



Monitoriranje moždane oksigenacije

Brain oxygenation monitoring

Miljenko Crnjaković¹

¹Zavod za neurologiju, Klinička bolnica „Dubrava“

Deskriptori

CEREBRALNA OKSIGENACIJA;
JUGULARNA VENSKA SATURACIJA KISIKOM;
PARCIJALNI TLAK O₂ U MOŽDANOM TKIVU;
NEAR-INFRACRVENA SPEKTROSKOPIJA

Descriptors

CEREBRAL OXYGENATION;
JUGULAR VENOUS SATURATION;
BRAIN TISSUE OXYGEN TENSION;
NEAR-INFRARED SPECTROSCOPY

Moždana cirkulacija je normalno regulirana putem nekoliko složenih mehanizama kao što su metabolički, kemijski i neurološki stimulusi, autoregulatorski mehanizmi, te perfuzijski tlak. Iako mozak čini otprilike 2% tjelesne težine, ukupni protok krvi kroz mozak iznosi oko 50/100 ml/g/min što je približno 750 ml ili 10–15% ukupnog minutnog obujma srca u bazalnim uvjetima, a uz to troši i otprilike 20% ukupnog kisika i 25% tjelesne glukoze (1,2). Oko 80% tog protoka usmjereno je u sivu tvar, a 20% u bijelu (2,3). Fiziološke promjene, različite bolesti ili ozljede utječu na moždanu cirkulaciju, a posljedično tome i na zasićenost moždane krvi kisikom. Pacijenti u Jedinicama intenzivnog liječenja (JIL), a s akutnom moždanom ozljedom, pod povećanim su rizikom razvoja sekundarne ozljede mozga posljedično ishemijski, hipoksiji (tj. anoksiji) ili uslijed porasta intrakranijskog tlaka. Upravo je prevencija sekundarne ozljede mozga jedan od primarnih ciljeva monitoriranja moždane oksigenacije. Održavanje adekvatne opskrbe mozga kisikom, sukladno njegovim metaboličkim potrebama, je ključan korak u liječenju pacijenata s akutnom ozljedom

SAŽETAK. Održavanje adekvatne opskrbe mozga kisikom sukladno metaboličkim potrebama ključan je korak u zbrinjavanju pacijenta s akutnom ozljedom mozga u okviru Jedinice intenzivnog liječenja (JIL), bilo da se radi o pacijentima s traumatskom ozljedom mozga (eng. Traumatic brain injury, TBI), intracerebralnim (ICH) ili subarahnoidalnim krvarenjem (SAH), odnosno o perioperativnom zbrinjavanju pacijenata u okviru neurokirurških, kardiokirurških ili zahvata vaskularne kirurgije. Ti su pacijenti pod povećanim rizikom razvoja sekundarne ozljede mozga posljedično hipoksiji i ishemijski. Upravo je s ciljem sprječavanja sekundarne ozljede mozga započeto s monitoriranjem moždane oksigenacije. Dostupne se metode mogu podijeliti na neinvazivne – trenutno je jedina dostupna near-infracrvena spektroskopija (NIRS), i invazivne poput monitoriranja jugularne venske saturacije kisikom (SjvO₂) i monitoriranja parcijalnog tlaka kisika u moždanom parenhimu (PtiO₂). Svaka od metoda ima svoje prednosti, ali i nedostatke, uz mjesto u kliničkom radu, te će isti uz opis metode i kliničku primjenu biti prikazani u ovom radu.

SUMMARY. Maintaining an adequate oxygen supply to the brain in accordance with metabolic needs is a key step in the management of patients with acute brain injury in the Intensive Care Unit (ICU), whether they are patients with traumatic brain injury (TBI), intracerebral (ICH) or subarachnoid hemorrhage (SAH), or during the perioperative care of patients in whom neurosurgical, cardiosurgical or vascular surgery procedures are planned. These patients are at increased risk of developing secondary brain injury as a result of hypoxia and ischemia. Brain oxygenation monitoring was developed with the aim of preventing secondary brain injury. Available methods can be divided into non-invasive – currently the only one available is near-infrared spectroscopy (NIRS), and invasive such as monitoring of jugular venous oxygen saturation (SjvO₂) and monitoring of the partial pressure of oxygen in the brain parenchyma (PtiO₂). Each of the methods has its own advantages and disadvantages, with its purpose in clinical setting, and the same will be presented in this paper along with the description of the method and its clinical application.

mozga (4). Razvojem medicine i tehnologije, u upotrebu se stavljaju nove metode monitoriranja moždane oksigenacije. Općenito govoreći, tehnike koje se koriste u tu svrhu mogu se podijeliti na neinvazivne i invazivne, te će iste u ovom radu biti ukratko predstavljene, uz mehanizam djelovanja, tehniku izvođenja, moguće prednosti i nedostatke.

