Virtuális Valóság fiziológiai és neurológiai tényezőinek vizsgálata: Ki alkalmas a használatára?

Frankl Dániel

frankl.daniel@stud.uni-obuda.hu

Absztrakt: A virtuális valóság (VR) használata eltérő mértékben terheli az érzékelő- és idegrendszert, egyesek számára pedig kifejezetten kellemetlen vagy nehezen tolerálható élményt jelenthet. A tanulmány célja VR-élmény feldolgozásában szerepet játszó fiziológiai és neurológiai tényezők vizsgálata és az összefüggő mellékhatások rendszerezett áttekintése, különös tekintettel azokra a tényezőkre, amelyek befolyásolják az egyéni toleranciát. A nem, életkor, egészségi állapot és technológiai jártasság moderáló szerepe gyakran ellentmondásos. A szubjektív skálák, élettani mutatók és viselkedési tesztek együttes alkalmazása pontosabb értékelést tesz lehetővé. Az eredmények kiemelik a személyre szabott VR-fejlesztés és a további multidiszciplináris kutatás szükségességét.

Kulcsszavak: virtuális valóság, neurológia, fiziológia, demográfia, kiberbetegség, mérési módszerek

Bevezetés

A virtuális valóság (virtual reality, VR) technológiai fejlődése az elmúlt évtizedben jelentős mértékű változásokat eredményezett. A kezdetben szórakoztatóipari célokra használt rendszerek mára egyre hangsúlyosabb szerepet töltenek be az oktatás, az orvostudomány, a pszichológiai rehabilitáció, valamint a katonai és biztonságtechnikai képzések területén is [1]. A VR-alapú rendszerek legfőbb erőssége az immerzivitás, vagyis az a képesség, hogy a felhasználókat szinte teljes mértékben bevonja egy mesterségesen létrehozott, háromdimenziós audiovizuális környezetbe. Ez az immerzív élmény lehetővé teszi a tanulási, gyakorlási és döntéshozatali folyamatok valósághű szimulációját, amely új távlatokat nyit a képességfejlesztés és adaptív tréningek terén.

Azonban a technológia széles körű elterjedésével párhuzamosan, számos kihívás is megjelent, amelyek közül az egyik legkritikusabb a cybersickness jelensége [2]. Ez az állapot, amely a mozgásszervi és szenzoros rendszerek közötti inkompatibilitás

következtében alakul ki, idegrendszeri működését tekintve nagyon hasonlít a hagyományos utazási betegséghez. A cybersickness tipikus tünetei közé tartozik a hányinger, szédülés, fejfájás, egyensúlyvesztés, diszorientáció, valamint a szenzoros túlterhelésből fakadó kognitív diszkomfort [3]. Bár a jelenség kialakulásának pontos biológiai folyamatai még nem teljesen ismertek, jól látható, hogy a tünetek erőssége és gyakorisága nagyban különbözik az egyes emberek között.

Ezen változatosság mögött feltételezhetően olyan összetett biológiai, pszichofiziológiai és neurológiai tényezők állnak, amelyek meghatározzák az egyének VR-toleranciáját. Ide tartoznak például a vestibuláris rendszer érzékenysége, a szemmozgások koordinációja, az autonóm idegrendszeri reaktivitás, a korábbi mozgásszervi vagy neurológiai érintettség, illetve a perceptuális észlelési mintázatok eltérései is. A cybersickness nem csupán átmeneti diszkomfortot okoz, hanem jelentősen korlátozhatja a VR-technológia hatékony és biztonságos alkalmazhatóságát, különösen az érzékeny célcsoportok (pl. gyermekek, idősek, neurológiai vagy pszichiátriai érintettséggel élők) esetében [4].

A jelen kutatás célja ezen érzékenységi különbségek mélyreható vizsgálata, különös tekintettel azokra a fiziológiai és neurológiai faktorokra, amelyek prediktív értékkel bírhatnak a cybersickness-re való hajlam szempontjából. A vizsgálat célkitűzése a VR-használattal összefüggő egyéni toleranciaküszöbök azonosítása, valamint olyan biomarkerek, pszichometriai mutatók és szubjektív élménybeszámolók feltérképezése, amelyek alapján előre jelezhető a VR-élményekkel kapcsolatos adaptív vagy maladaptív válaszreakció. A kutatás eredményei hozzájárulhatnak a VR-alkalmazások személyre szabott optimalizációjához, az immerzív környezetek fiziológiai terhelésének csökkentéséhez, valamint a felhasználói biztonságot és élményt egyaránt előtérbe helyező fejlesztési irányok meghatározásához.

Elméleti háttér

A témakör szakirodalmának áttekintése kettő, egymással funkcionális kapcsolatban álló egységre tagolódik. A fiziológiai alrész azokra a szomatikus válaszokra fókuszál, amelyeket a vizuális-motoros ingerlés közvetlenül a szervezet szervrendszereiben idéz elő, míg a neurológiai fejezet a központi idegrendszer szenzoros integrációját, kognitív terhelését és affektív reakcióit tárgyalja. A két dimenzió között bizonyos esetekben természetes összefüggés mutatható ki, hiszen a neurális aktiváció számos esetben vegetatív kimenettel egészül ki.

Fiziológiai tényezők

Fiziológiai tényezőknek tekinthetőek a szervezet testi működésére, a szervek, szervrendszerek és testi funkciók állapotára vonatkozó jellemzők és reakciók, amelyek a VR használata során jelentkezhetnek. A virtuális valóság sajátossága, hogy az emberi látó-, egyensúly- és mozgásérzékelő rendszer egyszerre kap intenzív, olykor ellentmondó ingereket; ez a szenzoros disszonancia sorra indítja el azokat a fiziológiai folyamatokat, amelyek a felhasználó komfortját, teljesítményét és egészségét egyaránt befolyásolhatják [5].

