Univerzita Karlova

1. lékařská fakulta

Autoreferát disertační práce

UNIVERZITA KARLOVA
1. lékařská fakulta

Prvky motorického učení při obnově hybnosti u pacientů s poruchou CNS

MUDr. Karla Kotková

2026

Doktorské studijní programy v biomedicíně

Univerzita Karlova a Akademie věd České republiky

Obor: Fyziologie a patofyziologie člověka

Předseda oborové rady: prof. MUDr. Otomar Kittnar, Dr.Sc. MBA

Školicí pracoviště: Klinika rehabilitačního lékařství 1.LFUK a VFN

Školitel: doc. MUDr. Yvona Angerová, Ph.D., MBA

Konzultant: doc. MUDr. Dana Marešová, CSc.

Disertační práce bude nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněna k nahlížení veřejnosti v tištěné podobě na Oddělení pro vědeckou činnost a zahraniční styky Děkanátu 1. lékařské fakulty.

Abstrakt:

Pohyb je jedním ze základních projevů života a motorické učení je základní proces získávání a zdokonalování pohybových dovedností prostřednictvím zkušenosti, praxe a opakování. Tento proces umožňuje jedinci osvojit si nové pohybové vzory, zdokonalit koordinaci a efektivitu pohybu a přizpůsobit se novým motorickým úkolům, což je zásadní pro vykonávání každodenních činností a specializovaných úkolů. Pacienti s poškozením centrálního motoneuronu ve své většině potřebují dlouhodobou rehabilitací zaměřenou na zlepšení hybnosti končetin a trupu, posturální stability a rovnováhy a dalších funkcí. Rehabilitace pomáhá aktivací neuroplastických, reparačních a kompenzačních mechanismů aktivitami vhodného typu a intenzity, a právě motorické učení s využitím vizuální zpětné vazby je jednou z perspektivních možností. Cílem práce bylo sledovat efekt motorického učení balančních dovedností na posturografické plošině s vizuální zpětnou vazbou a ověřit vliv senzorických vstupů na posturografické parametry rovnováhy. Druhým cílem bylo sledovat mechanismy motorického učení u dvou věkově rozdílných skupin a ověřit, zda je mezi nimi rozdíl. Ve studii motorického učení mladé ženy a seniorky trénovaly na posturometrické plošině s vizuální zpětnou vazbou jedenkrát týdně deset po sobě jdoucích týdnů a byly měřeny časy, za které provedly jednotlivé tréninkové sekvence. Ve studii zkoumající vliv motorického učení na rovnováhu stejným způsobem trénovali pacienti po cévní mozkové příhodě a byly měřeny parametry rovnováhy před a po tréninkovém cyklu. Výsledky ukázaly, že po tréninku s vizuální zpětnou vazbou se zlepšily měřené parametry rovnováhy, zlepšila se především vestibulární složka. Studie cílená na motorické učení potvrdila, že motorické učení s pomocí vizuální

zpětné vazby je u starší i mladší populace efektivní a má obdobnou dynamiku, i když u starší populace je dříve dosaženo limitu zlepšování. Závěry prokazují dobré schopnosti motorického učení balančních dovedností i ve vyšším věku. Prokazují také pozitivní dopad tréninku na rovnováhu u pacientů po poškození CNS. Proto by měly být takového prvky tréninku zařazeny do rehabilitace pacientů v rehabilitačních zařízeních i v programech založených na samostatném cvičení v domácích prostředí, i jako prevence poruch rovnováhy u seniorů a předcházení dalším obtížím a pádům.

Klíčová slova: motorické učení, rovnováha, vizuální zpětná vazba, cévní mozková příhoda, stárnutí

Abstract:

Movement is one of the basic signs of life, and motor learning is the fundamental process of acquiring and improving motor skills through experience, practice, and repetition. This process allows individuals to learn new movement patterns, improve coordination and movement efficiency, and adjust to new motor tasks, which is essential for performing everyday activities and specialized tasks. Most patients with central motor neuron damage require long-term rehabilitation focused on improving limb and trunk mobility, postural stabilization and balance, and other functions. Rehabilitation helps by activating neuroplastic, reparative, and compensatory mechanisms through activities of appropriate type and intensity, and motor learning using visual feedback is one of the promising approaches. The aim of the thesis was to observe the effect of motor learning of balance skills on a posturographic platform with visual feedback and to confirm

the impact of sensory inputs on posturographic balance parameters. The second aim was to observe the mechanisms of motor learning in two age-differentiated groups and to verify whether there is a difference between them. In the motor learning study, a young woman and a senior woman trained on a posturographic platform with visual feedback once a week for ten consecutive weeks, and the time they took to perform each training sequence was recorded. In the study evaluating the effect of motor learning on stability, patients who had suffered a stroke were trained in the same way, and stability parameters were measured before and after the training period. The results showed that after training with visual feedback, the measured stability parameters improved, with the vestibular component showing the most significant improvement. A study aimed at motor learning confirmed that motor learning with visual feedback is effective in both older and younger populations and shows similar dynamics, although the older population reaches the limit of improvement earlier. The results demonstrate good ability to learn motor balance skills even at an elderly age. They also show the positive impact of training on balance in patients after brain damage. Therefore, such training activities should be included in the rehabilitation of patients in rehabilitation centers and in programs based on individual exercise at home, as well as in the prevention of balance disorders in seniors and the prevention of further difficulties and falls.

