- pregledni rad -

METODE MERENJA INTRAOKULARNOG PRITISKA

Elena JORDANOVA¹, Paraskeva HENTOVA-SENČANIĆ², Ivan MARJANOVIĆ^{3,4}, Ivan SENČANIĆ⁵, Marko BARALIĆ⁶, Ivana STEFANOVIĆ⁷, Tanja PAVLOVIĆ⁸

¹Služba nefrologije, Klinika za internu medicinu, Kliničko bolnički centar Zemun, Beograd, Srbija;

²Medigroup - oftalmološka ambulanta Oftalmika, Beograd, Srbija; ³Klinika za očne bolesti, Klinički

centar Srbije, ⁴Medicinski fakultet, Univezitet u Beogradu, Beograd Srbija; ⁵Klinika za očne bolesti,

Kliničko bolnički centar Zvezdara, Beograd, Srbija; ⁶Klinika za nefrologiju, Klinički centar Srbije,

Beograd, Srbija; ⁷Gradski zavod za hitnu medicinsku pomoć, Beograd, Srbija; ⁸Služba pulmologije,

Klinika za internu medicinu, Kliničko bolnički centar Zemun, Beograd, Srbija

SAŽETAK

Tonometrija je metoda merenja intraokularnog pritiska (IOP). Goldmannova aplanaciona tonometrija (GAT) predstavlja zlatni standard merenja IOP-a. Merenje IOP-a ovom metodom vrši se na osnovu sile koja je potrebna da izvrši aplanaciju, odnosno zaravnjivanje određene površine rožnjače. U primeni GAT metode moguće se greške: neodgovarajući oblik i raspored fluorescentnih slika, pritisak na bulbus, nepravilna kalibracija, astigmatizam, kornealna patologija (edem, distorzija, centralna debljina rožnjače), položaj tela, gojaznost, Valsalva manevar. Modifikacije Goldmanovog aplanacionog tonometra su: metode po Dregeru, Perkinsu i Halbergu. Alternativne metode merenja IOP-a su: digitalna metoda i impesiona metoda Schiotzovim tonometrom. Dinamička kontaktna tonometrija (DCT, PASCAL) je kontaktna, neaplanaciona metoda merenja IOP-a koja se zasniva se na principu usaglašenih kontura glavetonometra i rožnjače tako da glava tonometra preuzima ulogu omotača bulbusa. Nataj način direktno meri silu koja se prenosi na omotač bulbusa, a potiče od intraokularnog pritiska. DCT je oftalmološki aparat, komercijalno dostupan od 2004. godine, koji direktno meri IOP na osnovu dinamičkih pulsativnih fluktuacija u IOP-u pomoću piezoelektričnog senzora ugrađenog u tip kojim se dodiruje rožnjača. Ostale tonometrijske metode su: a) pneumotonometrija, b) Ocular Blood flow (OBF), c) nekontaktna tonometrija: Goldmanov vazdušni tonometar, Air-puff tonometar, Ocular Response Analyzer (ORA), d) Mackay-Marg -ov električni tonometar, Tono-Pen, Proview Phosphene tonometar, Rebound tonometar. Goldmannova aplanaciona tonometrija i dalje predstavlja zlatni standard za merenje IOP-a. Ona je tačna, ali ne i potpuno precizna. U cilju dobijanja preciznijih vrednosti IOP-a mogu se koristiti i druge metode merenja IOP-a.

Ključne reči: intraokularni pritisak, Goldmannova aplanaciona tonometrija, Dinamički konturni tonometar

UVOD

Tonometrija je metoda merenja intra-

okularnog pritiska (IOP). Može biti: direktna i indirektna. IOP se najtačnije meri dire-

ktnim uvođenjem manometra u prednju očnu komoru. Direktna metodamerenja IOP-a se više ne koristi zbog opasnosti od unošenjainfekcije. Kod indirektno metode intraokularni pritisak se meri na osnovu inteziteta sile koji je potreban da se izvrši određena deformacija rožnjače. Može biti: digitalna i instrumentalna metoda. Instrumentalno merenje intraokularnog pritiska obuhvata dva načina merenja: aplanacionu i impresionu metodu[1,2].