Az első és szinte minden későbbi tünetet megalapozó jelenség az érzékszervi konfliktus. Amennyiben a látvány gyors haladást, erős mozgást vagy irányváltozást sugall, de a test mozdulatlan, az agy a helyzetet a mozgásbetegséghez hasonló biológiai vészjelzésként értelmezi [6]. Ebben az esetben rövid időn belül émelygés, verejtékezés, hirtelen sápadtság és fokozott nyáltermelés is jelentkezhet, a gyomor „liftezni” kezd, majd az érzékenyeknél öklendezés vagy tényleges hányás is előfordulhat. Palmisano és Constable (2022) kimutatták, hogy két, egyenként 15 perces VR-hullámvasút-expozíció már érezhetően csökkenti a cybersickness tipikus autonóm tüneteit, a javulás azonban feladatspecifikus, mert csak akkor alakul ki, ha a felhasználó ismételten ugyanazzal a szenzoros-konfliktus mintázattal szembesül [7].

A VR-élmény során a szem állandó jelleggel egy néhány centiméterre lévő kijelzőt néz, a virtuális jelenet pedig váltogatja a mélységet, egyszer messzebb lévő, másszor közeli tárgyakra fókuszálva. Kim és munkatársai (2018) vizsgálata szerint a spontán pislogási ráta a természetes nyugalmi helyzethez (átlagosan 24 pislogás/perc) képest már hagyományos monitor nézésekor is nagyjából egyharmaddal csökken (15 pislogás/perc), VR fejszettben pedig további csökkenés tapasztalható, mindössze körülbelül 11 pislogás/perc értékre [8]. A ritkább pislogás miatt a könnyfilm lassabban újul meg, a szaruhártya gyorsabban kiszárad, ami szemszárazságot, égő érzést és átmeneti homályos látást válthat ki, különösen hosszabb VR-használat során [9].

A VR-kijelzők fényereje és élénk színei ugyanúgy befolyásolhatják a felhasználók napiritmusát, mint a telefonok vagy monitorok [10]. Amennyiben magas fényerejű, kék–zöld spektrumot domináló akciójátékot indítanak este kilenc óra után, a képernyőfény visszaszoríthatja a melatonin, az elalvást előkészítő hormon kibocsátását, így éjfélkor is fennmaradhat az éberség [11]. Gerber és munkatársai (2019) viszont kimutatták, hogy egy lassú, tengerparti-erdős VR-jelenet (hullámzás, madárhangok) már tíz perc alatt csökkenti a légzés- és pulzusszámot, a résztvevők pedig magas restaurációs értéket és minimális kellemetlenséget jeleztek (12). Ez a kettősség azt mutatja, hogy a VR tartalom típusa és időzítése élénkítő vagy szedatív hatást egyaránt kifejthet, így megfelelő választással a paraszimpatikus, alvást támogató állapot erősíthető.

A vizuális és érzelmi ingerek nemcsak a központi idegrendszert, hanem a vegetatív (szimpatikus-paraszimpatikus) szabályozást is azonnal mozgósíthatják. Luong és Holz (2022) VR-kísérletei szerint egy magasságélményt szimuláló félelemhelyzetben, amikor a résztvevő egy keskeny pallón sétál a „mélység" felett, szignifikánsan emelkedik a pulzusszám és a légzésszám, ugyanakkor csökken a szívfrekvencia-variabilitás; ezzel párhuzamosan az elektrodermális reakciók (SCR) erőteljesebb csúcsokat, a pupillák pedig jól mérhető tágulást mutatnak, mindez a szervezet fokozott készenléti (arousal) állapotának lenyomata. [13]. A nyálban mért kortizolszint a jelenet befejezése után 20–30 percen belül éri el a csúcsát, ami igazolja, hogy a virtuális stressz hormonális szinten is valódi terhelést jelenthet [14].

A legtöbb kereskedelmi VR-headset tömege 400–600 gramm közötti és a karok ismétlődő, magasra emelt tartása jelentős mozgásszervi terheléssel járhat [15]. A váll és a nyak statikus izommunkája miatt izomfeszülés és görcs alakulhat ki; az úgynevezett „gorilla kar" szindrómában a deltoideus és a lapockaközelítő izmok már tíz-tizenkét perc után fájdalmas merevséget mutathatnak [16]. Astrologo és munkatársai (2024) kimutatták, hogy ha egy VR/AR-headset tömege eléri a 750 g-ot, és a tömegközéppontja néhány centiméterrel a szemek elé kerül, akkor a koponya és az első nyakcsigolya (OC1) közötti ízületnél mért nyaki forgatónyomaték körülbelül duplájára nő, a hetedik nyakcsigolya–első háti csigolya (C7–T1) szintjén a növekedés ennél kisebb, mintegy 20–30 % [17].

A tartós VR-használat folyamatos figyelni terhelést, érzékszervi integrációt és izomaktivitást igényelhet, ezért a rendszerből kilépve is fennmaradhatnak összetett testi reakciók. A VR-headset levétele után egyes felhasználók hirtelen álmosságot vagy általános kimerültséget tapasztalhatnak, míg másoknál továbbra is magas marad az idegrendszeri aktiváció, ami nehezítheti az elalvást [18]. A VR-tartalomtól függően a bőrerek gyors összehúzódása, majd kitágulása rövid ideig tartó hidegrázást, illetve átmeneti melegérzetet idézhet elő [19]. Wang és munkatársai (2024) vizsgálata rávilágít arra, hogy közel 1 órás nagylátószögű HTC Vive-használatot követően a résztvevők mozgáskoordinációja átmenetileg torzulhat, a valós térben végzett pointeres célmegjelölés során az első 9–12 próba alatt a 20–30 cm-re elhelyezett célpontokat következetesen 2–3 cm-rel alábecsülték, miközben ez a szenzomotoros hiba néhány percen belül fokozatosan eltűnt [20].

