

# Primjena virtualne stvarnosti u rehabilitaciji neuroloških bolesti

---

Hudi, Denis

Master's thesis / Diplomski rad

2021

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Dental Medicine and Health Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet za dentalnu medicinu i zdravstvo Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:243:794486>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-10**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Dental Medicine and Health Osijek  
Repository](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**  
**FAKULTET ZA DENTALNU MEDICINU I ZDRAVSTVO**  
**OSIJEK**

Diplomski sveučilišni studij Fizioterapija

**Denis Hudi**

**PRIMJENA VIRTUALNE STVARNOSTI**  
**U REHABILITACIJI NEUROLOŠKIH**  
**BOLESTI**

**Diplomski rad**

**Orahovica, 2021.**

**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**  
**FAKULTET ZA DENTALNU MEDICINU I ZDRAVSTVO**  
**OSIJEK**

Diplomski sveučilišni studij Fizioterapija

**Denis Hudi**

**PRIMJENA VIRTUALNE STVARNOSTI**  
**U REHABILITACIJI NEUROLOŠKIH**  
**BOLESTI**

**Diplomski rad**

**Orahovica, 2021.**

Rad je ostvaren na Fakultetu za dentalnu medicinu i zdravstvo, Osijek.

Mentor rada: prof. dr. sc. Savo Jovanović, professor emeritus

Rad ima 47 listova i 1 sliku.

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. POSTUPCI.....	3
3. VIRTUALNA STVARNOST .....	4
3.1 Razvoj virtualne stvarnosti .....	4
3.2 Svojstva virtualne stvarnosti.....	6
3.2.1 Imerzija .....	7
3.2.2 Interakcija .....	7
3.2.3 Senzomotorički dio .....	7
3.2.4 Iluzija .....	8
3.3 Uređaji za primjenu virtualne stvarnosti .....	8
3.4 Ne-imerzivna virtualna stvarnost.....	9
3.5 Imerzivna virtualna stvarnost .....	9
3.6 Područja primjene virtualne stvarnosti .....	10
3.7 Virtualna stvarnost u neurorehabilitaciji .....	10
4. MOŽDANI UDAR.....	12
4.1 Rehabilitacija motoričke funkcije nakon moždanog udara .....	13
4.2 Neuroplastičnost .....	15
4.3 Virtualna stvarnost u rehabilitaciji nakon moždanog udara .....	16
4.3.1 Rehabilitacija motoričke funkcije gornjih ekstremiteta primjenom virtualne stvarnosti.....	17
5. PARKINSONOVA BOLEST .....	22
5.1 Bazalni gangliji.....	23
5.2 Motorička procjena Parkinsonove bolesti .....	24
5.3 Rehabilitacija oboljelih od Parkinsonove bolesti primjenom virtualne stvarnosti .....	26
6. MULTIPLA SKLEROZA.....	30

7. VAŽNOST ZA PODRUČJE FIZIOTERAPIJE .....	32
7. ZAKLJUČAK .....	34
8. SAŽETAK.....	35
9. SUMMARY .....	36
10. LITERATURA.....	36
11. ŽIVOTOPIS .....	42

## 1. UVOD

Kao rezultat starenja stanovništva, povećava se i prevalencija neuroloških bolesti. Neurološke bolesti povezane su s visokom stopom smrtnosti i invaliditeta, a broj ljudi pogođen njima raste iz dana u dan. Sve veći broj onesposobljavajućih i neizlječivih neuroloških bolesti nepovoljno utječe na pacijente, njihovu obitelj i društvo u cjelini, čineći presudnim pronalaženje načina za usporavanje njihovog napredovanja i smanjenje njihove učestalosti. Starenje je povezano s razvojem brojnih patoloških stanja, osobito cerebrovaskularnih bolesti, kao i s početkom neurodegeneracije. Najčešće se javljaju bolesti ili poremećaji poput moždanog udara, polineuropatije, Parkinsonove bolesti i Alzheimerove bolesti. 15 milijuna ljudi diljem svijeta svake godine doživi moždani udar. Otprilike 6 milijuna tih ljudi umre u roku jednog sata, dok 5 milijuna ljudi ostaje trajno onesposobljeno. Samo Alzheimerova bolest pogađa jednu trećinu starijih od 85 godina, a u budućnosti se predviđa i rast oboljelih. Incidencija Parkinsonove bolesti također se povećava proporcionalno s godinama i nema tendenciju pada ni u starijim dobnim skupinama. S obzirom na to da globalno stanovništvo sve više stari, što za posljedicu ima sve veći broj neuroloških bolesnika, potrebno je usmjeriti se na prevenciju, kvalitetnu rehabilitaciju i zbrinjavanje tih bolesnika (1).

Neurološke bolesti su vrlo kompleksna stanja i kod pacijenata osim motoričkih i senzornih deficita uzrokuju i kognitivna oštećenja te probleme u komunikaciji, što zahtijeva dugotrajnu multidisciplinarnu skrb. Novije vrijeme donijelo je tehnološki napredak koji je omogućio bolje razumijevanje živčanog sustava, njegovog odgovora na ozljede i razvoj novih tehnologija rehabilitacije (2). Rehabilitacija neuroloških bolesnika u fizioterapiji fokusira se uglavnom na vraćanje motoričkih sposobnosti, u čemu razvoj novih tehnologija može uvelike pomoći i poboljšati kvalitetu rehabilitacije.

Virtualna stvarnost tehnologija je koja pacijentu pruža interaktivno virtualno okruženje. Ona može poboljšati neuroplastičnost i oporavak te smanjiti progresiju bolesti pružanjem intenzivnog, ponavljajućeg i angažiranijeg treninga zbog prednosti kao što su: zadatci s različitim razinama težine, povećane povratne informacije u stvarnom vremenu, upečatljivija i zanimljivija iskustva rehabilitacije i sigurna simulacija aktivnosti svakodnevnog života (3). Kada se govori o primjeni virtualne stvarnosti u rehabilitaciji, najviše istraživanja provedeno je u vezi implementacije virtualne stvarnosti na vraćanje motoričkih funkcija gornjih i donjih ekstremiteta te poboljšanje balansa i hoda pacijenata. Sustavi virtualne stvarnosti omogućavaju pružateljima zdravstvenih usluga povećanje doze izvedbenih vježbi, kako u

klinici tako i putem telerehabilitacije unutar vlastitog doma. Većinom se primjenjuju kao dodatak tradicionalnom pristupu fizioterapije, a fokusirani su na primjenu fizioterapije putem vježbi usmjerenih na određeni zadatak (4). Ovaj rad pokušat će odgovoriti na pitanja kako primjena virtualne stvarnosti u rehabilitaciji utječe na pacijente, koja je razlika između primjene tradicionalnih metoda fizioterapije i sustava virtualne stvarnosti i je li uistinu potrebno implementirati virtualnu stvarnost kao pomoćni alat u svrhu rehabilitacije neuroloških bolesnika.



## 2. POSTUPCI

Kod pretraživanja literature za izradu diplomskog rada na temu „Primjena virtualne stvarnosti u rehabilitaciji neuroloških bolesti“ korištena je literatura dostupna u Gradskoj knjižnici Virovitica i knjižnici Fakulteta za dentalnu medicinu i zdravstvo Osijek. Baze podataka pretraživane prilikom izrade rada bile su Pubmed i Hrčak. Pregledano je otprilike 90 radova, od kojih se njih 50 uzelo u obzir. Većina korištene literature nije starija od pet godina, a pretraživana literatura bila je isključivo na engleskom i hrvatskom jeziku. Literatura je pretraživana putem engleskih ključnih riječi: virtual reality, neurology, stroke, rehabilitation, Parkinson disease.

### 3. VIRTUALNA STVARNOST

Prije svega potrebno je razumjeti što zapravo znači pojam virtualna stvarnost. Često se virtualna stvarnost definira kao bilo koji računalni uređaj koji pruža vizualne podražaje na monitoru, poput videoigara. Međutim, ona je više nego jednostavni prikaz slike jer korisnika treba uvesti unutar virtualnog okruženja i reagirati u stvarnom vremenu na prirodne pokrete tijela. Korisnik je tijekom korištenja virtualne stvarnosti okružen 3D računalno generiranom slikom, može se kretati unutar virtualnog svijeta, gledati iz različitih kutova i posezati za predmetima unutar njega. Stoga se virtualna stvarnost može opisati kao vrhunsko sučelje koje uključuje stimulaciju u stvarnom vremenu i interakciju s ugrađenim objektom putem više senzornih kanala (vizualni, slušni, haptički) temeljenih na okruženju u kojem se ispitanik nalazi (5). Virtualna stvarnost osnovni je način na koji se ljudi mogu povezati vizualno s računalom, manipulirati njime i komunicirati s njim. Možemo je promatrati kao napredni oblik interakcije čovjeka s računalom koji omogućava korisnicima da se uključe u računalno generirano virtualno okruženje. Stvaranje virtualnog okruženja može se postići širokom uporabom spektra uređaja za interakciju, senzornih sustava i sadržaja prezentiranih u virtualnom okruženju. Sudionici uključeni u virtualnu stvarnost mogu je istraživati s percepcijom stvarnosti. Takve karakteristike mogu olakšati aktivnosti koje su uključene u program rehabilitacije i učiniti je zanimljivijim iskustvom za pacijenta. Raznim eksperimentalnim pristupima utvrđeno je kako virtualna stvarnost nudi prednost osobama s motoričkim oštećenjima, a studije pokazuju i poboljšanu motivaciju (6).

#### 3.1 Razvoj virtualne stvarnosti

Virtualna stvarno danas je bez sumnje najснаžnija dostupna iskustvena tehnologija. Kako se kod primjene virtualne stvarnosti integriraju različiti oblici interakcije, ona se odnosi na upotrebu interaktivnih simulacija, stvorenih računalnim hardverom i softverom, koje korisnicima pružaju mogućnost da se uključe u okruženja koja izgledaju i odvijaju se slično kao i stvarni događaji (7).

Kada govorimo o konceptu nastanka virtualne stvarnosti, on seže još u 1960-e kada je Ivan Sutherland pokušao opisati virtualnu stvarnost kao prozor kroz koji korisnik virtualni svijet doživljava kao da on izgleda, osjeća se, zvuči stvarno i u kojem korisnik može djelovati u realnom vremenu. Nakon tog vremena i u skladu s područjem razvilo se nekoliko definicija virtualne stvarnosti. Fuchs i Bishop virtualnu stvarnost definiraju kao „interaktivnu grafiku u

stvarnom vremenu s 3D modelima, u kombinaciji s prikazom tehnologije koja korisniku daje imerzivno iskustvo u svijetu modela i direktnu manipulaciju samim svijetom“. Gigante za virtualnu stvarnost kaže da je ona „iluzija sudjelovanja u sintetičkom okruženju, a ne vanjsko promatranje takvog okruženja. Virtualna stvarnost oslanja se na 3D stereoskopske zaslone za praćenje glave, ruku/tijela i binauralni zvuk i pruža višesenzorno imerzivno iskustvo“. Još jedna vrsta definicije koju je bitno spomenuti za virtualnu stvarnost je ta da se ona odnosi na imerzivno, interaktivno, multisenzorno, 3D usmjereno okruženje i kombinaciju tehnologija potrebnih za izgradnju okruženja. Ako malo analiziramo ove tri definicije, iako su one različite, možemo primijetiti tri zajedničke značajke sustava virtualne stvarnosti, a to su: imerzija, percepcija prisutnosti u okruženju i interakcija s tim okruženjem (8).

Kronološki razvoj virtualne stvarnosti započeo je 1962. godine kada je Morton Heiling stvorio prvi 3D imerzivni simulator zvan Sensorama, simulacijsko iskustvo motocikla koji prolazi ulicom, a karakteriziralo ga je nekoliko senzornih podražaja kao što su zvuk, njuh, pa čak i vjetar za pružanje maksimalno realističnog iskustva u to vrijeme. Istih je godina Ivan Sutherland razvio „Ultimate Display“, koji je osim zvuka, mirisa i haptičkih povratnih informacija uključivao i interaktivnu grafiku, za razliku od Sensorame. Nedugo nakon toga Philco je razvio prvi HMD (*head mounted display*), odnosno zaslon za postavljanje na glavu, koji je zajedno s Damaklovim mačem od Sutherlanda bio u mogućnosti ažurirati virtualne slike prateći položaj i orijentaciju korisnika.

70-ih godina Sveučilište Sjeverne Karoline razvilo je GROPE, koji se smatra prvim sustavom povratnih informacija, a Myron Krueger stvorio je Videoplance, odnosno umjetnu stvarnost u kojoj su kamere tijela snimale tjelesne slike korisnika i projicirale ih na ekranu. Na taj je način dva ili više korisnika moglo komunicirati u 2D virtualnom prostoru. Godine 1982. Američko ratno zrakoplovstvo stvorilo je prvi simulator leta (*Visual Coupled Airone System Simulator*) u kojem je pilot putem HMD-a mogao kontrolirati put zrakoplova. 80-ih godina počinje pojava prvih komercijalnih uređaja kao što su *DataGlove*, senzorne rukavice opremljene za mjerenje fleksije prstiju, orijentacije i prepoznavanje gesti ruku. Krajem 80-ih Fake Space Labs stvorili su BOOM (*Binocular-Omni-Orientalional Monitor*), složeni sustav koji je bio u mogućnosti prikazivati pokretno i široko virtualno okruženje te pratiti geste ruku. Pružao je stabilnu sliku i vrlo brzo reagirao na pokrete. Godine 1992. Laboratorij za elektroničku vizualizaciju Sveučilišta Illinois stvorio je *CAVE Automatic Virtual Environment*, imerzivni sustav virtualne stvarnosti sastavljen od projektoru usmjerenih na tri ili više zidova u prostoriji.