Key words: Motor learning, balance skills, visual feedback, stroke, aging

Obsah

1. Úvod 5

2. Hypotézy a cíle práce.....7

3. Materiál a metodika 7

4. Výsledky 10

5. Diskuse 13

6. Závěry 16

7. Použitá literatura ..... .17

1. Úvod

Motorické učení je proces získávání a zdokonalování pohybových dovedností prostřednictvím zkušenosti, praxe a opakování. Tento proces umožňuje jedinci osvojit si nové pohybové vzory, zdokonalit koordinaci a efektivitu pohybu a přizpůsobit se novým motorickým úkolům. Je zásadní pro vykonávání každodenních činností a specializovaných úkolů a je ovlivněn různými faktory (kognitivními, motorickými a environmentálními) (Schumway-Cook A. a Woollacott MH., 2012). Motorické učení je součástí neuroplastických mechanismů, spočívajících ve strukturálních i funkčních změnách neurálních okruhů, které vznikají díky spouštěcím mechanismům doprovázejícím fyzickou aktivitu. Patří k nim změny prokrvení mozku a saturace kyslíkem, ale i aktivace dalších faktorů, jako je uvolňování signálních molekul (BDNF a dalších neurotrofních a neuroprotektivních faktorů) (Bezzola L. et

al., 2012, Boudreau SA. et al., 2013). Neuroplasticita umožňuje mozku adaptaci na měnící se prostředí a cílenou tvorbou neurálních okruhů umožňuje splnění jeho individuálních potřeb (Kaas JH., 2015). Plasticita závislá na aktivitě je neurofyziologickým podkladem neurorehabilitace (Kerr AL. et al., 2011).

Efektivitu učení motorických dovedností ovlivňuje několik faktorů – věk, zpětná vazba, pozornost, motivace, procvičování a opakování. Pro motorické učení je zpětná vazba nezbytná, pomáhá opravovat chyby a zdokonalovat jednotlivé pohyby i jejich souhru (Schmidt RA., et al., 2018). Vnitřní zpětná vazba znamená informace z různých senzorických systémů (např. vizuální informace o tom, zda byl pohyb přesný, somatosenzorické informace o poloze segmentů těla…). Vnější (nebo rozšířená) zpětná vazba doplňuje vnitřní zpětnou vazbu – rozšiřuje a upřesňuje informace během nebo na konci úkolu (Shumway-Cook A. a Woollacott, MH., 2012). V posledních dekádách jsou jednou z možných forem zpětné vazby i terapeutické programy využívající virtuální realitu (VR) s vizuální zpětnou vazbou (VF), která poskytuje informaci o směru a velikosti změny polohy průmětu těžiště, což vede pacienta k lepší kontrole a plynulejší korekci zadaného pohybu a je využitelná například v tréninku balančních dovedností. (Čakrt O. a Jeřábek J., 2017, Janatová M. et al., 2015, Srivastava A. et al., 2009, Šajtárová L. et al., 2020). Technologie s VF umožňují zvýšit intenzitu tréninku díky interakci s počítačem generovanou virtuální realitou, nácviku různých strategií provedení aktivit a vizualizací funkcí, které by jinak byly obtížně představitelné (v našem případě pohyb těžiště). VF tak nabízí pozitivní posílení, které usnadňuje zlepšení

v provádění úkolu (Lorkowski J. et al., 2025). Další výhodou těchto technik je, že proband/pacient sleduje své aktuální výsledky, pozoruje své postupné zlepšování (v našem případě zkracování času potřebného k provedení tréninkových sekvencí) a je tak motivován jednak precizovat svůj výkon, jednak pokračovat v tréninku.

Udržování rovnováhy těla (posturální kontrola) je komplexní proces, který zahrnuje smyslovou integraci, motorickou odpověď a mozkovou regulaci. Rovnováha je udržována díky spolupráci centrální nervové soustavy (CNS), smyslových receptorů a svalového systému (Ivanenko Y. a Gurfinkel VS., 2018). U pacientů po cévních mozkových příhodách bylo potvrzeno několik specifických abnormalit udržování rovnováhy. Tito pacienti hůře kontrolují vůlí výkyvy v klidném stoji, rovnovážné reakce mají delší latenci na paretické končetině, na postižené straně je nižší amplituda reakčních sil, reakce jsou postiženy i nesprávným automatickým výběrem svalů při provádění vhodné rovnovážné odpovědi (Tasseel-Ponche et al., 2015, Zadravec et al., 2020).

Další skupinou s častějšími poruchami rovnováhy jsou senioři. Stárnutí popisují studie jako stav s přirozeným zhoršením senzorických vstupů vizuálních, vestibulárních a somatosenzorických, s přibývajícím věkem se objevují také změny v centrálních mechanismech zpracování informací a jejich zhoršená integrace v rámci rovnovážných reakcí, a to i zhoršením schopnosti kompenzovat nespolehlivé nebo protichůdné senzorické vstupy (Sturnieks D.L. et al., 2008, Wang J. et al., 2024).

