



Tinka Leskovec¹,
Katja Tomažini¹, Živa Majcen Rošker¹, Jernej Rošker²

Uporaba pupilometrije za vrednotenje intenzivnosti ravnotežnih nalog

Izvleček

Sposobnost ohranjanja ravnotežja je pomembna za ohranjanje neodvisnega življenja in opravljanja vsakodnevnih dejavnosti. Pomembna je tudi za izvajanje učinkovite hoje ter zmanjšanje tveganja za padce. Za ohranjanje ravnotežja skrbijo številni procesi, ki se medsebojno povezujejo: mišični, senzorični, skeletni in centralni upravljalni mehanizmi. Zapletenost teh procesov in številni vidiki s katerimi opisujemo ravnotežje otežujejo določanje enotne ocene intenzivnosti nalog ohranjanja ravnotežja. Če vadbo ravnotežja predpisujemo samo s frekvenco vadbe, tipom vadbe in njenim trajanjem, ne moramo napovedati njenega izida. Med obetavnejše pristope, s katerim bi lahko celovito ocenili intenzivnost ravnotežnih nalog oziroma njihovo zahtevnost, sodi spremljanje dilatacijskih lastnosti očesne zenice ali pupilometrija. Pupilometrija je posredno merilo delovanja možganskih funkcij in odraz kognitivnih procesov. Ker ohranjanje ravnotežja predstavlja kognitivno obremenitev, ki je odvisna od zahtevnosti naloge uravnavanja ravnotežja, starosti in od sposobnosti posameznikovega sistema za uravnavanje ravnotežja, bi lahko s pomočjo pupilometrije izmerili kognitivni napor, ki ga predstavlja opravljanje ravnotežne naloge. S tem bi lahko pridobili objektivno oceno zahtevnosti ravnotežne naloge in posledično objektivno mero njene intenzivnosti.

Ključne besede: dilatacija zenice, ravnotežje, intenzivnost naloge



Use of pupilometry to evaluate the intensity of balance tasks

Abstract

The ability to efficiently control balance is important for maintaining an independent life and performing daily activities. It also contributes to efficient walking and reducing the risk of falls. Maintaining balance is achieved by activity of interconnected systems: muscular, sensory, skeletal and central controlling mechanisms. The complexity of balance controlling processes and the many aspects with which we describe balance makes it difficult to determine uniform assessment of the balance tasks intensity. By prescribing balance training only with training frequency, type of training and its duration, the exact outcome cannot be predicted. Among the more promising approaches, with which we could comprehensively assess the intensity of balance tasks or their difficulty is by monitoring the pupil dilation or pupillometry. Pupillometry is an indirect measure of brain functions and a reflection of cognitive processes. Maintaining balance represents a cognitive load that is dependent on the difficulty of the balance task, age and the efficiency of the individual's postural control system. Based on these, pupillometry could gather more in-depth information on the involvement of the cognitive processes in performing the balance task. This could provide an objective assessment of the balance tasks difficulty and, consequently, an objective measure of its intensity.

Key words: pupil dilatation, balance, task intensity

¹Fakulteta za šport, Univerza v Ljubljani

²Fakulteta za vede o zdravju, Univerza na Primorskem, Koper

■ Uvod

Ravnotežje je pomemben del vsakodnevnih življenjskih aktivnosti, kot so sedenje, stoja, hoja in pri izvajanju manipulacij s predmeti. Dobro ravnotežje nam omogoča, da vse te aktivnosti opravljamo učinkovito. Vendar, ljudem s staranjem in prisotnostjo bolezni, upadajo živčno-mišične funkcije, kar poslabša sposobnost ohranjanja težišča telesa nad podporno površino. To lahko pomembno vpliva na kvaliteto življenja, saj prispeva k izgubi samostojnosti, zmanjšani udeležbi v vsakodnevnih življenjskih aktivnostih ter poveča možnost za padce in v skrajnih primerih tveganje za umrljivost (Shumway-Cook in Woollacott, 2012).

Dobro ravnotežje ni pomembno le za izvajanje vsakodnevnih življenjskih aktivnosti, temveč tudi za izvajanje zahtevnih in hitrih športnih gibanj. Ravnotežje v športu predstavlja pomembno motorično sposobnost predvsem iz vidika preprečevanja poškodb spodnjih udov, saj je slaba sposobnost ohranjanja ravnotežja povezana s povečanjem tveganja za nastanek poškodb (Hrysomallis, 2007). Ker lahko trening ravnotežja zmanjša incidenco športnih poškodb med mladimi odraslimi (Hübscher idr., 2010), se ravnotežna vadba pogosto izvaja v preventivni vadbi ali kot dopolnilno sredstvo pri vadbi moči.

Vsako vadbo določajo štiri pomembne komponente, ki so definirane po modelu FITT (Oberg, 2007). Prvi F predstavlja frekvenco vadbe, I intenzivnost vadbe, ki nam daje informacijo o stopnji napora, ki ga posameznik izkusi med telesno aktivnostjo, T predstavlja čas trajanja vadbe ter drugi T tip vadbe, kamor spadajo aktivnosti za razvoj posamezne sposobnosti (moči, vzdržljivosti, hitrosti, koordinacije, ravnotežja in gibljivosti). Za preverjanje odnosa med odmerkom in učinkom vadbe moramo poznati in ustrezno opredeliti vse štiri komponente po modelu FITT (Oberg, 2007). Pri predpisovanju vadbe ravnotežja se uporablja le: frekvenca vadbe, tip vadbe (proprioceptivna vadba in vaje, ki vključujejo motorične sposobnosti, kot so ravnotežje, agilnost, koordinacija, hoja in tek) in trajanje vadbe, med tem ko intenzivnost vadbe ni določena (American College of Sports Medicine, 2018). Tudi terminologija za opis intenzivnosti ravnotežnih nalog je nejasna, v primerjavi s terminologijo za opis intenzivnosti vadbe za moč ali vzdržljivost (Haas idr., 2012). Intenzivnost ravnote-