Metode

Unutarnja jugularna vena jedna je od glavnih struktura za odvod deoksigenirane krvi iz mozga i površinskih regija glave i vrata. Iz kranijuma izlazi kroz jugularni otvor na bazi lubanje. Iako je krv u jugularnom bulbusu podrijetla objiju moždanih hemisfera (70% ipsilateralne i 30% kontralateralne), smatra se da većina osoba ima dominantnu stranu venske drenaže (5–8).

✉ Adresa za dopisivanje:

Miljenko Crnjaković, <https://orcid.org/0000-0003-3326-6166>
Zavod za neurologiju, Klinička bolnica „Dubrava“,
e-pošta: mcrnjakovi@kdb.hr

U početnom toku nalazi se proširenje unutarnje jugularne vene, a koje se naziva jugularni bulbus.

Monitoriranje jugularne venske saturacija kisikom ($SjvO_2$) invazivna je metoda kojom se intermitentno uzimaju uzorci iz katetera lociranog u jugularnom bulbusu ili kontinuirano uz pomoć fiberoptičkog katetera (9). Jugularni bulbus nalazi se uz bazu lubanje, te se preferira za uzorkovanje krvi. Ako se radi o pacijentima s obostranom moždanom ozljedom, preporuča se postavljanje katetera u unutarnju jugularnu venu s dominantnom drenažom, a što je uglavnom s desne strane (7,10,11). U slučajevima fokalne (žarišne) moždane ozljede, nažalost još se uvijek vode rasprave o tome treba li kateter biti postavljen na stranu ipsilateralnoj ozljedi, bez jasnog konsenzusa (11). $SjvO_2$ se koristi za indirektnu evaluaciju potrošnje kisika moždanog parenhima, a reflektira dinamiku između opskrbe mozga kisikom i njegove potrošnje (11). $SjvO_2$ označava postotak oksigeniranog hemoglobina, a povezan je s opskrbom cijelog mozga kisikom (whole-brain oxygen supply) i njegovom potrošnjom (12). Normalan raspon $SjvO_2$ je 55–75% (13). Prema podacima iz literature, terapijski postupci s ciljem povećavanja cerebralne oksigenacije se predlažu kada $SjvO_2$ padne ispod 50%. U stanjima kada je moždana potrošnja kisika veća od opskrbe vrijednosti $SjvO_2$ bit će snižene (12). Kada moždani protok krvi padne ispod kritičnog praga, postupno dolazi do pada i u moždanoj potrošnji kisika i posljedičnog prelaska s aerobnog na anaerobni metabolizam, a što onda za posljedicu ima porast vrijednosti laktata u krvi. S druge strane, dok je opskrba mozga kisikom veća od njegove potrošnje, vrijednosti $SjvO_2$ će rasti (12).

Dva najčešće korištena sistema u kliničkoj praksi za monitoriranje jugularne venske saturacije kisikom su Abottov i Baxter – Edwardsov sistem. Svaki se sastoji od procesora, optičkog modula i fiber – katetera. Tijekom procesa monitoriranja, svjetlo sastavljeno od dviju ili više valnih duljina (u Baxter – Edwardsovu od dvije, u Abottovu od tri valne duljine) je dostavljeno u krv na željenom mjerenom mjestu preko optičkog vlakna u kateteru. Svjetlost se potom reflektira od eritrocita prema fotoelektričnom senzoru koji se nalazi u drugom optičkom vlaknu. Apsorpcija svjetla ovisi o različitim koncentracijama oksigeniranog hemoglobina u krvi (11,14). Fotosenzor mjeri apsorpciju reflektiranog svjetla na različitim valnim duljinama s $SjvO_2$, što se očituje kao postotak oksigeniranog oksihemoglobina prema ukupnom hemoglobinu.

$SjvO_2$ je metoda koja se često koristi u kliničkoj praksi. Najčešće se radi o pacijentima s traumatskim ozljedama glave, a koji se zbrinjavaju neurokirurškim zahvatima, ili za praćenje kardiokirurških pacijenata (15). Metoda se može koristiti i prilikom praćenja pacijenata s moždanim udarom (16). Neurološki ispadi nerijet-

ka su komplikacija kardiokirurških zahvata, npr. prilikom ugranje kardiopulmonalnih bypassa, a prvenstveno u fazi zagrijavanja nakon hipotermijskog kardiopulmonalnog bypassa (dolazi do $SjvO_2$ desaturacije) (17). Matta i sur. istraživali su učinkovitost intraoperativnog korištenja kateterizacije jugularnog bulbusa s ciljem praćenja pacijenata koji idu na neurokirurški zahvat. Prema njima metoda je brza, praktična i učinkovita u detektiranju cerebralne desaturacije, a kasnije i usmjeravanju prema liječenju (18). Moss i sur. proučavali su koristi $SjvO_2$ mjerenja u pacijenata podvrgnutih postavljanju klipsi na cerebralnih aneurizmama, te su došli do zaključka kako su te vrijednosti, zajedno s vrijednostima serumskih laktata, korisne u praćenju pacijenata sa SAH-om (19).