Posturografií nazýváme přístrojové metody snímání a hodnocení rovnováhy. Obecně jsou posturografické metody určeny k posouzení vzpřímeného stoje nebo chůze u zdravých i nemocných osob, k popisu a zhodnocení rovnováhy, směrové převahy nerovnováhy, ovlivnění balance (např. zavření očí, poloha hlavy, podložení plosek měkkým materiálem...). Výsledkem posturografického vyšetření jsou jednak přímo měřené parametry, jednak z nich přístrojem vypočítaná skore, z nichž jsme pro naši studii využili:

1. Somatosenzorické skore: Toto skóre představuje pacientovu schopnost využívat somatosenzorické informace pro řízení rovnováhy.

2. Vizuální skore: Tato hodnota nám podá obraz o schopnosti využít vizuální vstup k řízení rovnováhy.

3. Vestibulární skore: Tato hodnota představuje informaci o využití vestibulárního vstupu pro řízení motoriky.

4. Rombergův kvocient (RQ) je poměr plochy SKG při zavřených a otevřených očích.

2. Hypotézy a cíle práce

Hypotéza 1: Motorické učení posturálních a balančních dovedností má u mladých žen lepší parametry než u seniorek.

Cíl 1: Sledovat mechanismy motorického učení u dvou věkově rozdílných skupin a ověřit, zda je mezi nimi rozdíl.

Hypotéza 2: Posturografické parametry rovnováhy pacientů po poškození centrálního motoneuronu jsou po tréninku balančních dovedností srovnatelné s parametry seniorské skupiny.

Cíl 2: Sledovat vliv motorického učení balančních dovedností na posturografické plošině s vizuální zpětnou vazbou na jednotlivá senzorická skore posturografických parametrů rovnováhy.

3. Materiál a metodika

Studie 1: mechanismy motorického učení mladých žen a seniorek. Zúčastnilo se celkem 61 žen rozdělených do dvou skupin: mladé ženy (31) a seniorky (30). Kritéria pro zařazení do studie byla věk, pohlaví a žádné zkušenosti s tréninkem rovnováhy. Vyloučeny byly osoby s poruchami rovnováhy, závažnými strukturálními změnami pohybového aparátu a/nebo neurologickými onemocněními s motorickými a/nebo senzorickými příznaky. Všechny seniorky byly plně soběstačné, žijící v domácnosti, v dobrém zdravotním stavu a bez významných zdravotních nebo neurologických problémů. Všichni účastníci měli normální nebo brýlemi do normy korigovaný zrak.

Intervence ve studii: Program probíhal 1x týdně deset po sobě jdoucích týdnů, Během tréninku byl korigován základní postoj,

samotné strategie provedení sekvence korigovány nebyly. Obě skupiny trénovaly s využitím posturografické plošiny Homebalance, tj. na stabilometrické platformě s vizuální zpětnou vazbou. Celkem jsme připravili šest sekvencí, z nichž pět mělo pevné rozložení cílových bodů. Šestá byla náhodně generována počítačem. Každá sekvence 1.-5. byla provedena dvakrát v rychlém sledu, 6. sekvence „náhodný“ byla provedena jednou.

Tréninkové sekvence:
1. “stranový”: stoj na šířku pánve, cíle se střídají ze strany na stranu.
2. “malé výchylky”: stoj na šířku pánve, cíle se střídají v diagonálním vzoru, pohyb těžiště se po každém výpadu vrací do základní polohy.
3. “velké výchylky”: stoj na šířku pánve, terče se střídají v diagonálním vzoru, pohyb se po každém výpadu vrací do základní polohy. Výpady jsou dvakrát větší než v sekvenci „malé výchylky“.
4. “spirála pravá”: stoj na šířku pánve, cíle sledují vzor od středu do spirály vpravo s rostoucí vzdáleností.
5. “spirála levá”: stoj na šířku pánve, cíle sledují vzor od středu do spirály vlevo s rostoucí vzdáleností.
6. “náhodný”: stoj na šířku pánve, sekvence cílů je generována náhodně zařízením.

Probandky sledovaly pohyb projekce svého těžiště na tréninkovém poli na obrazovce a podle pohybu svého těžiště a objevujících se cílů měnily pozici těla. Rychlost a přesnost pohybu se trénovala vychylováním těla směrem k jednotlivým cílům tréninkové sekvence, které byly předem definovány s rostoucí obtížností (počet bodů, vzdálenost bodů, směry

rozložení bodů) a vedly subjekty ke stále komplexnějším a na koordinaci náročnějším pohybům těla. Zařízení zaznamenávalo čas provedení jednotlivých tréninkových sekvencí, tato data byla následně statisticky zpracována.