U posljednjih pet godina virtualna stvarnost privlači pozornost velikog broja ulagača i šire javnosti. Trenutno tvrtke kao što su Sony, Samsung, HTC i Google ulažu velika sredstva u razvoj virtualne stvarnosti. Znanstvene studije virtualne stvarnosti pokrenute su u području računalne grafike, ali proširene su na nekoliko disciplina. Trenutno je primjena virtualne stvarnosti u videoigrama najpopularniji spektar korištenja, no u istraživanjima ga koriste i neuroznanstvenici, psiholozi, biolozi i drugi istraživači. U posljednje vrijeme proveden je velik broj studija u kliničkim uvjetima pomoću virtualne stvarnosti. Štoviše, dostupnost besplatnih alata za eksperimentalnu računalnu upotrebu virtualne stvarnosti uvelike je olakšala pristup i provedbu raznih istraživanja na svim poljima (8). Danas je virtualna stvarnost postala medij za sebe, koji je sposoban generirati jedinstvena iskustva. Tehnologije prvobitno razvijene za virtualnu stvarnost danas se koriste u sve većem rasponu interakcije čovjeka s računalom u različitim domenama kao što su gaming, industrija, rehabilitacija, zdravstvo (7). U današnje vrijeme mnoge tvrtke razvijaju i poboljšavaju kvalitetu uređaja za virtualnu stvarnost. Uređaji kao što su Oculus Rift i HTC Vive pružaju šire vidno polje i manju latenciju. Prednost im je to što se mogu kombinirati s drugim sustavima za praćenje pokreta (8).



Slika 1 „Oculus Rift“

Izvor: <https://www.oculus.com/rift-s/>

### 3.2 Svojstva virtualne stvarnosti

Virtualna stvarnost sastoji se od niza svojstava koja njeno iskustvo čine više ili manje stvarnim. Postoje minimalno četiri međusobno povezana svojstva koja omogućuju da virtualna stvarnost pruži kvalitetno iskustvo korisniku, a to su: imerzija, interakcija, senzomotorički slučajevi i iluzija kao posljedica toga (7).

### 3.2.1 Imerzija

Prvi pojam koji se većinom veže za virtualnu stvarnost upravo je imerzija. U virtualnoj stvarnosti glavni doprinos danas dolazi od načina na koji se pružaju vizualne informacije, u čemu glavnu ulogu ima imerzija. Međutim, imerzija ne uključuje samo vrstu prikaza, veličinu i širinu vidnog polja, već se ona može proširiti i dodavanjem drugih osjetila kao što su npr. slušno i taktilno. Ne mora nužno uključivati samo elektroničke zaslone. Gledajući širu sliku, možemo reći da knjiga također pruža određenu razinu imerzije, gdje čitatelj mentalno vizualizira opisani svijet ili se poistovjećuje sa strahovima protagonista. Da bi se baš to iskustvo čitanja podiglo na razinu virtualne stvarnosti, potrebna su i druga svojstva koja uključuju nepredviđene senzomotoričke okolnosti i iluziju (7).

### 3.2.2 Interakcija

Prvi osjećaj stvoren nakon izlaganja novom imerzivnom okruženju može vrlo brzo nestati ako se to iskustvo ne kombinira s nepredviđenim senzomotornim okolnostima koje pružaju prirodnu i smislenu interakciju s okolinom. Prirodna interakcija u virtualnoj stvarnosti započinje vizualnim istraživanjem prostora. Putem zaslona montiranog na glavu s integriranim uređajem za praćenje korisnici mogu istraživati virtualni svijet kao što bi to činili i u stvarnom svijetu. Razina interakcije povećava se svaki put kad sustav odgovori na pokret korisnika. Ako je prikaz tijela uključen u virtualno iskustvo, prilikom dolaska do virtualnog objekta korisnik će moći taj predmet dodirnuti i osjetiti njegovu strukturu, kao što su oblik i težina, putem primjene haptičkih podataka rukavica.

Postoje i složeniji oblici interakcije koji pomoću mozga, odnosno interakcijom mozak – računalo, putem biofeedbacka mogu dobiti informacije kao što su npr. mogućnost da vide kako se njihovo disanje i pokreti prsa reproduciraju u virtualnom tijelu na sinkroniziran način (7).

### 3.2.3 Senzomotorički dio

Senzomotorički dio virtualne stvarnosti odnosi se na radnje koje provodimo kako bismo opazili virtualni svijet (7). U virtualnoj stvarnosti to se odnosi na interakciju s okolinom, a primjer može biti radnja u kojoj se nagnjemo prema naprijed u pokušaju da vidimo što se krije iza određenog predmeta (9). Za virtualnu stvarnost vrlo je bitna naša interakcija s okolinom jer naša percepcija virtualnog svijeta ovisi o podudarnosti naših postupaka s osjetnim povratnim informacijama koje proizlaze iz njih. Proizvoljna prostorno-vremenska

korelacija između multisenzornih podražaja umjetno stvorena unutar virtualne stvarnosti može biti korisna u aktivaciji živčanog sustava za potencijalno ubrzavanje procesa rehabilitacije (7).

### 3.2.4 Iluzija

Iluzija se može definirati kao „primjer pogrešno protumačene percepcije osjetilnog iskustva“. Uzevši u obzir tu definiciju u virtualnoj stvarnosti, to bi značilo niz perceptivnih iluzija povezanih s prostorom, okolinom i samim sobom. Što je više osjetila uključeno tijekom interakcije, to je snaga iluzije veća. Iluzija u virtualnoj stvarnosti uključuje „sebe“ kao svojstveni element, odnosno sudionika virtualne stvarnosti koji prestaje biti puki promatrač, već postaje glavni akter kojemu je omogućena kontrola unutar virtualnog svijeta (7). Virtualna stvarnost ima mogućnost dodati, modificirati i zamijeniti stvarne osjetilne informacije s onim virtualnima kako bi se njeno iskustvo primjene osjećalo što više stvarnim (10). Manipulacije vlastitim tijelom unutar virtualne stvarnosti mogu se koristiti za ispitivanje moždanih mehanizama koji se odnose na percepciju tijela i njegovu integraciju kod zdravih ispitanika, ali isto tako može biti primijenjena i u kontekstu različitih patologija, od poremećaja u prehrani do neuropatske boli ili oštećenja motoričkih funkcija (7).

### 3.3 Uređaji za primjenu virtualne stvarnosti

Važnu ulogu u iskustvu virtualne stvarnosti imaju uređaji koji se za to koriste, a možemo ih podijeliti na ulazne i izlazne. Ulazni uređaji su oni koji korisniku omogućuju komunikaciju s virtualnim svijetom, a to su džojstik, tipkovnica ili rukavice koje omogućuju hvatanje predmeta i pomicanje prstiju. S druge strane, izlazni uređaji omogućuju korisniku da vidi, čuje, nanjuši ili dodirne sve što se događa u virtualnom okruženju. Oni obuhvaćaju širok spektar uređaja: od vrlo jednostavnih kao što je monitor računala do vrlo sofisticiranih uređaja poput naočala za virtualnu stvarnost, HMD-a ili Cave sustava (8).

Kako bi iskustvo virtualne stvarnosti bilo potpuno, postoje minimalni zahtjevi instrumentacije, a oni moraju uključivati kontinuirano ažurirane multisenzorne povratne informacije (barem vizualne) s podudarnim senzomotornim situacijama. Iako su stereoskopske 3D slike prikazane u visoko imerzivnom HMD-u učinkovitije u generiranju kvalitetnog iskustva virtualne stvarnosti, samo njihovo nošenje to ne garantira, osim ako se ne zadovolje i ostale komponente kao što su interakcija, iluzija i senzomotorički dio virtualne

stvarnosti. Samim time iskustvo virtualne stvarnosti može se doživjeti i na ravnim zaslonima unatoč manjem stupnju imerzije (7).

### 3.4 Ne-imerzivna virtualna stvarnost

Što se tiče primjene virtualne stvarnosti, u literaturi se najčešće spominju dvije vrste virtualne stvarnosti, a to su ne-imerzivna i imerzivna. Ne-imerzivna virtualna stvarnost omogućuje korisnicima da virtualno okruženje doživljavaju kao promatrači te komuniciraju s njim pomoću uređaja koji ne mogu u potpunosti nadvladati osjetilne percepcije (11), što rezultira, kako sam naziv kaže, manjim osjećajem imerzije u virtualnom svijetu. Ne-imerzivne sustave uglavnom karakterizira sposobnost korisnika da kontroliraju svoju okolinu dok istodobno opažaju podražaje poput zvukova, vizualnih i haptičkih podražaja. Takvi sustavi većinom se temelje na primjeni računala ili konzola za videoigre i na ravnom zaslonu. Kako bi ne-imerzivni sustavi korisniku pružili što realističnije iskustvo, mogu pružiti i pogled iz prvog lica kako bi se korisnici povezali sa svojim virtualnim avатарom. S obzirom na to da je kod primjene ne-imerzivne virtualne stvarnosti riječ o ravnim zaslonima, koristi se 3D stereoskopska tehnologija vida, kojom se korisnicima pružaju stereo slike kako bi svako oko korisnika, koji nosi posebne naočale, vidjelo istu scenu, ali iz malo drugačijeg kuta, što omogućuje da korisniku izgleda kao da vidi i treću dimenziju s 2D zaslona (3).

### 3.5 Imerzivna virtualna stvarnost

Za razliku od ne-imerzivne virtualne stvarnosti, sustavi imerzivne virtualne stvarnosti pružaju poboljšan osjećaj prisutnosti, omogućuju ljudima da osjećaju kao da su „više“ u virtualnom okruženju, što znači veću vjerojatnost u komunikaciji s podražajima koju korisnik dobiva od računala i uređaja povezanih s računalom koji pružaju vizualne, slušne i haptičke podražaje. Glavni cilj imerzivnih sustava virtualne stvarnosti jest omogućiti korisnicima da iskuse iluziju boravka u računalno generiranom okruženju, a ne u stvarnom okruženju. Nošenjem zaslona postavljenog na glavu (HMD-a), uređaja za praćenje, haptičkih uređaja i podatkovnih rukavica te korištenjem kontrolera korisnici komuniciraju s virtualnim svijetom. Stvarni svijet, međutim, ima veću raznolikost osjetila poput mirisa, okusa, osjećaja topline i hladnoće. To je moguće simulirati i u virtualnom svijetu, ali za to su potrebni sofisticirani umjetni simulatori koji zahtijevaju više prostora i imaju veću cijenu. S obzirom na to da je kod primjene virtualne stvarnosti unutar određenog područja korisniku ograničen radijus kretanja, moguće je korištenje trake za trčanje uz istodobnu primjenu HMD-a. Njena primjena može

riješiti dva problema virtualne stvarnosti: simulacija korisnikovog hoda je realno sinkronizirana i za primjenu nije potreban veliki prostor.

Imerzivna i ne-imerzivna virtualna stvarnost razlikuju se u tome što je kod primjene imerzivne virtualne stvarnosti jača razina imerzije jer je potrebno manje mentalnog napora kako bi se „uronilo“ u okruženje iz razloga što hardverski sustav pokriva većinu osjetnih percepcija. Kod primjene ne-imerzivne virtualne stvarnosti situacija je malo drugačija. Ona zahtijeva veću količinu mentalnog napora, stoga može smanjiti samu prisutnost koja definira osjećaj boravka u virtualnom okruženju (3).

### **3.6 Područja primjene virtualne stvarnosti**

Od samog pojavljivanja pa sve do sada virtualna stvarnost koristi se u raznim područjima. Videoigre, vojna obuka, arhitektonsko oblikovanje, obrazovanje, učenje, trening socijalnih vještina, simulacija kirurških postupaka i rehabilitacija samo su neka od područja u kojima se koristi. Postoje mnoge mogućnosti vezane uz primjenu virtualne stvarnosti u raznim područjima. Može se koristiti kao veći oblik motivacije zamjenjujući stvarne podražaje i stvarajući iskustva koja u stvarnom svijetu ne bi bila moguća. Zbog toga njena primjena ima sve veću ulogu u poboljšanju tradicionalnih sustava motoričke rehabilitacije. S obzirom na broj objavljenih članaka, statistika objavljena na „Web of Science“ u razdoblju 2011. – 2016. ukazuje na to da primjena virtualne stvarnosti najčešću uporabu od čak 29,80% ima u informatici, dok neuroznanost, neurologija i rehabilitacija imaju postotak od 16,64%, odnosno 1291 objavljeni članak u tom razdoblju (8).

