során, azaz, hogy a szorongásszerű viselkedés leginkább a 30 W/m²-es csoportban volt tapasztalható, míg legkevésbé az álbesugárzott csoportban.

A két teszt eredményei összességében azt mutatják, hogy a hosszútávú, 4 hetes 5G expozíció okozhat enyhe változásokat patkányok általános aktivitásában és szorongásszerű viselkedésében, azonban ez a hatás statisztikailag nem szignifikáns. Ezek az eredmények konzisztensek a Petitdant és mtsai. által közölt tanulmányával, akik 900 MHz-es sugárzásnak (0;1,5;6 W/kg=SAR, napi 45 perc) tettek ki serdülő korú patkányokat, és nem találtak változást a szorongásszerű viselkedésben és általános aktivitásban (Petitdant és mtsai., 2016). Valamint a Qin és mtsai. által végzett kísérlet OF teszt eredményei is ezt mutatják, akik az 5G egyik működési frekvenciáján (4,9 GHz) sugároztak be egereket (50 W/m², 21 nap, napi 1 óra) (Qin és mtsai., 2024).

A poszt-expozíciós kísérleteink eredményei azt mutatják, hogy mind a NOR tesztben, mind az OF tesztben vizsgált magatartási paraméter az expozíció befejeztével visszaállt a normál szintre. Ezt figyelték meg Ntzuni és mtsai. is, akik 1,8GHz-es 0,11W/m²-es sugárzásnak tettek ki egereket 90 napon keresztül, és a besugárzás alatt észrevehető memóriaromlás az expozíció végével helyreállt (Ntzouni és mtsai., 2013).

Összességében az eredményeink azt mutatják, hogy a krónikus 5G expozíció képes lehet átmeneti neurokognitív zavarok kiváltására, a kognitív fejlődés késleltetésére, illetve hatással lehet az általános jóllétre fiatal patkányokban, de ez a hatás az expozíció elmúlásával minden esetben megszűnik. Annak érdekében, hogy megállapíthassuk, hogy vajon milyen molekuláris mechanizmus állhat az egyes heteken jelentkezett memóriadeficit hátterében, a jövőben további elemzéseket végzünk a begyűjtött vér és agyminták vizsgálatával. Továbbá annak érdekében, hogy minél egyértelműbb válaszokat kapjunk a RF-EMF kognitív képességekre és általános jóllétre gyakorolt hatásairól, további kutatásokat ajánlott végezni ezek összefüggésében az 5G más működési frekvenciáin és más korosztályokban is.