Studie 2: vliv motorického učení na rovnováhu: zúčastnilo se celkem 54 probandů rozdělených do dvou skupin: intervenční skupina (IS), tj. pacienti po CMP (24) a kontrolní skupina (KS), tj. seniorky (30). Studie se zúčastnilo 24 osob v intervenční skupině (IS) (průměrný věk 49,12, SD 14,98) a 30 osob v kontrolní skupině (průměrný věk 67,567, SD 2,996). V intervenční skupině bylo 14 žen, 10 mužů, dle etiologie CMP 9 žen a 5 mužů po ischemické CMP, 5 žen a 5 mužů po hemoragické CMP, pravostrannou parézou trpělo 7 žen a 4 muži, levostrannou 7 žen a 6 mužů. Doba od CMP byla u žen v průměru 16 měsíců (SD 3,39), u mužů 19,1 měsíců (SD 4,38). Studii nedokončila jedna osoba v IS skupině ze sociálních důvodů a jedna osoba v KS ze zdravotních důvodů. Vstupními kritérii pro studii byla: proběhlá cévní mozková příhoda s projevy centrální hemiparézy umožňující samostatný stoj a chůzi bez opory nebo s oporou 1 francouzské hole, schopnost spolupracovat (hodnocená ošetřujícím lékařem). U pacientů se zhoršením zrakové ostrosti vyšetření a terapie probíhaly s doporučenou korekcí zraku. Vylučujícími kriterii bylo těžké poškození rovnováhy s vysokým rizikem pádu (dle MiniBESTest cut-off skóre pro pacienty v chronické fázi po CMP 17,5 bodu) (Michalčinová K. et al., 2022, Potter K. a Brandfass K. 2015, Tsang CSL. et al. 2013), poškození rovnováhy v důsledku vestibulárního poškození, syndrom opomíjení (hemispaciální neglect syndrom), těžké kognitivní postižení, těžká fatická porucha s poruchou porozumění, těžké postižení

zraku, těžké poškození hlubokého čití nebo přítomnost jiného neurologického postižení (dle výsledků neuropsychologického a logopedického vyšetření).

Intervence ve studii: Rehabilitace je u pacientů po poškození centrálního motoneuronu v akutní a subakutní fázi vždy multifaktoriální a multioborová. Abychom mohli „izolovat“ terapii s využitím VF na posturografické plošině, byli do studie zařazeni pacienti v chronické fázi po CMP. V době docházení na terapie s VF neprobíhala jiná pohybová terapie na KRL (nicméně u některých pacientů probíhala terapie jinak zaměřená – ergoterapie, logopedie). Pacienti docházeli jedenkrát týdně po dobu deseti po sobě jdoucích týdnů. Prováděli za dohledu fyzioterapeuta stejné tréninkové sekvence jako ve studii s motorickým učením mladých žen a seniorek. Posturografické vyšetření bylo provedeno na přístroji Synapsys posturography Systém před zahájením terapie a po ukončení treninkového cyklu. Získaná data byla statisticky zpracována.

4. Výsledky

Studie 1: mechanismy motorického učení mladých žen a seniorek: Skupina mladých žen a seniorek se lišily v rychlosti provedení dané tréninkové sekvence, skupina mladých žen byla schopna jednotlivé sekvence provést rychleji, tj. měla nižší časy provedení, počáteční rychlost ve skupině seniorek byla nižší, tj. časy provedení byly vyšší. Srovnání skupin je možné při použití procenta vstupních hodnot časů provedení. Jak ukazuje Tabulka 1, maxima rozdílu hodnot mezi jednotlivými týdny dosáhly obě skupiny ve druhém týdnu, přičemž trend statisticky významného rozdílu mezi jednotlivých týdny pokračoval až do 6. týdne. Od 6.

týdne bylo zlepšení statisticky významné ve všech tréninkových sekvencích ve skupině mladých žen. Ve skupině seniorek statisticky významné jen v sekvencích „spirála pravá 2“ a „spirála levá 2“.

Maximální rozdíl hodnot mezi prvním a desátým týdnem je u skupiny seniorek v tréninkové sekvenci „spirála pravá 1“, minimální rozdíl hodnot mezi prvním a desátým týdnem je v sekvenci „malé výchylky 1“. Mladé ženy dosáhly maximálního zlepšení mezi prvním a desátým týdnem v tréninkové sekvenci „spirála pravá 1“, (viz Tabulka 1)

V tréninkové sekvenci „Náhodný“, kterou nebylo možné se mentálně naučit jako sekvenci postupných cílů, bylo statisticky významné zlepšení při srovnání rozdílů mezi první a desátým týdnem a prvním a šestým týdnem ve skupině seniorek, ve skupině mladých žen bylo statisticky významné ve všech třech sledovaných intervalech. (viz Tabulka 1)

Tabulka 1 *Dynamika zlepšení v procentech počátečních hodnot pro všechny tréninkové sekvence (tréninková sekvence=test)*