Neurológiai tényezők

Neurológiai tényezőknek tekinthető az idegrendszer működésével, idegrendszeri reakciókkal és mentális állapottal kapcsolatos tényezők, amelyeket a VR stimulációja vált ki. A VR különlegessége abban rejlik, hogy a felhasználóval egyszerre számos, részben ellentmondó érzetet közöl. Ez az érzetbeli ütközés indítja el a legtöbb neurológiai folyamatot, amelyek egymásra épülve határozzák meg, ki mennyi ideig képes kellemetlen mellékhatások nélkül a virtuális világban maradni.

A látott és valós mozgás közti eltérés, azaz a vizuális, vesztibuláris és szomatoszenzoros jelek konfliktusa, neurológiai zavarokat válthat ki, melyek szédüléshez és testtartási instabilitáshoz vezethetnek. Nishiike és munkatársai (2013) kimutatták, hogy már ötperces VR expozíció során is szignifikánsan nőtt a szubjektív szédülés és a testlengés mértéke, ami a szenzoros integráció megbomlására és a vizuális tájékozódás átmeneti háttérbe szorulására utal [21].

Assländer és munkatársai (2023) VR-alapú egyensúlykísérletei szerint már néhány perces (20–60 s hosszú, többször ismételt) pszeudo-random, illetve kisamplitúdójú szinuszos vizuális billentéssorozatok is számottevően növelik a résztvevők teljes-test előre–hátra irányú (pitch) kilengésének csúcsamplitúdóját; a jelenség különösen erősnek bizonyult, amikor a nagy kontrasztú, a megfigyelőhöz közel elhelyezett virtuális képernyő mozgott, amely ugyanazon ingerre mintegy háromszoros testkilengést idézett elő a fotó-realisztikus, távolabbi szobanézethez képest [22].

A villódzó vagy erősen kontrasztos jelenetek, például ritmusjátékok stroboszkóp-effektjei vagy hegesztési szikrákat imitáló grafika fotoszenzitív epilepsziás rohamot is provokálhatnak, klinikai adatok szerint a 15–25 Hz-en villódzó mintázat a legkockázatosabb [23]. A VR-használat olyan kellemetlen tüneteket idézhet elő, mint a hányinger, szédülés vagy dezorientáció, ezért a tartalmak elején elhelyezett figyelmeztetés nem csupán formaság, hanem valós biztonsági intézkedés [24].

A folyamatos ingertöbblet kognitív szinten is megterheli a felhasználót. Az agy ellentmondó szenzoros jelek összehangolására próbál erőforrást átcsoportosítani, ennek ára azonban a mentális fáradás [25]. Mittelstaedt és munkatársai (2019) kerékpáros VR-szimulációja kimutatta, hogy a VR szakasz után szignifikánsan lassíthatja a vizuális ingerekre adott reakcióidőt és ronthatja a figyelmi pontosságot, következményként rövid távú kognitív teljesítmény-csökkenést eredményezve egyes felhasználóknál [26].

Már egy perces, vizuálisan kiváltott mozgásérzetet (vectiont) előidéző VR-expozíció is kimutathatóan módosíthatja a vestibuláris feldolgozást, ha a látási–egyensúlyi konfliktus ennél hosszabb ideig fennmarad, a szenzoros újrasúlyozás feltételezhetően térbeli dezorientációhoz vezethet, amelyben a felhasználó a virtuális és a valós térben is bizonytalanabbul ítélheti meg testhelyzetét és elmozdulását [27]. Deperszonalizáció és derealizáció, vagyis a test, illetve a környezet valószerűtlenségének rövid, múló érzése, erősen immerzív VR-alkalmazások után jelentkezhet, különösen azoknál, akik eleve hajlamosak a disszociációra, viszont a jelenlegi vizsgálatok szerint ez az élmény általában néhány órán belül megszűnik [28].

A perceptuális torzulások zárják a láncolatot. A szem és az agy néhány perces alkalmazkodási fázisban visszaáll a valós környezetre, de addig a tárgyak méretét vagy távolságát pontatlanul becsülhetjük meg, egy vizsgálatában a résztvevők a VR-headset levétele után közelebbre mutattak, mint ahol a célpont ténylegesen volt, vagyis következetesen „rövidre” céloztak [20].

Mérési módszerek

A VR-hatások kutatásában három kiegészítő mérési megközelítés terjedt el: a szubjektív skálák, az élettani-objektív regisztrátumok és a viselkedési teljesítménytesztek. A szubjektív módszerek közül a leggyakrabban alkalmazott a Simulator Sickness Questionnaire (SSQ), amely 16 tünet intenzitását méri négyfokú skálán, majd három részpontszámot (hányingeres, okulomotoros, általános diszkomfort) és egy összesített indexet számít [29]. A Fast Motion Sickness skála (FMS) ezzel szemben egyetlen, 0-20-ig terjedő vizuális analóg léptéken rögzíti, mennyire érzi magát rosszul a résztvevő; előnye, hogy menet közben, akár percenként is gyorsan beadható, így jól követi a rosszullét dinamikáját [30]. A Misery Scale (MISC) egy 11 fokozatú (0–10) skála, amely a teljesen tünetmentes állapottól a hányással járó végállapotig méri a rosszullétet; ezért főleg olyan vizsgálatokban használják, ahol a kutatót a végső kimenetel, nem pedig a finom változások érdeklik [31] A skálák közös erőssége a felhasználói élmény közvetlen leképezése, korlátjuk viszont az, hogy a válaszok hangulati torzításnak, elvárásnak vagy szociális megfelelésnek is kitettek.