6. Irodalomjegyzék

- Baan, R., Grosse, Y., Lauby-Secretan, B., El Ghissassi, F., Bouvard, V., Benbrahim-Tallaa, L., Guha, N., Islami, F., Galichet, L., & Straif, K. (2011). Carcinogenicity of radiofrequency electromagnetic fields. *The Lancet Oncology*, 12(7), 624–626. [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(11\)70147-4](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(11)70147-4)
- Bali, Z. K., Bruszt, N., Kőszegi, Z., Nagy, L. V., Atlasz, T., Kovács, P., Csupor, D., Csupor-Löffler, B., & Hernádi, I. (2022). Aconitum Alkaloid Songorine Exerts Potent Gamma-Aminobutyric Acid-A Receptor Agonist Action In Vivo and Effectively Decreases Anxiety without Adverse Sedative or Psychomotor Effects in the Rat. *Pharmaceutics*, 14(10), 2067. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14102067>
- Belyaev, I. Y., Koch, C. B., Terenius, O., Roxström-Lindquist, K., Malmgren, L. O. G., H. Sommer, W., Salford, L. G., & Persson, B. R. R. (2006). Exposure of rat brain to 915 MHz GSM microwaves induces changes in gene expression but not double stranded DNA breaks or effects on chromatin conformation. *Bioelectromagnetics*, 27(4), 295–306. <https://doi.org/10.1002/bem.20216>
- Choleris, E. (2001). A detailed ethological analysis of the mouse open field test: effects of diazepam, chlordiazepoxide and an extremely low frequency pulsed magnetic field. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 25(3), 235–260. [https://doi.org/10.1016/S0149-7634\(01\)00011-2](https://doi.org/10.1016/S0149-7634(01)00011-2)
- Dangi, R., Lalwani, P., Choudhary, G., You, I., & Pau, G. (2021). Study and Investigation on 5G Technology: A Systematic Review. *Sensors*, 22(1), 26. <https://doi.org/10.3390/s22010026>
- Eberhardt, J. L., Persson, B. R. R., Brun, A. E., Salford, L. G., & Malmgren, L. O. G. (2008). Blood-Brain Barrier Permeability and Nerve Cell Damage in Rat Brain 14 and 28 Days After Exposure to Microwaves from GSM Mobile Phones. *Electromagnetic Biology and Medicine*, 27(3), 215–229. <https://doi.org/10.1080/15368370802344037>
- Eggert, T., Dorn, H., Sauter, C., Schmid, G., & Danker-Hopfe, H. (2020). RF-EMF exposure effects on sleep – Age doesn't matter in men! *Environmental Research*, 191, 110173. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110173>
- Ennaceur, A., & Delacour, J. (1988). A new one-trial test for neurobiological studies of memory in rats. 1: Behavioral data. *Behavioural Brain Research*, 31(1), 47–59. [https://doi.org/10.1016/0166-4328\(88\)90157-X](https://doi.org/10.1016/0166-4328(88)90157-X)

- European 5G Observatory. (n.d.). European 5G Observatory. Retrieved January 14, 2025, from <https://5gobservatory.eu>
- Gandhi, O. P. (2002). Electromagnetic Fields: Human Safety Issues. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 4(1), 211–234. <https://doi.org/10.1146/annurev.bioeng.4.020702.153447>
- Gökçek-Saraç, Ç. (2020). Effects of 2.1 GHz Electromagnetic Radiation on Locomotor Activity, Recognition Memory, and Anxiety-Related Behavior in Rats. *Neurophysiology*, 52(4), 261–266. <https://doi.org/10.1007/s11062-021-09881-w>
- Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz). (2020). *Health Physics*, 118(5), 483–524. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001210>
- Hussein, S., El-Saba, A.-A., & Galal, M. K. (2016). Biochemical and histological studies on adverse effects of mobile phone radiation on rat's brain. *Journal of Chemical Neuroanatomy*, 78, 10–19. <https://doi.org/10.1016/j.jchemneu.2016.07.009>
- IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. (2013). Non-ionizing radiation, Part 2: Radiofrequency electromagnetic fields. *IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans*, 102(Pt 2), 1–460.
- Keleş, A. İ., Yıldırım, M., Gedikli, Ö., Çolakoğlu, S., Kaya, H., Baş, O., Sönmez, O. F., & Odacı, E. (2018). The effects of a continuous 1-h a day 900-MHz electromagnetic field applied throughout early and mid-adolescence on hippocampus morphology and learning behavior in late adolescent male rats. *Journal of Chemical Neuroanatomy*, 94, 46–53. <https://doi.org/10.1016/j.jchemneu.2018.08.006>
- Kheifets, L., Repacholi, M., Saunders, R., & van Deventer, E. (2005). The Sensitivity of Children to Electromagnetic Fields. *Pediatrics*, 116(2), e303–e313. <https://doi.org/10.1542/peds.2004-2541>
- Kocaman, A., Altun, G., Kaplan, A. A., Deniz, Ö. G., Yurt, K. K., & Kaplan, S. (2018). Genotoxic and carcinogenic effects of non-ionizing electromagnetic fields. *Environmental Research*, 163, 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.01.034>
- Kostoff, R. N., Heroux, P., Aschner, M., & Tsatsakis, A. (2020). Adverse health effects of 5G mobile networking technology under real-life conditions. *Toxicology Letters*, 323, 35–40. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2020.01.020>
- Krivova, N. A., Kudabaeva, M. S., Zaeva, O. B., Borodina, S. V., Lepekhina, T. B., Pavlenko, O. A., Makhmanazarov, R. M., Kokin, D. S., & Shipilov, S. E. (2024). The effect of exposure to RF-EMF from the laboratory simulator of 5G NR base station on physiological