žne vadbe lahko izrazimo v absolutnih ali relativnih merah. Absolutna intenzivnost je določljiva in jo izrazimo v fizikalnih količinah (npr. hitrost gibanja oprijemališča sile reakcije podlage v m/s) (Muehlbauer Roth, Bopp in Granacher, 2012). V relativnih merah pa z deležem posameznikove največje sposobnosti (npr. delež od največje kapacitete ravnotežja). Mere, ki bi opredelila največjo kapaciteto ravnotežja ne poznamo, ker gre za zelo kompleksno sposobnost, ki je odvisna od zapletene integracije motoričnih in senzornih sistemov (Pollock, Durward, Rowe in Paul, 2000). Ker ni določena relativna mera intenzivnosti ravnotežja, ne poznamo odnosa med odmerkom in učinkom vadbe. Intenzivnost ravnotežne naloge lahko spreminjamo na različne načine: (1) z manjšanjem podporne površine (García-Massó, Pellicer-Chenoll, Gonzalez in Toca-Herrera, 2016; Muehlbauer idr., 2012), (2) s spreminjanjem dotoka senzornih informacij in spreminjanjem njihovega pomena (stabilna ali nestabilna podlaga, spremljanje dogajanja v okolju in opazovanjem premikajočega predmeta) (Barbado Murillo, Sabido Solana, Vera-Garcia, Gusi Fuertes in Moreno, 2012; Gebel, Lüder in Granacher, 2019; Muehlbauer idr., 2012; Rodrigues, Gotardi in Aguiar, 2017; Thomas, 2018; Tse idr., 2013), (3) s spreminjanjem gibanja rok (Objero, Wdowski in Hill, 2019) in (4) z dodajanjem dodatne naloge (kognitivna ali gibalna naloga) (Hsiao, Belur, Myers, Earhart in Rawson, 2020; Maki in McIlroy, 2007; Remaud, Boyas, Caron in Bilodeau, 2012). Ker poznamo več mehanizmov za povečanje intenzivnosti ravnotežne naloge, ki jih pogosto tudi prepletamo, je učinek na intenzivnost ravnotežja pogosto neznan in se zanašamo predvsem na strokovno oceno, da izbrana ravnotežna naloga za posameznika predstavlja dovolj velik izziv, ki bo povzročil akutne in kronične spremembe v mehanizmih za upravljanje drže in ravnotežja.

Namen tega članka je bil napraviti pregled znanstvene literature na temo vrednotenja intenzivnosti ravnotežnih nalog.

■ Metode

Iskanje znanstvenih člankov je potekalo preko podatkovnih baz PubMed, ScientoDirect in COBBIS. Uporabili smo naslednje ključne besede posamezno ali v medsebojni kombinaciji: »balance« AND »intensity« AND »postural control« AND »difficulty«. Vključili smo vse raziskave, ki so bile v

angleškem in slovenskem jeziku in izdane med 2010 do 2020. Skupno smo našli 183 člankov. Po pregledu naslovov in vsebine izvečka smo nekatere članke izključili, saj niso vsebovali tematike, ki smo jo obravnavali. Skupno smo v pregled vključili 15 člankov.

■ Rezultati

Študije so poskušale na različne načine ovrednotiti oziroma oceniti intenzivnost ravnotežnih nalog. Glede na način smo jih razdelili na 3 dele. Prvi del nam predstavlja študije, ki so se preko povečanja kognitivne obremenitve poskusile določiti zahtevnost ravnotežne naloge. Ta del smo razdelili še glede na pristope s katerim so vrednotili kognitivno obremenitev. V prvi poddel spadajo študije, ki so s pomočjo dodatne kognitivne naloge ovrednotile ali je bila za posameznika izvedba ravnotežne naloge zahtevnejša (Albertsen, Ghédira, Gracies in Hutin, 2017; Bustillo-Casero, Villarrasa-Sapiña in García-Massó, 2017; Remaud, Boyas, Caron in Bilodeau, 2012). Albertsen idr., (2017) so ugotovili, da med sočasno izvedbo ravnotežne naloge (različna zahtevnost ravnotežne naloge) in kognitivne naloge (odštevanje nazaj za 7), ni prišlo do sprememb v natančnosti izvedbe kognitivne naloge. Vendar pa je prišlo do povečane hitrosti nihanja telesa v vseh ravnotežnih nalogah, le pri najbolj zahtevni nalogi do tega ni prišlo (sonožna stoja z zaprtimi očmi). V tem pogoju se hitrost nihanja ni več bistveno povečala z dodajanjem dodatne kognitivne naloge. Remaud idr., (2012) so dokazali, da prihaja do statistično značilne povezave med zahtevnostjo ravnotežne naloge in dodeljevanjem virov za pozornost. Med različnimi ravnotežnimi nalogami (ravnotežno nalogo so držali 30 s) so izvajali dodatno nalogo z reakcijskim časom, kjer so se morali merjenici odzvati na slušni dražljaj. Ugotovili so, da je pri mlajših odraslih zmanjšana stabilnost, zaradi zmanjšane podporne površine ali odsotnosti vidne informacije, povezana s podaljšanjem reakcijskega časa. Bustillo-Casero idr., (2017) so ugotovili, da so mlajši odrasli in adolescenti nihal manj pri lažjih ravnotežnih nalogah (sonožna stoja) in bolj pri težjih ravnotežnih nalogah (tandemska in enonožna stoja). Posamezno ravnotežno nalogo so izvajali 35 s. Kljub temu niso ugotovili vpliva na stabilnost pri mlajših odraslih ob izvedbi dodatnih kognitivnih nalog (odštevanje nazaj za 3, 4 ali 5), med tem ko so kognitivne naloge vplivale na stabilnost

pri adolescentih. Ugotovili so tudi, da zahtevnost ravnotežne naloge ni vplivala na pravilnost izvajanja kognitivne naloge tako pri mlajših odraslih kot adolescentih. Do razlik v raziskavah lahko prihaja zaradi različnih merskih protokolov, saj so uporabljali različne dodatne naloge ter različni čas izvajanja ravnotežne naloge (30 s, 35s in 60s).