Relativne kontraindikacije za $SjvO_2$ monitoring su ozljeda cervikalne kralježnične moždine, prisutnost traheostome ili koagulopatije. Komplikacije mogu biti punkcija karotidne arterije, nastanak pneumotoraksa ili ozljeda živčanih struktura vrata. Također, nedostaci pretrage su i rizik nastanka hematoma, koji raste s duljinom monitoriranja, i opasnost razvoja venske tromboze. Također, pretraga je manje osjetljiva na regionalnu (lokalnu) cerebralnu ishemiju i hipoksiju. Niske vrijednosti $SjvO_2$ uvijek govore u prilog smanjenom moždanom protoku krvi, dok uredne vrijednosti ne isključuju regionalnu (udaljenu) ishemiju (12). Nadalje, još neka od ograničenja ove pretrage su kontaminacija uzorka ekstrakerebralnom krvi (otprilike 3% krvi iz jugularnog bulbusa je podrijetla moždanih ovojnica – meningi i mekog oglavka), slabija osjetljivost na infratentorijska zbivanja, prethodno spomenuta manja osjetljivost na lokalnu ishemiju, te lažno negativne visoke vrijednosti $SjvO_2$ radi pomaka ulijevo krivulja disocijacije oksihemoglobina tijekom alkalnih uvjeta (Bohrov efekt) (11).

Monitoriranje pacijalnog tlaka kisika u moždanom parenhimu ($PtiO_2$) invazivna je metoda mjerenja moždane oksigenacije, pomoću koje se prate parcijalni tlak kisika, temperatura i pH moždanog tkiva pomoću implantiranih mikroelektroda/katetera opremljenih sensorima kisika. Mjerenje $PtiO_2$ može detektirati je li moždani parenhim pretrpio ireverzibilna oštećenja posljedično moždanoj ishemiji ili hipoksiji. Prema podacima iz literature upravo se ova metoda smatra zlatnim standardom monitoriranja moždane oksigenacije uz krevet bolesnika (20). $PtiO_2$ kao metoda često se koristi za monitoriranje moždane oksigenacije u pacijenata kod kojih se istovremeno mjeri i intrakranijski tlak (ICP). Kateteri za određivanje $PtiO_2$ veličinom su slični intraparenhinskim ICP monitorima, a postavljaju se u subkortikalnu bijelu tvar, a kroz jedan ili više otvora. Očitavanja $PtiO_2$ vrijednosti su nepouzdana prvi sat nakon postavljanja, radi čega ova metoda nije praktična za intraoperativna mjerenja. Ispravno pozicioni-

ranje proba potvrđuje se prije početka monitoriranja upotrebom „testa kisikom“, a koji bi se trebao svakodnevno ponavljati. Normalan odgovor iznosi povećanje od 200% ili više od bazalne PtiO₂ vrijednosti nakon povećanja frakcije udahnutog kisika (FiO₂) na 1.0 tijekom 20 minuta (prilikom interpretacije rezultata treba uzeti u obzir i eventualni poremećaj plućne funkcije) (9). Uz navedeno, lokacija probe potvrđuje se i kompjuteriziranom tomografijom (CT). Kao što je i prethodno rečeno, za monitoriranje PtiO₂ izrazito je važno ispravno pozicioniranje elektroda obzirom da se radi o fokalnim/žarišnim mjerenjima. Područje od interesa uglavnom je veličine do 17 mm (9,11). U pacijenata s intracerebralnim krvarenjem (ICH) ili traumatskim ozljedama mozga sugerira se perilezionalno postavljanje proba, dok se u pacijenata s aneurizmatiskim SAH-om probe postavljaju u odgovarajući vaskularni teritorij (9). U slučajevima difuzne ozljede mozga probe se dogovorno postavljaju u nedominantni frontalni režanj (9). U literaturi se mogu pronaći različiti uredni rasponi PtiO₂ vrijednosti i donje granice za ishemijsku, te nažalost, još uvijek, ne postoji univerzalno prihvaćene referentne vrijednosti. Prema Tisdallu i sur. normalan raspon PtiO₂ je 35–50 mmHg, dok su vrijednosti 5–20 mmHg indikativne za ishemijsku (21). S druge strane, prema Schmidtu granične vrijednosti PtiO₂ su 15–20 mmHg, dok sve vrijednosti ispod toga su prediktor lošijeg ishoda (22). Međutim, generalno se smatra kako vrijednosti ispod 15 mmHg zahtijevaju hitno zbrinjavanje (12). PtiO₂ predstavlja dinamički kompleks, a koji odražava ravnotežu između moždane opskrbe kisikom i njegove potrošnje. Smanjenje vrijednosti PtiO₂ uzrokovano je ili povećanim moždanim metabolizmom ili nedostatnom opskrbom mozga kisikom (12)