### **3.7 Virtualna stvarnost u neurorehabilitaciji**

Primjena virtualne stvarnosti u neurorehabilitaciji usredotočena je na dva područja: poremećaj ravnoteže i njen multisenzorni temeljni mehanizam integracije, te oporavak funkcije nakon moždanog udara. Simulacija virtualne stvarnosti može biti vrlo zanimljiva i pružiti veću razinu motivacije, što ima vrlo važnu ulogu u rehabilitacijskom procesu, koji zahtijeva praksu koja se temelji na dosljednosti i ponavljanju. Imerzivna virtualna stvarnost u koju su uključeni pokreti glave, ruku i tijela s vizualno-slušnim podražajima pokazuje se korisnom za oporavak motoričke funkcije i posturalne stabilnosti (12). Područje primjene ovog polja napreduje zahvaljujući cjelokupnom tehnološkom napretku, koji tehnologiju čini dostupnijom. Sustavi virtualne stvarnosti u svrhu rehabilitacije uključuju virtualno okruženje predstavljeno na monitoru, HMD-u ili sustavu za projekciju. Kada je riječ o motoričkim oštećenjima, uređaji



virtualne stvarnosti koriste se za prijenos pokreta sudionika u virtualni svijet i upravo korištenjem fizioterapijskih vježbi unutar virtualne stvarnosti stvara se interakcija između korisnika i računala. Korištenje virtualne stvarnosti može utjecati na motivacijske strategije u obliku „gamifikacije“, odnosno upotrebe elemenata dizajna igre van njenog konteksta u svrhu veće motiviranosti korisnika (13). Vezano za samu rehabilitaciju, to može biti poželjno jer razbija monotoniju terapije i povećava želju pacijenta za vježbanjem (4).

Neurorehabilitacija primjenom virtualne stvarnosti, kao i druge vrste rehabilitacije, temelji se na neuroplastičnosti i motoričkom učenju. Struktura intervencija koje podupiru motoričko učenje ovisi o terapeutu koji provodi kliničku praksu, poznatu kao strategije motoričkog učenja, koje uzimaju u obzir specifično motoričko učenje za svakog pojedinca. Strategije motoričkog učenja mogu se definirati kao terapijske intervencije u kojima terapeuti razmatraju zadatak i čimbenike specifične za pacijenta kako bi na temelju dokaza izabrali i primijenili odgovarajuću terapiju koja omogućuje kvalitetne povratne informacije za optimalno motoričko učenje. Virtualna stvarnost ima nekoliko prednosti za primjenu strategija motoričkog učenja u odnosu na konvencionalnu terapiju, posebice zato što olakšava implementaciju principa motoričkog učenja poput povratne multisenzorne informacije unutar stvarnog vremena, raznih varijacija zadataka, objektivnog napredovanja i repetitivnog treninga usmjerenog na određeni zadatak. Izvođenje takvih vrsta zadataka može potaknuti reorganizaciju neuronskih mreža i stimulirati oporavak motoričkih sposobnosti nakon neuroloških oštećenja (14). Trenutni dokazi sugeriraju da bi virtualna stvarnost mogla biti korisna kao dodatak konvencionalnoj terapiji kod moždanog udara (15), Parkinsonove bolesti, multiple skleroze i drugih neuroloških bolesti. Također ima potencijal povećanog pristupa personalizirane rehabilitacije unutar vlastitog doma. Međutim, kvaliteta podataka pronađenih ispitivanja za neurorehabilitaciju ograničena je zbog toga što studije imaju male uzorke, stoga se ne može sa sigurnošću tvrditi njena učinkovitost. Usvajanje primjene pristupa virtualne stvarnosti u porastu je zadnjih godina. Razne recenzije sugeriraju da je taj način liječenja jednak (ako ne i bolji) kao i konvencionalni pristup, stoga virtualna stvarnost ima potencijal. Osim toga, sve više pružatelja usluga zainteresirano je upravo za primjenu tog pristupa u rehabilitaciji (4).

## 4. MOŽDANI UDAR

Moždani udar podrazumijeva naglo nastale žarišne ispade neurološke funkcije koji mogu biti posljedica ishemije, subarahnoidalnog ili intracerebralnog krvarenja (16). S obzirom na produljen životni vijek i starenje europske populacije, prema podacima Svjetske zdravstvene organizacije procjenjuje se da se incidencija moždanog udara u razdoblju od 2000. do danas povećala za 30%, bez tendencije smanjenja (17). Moždani udar danas je vodeći uzrok invalidnosti te se nalazi na trećem mjestu uzroka smrti odraslih osoba. Ovisno o mehanizmu nastanka, moždani udar možemo podijeliti na ishemijski i hemoragijski moždani udar, koji se dalje može podijeliti na intracerebralno i subarahnoidalno krvarenje. Prolazna ishemija, odnosno tranzitorna ishemijska ataka (TIA), kratkotrajni je gubitak cerebralne ili monookularne funkcije koji je uzrokovan žarišnim poremećajem cirkulacije i ne uzrokuje akutni infarkt. Simptomi TIA-e obično traju u vremenskom razdoblju manjem od 1 sat, a najčešće do desetak minuta. Moždani udar također možemo podijeliti i prema trajanju. Kod većine moždanih udara ili TIA-e simptomi mogu postići svoj maksimalni intenzitet od nekoliko sekundi do nekoliko minuta nakon nastupa moždanog udara, ali od samog početka razvoja tromba do potpune okluzije arterije može proći nekoliko sati ili dana (16).

Ishemijski moždani udar definira se kao infarkt mozga, leđne moždine ili mrežnice oka i predstavlja 71% svih moždanih udara. Većina ishemijskih moždanih udara tromboemboličkog je porijekla. Najčešće posljedice nastanka moždanog udara su ateroskleroza i srčane bolesti, posebno fibrilacije atrijske. Ostali uzroci ishemijskog moždanog udara odnose se na bolesti malih krvnih žila koje su povezane s krvnim tlakom i dijabetesom (18). Do hemoragijskog moždanog udara dolazi zbog krvarenja u mozgu nastalog puknućem krvne žile. Intracerebralno krvarenje odnosi se na krvarenje u moždani parenhim, a subarahnoidalno krvarenje u subarahnoidni prostor. Hemoragijski moždani udar povezan je s ozbiljnim morbiditetom i visokom smrtnošću, a najčešće nastaje kao posljedica hipertenzije (19).

Moždani udar diljem svijeta pogađa 13,7 milijuna ljudi, s otprilike 5,5 milijuna umrlih godišnje. Procjenjuje se da će svaka četvrta odrasla osoba tijekom svog života doživjeti moždani udar. Osobe koje prežive moždani udar predstavljaju visoko rizičnu populaciju te su u središtu pažnje kada govorimo o strategijama sekundarne prevencije. Od 1990. godine do 2010. epidemiologija varira ovisno o dohotku zemlje. Te razlike mogu nastati zbog razlika u demografskoj dobi stanovništva, očekivanom trajanju života i, naravno, zdravstvenom stanju i standardima pružanja zdravstvene zaštite pojedinih zemalja. Postoje i određeni čimbenici

rizika vezani za moždani udar. To su dob, spol i genetski čimbenici na koje ne možemo utjecati. Pokazalo se da više obolijevaju osobe muškog spola i incidencija se povećava proporcionalno s dobi. Čimbenike na koje osoba može utjecati, poput pušenja, pretilosti, nedovoljne aktivnosti i visoke konzumacije alkohola, trebalo bi svesti na minimum, u čemu glavnu ulogu treba imati primarna prevencija kao alat smanjenja incidencije moždanog udara (18).

#### **4.1 Rehabilitacija motoričke funkcije nakon moždanog udara**

Oštećenje motoričke funkcije zbog moždanog udara utječe na mobilnost pacijenata tako da ga ograničava u aktivnostima svakodnevnog života, što na kraju rezultira smanjenom kvalitetom života. Najčešći deficit nakon moždanog udara je hemipareza gornjeg kontralateralnog uda. Više od 80% akutno doživljava to stanje, dok je kod 40% pacijenata kronično. Uobičajeni simptomi motoričkog oštećenja gornjeg ekstremiteta mogu uključivati slabost mišića, kontrakture, poremećenu motoričku kontrolu i promjenu tonusa mišića. Sve te pojave ograničavaju pacijenta u aktivnostima kao što su doseganje, držanje i uzimanje određenih predmeta, što već samo za sebe bez drugih simptoma uzrokuje problem pacijentima. Hemipareza gornjih ekstremiteta može biti povezana s drugim neurološkim manifestacijama koje utječu na oporavak motoričkih funkcija, stoga zahtijeva pravilno usmjerenu terapijsku intervenciju. Deficit somatskih osjeta poput dodira, temperature, boli i propriocepcije nakon moždanog udara su česti. Funkcionalno gledano, motorički problemi nastali zbog senzornih deficita mogu se definirati kao oslabljena detekcija senzornih informacija, poremećena izvedba motoričkih zadataka koji zahtijevaju somatosenzorne informacije, a to može utjecati na lošiji ishod rehabilitacije gornjih ekstremiteta. Također, 50% pacijenata tijekom prve godine rehabilitacije osjeća bolove u gornjim ekstremitetima, a posebno bolove koji zahvaćaju rame, pa čak može doći i do pojave kompleksnog regionalnog bolnog sindroma tipa I (20).

Smatra se kako najučinkovitiji oporavak nakon moždanog udara pacijenti mogu postići u prvih nekoliko tjedana nakon moždanog udara, no pacijenti mogu postići poboljšanje motoričkih i kognitivnih funkcija i mnogo mjeseci nakon toga (15). Poboljšanja se događaju složenom kombinacijom spontanijih procesa i procesa ovisnih o učenju, koji uključuju restituciju, zamjenu i kompenzaciju. Neurološki oporavak reorganizacijom mozga uključuje razne metode rehabilitacije koje se mogu i moraju koristiti kako u akutnoj tako i u subakutnoj i kroničnoj fazi nakon moždanog udara. Ubrzo nakon moždanog udara uočava se

kontralezijski pomak aktivacije prema nezahvaćenoj hemisferi, što dovodi do aktivacije moždanih struktura (malog mozga, bazalnih ganglija i frontalnog korteksa) povezanih s učenjem. Nakon programa rehabilitacije gornjih ekstremiteta povećava se aktivacija mozga unutar oštećene hemisfere. Ključnu ulogu u tome ima neuroplastičnost, koja uključuje reorganizaciju i procese kompenzacije kao temelj neurorehabilitacije. Oporavak nakon moždanog udara u smislu funkcionalnog oporavka je heterogen. Pacijenti sa simptomima blage do umjerene pareze gornjih ekstremiteta u akutnoj fazi imaju dobru prognozu funkcionalnog oporavka s obzirom na to da njih 70% postiže barem djelomičnu samostalnost u 6 mjeseci nakon moždanog udara, dok 60% pacijenata s teškom parezom to ne uspijeva.

Rehabilitacija nakon moždanog udara trebala bi uključivati interdisciplinarni pristup. Cilj rehabilitacije je pružiti sva moguća sredstva za potencijalni oporavak izgubljene funkcije i povećanje samostalnosti bolesnika s moždanim udarom, ali uzimajući u obzir i preostala oštećenja. Loš oporavak može izravno biti posljedica moždanog udara, ali i neodgovarajućih i neadekvatnih terapijskih intervencija. Ne postoji najbolja terapija nakon moždanog udara. Program rehabilitacije moždanog udara za oštećenje gornjih ekstremiteta trebao bi uključivati motoričku rehabilitaciju, električnu stimulaciju i multisenzornu interakciju.

Kada govorimo o moždanom udaru, postoje razne metode rehabilitacije, a možemo ih podijeliti u nekoliko kategorija:

- neurofacilitacijski pristup/pristup višestrukog vježbanja (Bobath)
- specifične izolirane tehnike rehabilitacije (trening s otporom)
- motoričko učenje (terapija prisilno induciranog pokreta)
- pomoćne terapije (elektrostimulacija)
- intervencije temeljene na hipotezi zrcalnih neurona i motoričkih slika (terapija zrcalom)
- trening uz primjenu moderne tehnologije (virtualna stvarnost) (17).

Ljudski mozak oporavlja se od moždanog udara na tri načina: prilagodbom, regeneracijom i neuroplastičnosti. Prilagodba bi bila oslonac na alternativne i kompenzatorne pokrete. Primjer prilagodbe bio bi upotreba nedominantne ruke za hranjenje samoga sebe kod hemiplegije, koja utječe na funkciju dominantne šake. Koliko je adaptacija korisna, toliko može biti i štetna zbog krivo naučenih obrazaca pokreta ili izbjegavanja korištenja zahvaćenog uda iako ga je moguće koristiti. Ubrzo nakon moždanog udara smanjena je aktivacija u kortikalnom području. Smanjena aktivnost povezana je s promjenama u lokalizaciji određenih zadataka

kao što je recimo kretanje. Kako vrijeme prolazi, tijekom akutnog i subakutnog razdoblja neuronske mreže oštećene zbog moždanog udara moguće je ponovno spojiti zbog neuroplastičnosti. Kako bi se aktivirala neuroplastičnost, cilj i zadatak tijekom rehabilitacije mora biti usmjeren na specifičan pokret. Zadatci moraju biti zanimljivi i dovoljno izazovni kako bi zadržali pažnju bolesnika (20).

## 4.2 Neuroplastičnost

Jedna od najimpresivnijih karakteristika mozga je njegova sposobnost prilagodbe kao odgovora na vanjske i unutarnje podražaje. Neuroplastičnost je pojam koji se odnosi na funkcionalne i strukturalne promjene u mozgu koje se javljaju tijekom razvoja, interakcije s okolinom, starenjem ili kao odgovor na traumu. Također se u odrasloj dobi može javiti i funkcionalna plastičnost kao odgovor na iskustva i učenje modulacijom već postojećih veza (21). Mozak je kompleksna mreža stanica koje se mogu reprogramirati, ali i strukturno obnavljati (22). Glavna poanta neuroplastičnosti je sposobnost stimulacije raznim podražajima za modulaciju moždane aktivnosti (23). Zbog svojstva neuroplastičnosti mozak nadoknađuje štetu reorganizacijom i stvaranjem novih veza među neoštećenim neuronima (24). Sinaptička plastičnost postiže se poboljšanjem komunikacije u sinaptičkim vezama između postojećih neurona i temeljna je sastavnica za zadržavanje neuronskih mreža (25). Ona se odnosi na sposobnost neurona da modificiraju snagu svojih veza i važna je u neurofiziološkom procesu koji je uključen u razvoj i reorganizaciju moždanih mreža. (26). Neuroplastičnost služi kao mehanizam za brojne intervencije unutar neurološke rehabilitacije. Intervencije koje pružaju ponavljajuću, izazovnu i progresivno ciljanu praksu orijentiranu na određeni funkcionalni zadatak oslanjaju se na neuroplastične promjene kako bi imale dugotrajan učinak (27).