V drugi podel spadajo raziskave z elektroencefalografijo. Ugotovili so, da pri različnih zahtevnosti ravnotežne naloge (različna podporna površina ali spremembe v senzornih informacijah) prihaja do razlik pri možganskih valovih ter do aktivnosti v različnih delih možganov (Edwards, Guven, Furman, Arshad in Bronstein, 2018; Gebel, Lehmann in Granache, 2020; Hülsdünker, Mierau, Neeb, Kleinöder in Strüder, 2016; Tokuno, Keller, Carpenter, Márquez in Tabube, 2018; Tse idr., 2013; Varghese Beyer, Williams, Miyasike-daSilva in McIlroy, 2015).

V tretji podel sodi raziskava s pupilometrijo. Kahya, Wood, Sosnoff, in Devos, (2018) so s pomočjo pupilometrije (število nenadnih širitev zenice) preverili kognitivno obremenitev med izvajanjem sonožne stoji. Ugotovili so, da se je kognitivna obremenitev povečala, ko so povečali zahtevnost ravnotežne naloge, torej izvedba sonožne stoji z omejenim vidnim prilivom. Med tem, ko sej je pri rezultatih med izvajanjem samo ravnotežne naloge in ravnotežne naloge z dodatno kognitivno nalogo, pokazal nekoliko večja kognitivna aktivnost, ki ni bila statistično značilna.

V naslednji sklop smo uvrstili raziskave, ki so spremljale intenzivnosti ravnotežnih nalog s pomočjo različnih lestvic (Espy, Reinthal in Meisel, 2017; Farlie Molloy, Keating in Haines, 2016). Espy idr., (2017) so razvili 10-stopenjsko lestvico za samooceno zahtevnosti posamezne ravnotežne aktivnosti. Lestvica je podobna Borgovi lestvici za oceno napora in zagotavlja meritev intenzivnosti vadbe ravnotežja, ki jo zazna vadeči. Med tem ko so Farlie idr., (2016) poskušali intenzivnosti ravnotežnih nalog pri starejših osebah ovrednotiti s pomočjo verbalnih in neverbalnih znakov. Iz te študije so potem na podlagi teh znakov, razvili lestvico za spremljanje intenzivnosti ravnotežja, imenovano »Balance Intesity Scale«. Obe lestvici predstavljata subjektivno oceno zahtevnosti ravnotežnih nalog, ki v znanstveni literaturi še nista bili preverjeni.

V zadnji sklop smo uvrstili raziskave, ki so preko aktivacij mišic poskusile določiti intenzivnost ravnotežne naloge (García-Mas-

só, Pellicer-Chenoll, Gonzalez in Toca-Herrera, 2016; Gebel, Lüder in Granacher, 2019; Lichen, Strojnik in Tomazin, 2019). Gebel idr., 2019 so ugotovili, da se z povečanjem zahtev za ohranjanje ravnotežja, prihaja tudi do povečanja aktivacije mišic spodnjega uda in njihove koaktivacije. Lichen, Strojnik in Tomazin (2019) so poskusili določiti relativno intenzivnost ravnotežne naloge s pomočjo aktivacije mišic skočnega sklepa. Izvedli so enonožno stoji na T deski, ki je bila nestabilna v sagitalni ravnini. Ugotovili so, da odstotek maksimalne aktivacije mišic skočnega sklepa ni dobra spremenljivka, ki bi opisovala intenzivnost pri enonožni stoji na T deski.

Ker samo s frekvenco, tipom in časom trajanja ravnotežne vadbe ne moramo napovedati izida oziroma rezultata intervencije (vadbe) za izboljšanje ravnotežja (Farlie idr., 2019; Gebel, Lesinski, Behm in Granacher, 2018), je potrebno za boljše vrednotenje učinkov vadbe in njeno načrtovanje, poskati objektivne načine določanja intenzivnosti ravnotežnih nalog.

Diskusija

Namen študije je bil pregled znanstvene literature na temo vrednotenja intenzivnosti ravnotežnih nalog ter preveriti ali obstaja način s katerim bi lahko objektivno ocenili relativno intenzivnost ravnotežnih nalog. Izkazalo se je, da obstaja več različnih načinov za spremljanje intenzivnosti oziroma zahtevnosti ravnotežnih nalog, kot so pupilometrija, spremljanje aktivacije mišic spodnjega uda, spremljanje elektroencefalografske aktivnosti, z dodajanjem dodatne kognitivne naloge ter preko lestvic za oceno napora. Vsak izmed teh načinov ima svoje pomanjkljivosti in svoje prednosti. Na podlagi pregledanih študij lahko zaključimo, da v znanosti in športni praksi še ne poznamo načina s katerim bi lahko spremljali relativno mero intenzivnosti ravnotežne naloge. Glede na izsledke literature lahko predvidevamo, da sodi pupilometrija med najbolj primerne načine za vrednotenje relativne intenzivnosti ravnotežja.

Upravljanje drže in ravnotežja

Na upravljanje drže in ravnotežja vpliva veliko dejavnikov. Med glavne tri dejavnike prištevamo: (1) značilnosti ravnotežne naloge, (2) značilnosti okolja (podporna površina, zahtevnost naloge, svetloba in prevladujoči senzorni prilivi) in (3) lastnosti posameznika (motorični, senzorni in kogni-

tivni sistem) (Shumway-cook in Woollacott, 2017). K lastnostim posameznika spadajo mišično - skeletna komponenta in živčna komponenta. Pod mišično-skeletno komponento štejemo: število prostosti gibanja sklepa, mišične lastnosti in biomehanske odnose med posameznimi deli telesa, ki so povezani med seboj. Koordinacija glave s trupom in nogami je še posebej pomembna za uravnavanje drže, saj se v in na glavi ter v vratu nahajajo pomembni senzori (vestibularni aparat, oči ter številni vratni proprioceptorji) za zaznavanje in nadzor gibanja telesa in ravnotežja (Horak in Kuo, 2000). K živčnim komponentam prištevamo: kognitivne procese, ki vključujejo kognitivne vire in strategije, procese gibalnega upravljanja (kamor sodi upravljanje mišične aktivnosti), somatosenzorni sistem in spreminjanje pomena senzoričnega dotoka. K somatosenzornemu sistemu spada informacije iz vidnega senzornega sistema, vestibularnega in somatosenzornega sistema, ki centralnemu živčnemu sistemu sporočijo pomembne informacije o položaju in gibanju našega telesa (Shumway-Cook in Woollacott, 2017).