Monitoriranje PtiO₂ prvi je puta korišteno u zbrinjavanju pacijenata s teškim traumatskim ozljedama mozga (TBI, eng. traumatic brain injury), te je navedeno i danas primarna indikacija za korištenje ove metode. Osim navedenog, indikacije za upotrebu PtiO₂ jesu monitoriranje pacijenata u jedinicama intenzivnog liječenja (JIL), zatim monitoriranje pacijenata sa SAH-om i ICH-om, kao i perioperativno monitoriranje u sklopu zbrinjavanja aneurizmatiskih krvarenja, arteriovenskih malformacija (AVM) ili u sklopu cerebralne angiografije (9). Reducirane perihematomske vrijednosti PtiO₂ povezane su s lošijim ishodom (23). Metoda je rijetko korištena u pedijatrijskoj populaciji, a većina objavljenih radova odnosi se na praćenje djece s teškim traumatskim ozljedama mozga (24). Prema Lysonu i sur. određivanje PtiO₂ korisna je metoda i u praćenju pacijenata podvrgnutih endoskopskoj kirurgiji baze lubanje, najčešće zbog tumoskih tvorbi (25). Tijekom kirurškog zbrinjavanja aneurizmatiskog SAH-a, niske vrijednosti PtiO₂ indikativne su za po-

stoperativni vazospazam i prediktor su lošije prognoze (26).

Prednost ove metode je što se u stvarnom vremenu može monitorirati područje od interesa, uz nizak rizik razvoja hematoma (<2%) i infekcija. Ova metoda moguć je indikator i moždane smrti jer PtiO₂ brzo pada do 0kPa u ranim fazama moždane smrti (9,12). Dings i sur. ocjenjivali su tehničku i dijagnostičku pouzdanost PtiO₂ u pacijenata koji su pretrpjeli tešku traumu glave, kod kojih je dijagnosticirano subarahnoidalno krvarenje (SAH) i kod pacijenata kod kojih je došlo do kliničke deterioracije posljedično vazospazmu. PtiO₂ monitoriranje je provedeno dok god je bilo potrebe i za monitoriranjem ICP, a najdulje vrijeme monitoriranja iznosilo je 16 dana. Prema njihovim rezultatima, u 1.7% pacijenata došlo je do nastanka manjih hematoma, dok infekcije nisu zabilježene ni kod jednog pacijenta. Tehničke komplikacije uključujući dislokaciju ili defekt probe detektirane su u 13.6% slučajeva. Prema autorima, praćenje PtiO₂ koje odražava područje 17 do 27 mm ispod dure, sigurna je i pouzdana metoda monitoriranja moždane oksigenacije (27). Kienning i sur. uspoređivali u monitoriranje SjvO₂ i PtiO₂ u 15 pacijenata s teškim ozljedama mozga. Monitoriranje PtiO₂ pokazalo se kao učinkovita i sigurna metoda, bez posljedičnih krvarenja i infekcija, a koja je u usporedbi sa SjvO₂ pogodnija za potrebe duljih monitoriranja (28). S druge strane, radi se o invazivnoj metodi kod koje je ključno ispravno pozicioniranje proba. Obzirom da se monitorira točno određena regija (fokalno monitoriranje), moguće je propustiti patologiju udaljenu od mjesta monitoriranja, kao što i probe postavljene u područje moždane ozljede mogu „izmijeniti“ sliku globalnog moždanog metabolizma, tj. globalne procjene moždane oksigenacije. Tehničke komplikacije koje uključuju dislokaciju probe dosežu i do 13.6% (9,27), a uz to postoji i ključni period od jednog sata od postavljanja probe za vrijeme kojeg su očitavanja nepouzdana, radi čega ova metoda nije pogodna intraoperativnoj upotrebi (9).