- parameters and cognitive abilities of male wistar rats of different ages. *Scientific Reports*, 14(1), 10283. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-60862-5>
- Maaroufi, K., Had-Aissouni, L., Melon, C., Sakly, M., Abdelmelek, H., Poucet, B., & Save, E. (2014). Spatial learning, monoamines and oxidative stress in rats exposed to 900MHz electromagnetic field in combination with iron overload. *Behavioural Brain Research*, 258, 80–89. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2013.10.016>
- Marino, C., Lagroye, I., Scarfi, M. R., & Sienkiewicz, Z. (2011). Are the young more sensitive than adults to the effects of radiofrequency fields? An examination of relevant data from cellular and animal studies. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 107(3), 374–385. <https://doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2011.09.002>
- Masuda, H., Ushiyama, A., Takahashi, M., Wang, J., Fujiwara, O., Hikage, T., Nojima, T., Fujita, K., Kudo, M., & Ohkubo, C. (2009). Effects of 915 MHz Electromagnetic-Field Radiation in TEM Cell on the Blood-Brain Barrier and Neurons in the Rat Brain. *Radiation Research*, 172(1), 66–73. <https://doi.org/10.1667/RR1542.1>
- Nittby, H., Brun, A., Eberhardt, J., Malmgren, L., Persson, B. R. R., & Salford, L. G. (2009). Increased blood–brain barrier permeability in mammalian brain 7 days after exposure to the radiation from a GSM-900 mobile phone. *Pathophysiology*, 16(2–3), 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.pathophys.2009.01.001>
- Ntzouni, M. P., Skouroliahou, A., Kostomitsopoulos, N., & Margaritis, L. H. (2013). Transient and cumulative memory impairments induced by GSM 1.8 GHz cell phone signal in a mouse model. *Electromagnetic Biology and Medicine*, 32(1), 95–120. <https://doi.org/10.3109/15368378.2012.709207>
- Petitdant, N., Lecomte, A., Robidel, F., Gamez, C., Blazy, K., & Villégier, A. (2016). Cerebral radiofrequency exposures during adolescence: Impact on astrocytes and brain functions in healthy and pathologic rat models. *Bioelectromagnetics*, 37(5), 338–350. <https://doi.org/10.1002/bem.21986>
- Qin, T.-Z., Wang, X., Du, J.-Z., Lin, J.-J., Xue, Y.-Z., Guo, L., Lai, P.-P., Jing, Y.-T., Zhang, Z.-W., & Ding, G.-R. (2024). Effects of radiofrequency field from 5G communications on the spatial memory and emotionality in mice. *International Journal of Environmental Health Research*, 34(1), 316–327. <https://doi.org/10.1080/09603123.2022.2149708>
- Reger, M. L., Hovda, D. A., & Giza, C. C. (2009). Ontogeny of Rat Recognition Memory measured by the novel object recognition task. *Developmental Psychobiology*, 51(8), 672–678. <https://doi.org/10.1002/dev.20402>