Kognitivni procesi

Kognitivni procesi človeku omogočajo interakcijo z okoljem (Trbižan in Roblek, 2013). Ti procesi so vezani na zaznavanje, razumevanje, usmerjanje pozornosti, učenje, pomnjenje in posredovanje informacij. Našteti procesi skupno predstavljajo kognitivno obremenitev. Večjo kognitivno obremenitev predstavlja izvajanje nalog, ki zahtevajo višjo stopnjo mentalne aktivnosti za izvedbo zgoraj naštetih procesov (Paas, Tuovinen, Tabbers in Van Gerven, 2003). Kognitivni napor se nanaša na velikost kognitivne kapacitete, ki je potrebna za izvajanje naloge. Kognitivna kapaciteta je skupna količina informacij, ki jih lahko naenkrat procesiramo.

Upravljanje drže in ravnotežja povzroči kognitivno obremenitev, ker ni popolnoma avtomatski proces. Določeno stopnjo kognitivne aktivnosti zahteva že opravljanje »lažjih« ravnotežnih nalog, kot je ohranjanje mirne stoji (Varghese idr., 2015). Težja kot je ravnotežna naloga, več sodelovanja višjih centrov osrednjega živčnega sistema je potrebno (Edwards idr., 2018). Študije, kjer so med izvajanjem ravnotežne naloge dodale še dodatno kognitivno nalogo, kot je glasno ali tiho računanje, uporaba prostorskega spomina, zahteve po odzivu na zunanji dražljaj ali besedne naloge, so

ugotovile, da sočasno izvajanje ravnotežne naloge moti izvajanje naštetih nalog (Hsiao idr., 2020; Kahya idr., 2018; Maki in McIlroy, 2007). Pride lahko tudi do nasprotnega učinka, da izvajanje kognitivno zahtevnih nalog vpliva negativno na izvajanje ravnotežnih nalog. Razlog za poslabšanje izvajanja kognitivno zahtevnih nalog in ravnotežja lahko pripišemo dejstvu, da si omenjeni procesi delijo omejeno kognitivno kapaciteto (Horak, 2006; Shumway-Cook in Woollacott, 2017). Bolj zapletena gibanja, kot je na primer stopanje, zahtevajo večji delež kognitivne kapacitete kot gibanja, ki ne vključuje gibanja okončin ali ohranjanja mirne stoji. Dodatna kognitivna naloga vpliva tudi na izvajanje hoje pri mlajših odraslih (Hoang, Ranchet, Derollepot, Moreau in Paire-Ficout idr., 2020). Zmanjša se hitrost in kadenca hoje ter dolžina koraka, ko se kompleksnost kognitivne naloge poveča. Torej je velikost kognitivne kapacitete, ki je potrebna za uravnavanje ravnotežja, odvisna tako od intenzivnosti naloge uravnavanja ravnotežja, starosti kot tudi od sposobnosti posameznikovega sistema za uravnavanja ravnotežja (Horak, 2006; Woollacott in Shumway-Cook, 2002).

Raziskave, ki so uporabile paradigmo dvojnih nalog, so pokazale, da se tudi pri upravljanju drže in ravnotežja lahko preseže razpoložljivo kognitivno kapaciteto, ki je na voljo za obdelavo informacij (Al-Yahya idr., 2011; Plummer-D'Amato idr., 2012; Siu, Catena, Chou, Van Donkelaar in Woollacott, 2008). Kognitivno obremenitev med upravljanjem drže in ravnotežja lahko merimo na različne načine, kot na primer s subjektivno oceno kognitivnega napora, s pomočjo sekundarne oziroma dodatne naloge in z indeksom kognitivne aktivnosti oziroma spremembe velikosti zenice (Korbach, Brünken in Park, 2018; Szulewski, Gegenfurtner, Howes, Sivilotti in van Merriënboer, 2017). Slednji pristop je bolje uporabljati za merjenje kognitivnega napora med izvajanjem gibalne naloge. Pri njeni uporabi ne potrebujemo dodatne kognitivne naloge za oceno intenzivnosti in nam omogoča oceno kognitivnega napora izbrane gibalne naloge.

Pupilometrija

Ne-invazivne meritve gibanja očesa ali širine očesne zenice omogočajo vpogled v določene vidike delovanja kognitivnih procesov (kot so usmerjenost pozornosti in učenje). Med pogostejše uporabljene metode sodi spremljanje sprememb v ve-

likosti zenice oziroma pupilometrija, hitrosti mežikanja in gibanja osrednjega vida (Eckstein, Guerra-Carrillo, Miller Singley in Bunge, 2017). Našteti pristopi omogočajo vpogled v različne procese, ki prispevajo k kognitivnim procesom. Analiza podatkov gibanja in fiksacij osrednjega vida omogoča prepoznavanje trenutne usmerjenosti pozornosti. Spontana hitrost mežikanja je posredno povezana z delovanjem dopaminskega sistema in kognitivnih procesov. Nenadna razširitev zenice kaže predvsem na kognitivni napor, ki ga predstavlja izvedba naloge.

Očesna zenica, s pomočjo katere nadziramo količino svetlobe, ki vstopa v oko in posledično ostrino vidne slike (Laeng in Dag, 2019), se lahko odzove na tri različne vrste dražljajev: (1) na svetlobo, (2) na oddaljenost predmeta (povečanje ostrine za zaznavanje določenega predmeta) in (3) odziv na povečano kognitivno aktivnost, kot sta povečana stopnja vznburjenja ali kognitivnega napora (psihosenzorni odziv zenic) (Mathôt, 2018). Za spremljanje napora kognitivnih procesov je smiselno spremljati predvsem hitre odzive zenice. Odzivi zenic so v večini refleksi, saj bo isti dražljaj vedno vodil v podoben odziv. Vendar pa lahko pride do spremembe širine zenice tudi na posreden način, saj jih modulirajo kognitivni procesi na višji ravni (Mathôt, 2018). Kot navaja Laeng in Dag, (2019) do teh sprememb pride, če si miselno predstavljamo predmet ali dogodek, ki bi po navadi normalno sprožil spontani odziv zenice (gledanje sonca ali predstava o tem, da se nahajamo v temni sobi). Spremembe sprožijo tudi kognitivne naloge, kot so računske naloge ali preprostejše naloge, kot je priklic lastne telefonske številke. Te spremembe niso posledice svetlobnih dražljajev, ampak povečane aktivnosti kognitivnih procesov, kamor spadata kognitivni napor in čustveno stanje. Ta odziv spada v tretji sklop dražljajev, ki sprožijo spremembe zenice in ga imenujemo psihosenzorni odziv, saj do njega prihaja zaradi prisotnosti psiholoških in senzoričnih dražljajev (Mathôt, 2018).