Az objektív mérőeszközök ezt a szubjektív bizonytalanságot hivatottak ellensúlyozni. Az elektroenkefalográfia (EEG) VR-környezetben is hatékonyan követi a kérgi aktivitást, bár a fejre erősített HMD-pánt könnyen elmozdítja az elektródákat és zajt visz a jelbe, Tauscher és munkatársai (2019) kimutatták, hogy egy egyszerűen átalakított pánttal a torzítás nagyrészt kiküszöbölhető, így megbízható ERP-válaszok és akár a megjelenítés mintegy 50 ms-os késleltetése is tisztán mérhető [32]. A szívfrekvencia-variabilitás (HRV), amelyet az egymást követő szívverések közötti időintervallumok EKG-alapú elemzésével, például a magas frekvenciás komponens (HF) vagy az RMSSD (az egymást követő ütések közötti különbségek négyzetes középértéke) alapján határoznak meg, megbízható mutatója az autonóm idegrendszeri szabályozásnak, stressz vagy izgalom hatására a paraszimpatikus aktivitást jelző HF és RMSSD értékek csökkennek, míg nyugalmi vagy relaxációs állapotban ezek emelkednek, jelezve a szimpatikus-paraszimpatikus egyensúly eltolódását [33].

A galvanikus bőrreakció (GSR) a verejtékmirigyek aktivitását méri, s néhány másodperccel követi a félelem- vagy meglepetésszerű ingerre adott autonóm választ, ezért jól alkalmas a jelenetváltozások finom követésére [34]. Ezen szenzorok nagy előnye a pontosság és a másodperces időfelbontás; gyengeségük, hogy a nyers adatok erős egyéni alapérték-szórást mutatnak és a vezetékes vagy elektródás illesztés könnyen csökkenti a felhasználói élményt.

A viselkedési tesztek közvetlenül a funkcionális következményeket tárják fel. A poszturális stabilitást leggyakrabban erőplatformmal mérik, Tongar és Yazici-Mutlu (2024) egészséges felnőtteknél azt találták, hogy már a 30 másodperces VR-állás közben a test súlypontjának lengési sebessége (CoP sway velocity) közel 50 %-kal nagyobb volt, mint ugyanabban a helyzetben, valós környezetben, nyitott

szemmel [35]. Ez a jelentős növekedés arra utal, hogy a VR-expozíció alatt romlik a statikus egyensúly, a résztvevők jobban kilengenek, több korrekciós izommunkát végeznek. A kognitív teljesítményt standardizált feladatokkal, leggyakrabban pszichomotoros vigilance-teszttel (reakcióidő) vagy n-back munkamemória-feladattal mérik, amely lehetővé, hogy objektíven kimutatható legyen a VR-élmény utáni és közbeni reakcióidő-lassulás, továbbá hibaszám-növekedés vagy csökkenés [36]. A viselkedési metrikák előnye, hogy közvetlenül a feladatkészségre utalnak, ugyanakkor érzékenyek a gyakorlási hatásra, ezért kontrollcsoporttal vagy kiegyensúlyozott mérési sorrenddel szükséges kiegészíteni őket.

A három módszercsoport együttes alkalmazása ad megbízható képet a VR-terhelésről: a skálák rögzítik a szubjektív élményt, az objektív szenzorok feltérképezik a háttérben zajló élettani folyamatokat, a viselkedési tesztek pedig megmutatják, hogyan fordulnak át ezek a változások a felhasználó teljesítményébe és biztonságába.

Módszertan

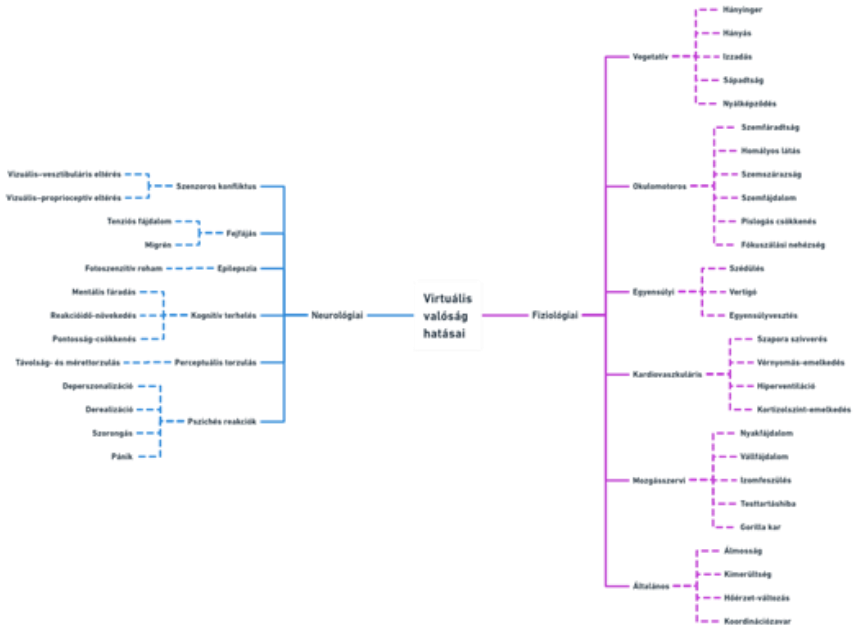
A módszertani keret egy célzott, szisztematikus szakirodalmi áttekintésre épül, amely a 2005. január 1. és 2025. április 30. között megjelent tanulmányokat foglalja magában. A PubMed, a Scopus és a Web of Science, Google Scholar adatbázisokban cím-, absztrakt- és tárgyszómezőben történt keresés a „virtual reality” vagy „VR” kifejezésekre, ezeket a „cybersickness”, „simulator sickness” vagy „side effect”, illetve a „physiology”, „neurology”, „age” és „sex” kulcsszavakkal kombinálva.

A bevonás feltétele volt, hogy a közlemény embereken végzett, empirikus vizsgálatot vagy szisztematikus áttekintést ismertessen, a VR-expozíciót követően lehetőleg tartalmazzon legalább egy fiziológiai (például pulzus, galvanikus bőrreakció, HRV) vagy neurológiai (például SSQ-pontszám, fejfájás-incidencia, EEG-változás) kimenetet, továbbá angol vagy magyar nyelvű teljes szövegként legyen elérhető. Kizárásra kerültek az állatkísérletek és a pusztán kiterjesztett valóságot vizsgáló tanulmányok.