		mladé	ženy	seniorky	
test	**interval týdnů**	**průměr**	**sd**	**průměr**	**sd**
stranovy 1	1→10	20.871*	9.133	17.278*	8.592
	1→6	18.548*	8.987	15.667*	8.265
	6→10	2.323*	3.779	1.611	4.738
stranovy 2	1→10	17.29*	10.113	13.5*	10.469
	1→6	14.839*	10.589	13.556*	10.308
	6→10	2.452*	4.758	-0.056	4.384
malé výchylky 1	1→10	10.226*	6.1	7*	8.866
	1→6	7.29*	6.049	6.833*	7.958
	6→10	2.935*	3.047	0.167	3.353
malé výchylky 2	1→10	10.355*	6.115	6.278*	5.616
	1→6	6.968*	6.742	5.222*	6.732
	6→10	3.387*	3.678	1.056	3.343
velké výchylky 1	1→10	18.839*	7.984	13*	8.458
	1→6	15.839*	9.218	12.333*	7.043
	6→10	3*	3.835	0.667	4.362
velké výchylky 2	1→10	19.032*	7.037	14.5*	9.073
	1→6	15.29*	6.994	13.889*	10.454
	6→10	3.742*	3.51	0.611	6.241
spirála pravá 1	1→10	21.548*	10.728	22*	12.584
	1→6	17.613*	10.724	19.833*	12.493
	6→10	3.935*	4.355	2.167	7.814
spirála pravá 2	1→10	16.677*	9.891	19.556*	10.064
	1→6	14.258*	9.948	16.444*	9.319
	6→10	2.419*	4.456	3.111*	4.017
spirála levá 1	1→10	17.452*	6.923	13.778*	8.119
	1→6	13.161*	8.621	13.778*	9.247
	6→10	4.29*	3.937	0	3.973
spirála levá 2	1→10	18.806*	6.813	16.389*	8.859
	1→6	14.839*	7.531	11.889*	10.094
	6→10	3.968*	4.461	4.5*	6.297
náhodný	1→10	14.548*	7.215	12.944*	6.92
	1→6	10.516*	6.951	11.222*	8.59
	6→10	4.032*	3.737	1.722	7.032

Studie 2: vliv motorického učení na rovnováhu: srovnávali jsme zlepšení parametrů rovnováhy, měřené na posturografické plošině testem senzorické organizace Sensory organisation test před a po tréninkovém cyklu.

Zvolili jsme tyto parametry: somatosenzorické skore v anteroposterioním směru (so AP), somatosenzorické skore v mediolaterálním směru (so ML), vestibulární skore v anteroposterioním směru (ve AP), vestibulární skore v mediolaterálním směru (ve ML), vizuální skore v anteroposterioním směru (vi AP), vizuální skore v mediolaterálním směru (vi ML). Přístroj parametry vypočítává v dílčích dat, poměřuje výsledky v jednotlivých senzorických situacích, výsledná skore jsou proto bezrozměrné hodnoty.

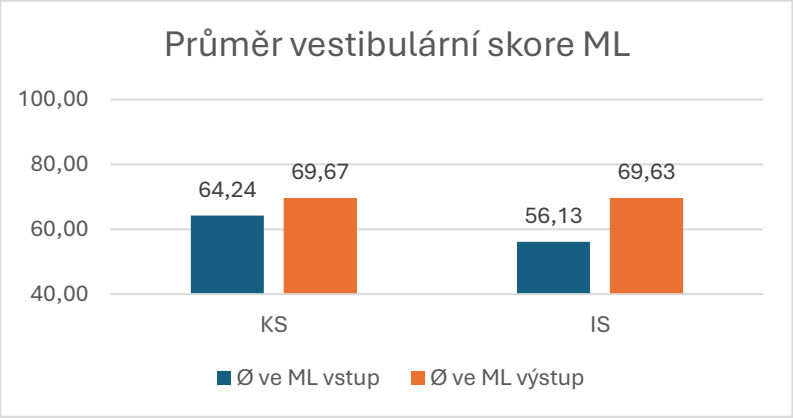
Tabulka 2 *Srovnání vstupních a výstupních hodnot průměrů jednotlivých skore*

skore	IS vstup	IS výstup	IS rozdíl	IS p	KS vstup	KS výstup	KS rozdíl	KS p
so AP	80,21	89,96	9,75	0,006275	92,61	92,91	0,3	0,8106
so ML	91,75	96,63	4,88	0,06978	94,55	96,94	2,39	0,0307
ve AP	45,63	58,08	12,45	0,00002204	55,85	58,36	2,51	0,3451
ve ML	56,13	69,63	13,5	0,000008208	64,24	69,67	5,43	0,02833
vi AP	79,08	78,04	-1,04	0,5916	80,88	86,67	5,79	0,0007382
vi ML	91,75	96,63	4,88	0,03245	84,55	88,21	3,66	0,007579

Zkratky: so AP: somatosenzorické skore v anteroposterioním směru; so ML: somatosenzorické skore v mediolaterálním směru; ve AP: vestibulární skore v anteroposterioním směru; ve ML: vestibulární skore v mediolaterálním směru; vi AP: vizuální skore v anteroposterioním směru; vi ML: vizuální skore v mediolaterálním směru;

Zvýrazněny jsou statisticky významné výsledky.

V tabulce 2 jsou statisticky zpracována popisná statistická data intervenční a kontrolní skupiny, maximální rozdíl vstupních a výstupních hodnot byl v intervenční skupině v parametru vestibulární skore ML, v kontrolní skupině ve vizuálním skore AP. Minimální rozdíl vstupních a výstupních hodnot byl v intervenční skupině v parametru vizuální skore AP, v kontrolní skupině v somatosenzorickém skore AP. Obě skupiny se zlepšily statisticky významně v parametrech vestibulární skore ML a vizuální skore ML. IS se statisticky významně zlepšila v somatosenzorickém skore AP, vestibulárním skore AP, KS v somatosenzorickém skore AP, a vizuálním skore AP.