Psihosenzorni odgovor zenice

Pri psihosenzornemu odzivu zenice oziroma pri odzivu zenice, ki jih povzroči naloga, se zenica razširi, kot odziv na povečanje vznburjenja ali kognitivnega napora. Že majhne spremembe napora ali obremenitve kapacitete pozornosti pripeljejo do spremembe v premeru zenic. Torej preprosto rečeno, vse kar aktivira um, bo

povzročilo dilatacijo zenic (Mathôt, 2018). Spremembe v zenicah zaradi teh psiholoških dejavnikov oziroma kognitivno sproženih odzivov, so običajno manjše od 0,5 mm, vendar jih lahko zaznamo, kadar je svetilnost v merilnem prostoru konstantna (Eckstein idr., 2017).

Raziskave narejene v 60. letih prejšnjega stoletja so pokazale, da je velikost zenice zanesljiv pokazatelj kognitivnega napora (Hess in Polt, 1964; Kahneman in Beatty, 1966) in vznburjenja (Hess in Polt, 1960). Hess in Polt, (1964) sta ugotovila, da povečanje težavnosti računanja poveča premer zenice preiskovancev, med tem ko sta Kahneman in Beatty (1966) ugotovila, da je velikost zenice odvisna tudi od števila števil, ki so si jih morali preiskovanci zapomniti. Dilatacija zenic odraža torej razlike v kognitivnem naporu in se spreminja s stopnjo zahtevnosti nalog, kot so: aritmetične operacije, razvrščanje števk, razumevanje stavka ali besedila, zaznavanje ujemanja in pri nalogah, ki so povezane s kratkoročnim spominom ter prostorskim spominom (Eckstein idr., 2017; Laeng in Dag, 2019). Dilatacija zenic lahko odraža tudi značilnosti kognitivnih procesov posameznega merjenca (Beatty, 1982). Pri številnih kognitivnih nalogah (množenje števil, uporaba večjega številskega razpona in razumevanje stavkov), so osebe z višjimi ocenami na testih inteligence, imele manjšo dilatacijo zenic kot pa osebe z nižjimi ocenami. Kognitivna obremenitev je torej pri enakih nalogah odvisna od inteligenčnega kvocienta (celokupne kapacitete), kar lahko predstavlja neke vrste relativno intenzivnost ali kognitivni napor.

Ker se premer zenice spreminja z zahtevami naloge, lahko predstavlja tudi objektivni pokazatelj intenzivnosti kognitivne obremenitve pri udeležencih različnih starosti (Eckstein idr., 2017), oziroma lahko premer zenice uporabljamo tudi kot merilo človekovega kognitivnega napora pri izvajanju različnih nalog (Beatty, 1982). Dilatacija zenic odraža tudi ravnovesje med zahtevami nalog in posameznikovo kognitivno kapaciteto (Just, Carpenter in Miyake, 2003). Izkoriščenost kapacitete se nanaša na delež virov, ki se v danem kognitivnem sistemu porabijo v določenem časovnem intervalu. Tesna povezava med dodelitvijo virov in spremembo velikosti zenice je razvidna tudi iz študij, ki so proučevali učinek preobremenitve obdelave informacij (Laeng in Dag, 2019). Ko se obremenitev poveča (na primer število elementov, ki jih moramo držati v mislih) velikost zenice doseže raz-

širitev, ki je blizu najvišji ravni dodeljevanja virov (Laeng in Dag, 2019). Kadar zahteve kognitivne obremenitve presežejo zgornjo mejo razpoložljivih kognitivnih virov, pride do slabšanja izvajanja naloge, kar se odraža tudi v velikosti zenice, ki namesto, da bi se povečevala, hitro upada in se vrne na izhodiščno raven.

Do teh sprememb v zenicah pride, ker je nevronska pot, ki vodi do dilatacije zenice, povezana z aktivnostjo hipotalamusa in Locus coeruleus, ki sta vključena v številne vidike kognicije (Mathôt, 2018). Locus coeruleus je majhno jedro v možganskem deblu, ki igra osrednjo vlogo v regulaciji fiziološkega vzburjenja in kognitivnega delovanja, tudi preko sproščanja noradrenalina (Eckstein idr., 2017). Noradrenalin je živčni prenašalec s širokim vplivom na delovanje centralnega in perifernega živčnega sistema. Locus coeruleus je še posebej aktiven, kadar je organizem vzburjen, buden in pozoren. Podobno vlogo pri dilataciji zenic ima tudi hipotalamus, ki je zapletena struktura s številnimi povezavami in podjedri (Mathôt, 2018).

Dilatacija zenice je torej posredno merilo možganskih funkcij in odraz kognitivnih procesov, kot so povečana intenzivnost kognitivne obremenitve in posledično napor, ki ga predstavlja opravljanje zahtevnejših nalog ter usmerjanje pozornosti (Mathôt, 2018).