Nakon oštećenja poput moždanog udara pred osobom stoje veliki izazovi kao što su osjetiti, kretati se, komunicirati i uključiti se u aktivnosti svakodnevnog života. Neposredni i dugoročni učinci moždanog udara uključuju oštećenje pokreta, osjeta, psiholoških i emocionalnih funkcija te smanjenje neovisnosti i kvalitete života. Neuroplastične promjene događaju se nakon ozljede kao što je moždani udar. One se mogu dogoditi u tjednima, mjesecima i godinama nakon moždanog udara. Te promjene mogu biti prilagodljive i korisne pacijentu, ali mogu biti i neprilagođene. Naprimjer, osoba može naučiti ne koristiti oštećen ekstremitet ili razviti distonične položaje. Međutim, tu priliku promjene neuroplastičnosti nakon moždanog udara potrebno je iskoristiti u rehabilitaciji i trebalo bi je shvatiti kao

moгуćnost za trajni oporavak. Neuroplastiĉnost pruža moгуćnost ciljne rehabilitacije kako bi se iskoristili i poboljšali njeni mehanizmi. U kontekstu neuroplastiĉnosti spominju se različite vrste uĉenja, a to ukljuĉuje uĉenje temeljeno na zadacima i uĉenje utemeljeno na aktivnostima. Ti pristupi smatraju se potencijalnim za razvoj neuroplastiĉnosti. Takvi pristupi su relevantni i kada govorimo o njima u kontekstu oporavka i rehabilitacije nakon moŹdanog udara. Kao primjer moŹemo uzeti promjene u funkciji i strukturi središnjeg Źivĉanog sustava koje se mogu modificirati zajedno s naĉelima motorikog uĉenja. Kada je rijeĉ o rehabilitaciji nakon moŹdanog udara, njeno uĉenje obuhvaća uĉenje senzomotorikih vještina, kao što je uĉenje drŹanja šalice pravilnim obrascima pokreta kod osoba nakon pareze (28).

Ukupno gledano, uĉenje i vjeŹbanje vještina presudno je za razvoj neuroplastiĉnosti i funkcionalni oporavak nakon moŹdanog udara. Ono ovisi o uporabi, što ukljuĉuje intenzitet, uĉestalost i trajanje odreĉene aktivnosti u odreĉivanju opsega neuronske reorganizacije. S obzirom na ulogu vjeŹbanja odreĉenih aktivnosti za razvoj neuroplastiĉnosti, tehnike poput virtualne stvarnosti, koje omogućuju korisniku kontrolu nad okruŹenjem i specifiĉnim zadacima, mogu poticati motorikog uĉenje. Takve tehnike omogućuju da trening simulira različite aktivnosti iz stvarnog Źivota i time potiče motorikog uĉenje integrirano u kliniĉko okruŹenje i prilagoĉeno specifiĉnim potrebama svake osobe. Znaĉajne kratkoroĉne promjene u vještinama i funkcionalnoj organizaciji mogu se uoĉiti već nakon jednog treninga u kontekstu „brzog“ uĉenja, meĉutim, to ne mora nuŹno znaĉiti i trajno poboljšanje motorikih vještina. VjeŹbanje tijekom više treninga karakterizira fazu „sporog“ uĉenja, koje se nastavlja tijekom duŹeg vremenskog razdoblja. Trening dovodi do jaĉanja motorikog memorije, što rezultira poboljšanjem motorikog funkcije. Brze promjene u koliĉini i poloŹaju neurotransmitera unutar i izmeĉu neurona podrŹavaju „brzo“ uĉenje, dok su s druge strane promjene strukturne modifikacije, koje stvaraju nove kontakte, podloga za „sporo“ uĉenje. Mehanizam neuroplastiĉnosti u aspektu motorikog uĉenja vaŹan je u dizajniranju i primjeni alata za razvoj neuroplastiĉnosti. Svojstva virtualne stvarnosti mogu se posebno dobro iskoristiti u tom podruĉju jer pruŹaju korisniku iskustva koja razvijaju procese „sporog“ i „brzog“ uĉenja (29).

### **4.3 Virtualna stvarnost u rehabilitaciji nakon moŹdanog udara**

Trening ponavljajućih zadataka pokazao se vrlo uĉinkovit u kontekstu rehabilitacije nakon moŹdanog udara u smislu poboljšanja motorike hoda i poboljšanja funkcije gornjih

ekstremiteta. Virtualna stvarnost relativno je nov pristup koji omogućuje simulirano vježbanje funkcionalnih zadataka. Kako tehnologija napreduje, istraživanja u vezi primjene virtualne stvarnosti u rehabilitaciji postaju sve učestalija, no njena primjena u kliničkim uvjetima tek je u povojima. S obzirom na veliku rasprostranjenost igračih konzola, istraživači i kliničari sve se više okreću jeftinim komercijalnim igračim sustavima kao alternativni isporuke virtualne stvarnosti. Takvi se sustavi prilagođavaju primjeni u terapijske svrhe tako da se interaktivne videoigre posebno dizajniraju u svrhu rehabilitacije. U rehabilitaciji u koju je implementirana virtualna stvarnost, virtualna okruženja i objekti pružaju korisniku vizualne povratne informacije koje se mogu prikazati korištenjem zaslona postavljenog na glavu, sustava za projekciju ili ravnog zaslona. Ovisno o intervenciji rehabilitacije, razina tjelesne aktivnosti korisnika može se kretati od relativno neaktivne, kao što je sjedenje za računalom pomoću navigacijske palice, do visoke aktivnosti koja zahtijeva pokrete cijelog tijela. Jedna od primarnih prednosti programa rehabilitacije putem virtualne stvarnosti je to što ona omogućuje testiranje zadataka koji nisu sigurni za vježbanje u stvarnom svijetu, npr. prelazak ulice. Također, neki su programi koncipirani za korištenje bez nadzora, što znači da se povećana doza terapije može osigurati bez povećanja broja terapeuta (15).

#### **4.3.1 Rehabilitacija motoričke funkcije gornjih ekstremiteta primjenom virtualne stvarnosti**

Virtualna stvarnost može zadovoljiti potrebe za intenzivnom, ciljano usmjerenom ponavljajućom terapijom. Uređaji poput mobilnog telefona ili tableta mogu pružiti personaliziranu terapiju u kući uz interaktivnu komunikaciju između pacijenta i terapeuta. Neimerzivna virtualna stvarnost ne zahtijeva poseban i skup hardver, stoga je dobra tehnologija za pružanje jeftinog i zanimljivog programa rehabilitacije. Terapija zasnovana na igrama može biti dobra opcija rehabilitacije. Mnogi pacijenti se žale na konvencionalni pristup rehabilitacije, stoga je baš takav pristup zanimljiv i motivirajući alat za promicanje sudjelovanja pacijenta u rehabilitacijskom procesu.

Godine 2018. provedeno je istraživanje koje je uključivalo primjenu mobilne aplikacije za rehabilitaciju nakon moždanog udara. Osobe koje su sudjelovale u istraživanju odabrane su prema sljedećim kriterijima:

- osobe kojima je dijagnosticiran ishemijski moždani udar
- osobe koje imaju sposobnost slijediti naredbe u jednom koraku
- medicinska stabilnost za sudjelovanje u aktivnoj rehabilitaciji

- oštećenje gornjih ekstremiteta

24 osobe koje su sudjelovale u istraživanju podijeljene su na eksperimentalnu grupu (12), koja je provodila rehabilitaciju putem mobilne aplikacije, i kontrolnu grupu (12), koja je primala konvencionalnu terapiju. Rehabilitacija putem mobilne aplikacije uključivala je tablet za prikaz i pametni telefon za dobivanje informacija o kretanju pomoću ugrađenih senzora. Rehabilitacija se sastojala od četiri mobilne igre unutar aplikacije. Svaka igra trajala je u prosjeku 5 – 10 minuta. Igra *Honey Pot Guard* uključivala je pokrete fleksije i ekstenzije lakta, a zadatak pacijenta bio je gađanje medvjeda jabukama pokretima lakatnog zgloba. Druga igra *Protect the Bunny* sastojala se od pokreta abdukcije i adukcije ramena. Pacijentov zadatak bio je zaštititi zeca hvatajući kamenje mrežom pomicanjem ramenog zgloba. Treća igra *Put out Fire* uključivala je pokrete fleksije i ekstenzije ramena. Cilj je bio da pacijent kroz prozor gasi vatru crijevom za vodu. Četvrta igra *Flower Splash* ciljala je na abdukciju i adukciju ramena, fleksiju i ekstenziju lakta te pronaciju i supinaciju ručnog zgloba. Pacijent je pokretima zgloba zalijevao pokretno sjeme cvijeća. Težina svih igara individualno se prilagođavala ovisno o pacijentovim sposobnostima. Primarna mjerenja ishoda rehabilitacije uključivala su Fugl-Mayerovu procjenu gornjih ekstremiteta, koja mjeri motoričku funkciju hemiparetične ruke. Sekundarno mjerenje odnosilo se na procjenu u Brunnstromovoj fazi i manualnom mišićnom testu gornjih ekstremiteta (30). Brunnstorm faza oporavka kratka je i lako primjenjiva mjera za procjenu motoričke funkcije (31). Gornji ekstremitet, šaka i donji ekstremitet ocjenjuju se odvojeno. Najniža faza označava se kao faza 1 (ne postoji dobrovoljan pokret) i najviša faza 6 (izolirani zglobni pokret prisutan) (32).

Pacijenti u eksperimentalnoj skupini završili su dvotjedno liječene bez štetnih učinaka i u pravilu su bili zadovoljni rehabilitacijom iako nisu svi bili na istoj razini informatičkog znanja. Pacijenti s moždanim udarom obično imaju invaliditet povezan s motoričkim oštećenjima. Takva invalidnost može ometati pacijenta u pristupu odgovarajućoj rehabilitaciji, npr. u slučaju dugotrajnog putovanja do klinike ili socioekonomskih poteškoća. Sveprisutni program zdravstvene zaštite može biti dobra opcija kod uklanjanja takvih prepreka. Ovaj program je izvediv i učinkovit u promicanju oporavka gornjih ekstremiteta. Prema podacima dobivenim mjerenjem motoričke sposobnosti, ovaj program je jednak ili blago učinkovitiji od konvencionalne terapije. Zbog učinaka igara, kao što su povratne informacije o pokretima pacijenta, užitek samog igranja, visoka motivacija i angažman, primjena ne-imerzivne virtualne stvarnosti, u ovom slučaju mobilnih igara, može povećati interes za rehabilitaciju promičući motivaciju. Slušne i vizualne povratne informacije mogu olakšati pacijentima želju



za interakcijom. Svi ti učinci važni su kako bi se povećala učinkovitost rehabilitacije povećanim pacijentovim angažmanom u terapiji. Ipak, ova studija ima nekoliko nedostataka kao što su mali uzorak, kratko vrijeme rehabilitacije i nemogućnost praćenja kinematičkih podataka kao što su linearni i kutni pomak, ubrzanje i podatci o karakteristikama kretanja pacijenata koji bi bili korisni u optimizaciji rehabilitacije (30).

Virtualna stvarnost djeluje kao prošireno okruženje u kojem se povratne informacije mogu distribuirati u obliku poboljšanih informacija o rezultatima same izvedbe. Što se tiče kliničke primjene za rehabilitaciju, razvoj funkcionalnih vještina tijekom procesa rehabilitacije može se promovirati prilagođavanjem složenosti određenih motoričkih zadataka na individualno prilagođenu funkcionalnu razinu za svakog pacijenta. Nekoliko studija prikazuje kako liječenje obogaćenim povratnim informacijama u virtualnom okruženju, eng. *Reinforced feedback in virtual reality* (RFVE), može biti učinkovitije od konvencionalne terapije u smislu poboljšanja motoričke funkcije gornjeg uda nakon moždanog udara. RFVE sadrži elemente korisne za maksimiziranje učenja pokreta kao što je pružanje ponavljanja i raznovrsnost treninga i zadataka te povećanje povratne informacije o postignutim rezultatima.

Jedno od istraživanja vezano za RFVE objavljeno je 2018. godine u časopisu „Archives of Physical Medicine and Rehabilitation“, a cilj je bio istražiti može li RFVE terapija u kombinaciji s konvencionalnom terapijom poboljšati motoričku funkciju više nego ista količina primijenjene konvencionalne terapije same, i nakon ishemijskog i nakon hemoragijskog moždanog udara, te promotriti može li vrsta moždanog udara utjecati na rezultate rehabilitacije. U ispitivanje je bilo uključeno 136 osoba, od kojih je 78 doživjelo ishemijski, a 58 hemoragijski moždani udar najmanje 12 mjeseci prije istraživanja. Ispitanici su bili podijeljeni u dvije skupine od 68 ljudi. Prva skupina primala je RFVE terapiju u trajanju od sat vremena i konvencionalnu terapiju od sat vremena, dok je druga skupina provodila samo konvencionalnu terapiju u trajanju od 2 sata. Rehabilitacija se provodila 5 dana tjedno u trajanju od 4 tjedna, što je ukupno uključivalo 40 h rehabilitacije. Pacijenti u RFVE grupi primali su terapiju putem sistema rehabilitacije virtualne stvarnosti koji se sastojao od računala spojenog na trodimenzionalni sustav za praćenje kretanja i zaslona visoke rezolucije, koji je prikazivao virtualne scenarije na velikom zidnom ekranu. Tijekom tretmana pacijent je sjedio ispred zaslona držeći pravi objekt, npr. loptu ili disk, s postavljenim sensorima, a u slučaju ozbiljnog nedostatka hvata senzor je bio pričvršćen na rukavicu koju je pacijent nosio. Stvarni objekt podudarao se s objektom virtualnog rukovanja.