Graf 1 *Porovnání průměrných hodnot KS a IS vestibulární skore ML* Osa Y je hodnota vestibulárního skore vypočtená přístrojem – bezrozměrné číslo

Zkratky: ve ML: vestibulární skore v mediolaterálním směru; KS: kontrolní skupina, IS: intervenční skupina

Graf 1 zobrazuje srovnání vstupních a výstupních hodnot vestibulárního skore v ML směru u obou skupin (tedy parametru

s největším rozdílem před a po terapii u IS). Rozdíl hodnot průměru vstupního a výstupního měření byl u KS statisticky významný. Rozdíl hodnot průměru vstupního a výstupního měření u IS byl také statisticky významný (viz tabulka 2).

5. Diskuse

Hlavním cílem naší studie bylo popsat a zhodnotit postup a výsledek motorického učení balančních dovedností na posturografické plošině s vizuální zpětnou vazbou u dospělých osob s poškozením centrální nervové soustavy (centrálního motoneuronu) v chronické fázi po CMP a ověřit vliv na jednotlivá senzorická skore posturografických parametrů rovnováhy. Dále jsme chtěli sledovat mechanismy motorického učení u starších osob ve srovnání s mladými při využití technik s cíleným tréninkem změny polohy těžiště s vizuální zpětnou vazbou.

Rovnováha souvisí s mobilitou a kvalitou života. Navíc patří mezi faktory, které lze potenciálně ovlivnit fyzickou aktivitou (Thilarajah S. et al. 2018). Trénink rovnováhy je proto důležitou strategií pro prevenci hypomobility a pádů nejen u starších osob a znalost procesu učení motorických rovnovážných dovedností je důležitá pro plánování tréninku pro seniory i osoby se zdravotním postižením, např. po cévní mozkové příhodě (Alhasan H. et al., 2017). Účinnost učení motorických dovedností ovlivňuje několik faktorů – věk, motivace, pozornost, zpětná vazba, praxe a opakování (Seidler RD. et al., 2014). Intenzita a pravidelnost tréninku je klíčová pro jeho efektivnost (Wang H. et al., 2013). Jedním z cílů současné rehabilitace je proto vytvořit přesná schémata rehabilitační intervence a jednotlivých terapií v různých fázích po poškození centrálního nervového systému.

Zatím panuje v této oblasti značná nejednotnost, rozdíly v typu, délce a frekvenci terapií jsou jedním z velmi proměnlivých faktorů v aplikované intervenci (Kwakkel G. et al, 2004, Todhunter-Brown A. et al., 2025).

Výsledky potvrdily zlepšení obou skupin v počátečních fázích motorického učení. Největšího zlepšení dosáhly obě skupiny ve druhém týdnu, přičemž pokrok pokračoval až do šestého týdne. Od šestého týdne bylo zlepšení obou skupin pomalejší, ale stále statisticky významné ve všech tréninkových sekvencích ve skupině mladých žen. Ve skupině seniorek bylo zlepšení statisticky významné jen v testech „spirála vpravo 2“ a „spirála vlevo 2“.

První studií jsme ověřili využitelnost posturografické plošiny s vizuální zpětnou vazbou pro motorické učení balančních dovedností, které jsme chtěli studovat v druhé fázi studie. Přenos naučených balančních dovedností z tréninkových klinických podmínek do kontextu reálného využití je důležitou součástí terapie. Převedení naučeného pohybu do dalších pohybových dovedností ale není automatické (Kitago K., Krakauer JW., 2013), proto nás zajímal dopad změny posturálních dovedností na rovnováhu.

Ve druhé studii jsme studovali vliv motorického učení na rovnováhu pacientů s poruchou centrálního motoneuronu po proběhlé CMP ve srovnání s reakcemi seniorů, tj. vliv tréninku na posturografické plošině s vizuální zpětnou vazbou na změnu parametrů rovnováhy v posturografickém vyšetření před a po tréninkovém cyklu. Vzhledem k velikosti souboru jsme nevytvářeli podskupiny podle etiologie CMP ani strany postižení.

Trénink posturálních dovedností s VF vedl u obou skupin ke zlepšení vestibulární složky rovnováhy, u intervenční skupiny statisticky velmi významně (v AP i ML směru) a prakticky se vyrovnala hodnotám kontrolní skupiny. V somatosenzorickém skore se IS zlepšila statisticky významně v obou směrech, KS se statisticky významně zlepšila pouze v ML směru. I v tomto směru se obě skupiny dostaly na podobné hodnoty skore. Skupina pacientů po CMP se tedy nejvíce zlepšila ve vestibulárním skore a naším závěrem tedy je, že rehabilitační postupy je možné a vhodné cílit na zlepšování právě tohoto senzorického vstupu.

Námi popisované studie dokazují, že trénink motorického učení je proveditelný, bezpečný a účinný při zlepšování schopností kontroly rovnováhy ve stoje. Výsledky potvrzují schopnost zlepšit rovnovážné dovednosti a aplikovat motorické učení u pacientů po CMP i seniorů. Naše závěry jsou v souladu se studiemi (Zijlstra A. et al., 2010, Janatová M. et al., 2015, Alhasah H. et al., 2017, Barcala L. et al., 2013, Laver KE. et al., 2025, Šajtárová L. et al., 2020), které použily virtuální realitu s VF během fyzioterapie a schopnost osob se zdravotním postižením nebo starších osob cvičit na stabilometrických platformách také potvrdily. V klinické praxi jsou tyto závěry využitelné jednak při organizování dlouhodobé rehabilitace, jednak v doporučeních pro samostatné cvičení pacientů v domácím prostředí.