Near – infracrvena spektroskopija (NIRS) jedina je do sada dostupna neinvazivna tehnika, točnije optička tehnika, praćenja moždane oksigenacije, čija se upotreba znatno proširila u posljednjem desetljeću. NIRS tehnika prvi put je opisana 1977. godine od strane Franza Jöbsisa, renomiranog predavača Duke Sveučilišta, a čije je područje interesa bila molekularna i stanična biologija. On je opisao NIRS tehniku pri proučavanju cerebralne i miokardijalne nedostatnosti kisikom i cirkulatorne parametre. Postavio je dva temeljna principa NIRS tehnike, a to su: svjetlost u NIR spektru (700–950 nm) može proći kroz biološko tkivo zbog relativne prozirnosti tkiva prema svjetlosti u danom rasponu valnih duljina, a uz to i nekoliko bioloških molekula, takozvani kromofori, imaju različite apsorp-

cijske spektre u NIR (29). Glavne kromofore za NIRS tehniku su oksihemoglobin (HbO_2) i deoksihemoglobin (HHb) (30). NIRS se temelji na transmisiji i apsorpciji svjetlosti iz NIR spektra dok prolazi kroz biološka tkiva. Svjetlost se stvara na određenim valnim duljinama, uglavnom diodama koje emitiraju svjetlost, a detektiraju je silicijske fotodiode (31). Alternativne metode detekcije su fotomultiplikatorske cijevi u starijim uređajima i nabojno spregnuti uređaji. Emitirajući i detektirajući uređaju često se nazivaju i optode (30). U idealnoj situaciji, gdje bi jedini uzrok atenuacije svjetlosti između izvora i detektora bila njegova apsorpcija kromoforima, atenuacija svjetlosti na danoj valnoj duljini opisuje Lambert-Beerov zakon, prema kojemu je atenuacija izravno proporcionalna trima čimbenicima: koncentraciji kromofora, koeficijentu apsorpcije kromofora (apsorpcijska svojstva na određenoj valnoj duljini) i udaljenosti svjetlosti od izvora do detektora (30). Za razliku od opisane idealne situacije, biološko je tkivo, odnosno ljudski organizam, mnogo kompleksniji. U NIR spektru je raspršenje svjetlosti to koje najviše pridonosi atenuaciji u većini bioloških tkiva, pa tako i na području glave odraslih osoba (32). Nadalje, sva svjetlost koja se emitira ne dopiše do detektora zbog raspršenja, a svjetlost koja i dopiše do detektora može biti raspršena i do nekoliko puta, stoga je prešla veću udaljenost od stvarne udaljenosti izvor-detektor (30). Sve se NIRS tehnike zasnivaju na mjerenju optičke atenuacije što je ukupni gubitak svjetlosti uzrokovan apsorpcijom i raspršivanjem. Nekoliko je tehnika koje se koriste za to: diferencijalna spektroskopija koja koristi modificirani Lambert-Beerov zakon, spektroskopija na više udaljenosti, koja se naziva i prostorno – razlučna spektroskopija (SRS) – često korištena u komercijalnim cerebralnim oksimetrima, frekvencijski razlučena (ili domenska) spektroskopija i vremenski razlučna spektroskopija. Sve navedene tehnike i metodologije zahtijevaju potom i složene algoritmove i formule za konkretne izračune, a sama se vrijednost zasićenja kisikom u cerebralnoj krvi procjenjuju se korištenjem prediktivnih modela (12,33). Jedna od najčešće korištenih i spominjanih metoda je i modificirani Lambert – Beerov zakon, a koji nam omogućuje kvantificiranje promjene u koncentracijama HbO i HbR od apsorpcije bliskog infracrvenog svjetla (33). Dostupni su različiti komercijalni cerebralni oksimetri, kao što je INVOS odobren 1990. godine od strane američke FDA (eng. Food and Drug Administration), ali i različiti uređaji Somanetics grupacije, ali i CerOx uređaj koji kombinira NIRS s drugim tehnologijama za razvoj uređaja s multimodalnim mogućnostima. Nažalost, još uvijek ne postoji standardizacija kliničkog NIRS uređaja, svaka tvrtka nastavlja razvijati različite optičke sonde i algoritme, a još uvijek ne postoji niti zlatni standard za NIRS monitoriranje, kao ni referentne vrijednosti za dobivene nalaze (12).