A relevancia megítélése két lépcsőben történt, először a cím és összefoglaló, majd a teljes szöveg áttekintése alapján. A vizsgálati protokollok és mutatók jelentős heterogenitása miatt kvantitatív meta-analízis nem készült, az eredmények narratív szintézisben, továbbá egy összefoglaló ábrán kerülnek bemutatásra, amelyek a fiziológiai és a neurológiai tünetcsoportokat szemléltetik. A szisztematikus áttekintés eredményei a következőkben bemutatott elméleti keretbe ágyazva segítenek megválaszolni fő kutatási kérdést és rávilágítanak arra, hogy kik és milyen tényezők mentén lehetnek érzékenyebbek a virtuális valóság használatára.

Eredmények

A szakirodalmi áttekintés összesítéseként a VR-expozícióhoz köthető jelenségek két elsődleges doménbe rendezhetők: fiziológiai és neurológiai hatások. A rendszer összesen 12 alcsoportot és 40 konkrét tünetet tartalmaz, amelyek hierarchikusan épülnek egymásra (1. ábra).



ábra 1. - Virtuális Valóság Hatásai

Forrás: Saját szerkesztés a szakirodalmi adatok alapján

A neurológiai területen belül hat alcsoport azonosítható. A szenzoros konfliktus kategóriáját a vizuális–vesztibuláris eltérés és a vizuális–proprioceptív eltérés jellemzi, vagyis a látott mozgás és a belső fül, illetve a látvány és az izmok visszajelzése közötti disszonancia. A fejfájás alcsoportba a tenziós fájdalom és a migrén tartozik. Az epilepszia csoportban fotoszenzitív roham, amelyet erős fényingerek provokálhatnak. A kognitív terhelés alcsoport mentális fáradást, reakcióidő-növekedést és pontosság-csökkenést foglal magában. A perceptuális torzulás távolság- és mérettorzulásban nyilvánul meg, míg a pszichés reakciók alcsoport deperszonalizációt, derealizációt, szorongást és pánikot ölel fel. Így a neurológiai fő kategória összesen 13 konkrét tünetet tartalmaz.

A fiziológiai domén szintén hat alcsoportot foglal magában. A vegetatív válaszok között szerepel a hányinger, a hányás, az izzadás, a sápadtság és a fokozott nyálképződés. Az okulomotoros alcsoport tünetei a szemfáradtság, a homályos látás, a szemszárazság, a szemfájdalom, a pislogás csökkenése és a fókuszálási

nehézség. Az egyensúlyi kategóriába a szédülés, a vertigó és az egyensúlyvesztés sorolható. A kardiovaszkuláris hatások körében szapora szívverést, vérnyomás-emelkedést, hiperventilációt és kortizolszint-emelkedést figyeltünk meg. A mozgásszervi alcsoport nyaktáji fájdalmat, vállfájdalmat, izomfeszülést, testtartáshibát és az ún. „gorilla kart" (a karok tartós, megterhelő kinyújtása miatti elnehezedést) foglalja magában. Végül az általános tünetek az álmosságot, a kimerültséget, a hőérzet-változást és a koordinációzavart jelentik. Összesen 27 fiziológiai tünet került azonosításra.

Demográfiai tényezők által okozott variancia

A VR-használat során fellépő negatív hatások (például a szimulátorbetegség vagy kiberbetegség tünetei) gyakorisága és erőssége jelentős eltéréseket mutathat a felhasználók különböző csoportjai között. A szakirodalom az életkort, a biológiai nemet és az egészségi állapotot említi a legfontosabb moderátor tényezőkként. Ugyanakkor fontos kiemelni, hogy nem minden tanulmány jut ugyanarra az eredményre, egyes vizsgálatok szignifikáns különbségeket találtak a csoportok között, míg mások nem tudtak ilyen eltéréseket kimutatni. Az alábbiakban áttekintésre kerül, hogyan befolyásolhatják a demográfiai tényezők a VR által kiváltott negatív hatások megjelenését.

Egy kísérleti tanulmányban idősebb felnőttek (65 év felett) váratlanul kevesebb kiberbetegség tünetről számoltak be, mint a fiatal felnőttek [37]. Ezzel szemben egy másik, vezetési szimulátort alkalmazó kutatás épp az ellenkezőjét tapasztalta: a 65 év feletti csoport tagjai erősebb mértékű szimulátorbetegséget éltek át, mint a 18–39 éves fiatalabb résztvevők [38]. A korhatás tehát nem egyértelmű, egy 2023-ban megjelent meta-analízis sem talált szignifikáns összefüggést az életkor és a VR okozta tünetek súlyossága között, ugyanakkor az oculomotoros tüneteknél már kimutatott egy kisebb, de mérhető különbséget, ami arra utal, hogy az életkori különbségek hatása kismértékű vagy függhet a konkrét VR-alkalmazástól és az egyéni különbségektől [39].

Számos tanulmány szerint a nők hajlamosabbak a VR által kiváltott rosszullétre, mint a férfiak, összefoglaló elemzések megerősítik, hogy a nők átlagosan több vagy súlyosabb cybersickness tünetet tapasztalnak [40]. A női felhasználók fokozott érzékenységének lehetséges okai között szerepelnek a fiziológiai és anatómiai különbségek. Például a VR-headsetek interpupilláris távolságának (IPD) korlátozott állíthatósága miatt a kisebb átlagos szemközti távolsággal rendelkező nők headsetje gyakran nem illeszkedik optimálisan, ez az eltérés a kutatások szerint a nemi különbségek egyik fő magyarázó tényezője, emellett a korábbi mozgásbetegségi hajlam is gyakoribb lehet a nők körében, ami tovább növelheti a VR-mellékhatások kockázatát (4). Fontos azonban hozzátenni, hogy a nemi hatás nem minden esetben mutatható ki egyértelműen, egy 71 vizsgálatot áttekintő, 2021-ben megjelent

szisztematikus vizsgálat szerint a nők csupán az esetek ≈ 56,5 %-ában mutattak a férfiaknál nagyobb cybersickness-érzékenységet [41]. Ez is jelzi, hogy bár általánosságban a nők sérülékenyebbek a VR okozta tünetekkel szemben, a jelenség mögötti okok összetettek és további kutatásokat igényelnek.