Rehabilitaciju su provodili fizioterapeuti posebno obučeni za tu vrstu rehabilitacije. Fizioterapeut uključen u istraživanje imao je mogućnost izbora najprikladnije vježbe

za svakog pacijenta. Pomicanje virtualnog objekta bilo je sinkronizirano u vremenu i prostoru između stvarnog i virtualnog bez ikakvog kašnjenja te je za svaki motorički zadatak utvrđen početni i završni položaj te složenost samih kretnji. Zvučni signal i digitalni glas pružali su informacije o izvođenju pokreta i njegovoj ispravnosti, a nakon svakog izvedenog zadatka primale su se povratne informacije u obliku bodova, koji su bili proporcionalni količini pogrešaka izvedenih u pokretu. Virtualni zadatci sastojali su se od jednostavnih pokreta, npr. pomicanja lopte izvođenjem fleksije lakta, i složenih pokreta koji su uključivali višestruke mišićne sinergije, npr. korištenje četice za zube, čekića ili izlijevanje vode u čašu. Također su u virtualno okruženje dodani dodatni objekti kako bi se povećala složenost zadatka. Vizualne povratne informacije pružane su putem „virtualnog učitelja“, odnosno objekta s istim oblikom, ali različitom bojom prikaza, koji je automatski izvršio ispravnu putanju pokreta. Pokrete trupa naprijed, natrag ili u stranu savjetovao je ili ograničavao fizioterapeut ovisno o specifičnosti zadatka. Na kraju zadatka fizioterapeut je pacijentima pokazivao rezultate vlastitih pokreta vizualizirajući zabilježenu putanju u usporedbi s traženom.

Pacijenti raspoređeni u grupu koja je uključivala rehabilitaciju putem konvencionalne terapije liječeni su 1 na 1 s terapeutom u bolničkoj službi. Primali su specifičnu rehabilitaciju gornjih ekstremiteta koja se sastojala od vježbi koje su uključivale pokrete u svim smjerovima (fleksija, ekstenzija, abdukcija, unutarnja i vanjska rotacija ramena, pokreti u laktu, pronacija i supinacija te zadatci hvatanja i opuštanja ruke). Sve su se vježbe također izvodile u sjedećem položaju pokušavajući biti maksimalno dosljedne RFVE terapiji. Fizioterapeut je progresivno povećavao složenost zadataka u programu vježbanja. Glavna uloga fizioterapeuta tijekom rehabilitacije u obje skupine uključivala je savjetovanje ispravnog kretanja u izvođenju zadataka prema principima motoričkog učenja. Sveukupno vrijeme liječenja, odnosno jedne terapije, u obje skupine provodilo se u trajanju od 2 sata, ali trajanje, količina vježbi i broj ponavljanja ovisio je o tjelesnoj sposobnosti pacijenta.

Uz Fugl-Mayerovu procjenu gornjih ekstremiteta (FMA-UE), koja je bila primarni ishod, u procjeni poboljšanja motoričke funkcije koristili su se i kinematički parametri, koji su mjereni tijekom izvođenja zadanih pokreta. Mjerenje se sastojalo od 8 motoričkih zadataka koji su se odnosili na glavne smjerove kretanja (fleksija, ekstenzija, adukcija, rotacija, pronacija, supinacija) zahvaćajući više zglobova gornjeg ekstremiteta. Na svim sudionicima mjerena je kinematička procjena prije i nakon tretmana, ali se iste vježbe nikad nisu izvodile u

rehabilitaciji. Funkcionalni i kinematički ishodi poboljšani su u obje skupine. Prema FMA-UE, poboljšanje u kontrolnoj grupi, koja je provodila konvencionalnu terapiju, povećalo se za 4,77%, dok je kod RFVE grupe to povećanje iznosilo 14,73%.

Rezultati ove studije pokazuju pozitivan učinak RFVE terapije. Oporavak se također pokazao i kod konvencionalne terapije, ali u manjoj mjeri. Prema podacima iz analize studije, dodatni pozitivan terapeutski učinak ima kombinacija RFVE terapije u integraciji s konvencionalnom terapijom i čini se da može povratiti bolju motoričku funkciju od oporavka koji pruža primjena konvencionalne terapije same. Intenzivna i ponavljajuća uporaba zahvaćenog uda pokazuje pozitivan učinak na neuroplastičnost i poboljšanje motoričke funkcije. Motoričko učenje podrazumijeva odabir motoričkih radnji za izvođenje traženih zadataka, a teoretski bi za postizanje najboljeg učinka pokret trebalo ponavljati. RFVE terapija može se primijeniti neovisno o dobi, spolu i etiologiji moždanog udara. Blagodati korištenja povratnih informacija primjenom virtualne stvarnosti zabilježene su u različitim studijama i pokazuju da ona može biti korisna kako u kroničnoj, tako i u subakutnoj fazi moždanog udara. Proces oporavka nakon moždanog udara učinkovito se poboljšava uporabom terapije virtualne stvarnosti, potencijalno zbog nasumičnih zadataka isporučenih trajnim intenzitetom u virtualnom okruženju. Također, dodatni se benefit pokazuje u učestalosti povratnih informacija koje promiču motoričko učenje. Vizualne i akustične povratne informacije koje se pružaju kvalitetnim sustavima interakcije s virtualnim okruženjem imaju ulogu u boljem povratu motoričke funkcije. Kod pacijenata s moždanim udarom virtualni trening pruža potporu u oporavku prethodno oštećenih motoričkih funkcija i olakšava stjecanje novih koje se mogu pretočiti u svakodnevne aktivnosti (33).

## 5. PARKINSONOVA BOLEST

Parkinsonova bolest progresivna je neurodegenerativna bolest karakterizirana degeneracijom dopaminergičkih neurona substance nigre. Nedostatak dopamina u bazalnim ganglijima dovodi do motoričkih simptoma klasičnih za Parkinsonovu bolest, kao što su bradikinezija, tremor, ukočenost, posturalna nestabilnost (34). Naziv je dobila prema engleskom liječniku Jamesu Parkinsonu, koji je 1817. godine prvi opisao bolest. Do danas se znanje o Parkinsonovoj bolesti uvelike proširilo. Otkrićem manjka dopamina i primjenom dopamina levodope, koji učinkovito kontrolira simptome, Parkinsonova bolest postaje prva neurodegenerativna bolest liječena supstitucijskom terapijom (16). Degenerativne promjene u živčanom sustavu, koje dovode do disfunkcije bazalnih ganglija, pacijentima uzrokuju simptome poput poremećaja kontrole i držanja tijela, što rezultira poremećajem pokretljivosti i uvelike smanjuje kvalitetu života pacijenata (35). Prevalencija i incidencija Parkinsonove bolesti raste s godinama starosti. Rana Parkinsonova bolest definira se kao pojava simptoma bolesti u dobi prije 40-e godine i čini 3 – 5% svih slučajeva bolesti. Parkinsonova bolest dvostruko je češća kod muškaraca nego kod žena zbog toga što se kod žena primjećuje zaštitni učinak ženskih spolnih hormona.

Klinički se Parkinsonova bolest može definirati prisutnošću bradikinezije u kombinaciji s još jednim simptomom, a to može biti mišićna ukočenost, posturalna nestabilnost ili tremor. Motorički simptomi započinju jednostrano i asimetrija se zadržava tijekom bolesti, ali bolest može zahvatiti i obje strane tijela. Uz motoričke simptome mogu se pojaviti i oni koji ne uključuju motoriku, kao što su poremećaj spavanja, urogenitalna disfunkcija, poremećaj raspoloženja i kognitivna oštećenja (34). Tremor je, s rigorom i bradikinezijom, karakterističan za Parkinsonovu bolest. Pojava tremora u mirovanju može se slikovito opisati kao kotrljanje kuglica ili brojanja novca (*money counting*) s kretnjama palca i kažiprsta, dakle najizraženiji je na rukama. Rigidnost je još jedan od simptoma koji se pojavljuje kod Parkinsonove bolesti, a definira se kao povišen tonus mišića koji rezultira povećanim otporom pri izvođenju pasivnih pokreta i odgovoran je za fleksijsko držanje pacijenta. Usporeni pokreti karakteristika su bradikinezije. Za Parkinsonovu bolest karakteristična je nepomična mišićna muskulatura lica, poremećaj hoda i držanja, teškoće u započinjanju hoda i hod sitnim koracima. Smrzavanje hoda (*freezing gait*) odnosi se na prolaznu nemogućnost kretanja, a većinom nastupa pri započinjanju kretnje, pri okretanju ili približavanju cilju. Tremor, rigidnost i bradikinezija znakovi su rane bolesti, dok se posturalna nestabilnost pojavljuje u kasnijoj fazi bolesti.

Parkinsonova bolest klinički se može manifestirati s tri osnovna tipa:

- tremor-dominantni tip pretežno karakterizira tremor u mirovanju
- akinetičko-rigidni tip manifestiran je osiromašenjem kretnji i rigidnim povišenim tonusom
- mješovit tip je tip u kojem su bradikinezija, tremor i rigidnost podjednako zastupljeni (16)

Parkinsonova bolest može se podijeliti u šest stadija neuropatološke bolesti. U predsuptomatskim stadijima bolesti (1 – 2 faza) inkluzijska tijela ograničena su na produženu moždinu, tangendum mosta i prednju olfaktornu jezgru. Napredovanjem bolesti zahvaća se supstanca nigra i jezgre srednjeg i prednjeg mozga (3 – 4 faza). U ovoj fazi pacijenti razvijaju kliničke simptome bolesti. U završnim fazama, odnosno 5 i 6 fazi, proces ulazi u neokorteks sa širokim rasponom kliničkih manifestacija. Degeneracija dopaminergičnih nigrostrijatalnih neurona s Lewyevim tjelešcima smatra se primarnim neuropatološkim korelatorom motoričkih oštećenja kod Parkinsonove bolesti (36).

### 5.1 Bazalni gangliji

Poremećaji kretanja većinom proizlaze iz disfunkcije bazalnih ganglija i malog mozga ili njihove kombinacije. Bazalni gangliji skupina su dubokih subkortikalnih struktura i tvore složene krugove koji oblikuju motoričku kontrolu, motoričko učenje te limbičke i asocijativne funkcije. Patološka i klinička istraživanja 20. stoljeća razbistrila su ulogu bazalnih ganglija u kontroli držanja tijela, tonusa i pokreta. Istraživanja su dovela do prepoznavanja ekstrapiramidnog motoričkog sustava čije lezije, suprotne onima piramidalnog sustava, ne paraliziraju pacijenta, već rezultiraju nehotičnim abnormalnim pokretima. Bazalni gangliji održavaju mnoge funkcije i njihova neispravnost rezultira motoričkim manifestacijama. Osim motoričke funkcije, izvršavaju emocionalnu ulogu, ciljano usmjereno ponašanje i praćenje sukoba. Uloga bazalnih ganglija posebno je prepoznatljiva u poremećajima akinetike i rigidnosti. Model bazalnih ganglija tvrdi da normalna motorička i kognitivna funkcija ovisi o ravnoteži između inhibicije i ekscitacije izravnog i neizravnog puta. Prekomjerna aktivnost neizravnog puta zbog dopaminergičnog gubitka neurona rezultira pretjeranom inhibicijom motornih talamokortikalnih petlji, što se očituje usporavanjem i smanjenjem amplitude voljnih i automatiziranih pokreta (bradikinezija), a u najtežem obliku događa se akinezija

(odsustvo kretanja). Dva druga ključna simptoma Parkinsonove bolesti – tremor i rigidnost – ne mogu se lako objasniti. Izmjene kortiko-ganglio-talamokortikalnih petlji zbog iscrpljivanja dopamina i zahvaćenosti malog mozga uključene su u stvaranje tremora, slično tome i rigidnosti. Bazalni gangliji usko su povezani s prilagodljivom motoričkom kontrolom i učenjem. Dopaminergička modulacija leži u osnovi mnogo motoričkih i nemotoričkih poremećaja koji proizlaze iz patologije bazalnih ganglija, a odnose se na Parkinsonovu bolest, diskineziju, tikove, coreu (37).