NIRS tehnika je našla svoju ulogu u širokom spektru stanja i specijalnosti, od perioperativne primjene u kardiokirurškim operacijama ili vaskularnoj kirurgiji karotidnih arterija, do nekirurških indikacija, te čak i u pedijatrijskoj populaciji. Karotidna endarterektomija (CEA) zahvat je koji se izvodi u pacijenata s aterosklerotskom stenozirajućom bolesti, u svrhu prevencije moždanog udara. Međutim, sam zahvat nosi rizik nastanka moždanog udara. Zahvat se može raditi u regionalnoj anesteziji, gdje bi nastanak neurološkog deficita bio indikativan razvoju ishemije, ili u općoj anesteziji, gdje nije moguće procjenjivati neurološki status u stvarnom vremenu. S ciljem sprječavanja ishemije, odnosno brzog uočavanja iste, pogotovo u pacijenata pod općom anestezijom, koriste se različite metode poput doplera, somatosenzornih evocirajućih potencijala (SSEP), te NIRS-a. Prema podacima iz literature, NIRS još uvijek nije dokazano superioran prema dostupnim metodama, međutim postaje sve atraktivniji zbog jednostavnosti korištenja, neinvazivnosti i dobre temporalne rezolucije (30). Neurološka disfunkcija nerijetka je posljedica i kardiokirurških zahvata, pogotovo kardiopulmonalnih bypassa, a koja se, ovisno o vrsti zahvata, javlja u čak 1–3% slučajeva (34). Mehanizmi nastanka neuroloških ispada, tj. moždanog udara, uključuju hipoperfuziju i embolijski moždani udar. Upotreba NIRS-a u svrhu monitoriranja moždane oksigenacije za vrijeme kardiokirurških zahvata u posljednje vrijeme je u sve većem porastu, unatoč nedostatku studija s ohrabrujućim i pozitivnim rezultatima. Murkin i sur. su u randomiziranoj prospektivnoj studiji analizirali intraoperativno monitoriranje cerebralne oksigenacije putem NIRS tehnike u 200 pacijenata koji su podvrgnuti zahvatu postavljanja koronarnih bypassa. Pacijenti su randomizirani u kontrolnu grupu i u intervencijsku grupu, u kojoj je donja granica za intervencije bila 75% $r\text{SO}_2$ bazalnih vrijednosti izmjerenih pri dolasku u operacijsku salu. U značajno većem broju pacijenata u kontrolnoj skupini dokazana je produljena cerebralna desaturacija, uz naknadni dulji boravak u JIL. Nije bilo razlike u ukupnoj incidenciji štetnih događaja među dvjema skupinama, ali je znatno više pacijenata u kontrolnoj skupini umrlo ili razvilo oštećenje velikih, ciljnih organa, što je bilo povezano s nižim bazalnim vrijednostima $r\text{SO}_2$, više epizoda intraoperativne cerebralne desaturacije i duljim boravkom u JIL (35). Unatoč inkonzistentnim rezultatima, Murkin i sur. otvorili su pitanje monitoriranja moždane oksigenacije kao „surogata“ za monitoriranje adekvatne perfuzije i ostalih organa. Prospektivna opservacijska studija Leal – Noval i sur. uspoređivala je $r\text{SO}_2$ i PtiO_2 u 22 stabilna pacijenta s teškim traumatskim ozljedama mozga, tijekom 16-satnog perioda. Prema rezultatima studije, unatoč direktnoj i neovisnoj korelaciji $r\text{SO}_2$ i PtiO_2 , $r\text{SO}_2$ pokazuje umjerenu točnost pri predikciji teške moždane hi-

poksije ($P_{tiO_2} < 12\text{mmHg}$) s osjetljivošću od 73% i specifičnošću od 86%, dok pokazuje slabu točnost u predikciji umjerene moždane hipoksije (P_{tiO_2} 12–15 mmHg) s osjetljivošću 62% i specifičnošću 49% (36). Iz navedenog se može zaključiti kako rSO_2 nije dostatna zamjena P_{tiO_2} . Dunham i sur. su pomoću INVOS sistema određivali rSO_2 u 18 pacijenata s traumatskom ozljedom mozga, zajedno s određivanjem ICP, CPP i snimanjem CT-a uz kliničko određivanje Glasgow coma score-a (GCS). Pronađena je povezanost između duljine vremena s $rSO_2 < 60\%$ s povećanim mortalitetom, intrakranijskom hipertenzijom i kompromitiranom cerebralnom perfuzijom (37).

S jedne se strane radi o neinvazivnoj tehnici visoke vremenske i prostorne rezolucije, uz mogućnost istovremenog monitoriranja više regija od interesa, međutim s druge strane nivo dokaza o učinkovitosti i poboljšanje ishoda liječenja su mali. Glavni nedostatak NIRS tehnike je „kontaminacija“ signala ekstrakranijskim tkivom, iako neki komercijalni sustavi pomoću algoritamskih formula pokušavaju razriješiti i taj problem. Nedostaje standardizacija između različitih komercijalnih uređaja, kao što nemamo dostupne niti referentne vrijednosti/granice za dobivene rezultate. Također, dostupni uređaju za NIRS postavljaju se na čelo pacijenata, stoga su nepogodni za detekciju ishemijskih područja u regijama udaljenima od promatranog mjesta, iako je moguće detektirati globalnu cerebralnu nedostatnost kisika (30).