1. Goldmannova aplanaciona tonometrija (GAT) predstavlja zlatni standard za merenje IOP-a. Hans Goldmann i Theo Schmidtsu 1957. god. predstavili ovu metodu. Merenje IOP-a ovom metodom vrši se na osnovu sile koja je potrebna da izvrši aplanaciju, odnosno zaravnjivanje određene površine rožnjače (**slika 1**). Maklakov je bio jedan od prvih koji je na ovaj način uspeo da izmeri očni pritisak. On je 1885.godine prikazao svoj aparat kojim se izaziva, jednom određenom i stalnom silom (7,5 g, 10 g i 15 g) različito aplaniranje rožnjače u zavisnosti od IOP-a. Ukoliko je pritisak u oku viši, manja je zaravnjena površina i obrnuto. Merenjem veličine zaravnjene površine Maklakov je izradio skalu za određivanje IOP-a na osnovu veličine aplanacije rožnjače dobijene primenom različitih opterećenja[2].

Imbert i Fick su dali matematički odnos koji vlada između intraokularnog pritiska, sile aplanacije i aplanirane površine: $W=P \cdot A$, gde je W - sila aplanacije, P - pritisak u oku, A - površina aplanacije.

Goldmann je, sledeći Fickov princip, određivao IOP na osnovu sile koja je

potrebna da izvrši aplanaciju rožnjače kružne površine dijametra 3,06 mm ($7,35 \text{ mm}^2$). Pri aplanaciji ove površine rožnjače, pritisak koji deluje na rožnjaču od 0,1 g odgovara 1 mmHg IOP-a. Pri ovako maloj aplanaciji rožnjače, pomeranje tečnosti je takođe malo i iznosi samo $0,4 \text{ mm}^3$ [2].

Slika 1. Goldmannov aplanacioni tonometar [3]

1.1. Tehnika merenja IOP-a aplanacionom metodom. Posle površne anestezije rožnjače, suzni film se prebojava 0,5% natrijum fluoresceinom kako bi se jasnije videla aplanirana površina koja se uz pomoć prizme razdvaja u dve polukružne linije. Kapilarno privlačenje meniskusa suza pokazuje sklonost da povlači glavu tonometra prema rožnjači (**slika 2**) [2].

Slika 2 Glava Goldmanovog aplanacionog tonometra (fotografisano u ambulanti Klinike za očne bolesti KCS)

Promena intenziteta sile se postiže okretanjem milimetarskog zavrtnja sa iskalibrisanom skalom u mmHg. Odgovarajuća aplanacija rožnjače je postignuta kada se polukružne fluorescenske linije, koje je ograničavaju, dodiruju unutrašnjim stranama. Širina fluorescentnih polukrugova u poziciji kontakta treba da bude 1/10 prečnika aplanacione površine ili 0,3 mm. Posmatranje i određivanje momenta aplanacije vrši se uz pomoć biomiskropa i plavog kobaltnog stakla (slika 3)[2].

Slika 3. Pravilan oblik fluorescentnih polukrugova [3]

Preciznost i tačnost Golmanove aplanacione tonometrije ogleda se u tome da su moguće i odgovarajuće varijacije: intraoperativne varijacije od 2,2 do 2,5 mmHg, dok su interoperativne varijacije od 2,2 do 3,8 mmHg. U kliničkoj praksi mogu biti i značajno veće razlike.