## 5.2 Motorička procjena Parkinsonove bolesti

Simptome Parkinsonove bolesti poput bradikinezije, ukočenosti mišića i tremora teško je procijeniti. Najstarija ljestvica za procjenu Parkinsonove bolesti objavljena je 1967. godine kao rezultat promatranja 856 pacijenata. Ljestvica razlikuje pet definiranih stupnjeva ozljede i invaliditeta kao pet stadija progresije bolesti, od jednostranog oštećenja kao prvog stadija do petog stadija kada je pacijent smješten u invalidska kolica ili krevet. Godine 1987. Fahn i Elton bili su na čelu radne skupine koja je razvila objedinjenu skalu za ocjenu Parkinsonove bolesti (UPDRS), koja se sastoji od šest cjelovitih dijelova:

- I – stanje intelektualnih poremećaja i poremećaja raspoloženja
- II – aktivnosti svakodnevnog života
- III – motorički pregled
- IV – komplikacije liječenja
- V – stadij bolesti
- VI – samoprocjena neovisnosti

Procjenjuju se prva tri područja i dio četvrtog na skali od pet točaka (0 – 4 boda). U trećem dijelu motorički UPDRS procjenjuje govor, tremor, ukočenost mišića, brze pokrete prstiju, brze pokrete ruku, izmjenične pokrete, pokrete nogu, ustajanje sa stolice, držanje, stabilnost, početak hoda i bradikineziju. Boduje se ovako: 0 – označava da nema poremećaja, 1 – poremećaji koji se mogu uočiti, 2 – umjereni poremećaji, 3 – znatni poremećaji, 4 – nema funkcije ili ozbiljni poremećaji. Godine 2004. Marinus i sur. opisali su kratku skalu evaluacije Parkinsonove bolesti. Kratka Parkinsonova skala za procjenu (SPES) dizajnirana je za

procjenu motoričke funkcije bolesnika. Ljestvicom ocjena 0 – 3 procjenjuje se 21 parametar koji uključuje motoričku procjenu, aktivnosti svakodnevnog života i motoričke komplikacije.

Određen postotak pacijenata koji boluju od Parkinsonove bolesti doživi smetnje vezane za održavanje ravnoteže i stabilnosti trupa, što može biti vrlo opasno jer često rezultira padom. Statistika pokazuje da 50% pacijenata tijekom bolesti doživi pad. Za procjenu ravnoteže i držanja tijela koristi se *Timed Up and Go* test i on obično mjeri vrijeme koje je pacijentu potrebno za ustajanje sa stolice, 10 koraka i povratak u sjedeći položaj. *Time Up and Go* test otkriva promjene u pokretljivosti bolesnika s Parkinsonovom bolesti. Za procjenu ravnoteže najčešće se koristi Bergova skala ravnoteže i Tinetti test. Godine 2009. Horak i sur. objavili su test za vrednovanje balansa (bestest), koji se sastoji od 36 dijelova grupiranih u 6 sustava:

1. biomehanička ograničenja
2. granica stabilnosti
3. anticipativne posturalne prilagodbe
4. posturalni odgovor
5. senzorna orijentacija
6. stabilnost u hodu

U 21. stoljeću posturometrijska i stabilometrijska evaluacija brzo se razvila i također se koristi za evaluaciju u treningu ravnoteže. U analizi 2011. godine, koju su proveli Błaszczyk i Orawiec, mjerio su omjer njihanja kod zdravih osoba i bolesnika s Parkinsonovom bolesti. Omjer njihanja procijenjen je na temelju središta signala pritiska stopala otvorenih i zatvorenih očiju. Anteroposteriorni i mediolateralni omjeri njihanja značajno su povećani kod bolesnika s Parkinsonovom bolesti za razliku od zdravih osoba.

Pacijenti s Parkinsonovom bolesti pokazuju nedostatak u motoričkom učenju kao i dvosmjerne smetnje, što znači da izvedba jednog zadatka istodobno ometa izvedbu drugog zadatka. U pilot studiji 2013. godine ispitalo se pacijente s Parkinsonovom bolesti i neurološki zdrave osobe tijekom istodobnog izvođenja posturalnih i govornih zadataka. Zadatci su se izvodili istovremeno i snimali tijekom 3 vremenska razdoblja (stjecanje, početak i kraj). Nedostatak dosljednih promjena u performansama motoričkih radnji u bilo kojim zadacima sugerira smanjenu učinkovitost motoričkog učenja i zalaže se za povećane doze vježbanja tijekom treninga ravnoteže. Prema Rochesteru i sur., ispitanici s Parkinsonovom bolesti hodaju znatno manjom brzinom i smanjenom duljinom koraka od zdravih osoba.

Testovi hoda s vremenskim ograničenjem valjani su za mjerenje predviđanja, no trebali bi uključivati i procjenu straha od pada. Što se tiče procjene hoda, Tomlinson i sur. u svom su pregledu fizioterapijskih tehnika koje se koriste za Parkinsonovu bolest izdvojili najpopularnija mjerenja hoda koja se koriste u praksi, a to su: 1) ishodi hoda: test hoda od dvije ili šest minuta, brzina hodanja na 10 ili 20 metara, brzina u metrima u sekundi, kadenca hoda u koracima, dužina koraka u metrima, duljina koraka, upitnik o zamrzavanju hoda; 2) ishod funkcionalne mobilnosti i ravnoteže: test funkcionalnog dosega, Bergova skala ravnoteže; 3) podatci o padovima: broj pacijenata koji padaju, *Falls Scale Efficacy* (38).

### **5.3 Rehabilitacija oboljelih od Parkinsonove bolesti primjenom virtualne stvarnosti**

S obzirom na to da simptomi Parkinsonove bolesti uvelike uzrokuju smanjenje kvalitete života pacijenata, literatura sugerira fizikalnu terapiju kao jednu od mogućih rješenja u svrhu poboljšanja kvalitete života i smanjenja progresije bolesti. Jedna od perspektivnih metoda rehabilitacije oboljelih od Parkinsonove bolesti je sigurno virtualna stvarnost, koja može pružiti slušne, vizualne i somatosenzorne podražaje koji pacijentima pomažu u poboljšanju hoda. Rehabilitacija putem virtualne stvarnosti omogućuje pacijentima interakciju s virtualnim okruženjem dok terapeuti u isto vrijeme mogu pratiti i procijeniti njihov napredak. Brzi razvoj umjetne inteligencije dovodi nas do novih područja istraživanja u rehabilitaciji. S obzirom na to da virtualna stvarnost može pružiti senzorne stimulacije, povratne informacije u stvarnom vremenu i imerzivno okruženje tijekom određenih motoričkih zadataka, to se odražava na neuroplastičnost i motoričko učenje. Uzevši to u obzir, pristup rehabilitaciji putem virtualne stvarnosti možemo smatrati nadopunom tradicionalnim metodama.

Na rehabilitacijskom odjelu u bolnici Heilongjiang provedeno je istraživanje gdje je 28 pacijenata podijeljeno u dvije grupe. Eksperimentalna grupa radila je trening putem virtualne stvarnosti, dok su s kontrolnom skupinom provodili klasičnu fizioterapiju. Trening je trajao 45 minuta, 5 dana u tjednu u razdoblju od 12 tjedana. Aktivnosti koje je radila kontrolna grupa bile su zagrijavanje (uglavnom istezanje zglobova i mišića), zatim drugi dio treninga koji je uključivao prijenos težišta gravitacije u različitim položajima i djelovanje sile pod različitim kutovima kako bi pacijent mogao održavati ravnotežu samostalno. Cilj tih vježbi je jačanje mišića udova i koordinacija gornjih i donjih ekstremiteta. Treći dio treninga bio je fizička aktivnost koja je uglavnom uključivala treninge hodanja. Četvrti dio treninga odnosio se na koordinaciju. Korišteni su vizualni i slušni podražaji u svrhu kontrole pacijentove posture. Zadnji dio treninga bio je istezanje i opuštanje mišića.



Eksperimentalna grupa radila je trening pomoću virtualne stvarnosti. Prvi dio bio je rukom dosegnuti sve kutove u svrhu povlačenja tijela. Drugi zadatak uključivao je dodirnuti loptu gornjim ili donjim ekstremitetima ovisno o njenom položaju. Treći zadatak bio je veslanje korištenjem gornjeg dijela tijela održavajući balans kako ne bi pali u vodu. Četvrti zadatak odvijao se tako da se pacijent nalazio u labirintu i bilo je potrebno naći izlaz kretanjem u određenom smjeru. Zadnji dio treninga je, kao i kod kontrolne grupe, uključivao istežanje i opuštanje mišića. Kako bi usporedili podatke, koristili su Bergovu skalu za procjenu ravnoteže, *Time up and go* test, test procjene funkcionalnosti hoda i objedinjenu skalu za ocjenu Parkinsonove bolesti. Bergova skala koristi se za procjenu ravnoteže pacijenta. Uključuje 14 aktivnosti koje se odnose na ravnotežu, kao što je sjedenje bez potpore i ustajanje bez potpore. *Time up and go* test provodi se tako da pacijent sjedi u stolici s naslonom za ruke, samostalno se ustane, hoda naprijed tri metra, vrati se do stolice i sjedne. Test procjene funkcionalnosti hoda sastoji se od 10 zadataka u kojima pacijent hoda po različitim uvjetima, kao što su hod sa zatvorenim očima ili okretanja. Svaki se zadatak ocjenjuje od 0 do 3 gdje ocjena 0 ukazuje na nemogućnost izvršenja zadataka, dok je ocjena 3 normalan hod. Ovi testovi provedeni su prije i nakon rehabilitacije i kod svih testova vidljivo je kako su pacijenti iz kontrolne grupe manje napredovali od pacijenata koji su koristili VR. Prednost VR-a u rehabilitaciji je taj što može pružiti dvije vrste povratnih informacija, uključujući povratne informacije za svaku vježbu kao i povratne informacije koje utječu na kognitivni osjećaj pacijenta jer je moguće pripremiti različita okruženja i pobuditi interes pacijenta (35).

Uzimajući u obzir da je Parkinsonova bolest neurodegenerativni poremećaj, najbolje ga se može kontrolirati primjenom kombinacije lijekova i redovite fizioterapije. U tom se kontekstu virtualna stvarnost može koristiti kao dodatan alat s dodanom vrijednošću u odnosu na tradicionalni pristup rehabilitaciji. Ona potencijalno optimizira motoričko učenje u sigurnom okruženju, a repliciranjem scenarija iz stvarnog života mogu se poboljšati funkcionalne aktivnosti svakodnevnog života (39). Multidisciplinarni pristup sve je više prepoznat u liječenju Parkinsonove bolesti (40). Objavljen je pregled koji je obuhvaćao 39 ispitivanja s ukupno 1827 sudionika s Parkinsonovom bolesti kako bi se utvrdila učinkovitost fizioterapije. Pokazane su značajne kratkoročne koristi za hod, izdržljivost, ravnotežu i globalnu motoričku funkciju (41). S obzirom na progresiju bolesti, ključnim za postizanje optimalne funkcionalnosti i održavanje neovisnosti u aktivnostima svakodnevnog života smatra se upravo vježbanje. Nije iznenađujuće kako virtualna stvarnost privlači sve veću pozornost s

obzirom na to da pruža trening u izazovnom i motivirajućem okruženju. Ona pruža osjećaj kontrole, izazova i uspjeha kao ključnih komponenti za imerziju pacijenata u sustav i uživanja u njemu.

Konvencionalna fizioterapija ima za cilj poboljšati funkcionalne sposobnosti i smanjiti sekundarne komplikacije. Ima pozitivan utjecaj na hod, izdržljivost i globalnu motoričku funkciju kod osoba s Parkinsonovom bolesti. Nažalost, učinci vježbanja smanjuju se nakon razdoblja praćenja bez treninga, što nam dovoljno govori o važnosti kontinuiranog treninga. Nedavne studije pokazuju kako dugotrajno vježbanje tijekom dvije godine ima trajnu korist na motoričke i kognitivne ishode, samo što uključivanje pacijenata u taj dugotrajni proces predstavlja izazov. Vježbanje primjenom tehnologije može poboljšati pridržavanje vježbanja poticanjem korisnika na trening na personaliziran, motivirajući, zabavan i zanimljiv način (40).

Istraživanje provedeno 2019. godine uspoređuje primjenu konvencionalne terapije s terapijom pomoću virtualne stvarnosti putem NIRVANA sustava. Provedeno je tako da su 51 pacijenta koji boluje od Parkinsonove bolesti podijelili u dvije grupe. S 26 pacijenata provedena je konvencionalna terapija, koja je uključivala tri faze. Prva faza (faza zagrijavanja) uključivala je pasivno razgibavanje zglobova i jačanja mišića donjih udova. Druga faza (aktivna faza) provodila se stojeći i sjedeći. Uključivala je vježbe motoričke koordinacije s gornjim i donjim udovima, trening ravnoteže, vježbe kretanja i zaustavljanja i trening hoda. Treća faza (faza hlađenja) obuhvaćala je manipulacijske vježbe, vježbe mobilizacije i respiratorne vježbe. S drugom skupinom, u kojoj je bilo 25 pacijenata, provedena je terapija putem sustava virtualne stvarnosti NIRVANA. NIRVANA sustav zasnovan je na optoelektronskim infracrvenim uređajima, koji pacijentima omogućuju izvođenje vježbi u virtualnom svijetu s potpunom audiovizualnom imerzijom. Sustav je povezan sa zidnim projektorom i putem njega je reproduciran niz vježbi koje uključuju koordinaciju donjih i gornjih ekstremiteta i kontrolu trupa. Aktivnosti pacijenata zabilježene su putem web kamere kako bi se analizirali njihovi pokreti. Neke od vježbi koje su pacijenti radili bile su: šetati psa do sva četiri kuta zida, dodirnuti krticu koja izlazi iz rupe (pacijenti nisu znali gdje će se krtica pojaviti i bili su slobodni šetati po sobi), dodirnuti trubu koja se kreće po zaslonu (kada pacijent dodirne trubu, emitira se zvuk i truba nestane), dodirnuti jaja projicirana na zaslonu slučajnim odabirom što je brže moguće, izvesti motorički zadatak kako je naznačeno (nalazeći se između dvije bočno postavljene šipke uz održavanje ravnoteže bez dodirivanja šipki), očistiti lišće projicirano na zaslonu što je brže moguće.