Zaključak

Moždana oksigenacija rezultat je moždane opskrbe kisikom i moždane potrošnje (potrebe) za kisikom. Nesrazmjer u ovim vrijednostima može za posljedicu imati hipoksiju, te razvoj sekundarne ozljede mozga i neuroloških deficita, a što definira lošiji ishod pacijenata koji se zbrinjavaju u okviru Jedinica za intenzivno liječenje. Iako u procjeni moždane oksigenacije dominiraju invazivne metode, u posljednje vrijeme sve veći naglasak na razvoju i unaprijeđenju neinvazivnih metoda, poput near – infracrvene spektroskopije. Svaka od navedenih metoda ima svoje mjesto u kliničkoj praksi, kao i svoje prednosti i nedostatke. Kako bi se unaprijedilo monitoriranje pacijenata s akutnim ozljedama mozga, te poboljšali ishodi njihovog liječenja i umanjio rizik nastanka sekundarnih ozljeda mozga, cilj je usavršiti postojeće tehnike monitoriranja moždane oksigenacije, definirati standardizirane vrijednosti za dobivena mjerenja, razviti jednostavne i široko dostupne uređaje, s minimalnim posljedicama njihove upotrebe.

LITERATURA

1. Nagata K, Yamazaki T, Takano D, Maeda T, Fujimaki Y, Nakase T, et al. Cerebral circulation in aging. *Ageing Res Rev*. 2016;30:49–60.

2. Čolak Ž. Poremećaj kognitivnih funkcija i uloga cerebralne oksimetrije kod kirurške revaskularizacije srca [Disertacija]. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Medicinski fakultet; 2011.
3. Rasulo F, Matta B, Varanini N. Cerebral Blood Flow Monitoring. U: *Neuromonitoring Techniques*; Academic Press: Pittsburgh, PA, USA. 2018, str. 1–56.
4. Macmillan CSA, Andrewa PJD. Cerebrovenous Oxygen Monitoring. *Intensive Care Med*. 2000;26:1028–36.
5. Beards SC, Yule S, Kassner A, Jackson A. Anatomical variation of cerebral venous drainage: the theoretical effect on jugular bulb blood samples. *Anaesthesia*. 1998;53(7):627–33.
6. Gibbs EL, Lennox WG, Gibbs FA. Bilateral internal jugular blood: Comparison of AV differences, oxygen-dextrose ratios and respiratory quotients. *Am J Psychiatry*. 1945;102(2):184–90.
7. Robertson CS, Narayan RK, Gokaslan ZL, Pahwa R, Grossman RG, Caram P, et al. Cerebral arteriovenous oxygen difference as an estimate of cerebral blood flow in comatose patients. *J Neurosurg*. 1989;70(2):222–30.
8. Shenkin HA, Harmel MH, Kety SS. Dynamic anatomy of the cerebral circulation. *Arch Neurol Psychiatry*. 1948;60(3):240–52.
9. Kirkman MA, Smith M. Brain Oxygenation Monitoring. *Anesthesiol Clin*. 2016;34(3):537–56.
10. Cowan F, Thoresen M. Ultrasound study of the cranial venous system in the human new-born infant and the adult. *Acta Physiol Scand*. 1983;117(1):131–7.
11. Schell RM, Cole DJ. Cerebral monitoring: Jugular venous oximetry. *Anesth Analg*. 2000;90(3):559–66.
12. Zhong W, Ji Z, Sun C. A review of monitoring methods for cerebral blood oxygen saturation. *Healthc*. 2021;9(9).
13. Chaikittisilpa N, Vavilala M., Lele AV. Jugular venous oximetry. U: *Neuromonitoring Techniques*; Academic Press: Pittsburgh, PA, USA. 2018, str. 57–75.
14. Andrews PJD, Dearden NM, Miller JD. Jugular bulb cannulation: Description of a cannulation technique and validation of a new continuous monitor. *Br J Anaesth*. 1991;67(5):553–8.
15. Samra SK, Rajajee V. Monitoring of Jugular Venous Oxygen Saturation. U: *Monitoring the Nervous System for Anesthesiologists and Other Health Care Professionals*. 2012, str. 255–77.
16. Guven M, Akilli NB, Koylu R, Oner V, Guven M, Ozer MR. A new marker identification of high risk stroke patients: Jugular saturation. *Am J Emerg Med*. 2020;38(1):7–11.
17. Schell RM, Kern FH, Greeley WJ, Schulman SR, Frasco PE, Croughwell ND, et al. Cerebral blood flow and metabolism during cardiopulmonary bypass. *Anesth Analg*. 1993;76(4):849–65.
18. Matta BF, Lam AM, Mayberg TS, Shapira Y, Winn HR. A critique of the intraoperative use of jugular venous bulb catheters during neurosurgical procedures. *Anesth Analg*. 1994;79(4):745–50.
19. Moss E, Dearden NM, Berridge JC. Effects of changes in mean arterial pressure on SjO_2 during cerebral aneurysm surgery. *Br J Anaesth*. 1995;75(5):527–30.
20. Rose JC, Neill TA, Hemphill JC. Continuous monitoring of the microcirculation in neurocritical care: An update on brain tissue oxygenation. *Curr Opin Crit Care*. 2006;12(2):97–102.
21. Tisdall MM, Smith M. Multimodal monitoring in traumatic brain injury: Current status and future directions. *Br J Anaesth*. 2007;99(1):61–7.