Zhodnocení hypotéz a cílů:

Naší první hypotézou bylo, že motorické učení posturálních a balančních dovedností bude mít u mladých žen lepší parametry než u seniorek. Studie 1 ukázala, že mladé ženy se zlepšují po celou dobu tréninku (10 týdnů statisticky významně), oproti seniorkám, které se ve většině parametrů zlepšovaly do šestého

týdne. Mladé ženy mají také ve většině tréninkových sekvencí větší rozdíly mezi vstupními a výstupními hodnotami než seniorky. Hypotéza byla potvrzena.

Parametry motorického učení mladých žen svědčí pro celkově lepší učení, nicméně dynamika procesu je u obou skupin obdobná a potvrzuje schopnost seniorek se učit novým pohybovým dovednostem.

Naší druhou hypotézou bylo, že posturografické parametry rovnováhy pacientů po poškození centrálního motoneuronu budou po tréninku balančních dovedností srovnatelné s parametry seniorské skupin. Studie 2 ukázala že výstupní hodnoty vestibulárního skore v anteroposteriorním i mediolaterálním směru a somatosenzorického skore v mediolaterálním směru jsou u obou skupin prakticky totožné, somatosenzorického skore v anteroposteriorním směru jsou minimálně odlišné. Rozdíl zůstává ve vizuálním skore v anteroposteriorním i mediolaterálním směru. Hypotéza byla potvrzena částečně.

Motorické učení na posturografické plošině má pozitivní vliv především na vestibulární skore, které přestavuje zapojení vestibulárního systému do rovnováhy. Posturografické vyšetření je schopno popsat podrobněji vstupní nízké parametry i zachytit jejich změnu po terapii, přestože ve standardním klinickém vyšetření nebyly významné příznaky funkčního poškození rovnováhy pozorovány.

6. Závěry

Předložená práce zkoumala mechanismy motorického učení a jeho dopadu na rovnováhu pacientů s poškozením CNS a seniorů.

Studie prokázala, že motorické učení je využitelné i v seniorském věku a že existuje přímá souvislost mezi tréninkem balančních dovedností s využitím posturografické plošiny s vizuální zpětnou vazbou a zlepšením rovnováhy u pacientů po CMP a seniorů.

Výsledky naznačují, že tento typ terapie zlepšuje motorické dovednosti a tím může přispět ke zlepšení mobility pacientů i seniorů a snížit tak riziko komplikací z hypomobility a pádů.

Abychom více pochopili tyto mechanismy, měl by se budoucí výzkum zaměřit na délku, frekvenci a načasování opakování tréninkových cyklů na větších a heterogennějších skupinách probandů.

Z klinického hlediska by měly být zavedeny do rehabilitace pacientů po CMP terapie se zaměřením na zlepšení vestibulární senzorické složky, například terapie s vizuální zpětnou vazbou kombinovat s měkkými ev. nestabilními prvky stoje. Měli bychom připravit programy, včetně programů zaměřených na rovnováhu, pro telerehabilitaci a samostatné cvičení v domácím prostředí, a to jak pro pacienty, tak i seniory.

7. Použitá literatura

1. Alhasan, H., Hood, V., & Mainwaring, F. (2017). The effect of visual biofeedback on balance in elderly population: a systematic review. *Clinical interventions in aging*, 487-497.
2. Barcala, L., Grecco, L. A. C., Colella, F., Lucareli, P. R. G., Salgado, A. S. I., & Oliveira, C. S. (2013). Visual biofeedback balance training using wii fit after stroke: a randomized controlled trial. *Journal of physical therapy science*, *25*(8), 1027-1032.
3. Bezzola, L., Mérillat, S., & Jäncke, L. (2012). Motor training-induced neuroplasticity. *GeroPsych*. 25(4), 189-197.
4. Boudreau, S. A., Lontis, E. R., Caltenco, H., Svensson, P., Sessle, B. J., Andreasen Struijk, L. N., & Arendt-Nielsen, L. (2013). Features of cortical neuroplasticity associated with multidirectional novel motor skill training: a TMS mapping study. *Experimental brain research*, *225*(4), 513-526.
5. Čakrt, O., & Jeřábek, J. (2017). Vestibulární rehabilitace. *Neurologie pro praxi*, *18*(3), 170-173.
6. Ivanenko, Y., & Gurfinkel, V. S. (2018). Human postural control. *Frontiers in neuroscience*, *12*, 171.
7. Janatová M., Tichá M., Gerlichová M., Řeháková T., Švestková O., (2015) Terapie poruch rovnováhy u pacientky po cévní mozkové příhodě s využitím vizuální zpětné vazby a stabilometrické plošiny v domácím prostředí. *Rehabilitácia, 53(3),* 140-146.