Ohranjanje ravnotežja in pupilometrija

Pupilometrija je objektivna meritev, ki omogoča spremljanje kognitivne obremenitve. Kahya idr., (2018) so ugotovili, da povečana zahtevnost ravnotežne naloge, kot je sonožna stoja z omejenim vidnim prilivom, poveča kognitivno obremenitev. Kognitivno obremenitev so v omenjeni študiji posredno ocenili s pupilometrijo. Višji kot je bil indeks kognitivne aktivnosti (število nenadnih širitev zenice), večja je bila kognitivna obremenitev med njeno izvedbo. Te ugotovitve kažejo, da omejen vidni priliv zahteva dodatno aktivnost predelov v možganski skorji, ki sodelujejo pri ohranjanju ravnotežja. V raziskavi so ugotovili tudi, da se hitrost nihanja telesa v anteriorno-posteriorni in medialno-lateralni smeri ni spremenila z omejevanjem vidnega priliva ali z dodajanjem dodatne kognitivne naloge, medtem ko so se vrednosti indeksa kognitivne aktivnosti znatno povečale s povečanjem zahtevnosti ravnotežne naloge (sonožna stoja z omejenim vidnim pri-

livom). To lahko nakazuje, da spremembe v mehanskih spremenljivkah gibanja telesa med ohranjanjem ravnotežja, morda niso dovolj občutljive, da bi zaznale spremembe v zahtevah ravnotežne naloge v primerjavi z odzivom zenic pri zdravih mladih odraslih. Zato bi lahko pupilometrija pomagala boljše razumeti kognitivno obremenitev, povezano s spremembami v zahtevnostih ravnotežne naloge.

Nekatere študije so uporabile dilatacijo zenice kot indikator kognitivne obremenitve med izvedbo motoričnih nalog, kot so stisk dlani, kolesarjenje na ergometru in hojo (Hayashi, Someya in Fukuba, 2010; Saeed-pour-Parizi, Hassan in Shea, 2020; White in French, 2016; Zénon, Sidibé in Olivier, 2014). Odziv zenic ima tudi odlično ponovljivost in veljavnost ponovitev testov ravnotežnih nalog z dvojno nalogo pri zdravi populaciji in ljudeh s Parkinsonovo boleznijo (Kahya idr., 2021). Kahya, Liao, Gustafson, Akinwuntan in Devos, (2019) so ugotovili, da je odziv zenice povezan tudi s spremembami v elektroencefalografski aktivnosti med izvajanjem ravnotežne naloge z dvojno nalogo. Spremembe v elektroencefalografski aktivnosti so povezane tudi s spremembami v zahtevnosti ravnotežne naloge (Gebel idr., 2020; Tokuno idr., 2018). Zato lahko odziv zenice predstavlja alternativno merilo kognitivne obremenitve med upravljanjem ravnotežja in določanja intenzivnosti ravnotežnih nalog.

Zaključek

Vadbo predpisujemo s 4 komponentami po modelu FITT. Te komponente so frekvenca vadbe, intenzivnost vadbe, čas trajanja vadbe ter tip vadbe, kamor spadajo aktivnosti za razvoj: moči, vzdržljivosti, hitrosti, koordinacije, ravnotežja in gibljivosti. Pri vadbi ravnotežja ne poznamo relativne mere intenzivnosti. Če ena izmed komponent po modelu FITT ni znana oziroma ni opredeljena, ne moremo opredeliti odnosa med odmerkom vadbe in njegovim učinkom. Zato je potrebna določiti objektivno mero relativne intenzivnosti. Pupilometrija spremlja spremembe velikosti zenice in nam nudi vpogled v intenzivnost trenutne kognitivne obdelave. Ker upravljanje drže in ravnotežja predstavlja kognitivno obremenitev, bi lahko s pomočjo pupilometrije ugotovili koliko kognitivne kapacitete je zasedene z upravljanje različnih ravnotežnih nalog. Tako bi lahko s pomočjo pupilometrije določili relativno intenzivnost

ravnotežne naloge/vadbe. Potrebno bi bilo preveriti ali se število nenadnih širitev zenice sistematično povečuje s povečevanjem intenzivnosti ravnotežne naloge, kjer sistematično zmanjšujemo podporno površino in/ali spreminjamo senzorni priliv in bi kot takšen predstavljal relativno mero intenzivnosti ravnotežne naloge.

Literatura

1. Al-Yahya, E., Dawes, H., Smith, L., Dennis, A., Howells, K., in Cockburn, J. (2011). Cognitive motor interference while walking: A systematic review and meta-analysis. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 35(3), 715–728. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2010.08.008>
2. Albertsen, I. M., Ghédira, M., Gracies, J. M., in Hutin, É. (2017). Postural stability in young healthy subjects – Impact of reduced base of support, visual deprivation, dual tasking. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 33, 27–33. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2017.01.005>
3. American College of Sports Medicine. (2018). Philadelphia: Wolters Kluwer.
4. Barbado Murillo, D., Sabido Solana, R., Vera-García, F. J., Gusi Fuertes, N., in Moreno, F. J. (2012). Effect of increasing difficulty in standing balance tasks with visual feedback on postural sway and EMG: Complexity and performance. *Human Movement Science*, 31(5), 1224–1237. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2012.01.002>
5. Beatty, J. (1982). Task-evoked pupillary responses, processing load, and the structure of processing resources. *Psychological Bulletin*, 91(2), 276–292. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.91.2.276>
6. Bustillo-Casero, P., Villarrasa-Sapiña, I., in García-Massó, X. (2017). Effects of dual task difficulty in motor and cognitive performance: Differences between adults and adolescents. *Human Movement Science*, 55(July), 8–17. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2017.07.004>
7. Eckstein, M. K., Guerra-Carrillo, B., Miller Singley, A. T., in Bunge, S. A. (2017). Beyond eye gaze: What else can eyetracking reveal about cognition and cognitive development? *Developmental Cognitive Neuroscience*, 25, 69–91. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2016.11.001>
8. Edwards, A. E., Guven, O., Furman, M. D., Arshad, Q., in Bronstein, A. M. (2018). Electroencephalographic Correlates of Continuous Postural Tasks of Increasing Difficulty. *Neuroscience*, 395, 35–48. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2018.10.040>
9. Espy, D., Reinthal, A., in Meisel, S. (2017). Intensity of Balance Task Intensity, as Measured by the Rate of Perceived Stability, is In-