- Repacholi, M. H., Lerchl, A., Rösli, M., Sienkiewicz, Z., Auvinen, A., Breckenkamp, J., d’Inzeo, G., Elliott, P., Frei, P., Heinrich, S., Lagroye, I., Lahkola, A., McCormick, D. L., Thomas, S., & Vecchia, P. (2012). Systematic review of wireless phone use and brain cancer and other head tumors. *Bioelectromagnetics*, 33(3), 187–206. <https://doi.org/10.1002/bem.20716>
- Sahin, D., Ozgur, E., Guler, G., Tomruk, A., Unlu, I., Sepici-Dinçel, A., & Seyhan, N. (2016). The 2100MHz radiofrequency radiation of a 3G-mobile phone and the DNA oxidative damage in brain. *Journal of Chemical Neuroanatomy*, 75, 94–98. <https://doi.org/10.1016/j.jchemneu.2016.01.002>
- Sharma, S., & Shukla, S. (2020). Effect of electromagnetic radiation on redox status, acetylcholine esterase activity and cellular damage contributing to the diminution of the brain working memory in rats. *Journal of Chemical Neuroanatomy*, 106, 101784. <https://doi.org/10.1016/j.jchemneu.2020.101784>
- Shepherd, J. K., Grewal, S. S., Fletcher, A., Bill, D. J., & Dourish, C. T. (1994). Behavioural and pharmacological characterisation of the elevated “zero-maze” as an animal model of anxiety. *Psychopharmacology*, 116(1), 56–64. <https://doi.org/10.1007/BF02244871>
- Sienkiewicz, Z., & van Rongen, E. (2019). Can Low-Level Exposure to Radiofrequency Fields Effect Cognitive Behaviour in Laboratory Animals? A Systematic Review of the Literature Related to Spatial Learning and Place Memory. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(9), 1607. <https://doi.org/10.3390/ijerph16091607>
- Simkó, M., & Mattsson, M.-O. (2019). 5G Wireless Communication and Health Effects—A Pragmatic Review Based on Available Studies Regarding 6 to 100 GHz. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(18), 3406. <https://doi.org/10.3390/ijerph16183406>
- Singh, S., & Kapoor, N. (2014). Health Implications of Electromagnetic Fields, Mechanisms of Action, and Research Needs. *Advances in Biology*, 2014, 1–24. <https://doi.org/10.1155/2014/198609>
- Streetwave. (n.d.). 5G spectrum mapping explained. Streetwave. Retrieved January 6, 2025, from <https://streetwave.co/5g/5g-spectrum-mapping-explained/>
- Tafakori, S., Farrokhi, A., Shalchyan, V., & Daliri, M. R. (2020). Investigating the impact of mobile range electromagnetic radiation on the medial prefrontal cortex of the rat during working memory. *Behavioural Brain Research*, 391, 112703. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2020.112703>

- Thuróczy, G. (2002). A rádiófrekvenciás sugárzások egészségügyi kérdései. *Magyar Tudomány*, XLVII.(8), 1010–1025.
- Tkalec, M., Štambuk, A., Šrut, M., Malarić, K., & Klobučar, G. I. V. (2013). Oxidative and genotoxic effects of 900MHz electromagnetic fields in the earthworm *Eisenia fetida*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 90, 7–12.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.12.005>
- Wiart, J., Hadjem, A., Wong, M. F., & Bloch, I. (2008). Analysis of RF exposure in the head tissues of children and adults. *Physics in Medicine and Biology*, 53(13), 3681–3695.
<https://doi.org/10.1088/0031-9155/53/13/019>
- World Health Organization., International Agency for Research on Cancer., & IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans (2001 : Lyon, F. (2002). *Non-ionizing radiation. Part 1, Static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields*. IARC Press.

7. Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani témavezetőimnek Dr. Hernádi Istvánnak és Dr. Bali Zsolt Kristófnak a munkámban nyújtott elméleti és gyakorlati segítségért. Dr. Bruszt Nórának a kísérletek elvégzésében nyújtott segítségért. Továbbá köszönöm az Országos Sugárbiológiai Intézet munkatársainak, Dr. Thuróczy Györgynek és Dr. Vecsei Zsuzsannának a besugárzó rendszerrel kapcsolatos szakmai segítséget.