Az egyén fennálló egészségügyi állapota jelentősen befolyásolhatja a VR-használat közben jelentkező mellékhatásokat. Különösen bizonyos neurológiai vagy egyensúlyi rendellenességek esetén nő a kockázat. Egy 2023-as meta-analízis szerint a szerzett agysérüléssel vagy vestibuláris diszfunkcióval élő VR-felhasználóknál a cybersickness összesített SSQ-pontszáma szignifikánsan magasabb volt, mint más felhasználói csoportoknál [39]. Kvantitatív elemzések szerint a közepes–mérsékelt fogyatékosságú sclerosis multiplex-betegeknél az SSQ-pontszám közepes hatásnagyságú többletet mutat a kontrollcsoporthoz képest [42], míg enyhe–közepes Parkinson-kórban egy 20 perces, teljesen immerszív VR-séta után nem igazolódott szignifikáns SSQ-emelkedés [43]. Ez alapján a cybersickness csak bizonyos neurológiai kórképekben áll közepes erősségű kapcsolatban a betegség jelenlétével. Nem véletlen, hogy a VR-eszközök használati útmutatói figyelmeztetnek: bizonyos egészségügyi állapotok, például a fotoszenzitív epilepszia vagy egyéb neurológiai érzékenységek esetén fokozott óvatosság indokolt a VR használatakor. Mindez azt mutatja, hogy az egyéni egészségügyi profil fontos moderáló tényező a VR-rel kiváltott mellékhatások tekintetében.

Az oktatási szint és a szocioökonómiai státusz közvetlen hatását a VR által kiváltott élettani hatásokra eddig kevéssé vizsgálták. Ezek a tényezők azonban közvetve befolyásolhatják a VR-élményt, például a technológiához való hozzáférésen és a felhasználói jártasságon keresztül. A fiatalabb korosztály magasabb iskolázottsággal vagy jobb anyagi háttérrel gyakrabban fér hozzá a VR eszközökhöz és videojátékokhoz, így tapasztaltabb felhasználók lehetnek. A kutatások alapján a gyakorlott VR/game felhasználók valamivel kevésbé hajlamosak a rosszullétre, feltehetően a hozzászokás és szenzoros adaptáció miatt [44]. Ezzel szemben az úgynevezett valós élmény (real-world experience) bizonyos esetekben növelheti a tünetek kockázatát, például a tapasztalt sofőrök egy szimulátorban élesebben érzékelhetik a vizuális-vestibuláris konfliktust, ami nagyobb diszkomfortot eredményezhet [45]. Összességében elmondható, hogy az olyan demográfiai és személyes tényezők, mint az iskolázottság és a társadalmi-gazdasági helyzet, inkább közvetett módon (a technológiai ismeretek és habituáció révén) befolyásolják a VR-mellékhatások kialakulását. Jelenleg kevés konkrét adat áll rendelkezésre e tényezők közvetlen szerepéről, így ezen a területen is további tudományos vizsgálatokra van szükség a pontos összefüggések megértéséhez.

Következtetések

A szakirodalmi áttekintés alapján jól látható, hogy a VR-használat élettani és neurológiai hatásai összetettek és egyénenként eltérőek. Bár számos tényezőt – például nemet, életkort és egészségi állapotot – azonosítottak lehetséges kockázati

vagy befolyásoló változóként, az eredmények gyakran ellentmondásosak. Egyes vizsgálatok szignifikáns összefüggéseket mutattak ki, mások ugyanazon tényezők esetében nem találtak releváns eltérést.

A VR-hatások pontos értékeléséhez többféle mérési módszer kombinációja szükséges, de ezek nem mindig egységesek vagy összevethetők; ráadásul a kevés számú kutatás eltérő eszközökkel és expozíciós időkkel dolgozik, így az eredmények csoportonként is változóak, továbbá nehezen összevethetőek.

Mindez azt jelzi, hogy a VR-tolerancia és a kapcsolódó mellékhatások megértéséhez további, standardizált, nagy mintán végzett, multidiszciplináris kutatásokra van szükség. Csak így lehetséges megbízhatóan azonosítani azokat a fiziológiai, neurológiai és demográfiai tényezőket, amelyek előre jelezhetik, ki alkalmas biztonságosan a VR-technológia használatára.

Források

[1.] Rizzo, A. & Koenig, S. T. (2017). Is clinical virtual reality ready for primetime? Neuropsychology, 31(8), 877–899. DOI: 10.1037/neu0000405

[2.] Tian, N., Lopes, P., & Boulic, R. (2022). A review of cybersickness in head-mounted displays: raising attention to individual susceptibility. Virtual Reality, 26, 1409–1441. DOI: 10.1007/s10055-022-00638-2

[3.] Bouchard, S., Berthiaume, M., Robillard, G., Forget, H., Daudelin-Peltier, C., Renaud, P., Blais, C. & Fiset, D. (2021). Arguing in Favor of Revising the Simulator Sickness Questionnaire Factor Structure When Assessing Side Effects Induced by Immersions in Virtual Reality. Frontiers in Psychiatry, 12, 739742. DOI: 10.3389/fpsyt.2021.739742

[4.] Stanney, K. M., Fidopiastis, C. M., Foster, L., Lange, B., Fidopiastis, C. M. & Reeves, L. (2020). Virtual Reality Is Sexist: But It Does Not Have to Be. Frontiers in Robotics and AI, 7, 4. DOI: 10.3389/frobt.2020.00004

[5.] Rebenitsch, L. & Owen, C. (2016). Review on cybersickness in applications and visual displays. Virtual Reality, 20(2), 101–125. DOI: 10.1007/s10055-016-0285-9