1.2. Greške u merenju aplanacionom metodom. U primeni GAT metode moguće su sledeće greške:

a) Neodgovarajući oblik i raspored fluorescentnih slika - Ako se nedovoljno oboji suznim film, dobijaju se tanji krugovi i niže vrednosti intraokularnog pritiska, dok se kod

previše obojenog suznog filma dobijaju deblji krugovi i više vrednosti intraokularnog pritiska (slika 4).

Slika 4. Nepravilan položaj polukrugova: a) višak fluoresceina-polukrugovi predebili; b) nedovoljno fluoresceina-polukrugovi pretanki [3]

b) Pritisak na bulbus, stezanje kapaka- Ako se prilikom merenja IOP-a GAT izvrši pritisak na bulbus, dobija se impresija rožnjače i prevelike vrednosti IOP-a.

c) Nepravilna kalibracija- Za kliničku praksu savet je da se aparat kalibriše dva puta godišnje. Za klinička istraživanja granica greške je ± 1 mmHg

d) Astigmatizam je veliki problem za merenje IOP-a odnosno dobijanje validnih vrednosti. Ako su prizme GAT horizontalno orjentisane (direktni astigmatizam $>4D$) daje potcenjene, niže vrednosti IOP-a; a indirektni astigmatizam daje precenjene, više vrednosti IOP-a. Praktičan način prevazilaženja ovog problema je da se izvrše dva sukcesivna merenja. Prizme se postave prvo horizontalno, pa vertikalno i izračuna srednja vrednost merenja. Alternativan način prevazilaženja ove greške kod pacijenata sa astigmatizmom $>3D$ da se osočina tonometarskog vrha na 43° (crvena linija na GAT-u) okrene na

glavu astigmatske osovine rožnjače minus forma cilindra

e) Kornealna patologija (edem, distorzija, centalna debljina rožnjače) - Ako je rožnjača edematozna, dobijaju se niže vrednosti IOP-a. Debele rožnjače (okularna hipertenzija) dovode do precenjivanja IOP-a i za 6.8 mmHg. Tanje rožnjače (glaukom otvorenog ugla, normotenzivan glaukom, pseudoeksfolijativni glaukom, kongenitalni glaukom) dovode do potcenjivanja IOP-a i za 4,9 mm Hg.

f) Položaj tela- Veće vrednosti IOP-a se dobijaju kadaje pacijent u ležećem položaju.

g) Gojaznost- Merenje IOP-a GAT kod gojaznih osoba može dati povećane vrednosti IOP-a usled kompresije toraksa u položaju merenja jer dolazi do povećanja pritiska u episklernalnim venama.

h) Valsalva manevar- U položajima kao što su dizanje tereta, naporne vežbe i naprezanje, sviranje duvačkih instrumenata dolazi do povećanja IOP-a usled povećanja pritiska u episklernalnim venama.

i) Kod dece se merenje IOP-a GAT metodom vrši u opštoj anesteziji. Pri primeni halotana kao anestetika dobijaju se niže od realnih vrednosti IOP-a. Preporučuje se ketalar kao opšti anestetik[1,4].

1.3. Modifikacije Goldmanovog aplanacionog tonometra

a) Metoda po Draegeru Jedna od modifikacija Goldmanovog aplanacionog tonometra je metoda po Draeger-u iz 1966.god. za merenje intraokularnog pritiska u ležećem položaju. Ova metoda je našla primenu pri merenju IOP-a u opštoj anesteziji [3,5].

b) Metoda po Perkinsu Mnogo jednostavnija, naročito pogodna za rad na terenu, je Perkinsov aplanacioni tonometar iz 1970. god. Ovaj aparat koristi isti princip merenja IOP-a kao i Goldmannov aplanacioni tonometar, samo mu nije potreban biomikroskop. Kao izvor električne struje koristi se baterija [3,5].

c) Metoda po Halbergu Godine 1967. Halberg je konstruisao tonometar kao modifikaciju Maklakovog i Posnerovog tonometra iz 1964. god. Postupak merenja se vrši u lokalnoj anesteziji, zahteva regularnu prednju površinu rožnjaču. Aplanacija se postiže transparentnim 5mg metilmeta-akrilatnim cilindrom. Aplanacioni dijametar se pretvara u mmHg pritiska pomoću Posnerove tablice [3,5,6].