Zadnjih godina prepoznato je da rehabilitacija osoba s Parkinsonovom bolesti ne treba biti usmjerena samo na motoričke zadatke. Na hod snažno utječe spoznaja, a osobe s Parkinsonovom bolesti također pate od kognitivne disfunkcije, stoga sposobnost normalizacije hoda ostaje oslabljena. Pravilno izvođenje vježbi tijekom treninga virtualne stvarnosti može biti potvrđeno vizualnim i zvučnim povratnim informacijama. Također se pokazalo kako učinak senzornih povratnih informacija daje snažan poticaj.

Testovi korišteni u ovoj studiji bili su Bergova skala ravnoteže i dinamički indeks hoda, koji se koristi za procjenu performansi mobilnosti, a posebno sposobnosti prilagođavanja hoda složenim zadacima i hodanju u zajednici. Prema rezultatima studije, veće poboljšanje hodanja i ravnoteže vidljivo je kod pacijenata koji su bili uključeni u rehabilitaciju putem virtualne stvarnosti. Takvi rezultati mogući su upravo zbog toga što virtualna stvarnost stimulira senzorno-motoričke i kognitivne funkcije. Ravnoteža se održava i postiže složenim skupom senzorno-motoričkih upravljačkih sustava koji uključuju senzorne ulaze vida, propriocepcije i vestibularnog sustava, koji je uključen u kretanje, ravnotežu i orijentaciju u prostoru. Sposobnost virtualne stvarnosti da utječe na poboljšanje ravnoteže vrlo je važna jer je posturalna nestabilnost jedan od glavnih problema s kojim se moraju nositi osobe oboljele od Parkinsonove bolesti, a može prouzročiti probleme s padovima i morbiditet. Studija pokazuje da je proveden rehabilitacijski program uz pomoć virtualne stvarnosti koristan za poboljšanje ishoda kod bolesnika s Parkinsonovom bolesti. U usporedbi ovih dvaju programa rehabilitacije, rehabilitacija primjenom virtualne stvarnosti pokazala se učinkovitijom u poboljšanju hoda, ravnoteže, funkcije gornjih ekstremiteta i mentalnog aspekta (42).

## 6. MULTIPLA SKLEROZA

Multipla skleroza je neurodegenerativna demijelinizirajuća bolest s lezijama koje zahvaćaju središnji živčani sustav. Uglavnom je uzrokovana autoimunim procesima koji uzrokuju gubitak mijelina u bijeloj tvari moždanih hemisfera, moždanog debla, leđne moždine i malog mozga (43). Najčešća je netraumatska bolest odraslih mladih osoba koja dovodi do invalidnosti. S epidemiološke strane, multipla skleroza vrlo je istražena bolest, a razlike u incidenciji i prevalenciji mogu se pripisati različitim čimbenicima kao što su genetski čimbenici, okolišni i socioekonomski čimbenici, od kojih je dostupnost medicinske skrbi jedan od važnijih. Prevalencija multiple skleroze u Europi u posljednja tri desetljeća iznosi 83 na 100.000 stanovnika. Novija istraživanja prikazuju porast prevalencije multiple skleroze, osobito kod žena. Točan uzrok bolesti nije poznat, no poznato je da je za razvoj bolesti potrebno djelovanje različitih okolišnih čimbenika kod osoba koje imaju određenu genetičku predispoziciju. Kada se govori o tim čimbenicima, isključivo se misli na pušenje, infekciju Epstein-Barr virusom, debljinu, povećan unos natrija i manjak vitamina D, što se može povezati s time kako je prevalencija multiple skleroze veća u sjevernim zemljama (16).

Tipičan početak bolesti obično je oko čovjekovih 30 godina života i češće se dijagnosticira kod žena između 20 i 40 godina. Klinički, većina bolesnika koji boluju od multiple skleroze doživi ponavljajuće epizode (recidive) neurološkog oštećenja, ali u 60 do 80 posto slučajeva tijekom bolesti s vremenom postaje kroničan i progresivan, što dovodi do kognitivnih deficita i kumulativne motoričke invalidnosti. Multipla skleroza zbog raširene prirode bolesti predstavlja širok spektar simptoma. Klinički se simptomi sastoje od poremećaja motoričke aktivnosti (tremor, spastičnost, slabost), senzornih poremećaja (bol), poremećaja vizualnih funkcija (diplopija, optički neuritis) i kognitivnih poremećaja kao što je deficit pažnje i izvršna disfunkcija (44). Liječenje i terapija bolesnika s multiplom sklerozom ima za cilj usporavanje progresije bolesti i liječenje simptoma. Lijekovi koji se koriste napravljeni su tako da skraćuju recidive, smanjuju njihovu ozbiljnost i progresiju bolesti. S druge strane, rehabilitacija je orijentirana prema razvoju motoričkih i kognitivnih funkcija koje su oštećene zbog bolesti, a to je neophodno ukoliko pacijentima želimo poboljšati kvalitetu života. Fizioterapija i kinezioterapija najčešće se koriste kod motoričke rehabilitacije i smanjuju poteškoće vezane za spastičnost, bol i umor (45).

Kod 85% bolesnika multipla skleroza počinje relapsom koji se naziva klinički izolirani sindrom (CIS). Ako se pacijenta prati dovoljno dugo vremena, kod većine bolesnika CIS

prelazi u relapsno remitirajuću multiplu sklerozu (RRMS). Ako se bolesnici koji boluju od relapsno remitirajuće multiple skleroze ne liječe, nakon 10 – 15 godina 70% njih razvit će progresiju bolesti koja je obilježena povećanjem neurološke onesposobljenosti s relapsom ili bez njega i naziva se sekundarno progresivna multipla skleroza (SPMS). Samo 15% bolesnika od početka ima progresivni oblik koji se naziva primarno progresivna multipla skleroza (PPMS(16)).

## 7. VAŽNOST ZA PODRUČJE FIZIOTERAPIJE

Kognitivna disfunkcija tipični je sindrom kod osoba s multiplom sklerozom. Zahvaća čak 65% pacijenata, a može biti prisutna tijekom početne faze bolesti i u fazama teške invalidnosti (46). Kod bolesnika s multiplom sklerozom kognitivna disfunkcija može imati značajan negativni utjecaj na kvalitetu života, a najčešći neuropsihološki simptomi uključuju deficit izvršnih funkcija, memorije, vizualno-prostornih sposobnosti i oštećenje verbalnih sposobnosti. Ovi deficiti povezani su s psihološkim poremećajima poput tjeskobe i depresije. Među metodama rehabilitacije jedan od alata je i virtualna stvarnost. Oštećeno motoričko učenje kod bolesnika s multiplom sklerozom zahtijeva složenu integraciju vizualnih i senzomotoričkih informacija (pacijent, koristeći desnu ruku, zglobov i kažiprstom treba pratiti projicirani ciljani objekt na ekranu). Primjena virtualne stvarnosti pokazuje značajno motoričko učenje nakon jednog treninga putem interaktivnog rehabilitacijskog sustava (45). Postoje dvije vrste rehabilitacije oboljelih od multiple skleroze putem virtualne stvarnosti. Prvi pristup odnosi se na igranje igara zamišljenih posebno za rehabilitaciju, dok je drugi pristup zamišljen kao igranje igara koje su napravljene za zabavu opće populacije, ali se mogu primijeniti i u kontekstu rehabilitacije (47). Prema dvije nedavne recenzije o interaktivnim igrama, tehnologiji i ozbiljnom vježbanju, oba pristupa mogu obećati olakšanje pristupa rehabilitacije pacijenata s multiplom sklerozom (45). Istraživanje provedeno na 30 pacijenata s multiplom sklerozom s umjerenim kognitivnim oštećenjima pokazuje kako je primjena okruženja virtualne stvarnosti obećavajuća u smanjenju kognitivnih deficita (48).

Motoričko oštećenje kod multiple skleroze uz kognitivnu disfunkciju jedan je od najčešćih simptoma bolesti. Hod, koordinacija i ravnoteža ozbiljno mogu biti ugroženi, sa značajnim posljedicama na aktivnosti svakodnevnog života i općenito aktivnost pacijenta, što utječe i na njegovo psihološko stanje (49). Specifične abnormalnosti hoda kod multiple skleroze uključuju smanjenu brzinu i duljinu koraka, duže vrijeme oslanjanja na obje noge tijekom hoda i asimetrija hoda. Oštećenje ravnoteže jedan je od najčešćih onesposobljenja, ono smanjuje pokretljivost pacijenta i povezano je s većim rizikom od pada. U pristupu motornog učenja virtualna stvarnost nudi mogućnost korištenja zadataka usmjerenih na multisenzorni trening povratnih informacija. Većina intervencija u rehabilitaciji motoričke funkcije kod multiple skleroze putem virtualne stvarnosti sastoji se od individualno prilagođenog režima treninga pod nadzorom fizioterapeuta. Uzevši u obzir promatrane studije, virtualna stvarnost najučinkovitijom se pokazala kada se koristi u kombinaciji s konvencionalnom rehabilitacijom. Peruzzi i sur. procijenili su učinke rehabilitacijskog programa na temelju

kombinirane upotrebe virtualne stvarnosti i trake za trčanje. Sudionici su šetali trakom dok su u virtualnoj stvarnosti gledali okoliš koji predstavlja šumu. Istraživanje prikazuje da intenzivan progresivan program treninga na traci može biti održiv pristup u rehabilitaciji oboljelih od multiple skleroze i pozitivno utjecati na kompleksne zadatke poput hoda, dvostrukog zadatka i izbjegavanja određenih prepreka. Također je uočeno značajno poboljšanje brzine hoda kod grupe koja je koristila virtualnu stvarnost (50).

## 7. ZAKLJUČAK

S obzirom na to da se broj osoba oboljelih od neuroloških bolesti u svijetu sve više povećava, a neurološke bolesti jedne su od najvećih uzroka invaliditeta i dovode do značajnog smanjenja kvalitete života, dolazimo do toga da je potrebno istražiti i nove mogućnosti rehabilitacije pacijenata oboljelih od takvih bolesti. Budući da neurološke bolesti i poremećaji poput moždanog udara, Parkinsonove bolesti i multiple skleroze rezultiraju različitim oštećenjima motoričkih funkcija, fizioterapija ima jednu od ključnih uloga u sprečavanju progresije i poboljšanju ishoda bolesti.

Sve većim napretkom tehnologije u zadnje vrijeme pojavljuju se novija istraživanja koja govore o primjeni virtualne stvarnosti u rehabilitaciji bolesnika s neurološkim bolestima. Primjena virtualne stvarnosti u rehabilitaciji može nam služiti kao dodatni alat uz konvencionalnu rehabilitaciju s obzirom na to da nam daje kvalitetne povratne multisenzorne informacije unutar stvarnog vremena i uvelike može utjecati na motivaciju pacijenta. Također, podiže kvalitetu rehabilitacije na jedan viši nivo. U zadnje vrijeme provedena su razna istraživanja vezana za virtualnu stvarnost od kojih neki ističu njene prednosti, dok određena istraživanja govore o tome kako nema znatne razlike između konvencionalne rehabilitacije i rehabilitacije putem virtualne stvarnosti. Benefiti poput zanimljivosti te vizualnih, auditivnih i taktilnih povratnih informacija utječu na interes i motivaciju pacijenta, a poznato je da će i rehabilitacija pružiti bolje rezultate ukoliko je pacijent motiviran.

Bez obzira na sve pozitivne učinke u rehabilitaciji putem virtualne stvarnosti, to područje se još može smatrati slabo istraženim. Problem je što sva istraživanja uključuju vrlo mali broj sudionika što definitivno utječe na ishode tih istraživanja. Kada sve to sagledamo u cijelosti, virtualnu stvarnost možemo smatrati potencijalnim pomoćnim alatom uz konvencionalnu rehabilitaciju kako bismo dobili još bolje rezultate rehabilitacije. Međutim, za njenu primjenu u kliničkoj praksi potrebno je posebno školovati fizioterapeute u tom području kako bi znali individualno prilagoditi svaki zadatak pojedinom pacijentu i usmjeravati ga u pravom smjeru, što će sigurno dovesti do rezultata koji će poboljšati njegovu kvalitetu života i pozitivno utjecati na tijek bolesti ili oštećenja koja posjeduje.



## 8. SAŽETAK

UVOD: Neurološke bolesti povezane su s visokom stopom smrtnosti i invaliditeta. Rehabilitacija kod neuroloških bolesti odnosi se na vraćanje motoričkih i kognitivnih funkcija pacijenta u čemu nam razvoj novih tehnologija može pomoći postići bolje rezultate. Virtualna stvarnost pruža interaktivno virtualno okruženje, utječe na neuroplastičnost i pomaže u oporavku pacijenata tijekom rehabilitacije.

POSTUPCI: Pretraživane baze podataka bile su Pubmed i Hrčak. Prilikom pisanja rada pregledano je 90 radova, a njih 50 je uzeto u obzir. Većina literature pretraživana je na engleskom jeziku.

PRIKAZ TEME: Virtualna stvarnost osnovni je način na koji se ljudi mogu povezati vizualno s računalom, manipulirati njime i komunicirati s njim. Napredni je oblik interakcije čovjeka s računalom onaj koji omogućava korisnicima da se uključe u računalno generirano virtualno okruženje. Istraživanja pokazuju korist primjene virtualne stvarnosti kod bolesti kao što su Parkinsonova bolest, multipla skleroza i moždani udar. Većina neuroloških bolesti dovodi do oštećenja motoričke funkcije. Primjena virtualne stvarnosti u rehabilitaciji ima određene prednosti u odnosu na konvencionalnu terapiju jer olakšava implementaciju principa motoričkog učenja, pruža sve vrste povratnih informacija u stvarnom vremenu i daje nam uvid u objektivno napredovanje koje je lako mjerljivo.