[6.] Oman, C. M. (1990). Motion sickness: a synthesis and evaluation of the sensory conflict theory. Canadian Journal of Physiology and Pharmacology, 68(2), 294–303. DOI: 10.1139/y90-044

[7.] Palmisano, S., Constable, R. Reductions in sickness with repeated exposure to HMD-based virtual reality appear to be game-specific. Virtual Reality 26, 1373–1389 (2022). DOI: 10.1007/s10055-022-00634-6

[8.] Kim, J., Sunil Kumar, Y., Yoo, J., & Kwon, S. (2018). Change of Blink Rate in Viewing Virtual Reality with HMD. Symmetry, 10(9), 400. DOI: 10.3390/sym10090400

[9.] Kim, H., Gil, M., & Kang, H. (2024). Tear Film Break-Up Time before and after Watching a VR Video: Comparison between Naked Eyes and Contact Lens Wearers. Electronics, 13(13), 2448. DOI: 10.3390/electronics13132448

[10.] Chang, A. M., Aeschbach, D., Duffy, J. F., & Czeisler, C. A. (2015). Evening use of light-emitting eReaders negatively affects sleep, circadian timing, and next-morning alertness. Proceedings of the National Academy of Sciences, 112(4), 1232–1237. DOI: 10.1073/pnas.1418490112

[11.] Cajochen, C., Frey, S., Anders, D., Späti, J., Bues, M., Pross, A., Mager, R., & Wirz-Justice, A. (2011). Evening exposure to a light-emitting diodes (LED)-backlit computer screen affects circadian physiology and cognitive performance. Journal of Applied Physiology, 110(5), 1432–1438. DOI: 10.1152/japplphysiol.00165.2011

[12.] Gerber, S. M., Jeitziner, M. M., Sänger, S. D., Knobel, S. E., Marchal-Crespo, L., Müri, R. M., ... & Nef, T. (2019). Comparing the relaxing effects of different virtual reality environments in the intensive care unit: observational study. JMIR perioperative medicine, 2(2), e15579. DOI: 10.2196/15579

[13.] Luong, T., & Holz, C. (2022). Characterizing physiological responses to fear, frustration, and insight in virtual reality. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 28(11), 3917-3927. DOI: 10.1109/TVCG.2022.3203113

[14.] Martens, M. A. G., Antley, A., Freeman, D., Slater, M., Harrison, P. J., & Tunbridge, E. M. (2019). It feels real: physiological responses to a stressful virtual reality environment and its impact on working memory. Journal of Psychopharmacology, 33(10), 1264–1273. DOI: 10.1177/0269881119860156

[15.] Tada, M., Ujike, H., & Hyodo, K. (2021). Effects of the weight and balance of head-mounted displays on physical load. Applied Sciences, 11(15), 6802. DOI: 10.3390/app11156802

[16.] Penumudi, S. A., Kuppam, V. A., Kim, J. H., & Hwang, J. (2020). The effects of target location on musculoskeletal load, task performance, and subjective discomfort during virtual reality interactions. Applied ergonomics, 84, 103010. DOI: 10.1016/j.apergo.2019.103010

[17.] Astrologo, A. N., Nano, S., Klemm, E. M., Shefelbine, S. J., & Dennerlein, J. T. (2024). Determining the effects of AR/VR HMD design parameters (mass and inertia) on cervical spine joint torques. Applied Ergonomics, 116, 104183. DOI: 10.1016/j.apergo.2023.104183

[18.] Lackner J. R. (2014). Motion sickness: more than nausea and vomiting. Experimental brain research, 232(8), 2493–2510. DOI: 10.1007/s00221-014-4008-8

[19.] Brelet, L., & Gaffary, Y. (2022). Stress reduction interventions: A scoping review to explore progress toward use of haptic feedback in virtual reality. Frontiers in Virtual Reality, 3, 900970. DOI: 10.3389/frvir.2022.900970

[20.] Wang, X. M., Southwick, D., Robinson, I., Nitsche, M., Resch, G., Mazalek, A., & Welsh, T. N. (2024). Prolonged exposure to mixed reality alters task performance in the unmediated environment. Scientific Reports, 14(1), 18938. DOI: 10.1038/s41598-024-69116-w

[21.] Nishiike, S., Okazaki, S., Watanabe, H., Akizuki, H., Imai, T., Uno, A., Kitahara, T., Horii, A., Takeda, N., & Inohara, H. (2013). The effect of visual-vestibulosomatosensory conflict induced by virtual reality on postural stability in humans. The journal of medical investigation: JMI, 60(3-4), 236–239. DOI: 10.2152/jmi.60.236

[22.] Assländer, L., Albrecht, M., Diehl, M. et al. Estimation of the visual contribution to standing balance using virtual reality. Sci Rep 13, 2594 (2023). DOI: 10.1038/s41598-023-29713-7

[23.] Fisher, R. S., Harding, G., Erba, G., Barkley, G. L. & Wilkins, A. (2005). Photic- and pattern-induced seizures: a review for the Epilepsy Foundation of America Working Group. Epilepsia, 46(9), 1426–1441. DOI: 10.1111/j.1528-1167.2005.31405.x

[24.] Chang, E., Kim, H. T. & Yoo, B. (2020). Virtual reality sickness: a review of causes and measurements. International Journal of Human–Computer Interaction, 36(17), 1658–1682. DOI: 10.1080/10447318.2020.1778351

[25.] Shen, R., Weng, D., Chen, S., Guo, J., & Fang, H. (2019, October). Mental fatigue of long-term office tasks in virtual environment. In 2019 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct) (pp. 124-127). IEEE. DOI: 10.1109/ISMAR-Adjunct.2019.00-65

[26.] Mittelstaedt, J. M., Wacker, J., & Stelling, D. (2019). VR aftereffect and the relation of cybersickness and cognitive performance. Virtual Reality, 23, 143-154. DOI: 10.1007/s10055-018-0370-3