2. Alternativne metode merenja intraokularnog pritiska

2.1. Digitalna metoda je najstariji, najjednostavniji, ali i najneprecizniji i metod merenja IOP-a. Visina IOP-a se određuje na osnovu otpora koji pružaju motači očne jabučice na dejstvo digitalne kompresije. Postupak merenja se izvodi tako što pacijent gleda prema dole, a lekar stavi oba svoja kažiprsta na jednu očnu jabučicu preko kože gornjeg kapka, vršeći naizmenično pritisak jednim i drugim kažiprstom. U normalnim uslovima pod prstima se oseća laka fluktuacija. Ukoliko je intraokularni pritisak povišen, zidovi su zategnuti, očna jabučica je tvrda, a pod prstima osećamo manje fluktuacije ili one uopšte ne postoje (kad je intraokularni pritisak veoma visok). Obrnuto, kada je intraokularni pritisak snižen, zidovi očne

jabučice su manje zategnuti, oko je mekše, a fluktuacije su izraženije nego obično. Prvu klasifikaciju vrednosti visine IOP-a dobijenu ovom metodom izneo je 1862. Bowmann. Normalni IOP se obeležava sa N digitalno. $N+1$ = lako povišen IOP; $N+2$ = umereno povišen IOP, oko tvrđe; $N+3$ = veoma povišen IOP, oko tvrdo kao kamen. Različit stepen hipotonije se obeležava na sledeći način: $N-1$ = lako snižen IOP; $N-2$ = umereno snižen IOP; $N-3$ = veoma snižen IOP. U kliničkim uslovima kada postoji sumnja na otvorenu povredu očne jabučice pribegavamo digitalnom merenju IOP-a [2,7].

2.2. Impresiona metoda Prvi aparat za merenje IOP-a na principu impresije rožnjače konstruisao je 1862. god. Albrecht von Graefe. Merenje je vršeno preko kapaka usled nepoznavanja lokalne anestezije, što je smanjivalo tačnost merenja.

Brojni autori su, koristeći von Grafeov princip, prikazali svoje instrumente za merenje očnog pritiska. Najdalje u poboljšanju osnovnog von Grafeov impresionog tonometra došao je Hjalmar Schiøtz. On je u Oslu 1905. god. prikazao novi impresioni tonometar. Mereći veličinu deformacije rožnjače izazvanu težinom samog tonometra (16,5 g) i jednog dodatog tega čijaje težina bila različita u zavisnosti od visine IOP-a (5,5g, 7,5g, 10g) jednostavno je određivao visinu očnog pritiska (**slika 5**) [2].

Ovaj metod merenja IOP-a počeo je od 1924. godine da se primenjuje u praksi. Merenje IOP-a **Schiøtzovim tonometrom** [8] izvodi se u ležećem položaju bolesnika, pri čemu je glava zabačena unazad.

Slika 5. Schiøtzov tonometar [8]

Posle ukapavanja lokalnog anestetika u konjunktivalni sakus, blago se povuče gornji i donji kapak palcem i kažiprstom leveruke, tako da se ne vrši nikakav pritisak na očnu jabučicu. Određivanje fiksacione tačke, za koju može dobro da posluži i ispružena ruka bolesnika, omogućava pravilno postavljanje tonometra na rožnjaču bolesnika. Kada se potpuno umiri očna jabučica, na centralni deo rožnjače se postavi tonometarska papučica, pri čemu je važno da ivice kapaka na dodiruju tonometar. Posmatranjem igle na tonometarskoj skali vide se blaga podrhtavanja. Prisustvo ovih pulsnihi oscilacija ukazuje na pravilno postavljen tonometar. Ukoliko je dobijeni otklon na skali manji od tri podeoka stavlja se naredni veći teg. Obično se merenje započinje sa najmanjim tegom od 5,5 g kadase očekuje IOP do 4,0 kPa (30 mmHg). Ukoliko je IOP viši, na tonometar se postavlja teg od 7,5 ili 10g. Očitavanjem vrednosti na skali tonometra koju pokazuje igla tonometra završava se merenje. Ovako dobijena vrednost, sa uzimanjem u obzir tega koji je korišćen pri merenju, traži se u tablici za preračunavanje vrednosti IOP-a u mmHg [2,8].