8. Kaas JH, Neural Plasticity, International Encyklopedia of the Social and Behavioral Sciences, (2015), Second Edition, Elsevier, 619-622.
9. Kerr, A. L., Cheng, S. Y., & Jones, T. A. (2011). Experience-dependent neural plasticity in the adult damaged brain. *Journal of communication disorders*, *44*(5), 538-548.
10. Kitago, T., & Krakauer, J. W. (2013). Motor learning principles for neurorehabilitation. *Handbook of clinical neurology*, *110*, 93-103.
11. Kwakkel, G., van Peppen, R., Wagenaar, R. C., Wood Dauphinee, S., Richards, C., Ashburn, A., ... & Langhorne, P. (2004). Effects of augmented exercise therapy time after stroke: a meta-analysis. *Stroke*, *35*(11), 2529-2539.
12. Laver, K. E., Lange, B., George, S., Deutsch, J. E., Saposnik, G., Chapman, M., & Crotty, M. (2025). Virtual reality for stroke rehabilitation. *Cochrane database of systematic reviews*, (6).
13. Lorkowski, J., Raulinajtys-Grzybek, M., & Pokorski, M. (2025). Virtual Reality-Based Rehabilitation Therapy. *Physiological Research*, *74*(4), 563-569.
14. Michalčinová, K., Jeníček, J., Rogalewicz, V., Jakovcová, K., Kejhová, E., Kuželková, A., Slámová, A. (2022). Česká verze nástroje Mini-BESTest a doporučení pro jeho klinické použití. *Česká a Slovenská Neurologie a Neurochirurgie*, *85/118*(1), 49-58.
15. Potter, K., & Brandfass, K. (2015). The mini-balance evaluation systems test (Mini-BESTest). *Journal of physiotherapy*, *61*(4), 225.

16. Seidler, R. D., Bernard, J. A., Burutolu, T. B., Fling, B. W., Gordon, M. T., Gwin, J. T., ... & Lipps, D. B. (2010). Motor control and aging: links to age-related brain structural, functional, and biochemical effects. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *34*(5), 721-733.
17. Shumway-Cook A, Woollacott MH. eds. (2012) Motor control: translating research into clinical practice, 4th ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins.
18. Schmidt, R. A., Lee, T. D., Winstein, C., Wulf, G., & Zelaznik, H. N. (2018). *Motor control and learning: A behavioral emphasis*. Human kinetics.
19. Srivastava, A., Taly, A. B., Gupta, A., Kumar, S., & Murali, T. (2009). Post-stroke balance training: role of force platform with visual feedback technique. *Journal of the neurological sciences*, *287*(1-2), 89-93.
20. Sturnieks, D. L., St George, R., & Lord, S. R. (2008). Balance disorders in the elderly. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*, *38*(6), 467-478.
21. Šajtárová, L., Janatová, M., Veselý, T., Lopotová, M., Smrčka, P., & Hána, K. (2020). Randomizovaná kontrolovaná studie efektu terapie poruch rovnováhy s využitím audiovizuální zpětné vazby u seniorů. *Česká a Slovenská Neurologie a Neurochirurgie*, *83*(1).
22. Tasseel-Ponche, S., Yelnik, A. P., & Bonan, I. V. (2015). Motor strategies of postural control after hemispheric stroke. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*, *45*(4-5), 327-333.
23. Thilarajah, S., Mentiplay, B. F., Bower, K. J., Tan, D., Pua, Y. H., Williams, G., ... & Clark, R. A. (2018). Factors associated with post-stroke physical activity: a

systematic review and meta-analysis. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, *99*(9), 1876-1889.

24. Todhunter-Brown, A., Sellers, C. E., Baer, G. D., Choo, P. L., Cowie, J., Cheyne, J. D., ... & Campbell, P. (2025). Physical rehabilitation approaches for the recovery of function and mobility following stroke. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, (2).
25. Tsang, C. S., Liao, L. R., Chung, R. C., & Pang, M. Y. (2013). Psychometric properties of the Mini-Balance Evaluation Systems Test (Mini-BESTest) in community-dwelling individuals with chronic stroke. *Physical therapy*, 93(8): 1102–1115.
26. Wang, H., Camicia, M., Terdiman, J., Mannava, M. K., Sidney, S., & Sandel, M. E. (2013). Daily treatment time and functional gains of stroke patients during inpatient rehabilitation. *PM&R*, *5*(2), 122-128.
27. Wang, J., Li, Y., Yang, G. Y., & Jin, K. (2024). Age-related dysfunction in balance: a comprehensive review of causes, consequences, and interventions. *Aging and disease*, *16*(2), 714.
28. Zadravec, M., Olenšek, A., Rudolf, M., Bizovičar, N., Goljar, N., & Matjačić, Z. (2020). Assessment of dynamic balancing responses following perturbations during slow walking in relation to clinical outcome measures for high-functioning post-stroke subjects. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, *17*(1), 85.
29. Zijlstra, A., Mancini, M., Chiari, L., & Zijlstra, W. (2010). Biofeedback for training balance and mobility tasks in older populations: a systematic review. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, *7*(1), 58.

Seznam publikací:

1. publikace *in extenso,* které jsou podkladem disertace

a) s impact factorem (uvést hodnotu IF)

Kotková K. & Angerová Y. (2026). Comparison of motor learning abilities using balance training in young and senior women. *Physiological Research, přijato do tisku. IF 2.26*

2. publikace *in extenso* bez vztahu k tématu disertace

a) s IF (uvést hodnotu IF)

Marešová, D., Kotková, K., Kozler, P., & Pokorný, J. (2019). Forelimb movement disorder in rat experimental model. *Physiological Research, 68(6), 1037-1042*. IF 1,655