22. Schmidt JM, Claassen K. Clinical utility of brain tissue oxygen tension in treatment of brain injury more complicated than it appears. *Clin Neurophysiol.* 2012;123:1060–2.
23. Ko SB, Choi HA, Parikh G, Helbok R, Schmidt JM, Lee K, et al. Multimodality monitoring for cerebral perfusion pressure optimization in comatose patients with intracerebral hemorrhage. *Stroke.* 2011;42(11):3087–92.
24. Figaji AA, Zwane E, Graham Fieggen A, Argent AC, Le Roux PD, Peter JC. The effect of increased inspired fraction of oxygen on brain tissue oxygen tension in children with severe traumatic brain injury. *Neurocrit Care.* 2010;12(3):430–7.
25. Lyson T, Sieskiewicz A, Rutkowski R, Rybaczek M, Sobolewski A, Gorbacz K, et al. Brain tissue oxygenation during transnasal endoscopic skull base procedures. *Adv Med Sci.* 2020; 65(2):286–90.
26. Domínguez-Roldán JM, Lubillo S, Videtta W, Llompart-Pou JA, Badenes R, Márquez Rivas J, et al. International consensus on the monitoring of cerebral oxygen tissue pressure in neurocritical patients. *Neurocirugia (Astur : Engl Ed).* 2020;31(1): 24–36.
27. Dings J, Meixensberger J, Jäger A, Roosen K. Clinical experience with 118 brain tissue oxygen partial pressure catheter probes: Comments. *Neurosurgery.* 1998;43(5):1094–5.
28. Kiening KL, Unterberg AW, Bardt TF, Schneider GH, Lanksch WR. Monitoring of cerebral oxygenation in patients with severe head injuries: Brain tissue PO₂ versus jugular vein oxygen saturation. *J Neurosurg.* 1996;85(5):751–7.
29. Frans F. Jöbsis. Noninvasive, infrared monitoring of cerebral and myocardial oxygen sufficiency and circulatory parameters. *Science (80-).* 1977;198(4323):1264–7.
30. Ghosh A, Elwell C, Smith M. Cerebral near-infrared spectroscopy in adults: A work in progress. *Anesth Analg.* 2012; 115(6):1373–83.
31. Ferrari M, Quaresima V. Review: Near infrared brain and muscle oximetry: From the discovery to current applications. *J Near Infrared Spectrosc.* 2012;20(1):1–14.
32. Cheong W, Prahl SA, Welch A. A Review of the Optical Properties of Biological Tissues. *IEEE J Quantum Electron.* 1990; 26(12):2166–85.
33. Tak S, Ye JC. Statistical analysis of fNIRS data: A comprehensive review. *Neuroimage.* 2014;85:72–91.
34. Newman ME, Mathew JB, Grocott HP, Mackensen GB, Monk T, Welsh-Bohmer KA, et al. Central nervous system injury associated with cardiac surgery. *Lancet.* 2006;368(9536):694–703.
35. Murkin JM, Adams SJ, Novick RJ, Quantz M, Bainbridge D, Iglesias I, et al. Monitoring brain oxygen saturation during coronary bypass surgery: A randomized, prospective study. *Anesth Analg.* 2007;104(1):51–8.
36. Leal-Noval SR, Cayuela A, Arellano-Orden V, Marín-Caballeros A, Padilla V, Ferrándiz-Millón C, et al. Invasive and noninvasive assessment of cerebral oxygenation in patients with severe traumatic brain injury. *Intensive Care Med.* 2010;36 (8):1309–17.
37. Dunham CM, Ransom KJ, Flowers LL, Siegal JD, Kohli CM, Valadka AB, et al. Cerebral Hypoxia in Severely Brain-Injured Patients Is Associated with Admission Glasgow Coma Scale Score, Computed Tomographic Severity, Cerebral Perfusion Pressure, and Survival. *J Trauma – Inj Infect Crit Care.* 2004;56(3):482–91.