Tokom merenja IOP-a Schiøtzovim tonometrom mogu nastati greške:

a) u samom instrumentu- greške nastaju zbog razlike u težini pojedinih delova tonometra u različitim tonometrima.

b) zbog kontrakcije ekstraokularnih mišića- kada se prsloni tonometar na oko, dolazi do refleksne kontrakcije ekstraokularnih mišića i dobija se lažno visoka vrednost IOP-a.

c) zbog akomodacije- kada se prsloni tonometar na rožnjaču, pacijent gleda u tonometar i dolazi do akomodacije tj. kontrakcije cilijarnog mišića; povećava se lakoća isticanja očne vodice iz trabekuluma u prednju očnu komoru i dobija se lažno niža vrednost IOP-a.

d) usled okularnog rigiditeta- za precizno merenje IOP-a impresiom metodom neophodno je poznavati i osobine omotača očne jabučice koje značajno utiču na stvaranje deformacije rožnjače pod dejstvom težine tonometra.

U eksperimentalnim radovima Friedenwald je našao da postoji stalan odnos između promene zapremine i promene pritiska za jedno oko. On je ovaj odnos prikazao sledećom jednačinom:

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta V}{V} \cdot K$$

gde je P- početna vrednost IOP-a, ΔP - promena IOP-a, V- početna zapremina, ΔV - promena zapremine, K- konstanta.

Vrednost K je specifična za svako oko i uslovljena je stanjem omotača oka. Prema Friedenwaldu to bi bila sila koja se suprotstavlja promeni oblika (deformaciji) omotača oka. Ovu silu je Weber označio kao elastičnost omotača očne jabučice. Ista promena zapremine koja nastaje usled impresije rožnjače pod dejstvom težine tonometra, ne daje kod svakog oka istu promenu pritiska, već je ta promena pritiska zavisna

od osobina omotača oka, odnosno intenziteta sile koja se suprotstavlja promeni oblika omotača oka. Tu silu je Friedenwald označio kao rigiditet. S obzirom da najveći deo okularnog rigiditeta odgovara skleri mi govorimo o skleralnom rigiditetu. Miopi imaju veoma tanku skleru i smanjen skleralni rigiditet tako da su kod ovih osoba izmerene vrednosti IOP-a Schiotzovim tonometrom niže od stvarnih, ako nije obračunat skleralni rigiditet. Slično se viđa i kod pacijenata sa kongenitalnim glaukomom. Kod hipermetropa su izmerene vrednosti IOP-a Schiotzovim tonometrom više od stvarnih.

Prilikom merenja IOP-a GAT metodom skleralni rigiditet, zbog male površine aplanacije, nema uticaja na dobijene vrednosti IOP-a.

e) usled varijacija u zapremini očne jabučice- greške mogu nastati zbog različite veličine očne jabučice i različite zakrivljenosti rožnjače (nemogućnost da se papučica tonometra, koja naleže na rožnjaču, prilagodi njenoj zakrivljenosti). Greške nastaju kod mikroftalmusa, buftalmusa i visoke miopije jer što je veći poluprečnik zakrivljenosti rožnjače to se ovom metodom dobija veća vrednost IOP-a.

f) u očitavanju skale merenja- granica greške pri manjim vrednostima IOP-a je $\pm 2\text{mmHg}$, dok je pri većim vrednostima $\pm 4\text{mmHg}$.