- dependent of Physical Exertion as Measured by Heart Rate. *Journal of Novel Physiotherapies*, 7, 1–4. <https://doi.org/10.4172/2165-7025.1000343>
10. Farlie, M. K., Molloy, E., Keating, J. L., in Haines, T. P. (2016). Clinical markers of the intensity of balance challenge: Observational study of older adult responses to balance tasks. *Physical Therapy*, 96(3), 313–323. <https://doi.org/10.2522/ptj.20140524>
11. Farlie, M. K., Robins, L., Haas, R., Keating, J. L., Molloy, E., in Haines, T. P. (2019). Programme frequency, type, time and duration do not explain the effects of balance exercise in older adults: A systematic review with a meta-regression analysis. *British Journal of Sports Medicine*, 53(16), 996–1002. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2016-096874>
12. García-Massó, X., Pellicer-Chenoll, M., González, L. M., in Toca-Herrera, J. L. (2016). The difficulty of the postural control task affects multi-muscle control during quiet standing. *Experimental Brain Research*, 234(7), 1977–1986. <https://doi.org/10.1007/s00221-016-4602-z>
13. Gebel, A., Lehmann, T., in Granacher, U. (2020). Balance task difficulty affects postural sway and cortical activity in healthy adolescents. *Experimental Brain Research*, 238(5), 1323–1333. <https://doi.org/10.1007/s00221-020-05810-1>
14. Gebel, A., Lesinski, M., Behm, D. G., in Granacher, U. (2018). Effects and Dose–Response Relationship of Balance Training on Balance Performance in Youth: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Medicine*, 48, (9), 2067–2089. <https://doi.org/10.1007/s40279-018-0926-0>
15. Gebel, A., Lüder, B., in Granacher, U. (2019). Effects of Increasing Balance Task Difficulty on Postural Sway and Muscle Activity in Healthy Adolescents. *Frontiers in Physiology*, 10(1135), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.01135>
16. Haas, R., Maloney, S., Pausenberger, E., Keating, J. L., Sims, J., Molloy, E., ... in Haines, T. (2012). Clinical decision making in exercise prescription for fall prevention. *Physical Therapy*, 92(5), 666–679. <https://doi.org/10.2522/ptj.20110130>
17. Hayashi, N., Someya, N., in Fukuba, Y. (2010). Effect of intensity of dynamic exercise on pupil diameter in humans. *Journal of Physiological Anthropology*, 29(3), 119–122. <https://doi.org/10.2114/jpa2.29.119>
18. Hess, H. E., in Polt, M. J. (1960). Pupil Size as Related to Interest Value of Visual Stimuli. *Science*, 132(3423), 349–350. <https://doi.org/10.1126/science.132.3423.349>
19. Hess, H. E., in Polt, M. J. (1964). Pupil Size in Relation to Mental Activity during Simple Problem-Solving. *Science*, 143(3611), 1190–1192. <https://doi.org/10.1126/science.143.3611.1190>
20. Hoang, I., Ranchet, M., Derollepot, R., Moreau, F., in Paire-Ficout, L. (2020). Measuring the Cognitive Workload During Dual-Task Walking in Young Adults: A Combination of Neurophysiological and Subjective Measures. *Frontiers in Human Neuroscience*, 14(November), 1–10. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2020.592532>
21. Horak, F. B. (2006). Postural orientation and equilibrium: What do we need to know about neural control of balance to prevent falls?, 35(S2), ii7–iii1. <https://doi.org/10.1093/ageing/af077>
22. Horak, F., in Kuo, A. (2000). Postural Adaptation for Altered Environments, Tasks, and Intentions. V Winters, J.M. in P. E. Crago (Ur), (str. 267–281). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2104-3_19
23. Hrysomallis, C. (2007). Relationship between balance ability, training and sports injury risk. *Sports Medicine*, 37(6), 547–556. <https://doi.org/10.2165/00007256-200737060-00007>
24. Hsiao, D., Belur, P., Myers, P. S., Earhart, G. M., in Rawson, K. S. (2020). The impact of age, surface characteristics, and dual-tasking on postural sway. *Archives of Gerontology and Geriatrics*, 87, 103973. <https://doi.org/10.1016/j.archger.2019.103973>
25. Hübscher, M., Zech, A., Pfeifer, K., Hänsel, F., Vogt, L., in Banzer, W. (2010). Neuromuscular Training for Sports Injury Prevention: A Systematic Review. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 42(3), 413–421. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181b88d37>
26. Hülshdünker, T., Mierau, A., in Strüder, H. K. (2016). Higher balance task demands are associated with an increase in individual alpha peak frequency. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9, 1–12. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00695>
27. Just, M. A., Carpenter, P. A., in Miyake, A. (2003). Neuroindices of cognitive workload: Neuroimaging, pupillometric and event-related potential studies of brain work. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 4(1–2), 59–88. <https://doi.org/10.1080/14639220210159735>
28. Kahneman, D., in Beatty, J. (1966). Pupil Diameter and Load on Memory. *Science*, 154(3756), 1583–1586. <https://doi.org/10.1126/science.154.3756.1583>
29. Kahya, M., Liao, K., Gustafson, K., Akinwuntan, A., in Devos, H. (2019). Validation of Pupillary Response Against EEG during Dual-Tasking Postural Control. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 100(10), eE42. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2019.08.434>
30. Kahya, M., Lyons, K. E., Pahwa, R., Akinwuntan, A. E., He, J., in Devos, H. (2021). Reliability and Validity of Pupillary Response During Dual-Task Balance in Parkinson Disease. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 102(3), 448–455. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2020.08.008>
31. Kahya, M., Wood, T. A., Sosnoff, J. J., in Devos, H. (2018). Increased postural demand is associated with greater cognitive workload in healthy young adults: A pupillometry study. *Frontiers in Human Neuroscience*, 12(288), 1–8. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00288>
32. Korbach, A., Brünken, R., in Park, B. (2018). Differentiating Different Types of Cognitive Load: a Comparison of Different Measures. *Educational Psychology Review*, 30(2), 503–529. <https://doi.org/10.1007/s10648-017-9404-8>
33. Laeng, B., in Dag, A. (2019). Pupillometry. V C. Klein in U. Ettinger (Ur), (str. 449–502). Springer Nature Switzerland AG. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20085-5_6
34. Liden, J., Strojnik, V., in Tomazin, K. (2019). Could Ankle Muscle Activation Be Used as a Simple Measure of Balance Exercise Intensity? *Journal of Human Kinetics*, 70(1), 47–59. <https://doi.org/10.2478/hukin-2019-0037>
35. Maki, B. E., in Mclroy, W. E. (2007). Cognitive demands and cortical control of human balance-recovery reactions. *Journal of Neural Transmission*, 114(10), 1279–1296. <https://doi.org/10.1007/s00702-007-0764-y>
36. Mathôt, S. (2018). Pupillometry: Psychology, Physiology, and Function. *Journal of Cognition*, 1(1), 1–23. <https://doi.org/10.5334/joc.18>
37. Melzer, I., Damry, E., Landau, A., in Yagev, R. (2011). The influence of an auditory-memory attention-demanding task on postural control in blind persons. *Clinical Biomechanics*, 26(4), 358–362. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2010.11.008>
38. Muehlbauer, T., Roth, R., Bopp, M., in Granacher, U. (2012). An Exercise Sequence For Progression In Balance Training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 26(2), 568–574.
39. Oberg, E. (2007). Physical activity prescription: Our best medicine. *Integrative Medicine*, 6(5), 18–22. http://www.imjournal.com/resources/web_pdfs/popular/1007_oberg.pdf
40. Objero, C. N., Wdowski, M. M., in Hill, M. W. (2019). Can arm movements improve postural stability during challenging standing balance tasks? *Gait and Posture*, 74, 71–75. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2019.08.010>
41. Paas, F., Tuovinen, J. E., Tabbers, H., in Van Gerven, P. W. M. (2003). Cognitive load measurement as a means to advance cognitive load theory. *Educational Psychologist*, 38(1), 63–71. https://doi.org/10.1207/S15326985EP3801_8
42. Plummer-D'Amato, P., Brancato, B., Dantowitz, M., Birken, S., Bonke, C., in Furey, E. (2012). Effects of gait and cognitive task difficulty on cognitive-motor interference in aging. *Journal of Aging Research*, 2012(1). <https://doi.org/10.1155/2012/583894>
43. Pollock, A. S., Durward, B. R., Rowe, P. J., in Paul, J. P. (2000). What is balance? *Clinical*