ZAKLJUČAK: Neurološke bolesti uvelike smanjuju kvalitetu života. Primjena virtualne stvarnosti osim svih pozitivnih učinaka na razvoj motoričke funkcije također utječe i na motivaciju pacijenta, koja nam je vrlo bitna prilikom rehabilitacije. S obzirom na istraživanja, ne možemo sa sigurnošću tvrditi sve pozitivne učinke virtualne stvarnosti, ali svakako nam može služiti kao pomoćni alat konvencionalnoj rehabilitaciji.

Ključne riječi: virtualna stvarnost; neurologija; moždani udar; rehabilitacija; Parkinsonova bolest

## 9. SUMMARY

### **Use of virtual reality in rehabilitation of neurological diseases**

**INTRODUCTION:** Neurological diseases are associated with high mortality and disability rate. Rehabilitation of neurological diseases refers to the restoration of motor and cognitive function of the patient in which the development of new technology can help us achieve better results. Virtual reality provides an interactive virtual environment, affects neuroplasticity and helps in the patient's recovery during rehabilitation.

**PROCEDURES:** The databases searched were Pubmed and Hrčak. When writing the paper, 90 papers were reviewed and 50 of them were taken into consideration. Most of the literature was studied in English.

**OVERVIEW:** Virtual reality is the basic way people can connect visually with a computer and a they can manipulate and communicate with it,too. It is an advanced form of a human-computer interaction that allows users to engage in a computer-generated virtual environment. Studies show the benefits of its application in diseases such as Parkinson's disease, multiple sclerosis and stroke. Most neurological diseases lead to impairment of motor function. The application of virtual reality in rehabilitation has certain advantages over conventional therapy because it facilitates the implementation of the principles of motor learning, provides all kinds of real-time feedback, and gives us vision in objective progress that is easily measurable.

**CONCLUSION:** Neurological diseases greatly reduce the quality of life. The application of virtual reality, in addition to all positive effects on the development of the motor function also affects the motivation of the patient, which is very important during the rehabilitation. Regarding the research, we cannot determine with certainty all the positive effects of virtual reality, but it can definitely serve as an auxiliary tool to conventional rehabilitation.

**Keywords:** Virtual reality; neurology; stroke; rehabilitation; Parkinson's disease

**10. LITERATURA**

1. Klepac N. Neurološke promjene u dugovječnosti. *Socijalna psihijatrija* 2019;47(3):351-358.
2. Khan F, Amatya B, Galea MP, Gonzenbach R, Kesselring J. Neurorehabilitation: applied neuroplasticity. *J Neurol.* 2017;264(3):603-615.
3. Kim WS, Cho S, Ku J, Kim Y, Lee K, Hwang H, i sur. Clinical Application of Virtual Reality for Upper Limb Motor Rehabilitation in Stroke: Review of Technologies and Clinical Evidence. *J Clin Med.* 2020;9(10):3369.
4. O'Neil O, Fernandez MM, Herzog J, Beorchia M, Gower V, Gramatica F, i sur. Virtual Reality for Neurorehabilitation: Insights From 3 European Clinics. *PM R.* 2018;9(2):198-206.
5. Tieri, G, Morone G, Paolucci S, Iosa M. Virtual reality in cognitive and motor rehabilitation: facts, fiction and fallacies. *Expert Review of Medical Devices.* 2018;15(2):107–117.
6. Massetti T, da Silva TD, Crocetta TB, Guarnieri R, de Freitas BL, Bianchi Lopes P, i sur. The Clinical Utility of Virtual Reality in Neurorehabilitation: A Systematic Review. *J Cent Nerv Syst Dis.* 2018;10:1179573518813541.
7. Perez-Marcos D. Virtual reality experiences, embodiment, videogames and their dimensions in neurorehabilitation. *J Neuroeng Rehabil.* 2018;15(1):113.
8. Cipresso P, Giglioli IAC, Raya MA, Riva G. The Past, Present, and Future of Virtual and Augmented Reality Research: A Network and Cluster Analysis of the Literature. *Front Psychol.* 2018;9:2086.
9. Buhrmann T, Paolo ED. The sense of agency – a phenomenological consequence of enacting sensorimotor schemes. *Phenom Cogn Sci.* 2017;16:207–236.
10. Gonzalez-Franco M, Lanier J. Model of Illusions and Virtual Reality. *Front Psychol.* 2017;8:1125.
11. Ventura S, Brivio E, Riva G, Baños RM. Immersive Versus Non-immersive Experience: Exploring the Feasibility of Memory Assessment Through 360° Technology. *Front Psychol.* 2019;10:2509.

12. Bohil CJ, Alicea B, Biocca FA. Virtual reality in neuroscience research and therapy. *Nat Rev Neurosci*. 2011;12(12):752-62.
13. Johnson D, Deterding S, Kuhn KA, Staneva A, Stoyanov S, Hides L. Gamification for health and wellbeing: A systematic review of the literature. *Internet Interv*. 2016;6:89-106.
14. Cano Porras D, Siemonsma P, Inzelberg R, Zeilig G, Plotnik M. Advantages of virtual reality in the rehabilitation of balance and gait: Systematic review. *Neurology*. 2018;90(22):1017-1025.
15. Laver KE, Lange B, George S, Deutsch JE, Saposnik G, Crotty M. Virtual reality for stroke rehabilitation. *Cochrane Database Syst Rev*. 2017;11(11):CD008349.
16. Brinar V, i sur. *Neurologija za medicinare*. 2 izd. Zagreb: Medicinska naklada; 2018.
17. Hatem SM, Saussez G, Della Faille M, Prist V, Zhang X, Dispa D, i sur. Rehabilitation of Motor Function after Stroke: A Multiple Systematic Review Focused on Techniques to Stimulate Upper Extremity Recovery. *Front Hum Neurosci*. 2016;10:442
18. Campbell BCV, De Silva DA, Macleod MR, Coutts SB, Schwamm LH, Davis SM, i sur. Ischaemic stroke. *Nat Rev Dis Primers*. 2019;5(1):70.
19. Unnithan AKA, Mehta P. Hemorrhagic Stroke. Treasure Island: StatPearls; 2021  
Dostupno na adresi: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK559173/>. Datum pristupa: 15.04.2021.
20. Belagaje SR. Stroke Rehabilitation. *Continuum (Minneap Minn)*. 2017;1:238-253.
21. Sampaio-Baptista C, Sanders ZB, Johansen-Berg H. Structural Plasticity in Adulthood with Motor Learning and Stroke Rehabilitation. *Annu Rev Neurosci*. 2018;41:25-40
22. Götz M, Jarriault S. Programming and reprogramming the brain: a meeting of minds in neural fate. *Development*. 2017;144(15):2714-2718.
23. Voss P, Thomas ME, Cisneros-Franco JM, de Villers-Sidani É. Dynamic Brains and the Changing Rules of Neuroplasticity: Implications for Learning and Recovery. *Front Psychol*. 2017;8:1657.
24. Dąbrowski J, Czajka A, Zielińska-Turek J, Jaroszyński J, Furtak-Niczyporuk M, Mela A, i sur. Brain Functional Reserve in the Context of Neuroplasticity after Stroke. *Neural Plast*. 2019;2019:9708905.

25. Power JD, Schlaggar BL. Neural plasticity across the lifespan. *Wiley Interdiscip Rev Dev Biol.* 2017;6(1):10.1002/wdev.216.
26. Stampanoni Bassi M, Iezzi E, Gilio L, Centonze D, Buttari F. Synaptic Plasticity Shapes Brain Connectivity: Implications for Network Topology. *Int J Mol Sci.* 2019;20(24):6193.
27. Stewart JC, Cramer SC. Genetic Variation and Neuroplasticity: Role in Rehabilitation After Stroke. *J Neurol Phys Ther.* 2017;41(3):17-23.
28. Carey L, Walsh A, Adikari A, Goodin P, Alahakoon D, De Silva D, i sur. Finding the Intersection of Neuroplasticity, Stroke Recovery, and Learning: Scope and Contributions to Stroke Rehabilitation. *Neural Plast.* 2019;2019:5232374
29. Weiss PL, Keshner EA, Levin MF, ur. *Virtual Reality for Physical and Motor Rehabilitation.* New York: Springer; 2014
30. Choi YH, Paik NJ. Mobile Game-based Virtual Reality Program for Upper Extremity Stroke Rehabilitation. *J Vis Exp.* 2018;(133):56241.
31. Huang CY, Lin GH, Huang YJ, Song CY, Lee YC, How MJ, i sur. Improving the utility of the Brunnstrom recovery stages in patients with stroke: Validation and quantification. *Medicine (Baltimore).* 2016;95(31):e4508.
32. Ikbali Afsar S, Mirzayev I, Umit Yemisci O, Cosar Saracgil SN. Virtual Reality in Upper Extremity Rehabilitation of Stroke Patients: A Randomized Controlled Trial. *J Stroke Cerebrovasc Dis.* 2018;27(12):3473-3478.
33. Kiper P, Szczudlik A, Agostini M, Opara J, Nowobilski R, Ventura L, i sur. Virtual Reality for Upper Limb Rehabilitation in Subacute and Chronic Stroke: A Randomized Controlled Trial. *Arch Phys Med Rehabil.* 2018;99(5):834-842.
34. Radhakrishnan DM, Goyal V. Parkinson's disease: A review. *Neurol India.* 2018;66:26-35.
35. Feng H, Li C, Liu J, Wang L, Ma J, Li G, i sur. Virtual Reality Rehabilitation Versus Conventional Physical Therapy for Improving Balance and Gait in Parkinson's Disease Patients: A Randomized Controlled Trial. *Med Sci Monit.* 2019;25:4186-4192
36. Sveinbjornsdottir S. The clinical symptoms of Parkinson's disease. *J Neurochem.* 2016;139(1):318-324.

37. Fazl A, Fleisher J. Anatomy, Physiology, and Clinical Syndromes of the Basal Ganglia: A Brief Review. *Semin Pediatr Neurol*. 2018;25:2-9.
38. Opara J, Małecki A, Małecka E, Socha T. Motor assessment in Parkinson's disease. *Ann Agric Environ Med*. 2017;24(3):411-415.
39. Dockx K, Bekkers EM, Van den Bergh V, Ginis P, Rochester L, Hausdorff JM, i sur. Virtual reality for rehabilitation in Parkinson's disease. *Cochrane Database Syst Rev*. 2016;12(12):CD010760.
40. van der Marck MA, Munneke M, Mulleners W, Hoogerwaard EM, Borm GF, Overeem S i sur. Integrated multidisciplinary care in Parkinson's disease: a non-randomised, controlled trial (IMPACT). *Lancet Neurol*. 2013;12(10):947-56.
41. Tomlinson CL, Patel S, Meek C, Clarke CE, Stowe R, Shah L, i sur. Physiotherapy versus placebo or no intervention in Parkinson's disease. *Cochrane Database Syst Rev*. 2012;(7):CD002817.
42. Pazzaglia C, Imbimbo I, Tranchita E, Minganti C, Ricciardi D, Lo Monaco R, i sur. Comparison of virtual reality rehabilitation and conventional rehabilitation in Parkinson's disease: a randomised controlled trial. *Physiotherapy*. 2020;106:36-42
43. Ghasemi N, Razavi S, Nikzad E. Multiple sclerosis: pathogenesis, symptoms, diagnoses and cell-based therapy. *Cell J* 2017;19(1):1–10.
44. Katz Sand I. Classification, diagnosis, and differential diagnosis of multiple sclerosis. *Curr Opin Neurol* 2015;28(3):193–205.
45. Maggio MG, Russo M, Cuzzola MF, Destro M, La Rosa G, Molonia F, i sur. Virtual reality in multiple sclerosis rehabilitation: A review on cognitive and motor outcomes. *J Clin Neurosci*. 2019;65:106-111.
46. Sandi D, Biernacki T, Szekeres D, Füvesi J, Kincses ZT, Rózsa C, i sur. Prevalence of cognitive impairment among Hungarian patients with relapsing-remitting multiple sclerosis and clinically isolated syndrome. *Mult Scler Relat Disord*. 2017;17:57-62.
47. Thomas S, Fazakarley L, Thomas PW, Collyer S, Brenton S, Perring S, i sur. Mii-vitaliSe: a pilot randomised controlled trial of a home gaming system (Nintendo Wii) to increase activity levels, vitality and well-being in people with multiple sclerosis. *BMJ Open* 2017;7(9):e016966.

48. Lamargue-Hamel D, Deloire M, Saubusse A, Ruet A, Taillard J, Philip P, i sur. Cognitive evaluation by tasks in a virtual reality environment in multiple sclerosis. *J Neurol Sci.* 2015;359(1-2):94-9.
49. Calabrò RS, Russo M, Naro A, De Luca R, Leo A, Tomasello P, i sur. Robotic gait training in multiple sclerosis rehabilitation: Can virtual reality make the difference? Findings from a randomized controlled trial. *J Neurol Sci.* 2017;377:25-30.
50. Peruzzi A, Cereatti A, Della Croce U, Mirelman A. Effects of a virtual reality and treadmill training on gait of subjects with multiple sclerosis: a pilot study. *Mult Scler Relat Disord* 2016;5:91–6.