[27.] Gallagher, M., Dowsett, R., & Ferrè, E. R. (2019). Vection in virtual reality modulates vestibular-evoked myogenic potentials. European Journal of Neuroscience, 50(10), 3557-3565. DOI: 10.1111/ejn.14499

[28.] Peckmann, C., Kannen, K., Pensel, M. C., Lux, S., Philipsen, A., & Braun, N. (2022). Virtual reality induces symptoms of depersonalization and derealization: A longitudinal randomised control trial. Computers in Human Behavior, 131, 107233. DOI: 10.1016/j.chb.2022.107233

[29.] Bimberg, P., Weissker, T., & Kulik, A. (2020, March). On the usage of the simulator sickness questionnaire for virtual reality research. In 2020 IEEE conference on virtual reality and 3D user interfaces abstracts and

workshops (VRW) (pp. 464-467). IEEE. DOI: 10.1109/VRW50115.2020.00098

[30.] Keshavarz, B., & Hecht, H. (2011). Validating an efficient method to quantify motion sickness. Human factors, 53(4), 415-426. DOI: 10.1177/0018720811403736

[31.] Conner, N. O., Freeman, H. R., Jones, J. A., Luczak, T., Carruth, D., Knight, A. C., & Chander, H. (2022, November). Virtual reality induced symptoms and effects: concerns, causes, assessment & mitigation. In Virtual Worlds (Vol. 1, No. 2, pp. 130-146). MDPI. DOI: 10.3390/virtualworlds1020008

[32.] Tauscher, J. P., Schottky, F. W., Grogorick, S., Bittner, P. M., Mustafa, M., & Magnor, M. (2019, March). Immersive EEG: evaluating electroencephalography in virtual reality. In 2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR) (pp. 1794-1800). IEEE. DOI: 10.1109/VR.2019.8797858

[33.] Gaertner, R. J., Kossmann, K. E., Benz, A. B., Bentele, U. U., Meier, M., Denk, B. F., ... & Pruessner, J. C. (2023). Relaxing effects of virtual environments on the autonomic nervous system indicated by heart rate variability: A systematic review. Journal of Environmental Psychology, 88, 102035. DOI: 10.1016/j.jenvp.2023.102035

[34.] Benedek, M., & Kaernbach, C. (2010). A continuous measure of phasic electrodermal activity. Journal of neuroscience methods, 190(1), 80–91. DOI: 10.1016/j.jneumeth.2010.04.028

[35.] Tongar, S. Ş., & Yazici-Mutlu, Ç. (2024). How virtual reality is impacting balance: An examination of postural stability. Journal of Bodywork and Movement Therapies, 38, 81-85. DOI: 10.1016/j.jbmt.2024.01.034

[36.] Aksoy, M., Ufodiama, C. E., Bateson, A. D., Martin, S., & Asghar, A. U. (2021). A comparative experimental study of visual brain event-related potentials to a working memory task: virtual reality head-mounted display versus a desktop computer screen. Experimental Brain Research, 239, 3007-3022. DOI: 10.1007/s00221-021-06158-w

[37.] Dilanchian, A. T., Andringa, R., & Boot, W. R. (2021). A pilot study exploring age differences in presence, workload, and cybersickness in the experience of immersive virtual reality environments. Frontiers in Virtual Reality, 2, 736793. DOI: 10.3389/frvir.2021.736793

[38.] Keshavarz, B., Ramkhalawansingh, R., Haycock, B., Shahab, S., & Campos, J. L. (2018). Comparing simulator sickness in younger and older adults during simulated driving under different multisensory conditions. Transportation research part F: traffic psychology and behaviour, 54, 47-62. DOI: 10.1016/j.trf.2018.01.007

[39.] Li, X., Luh, D. B., Xu, R. H., & An, Y. (2023). Considering the consequences of cybersickness in immersive virtual reality rehabilitation: a systematic review and meta-analysis. Applied Sciences, 13(8), 5159. DOI: 10.3390/app13085159

[40.] Kelly, J. W., Gilbert, S. B., Dorneich, M. C., & Costabile, K. A. (2023, March). Gender differences in cybersickness: Clarifying confusion and identifying paths forward. In 2023 IEEE conference on virtual reality and 3D user interfaces abstracts and workshops (VRW) (pp. 283-288). IEEE. DOI: 10.1109/VRW58643.2023.00067

[41.] MacArthur, C., Grinberg, A., Harley, D., & Hancock, M. (2021, May). You're making me sick: A systematic review of how virtual reality research considers gender & cybersickness. In Proceedings of the 2021 CHI conference on human factors in computing systems (pp. 1-15). DOI: 10.1145/3411764.3445701

[42.] Pau, M., Arippa, F., Leban, B., Porta, M., Casu, G., Frau, J., ... & Cocco, E. (2024). Cybersickness in people with multiple sclerosis exposed to immersive virtual reality. Bioengineering, 11(2), 115. DOI: 10.3390/bioengineering11020115

[43.] Kim, A., Darakjian, N., & Finley, J. M. (2017). Walking in fully immersive virtual environments: an evaluation of potential adverse effects in older adults and individuals with Parkinson's disease. Journal of neuroengineering and rehabilitation, 14, 1-12. DOI: 10.1186/s12984-017-0225-2

[44.] Pöhlmann, K. M., Li, G., Wilson, G., McGill, M., Pollick, F., & Brewster, S. (2024). Is Video Gaming a Cure for Cybersickness? Gamers Experience Less Cybersickness Than Non-Gamers in a VR Self-Motion Task. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. DOI: 10.1109/TVCG.2024.3456176

[45.] Milleville-Pennel, I., & Charron, C. (2015). Do mental workload and presence experienced when driving a real car predispose drivers to simulator sickness? An exploratory study. Accident Analysis & Prevention, 74, 192-202. DOI: 10.1016/j.aap.2014.10.021