- Rehabilitation*, 14(4), 402–406. <https://doi.org/10.1191/0269215500cr342oa>
44. Remaud, A., Boyas, S., Caron, G. A. R., in Bilocheau, M. (2012). Attentional demands associated with postural control depend on task difficulty and visual condition. *Journal of Motor Behavior*, 44(5), 329–340. <https://doi.org/10.1080/00222895.2012.708680>
45. Rodrigues, S. T., Gotardi, G., in Aguiar, S. A. (2017). Effects of vision on postural control in neurologically healthy individuals. V. F. A. Barbieri in R. Vitorio (ur.), (str. 219–236). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-48980-3>
46. Saeedpour-Parizi, M. R., Hassan, S. E., in Shea, J. B. (2020). Pupil diameter as a biomarker of effort in goal-directed gait. *Experimental Brain Research*, 238(11), 2615–2623. <https://doi.org/10.1007/s00221-020-05915-7>
47. Shumway-Cook, A., in Woollacott, M. H. (2017). (5th izd.). Wolters Kluwer.
48. Siu, K. C., Catena, R. D., Chou, L. S., Van Donkelaar, P., in Woollacott, M. H. (2008). Effects of a secondary task on obstacle avoidance in healthy young adults. *Experimental Brain Research*, 184(1), 115–120. <https://doi.org/10.1007/s00221-007-1087-9>
49. Szulewski, A., Gegenfurtner, A., Howes, D. W., Sivilotti, M. L. A., in van Merriënboer, J. J. G. (2017). Measuring physician cognitive load: validity evidence for a physiologic and a psychometric tool. *Advances in Health Sciences Education*, 22(4), 951–968. <https://doi.org/10.1007/s10459-016-9725-2>
50. Thomas, N. M. (2018). (Doktorska disertacija, University of Cumbria). Pridobljeno s <http://insight.cumbria.ac.uk/id/eprint/3755/>
51. Tokuno, C. D., Keller, M., Carpenter, M. G., Márquez, G., in Taube, W. (2018). Alterations in the cortical control of standing posture during varying levels of postural threat and task difficulty. *Journal of Neurophysiology*, 120(3), 1010–1016. <https://doi.org/10.1152/jn.00709.2017>
52. Trbižan, B., in Roblek, V. (2013). Pomen kognitivnih in afektivnih procesov pri delu z računalnikom. *Revija za univerzalno odličnost*, 2(2), A12–A24. Pridobljeno s http://www.fos.unm.si/media/pdf/RUO_2013_07_Trbizan_Roblek.pdf
53. Tse, Y. Y. F., Petrofsky, J. S., Berk, L., Daher, N., Lohman, E., Laymon, M. S., in Cavalcanti, P. (2013). Postural sway and Rhythmic Electroencephalography analysis of cortical activation during eight balance training tasks. *Medical Science Monitor*, 19, 175–186. <https://doi.org/10.12659/MSM.883824>
54. Varghese, J. P., Beyer, K. B., Williams, L., Miyasike-daSilva, V., in McIlroy, W. E. (2015). Standing still: Is there a role for the cortex? *Neuroscience Letters*, 590, 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2015.01.055>
55. White, O., in French, R. M. (2016). Pupil Diameter May Reflect Motor Control and Learning. *Journal of Motor Behavior*, 49(2), 141–149. <https://doi.org/10.1080/00222895.2016.1161593>
56. Wollesen, B., Voelcker-Rehage, C., Regenbrecht, T., in Mattes, K. (2016). Influence of a visual-verbal Stroop test on standing and walking performance of older adults. *Neuroscience*, 318, 166–177. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2016.01.031>
57. Woollacott, M., in Shumway-Cook, A. (2002). Attention and the control of posture and gait: A review of an emerging area of research. *Gait and Posture*, 16(1), 1–14. [https://doi.org/10.1016/S0966-6362\(01\)00156-4](https://doi.org/10.1016/S0966-6362(01)00156-4)
58. Zénon, A., Sidibé, M., in Olivier, E. (2014). Pupil size variations correlate with physical effort perception. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 8(286), 1–8. <https://doi.org/10.3389/fnbeh.2014.00286>

Tinka Leskovec, dipl. kin.
tinka.leskovec@gmail.com