Dalji razvoj impresione tonometrije omogućio je zamenu mehaničke transmisije, kod Schiotzovog tonometra, električnom. To je povećalo tačnost izmerenih vrednosti, smanjujući grešku koja nastaje

usled paralakse i trenja prilikom mehaničke transmisije i očitavanja visine IOP-a. Kod elektro tonometra pomeranje cilindra u tubusu izaziva promenu otpora u električnom kolu koja se prenosi na izbaždarenu skalu. Električni tonometri omogućavaju, pored veće preciznosti u merenju, i kontinuirano merenje IOP-a u toku određenog vremenskog perioda [2,8].

Godine 1950. u SAD je izrađena posebna modifikacija Schiotzovog tonometra, bez mehaničke transmisije, označena kao Berens-Tolmanov indikator. Ovaj jednostavni džepni instrument pokazuje samo da li je IOP iznad ili ispod normalnih vrednosti. Aparat se sastoji od jednog plastičnog ili metalnog omotača u kojem se nalazi tubus sa cilindrom koji odgovara onom kod Schiotzovog tonometra. Pomeranje cilindra se direktno čita korišćenjem jednog optičkog sistema na gornjem kraju indikatora. Ovaj tonometar je zbog svog jednostavnog mehanizma i načina čitanja graničnih vrednosti pogodan za masovni screening na terenu.

Indikacije u kliničkoj praksi za primenu tonometrije po Schiotzu su: nepokretni (ležeći) pacijenti i kada smo na terenu. Kontraindikacije za primenu impresione (indentacione) tonometrije su: okularne infekcije, sveže povrede oka ili hemijske povrede, akutna herpetična infekcija lica ili oka, edem rožnjače zbog mogućnosti mehaničke povrede rožnjače, nistagmus, blefarospazam, endemske okularne infekcije i visoka miopija [2, 3, 7].

2.3. Dinamička konturna tonometrija Nova kontaktna, neaplanaciona metoda merenja IOP-a poznata je pod nazivom dinamička kontur-

na tonometrija (DCT) ili PASCAL metoda. Nazvana je Pascalova metoda u čast francuskog fizičara Blaise Pascala (1623-1662) jer principrada ovog tonometra počiva na njegovom zakonu: "Pritisak na zatvoreni fluid se prenosi podjednako na sve zidove suda" (**slika 6**).

Ova metoda merenja IOP-a zasniva se na principu usaglašenih kontura glave tonometra i rožnjače tako da glava tonometra preuzima ulogu omotača bulbusa. Na taj način direktno meri silu koja se prenosi na omotač bulbusa, a potiče od intraokularnog pritiska [9,10].

Slika 6. Dinamički konturni tonometar [13]

Ovaj metod merenja IOP-a pojavio se 2002. god, a komercijalno je dostupan od 2004. godine. Osmišljen je i dizajniran za direktno i neinvazivno merenje IOP-a, relativno nezavisno od inter-individualnih varijacija kornealne biomehanike. Visina IOP-a dobijena PASCAL metodom je rezultat ravnoteže koju ostvaruju četiri sile: IOP, rigiditet rožnjače, adhezijska sila suznog filma i apozicijska sila tonometra. DCT direktno meri dinamičke pulsativne fluktuacije u IOP-u koristeći piezoelektrični senzor (dijametra 1,2 mm) ugrađen na vrhu konturne glave tonometra (prečnik zakrivljenosti glave je 10,5 mm sa kontaktnom površinom dijametra 7 mm).

Glava DCT je slična glavi GAT i proizvodi konstantnu apozicionu silu od 1g. Iz praktičnih i higijenskih razloga DCT na svojoj glavi ima specijalan silikonski prekrivač- tip (slika 7) [9,10,11].

Slika 7. Princip rada Dinamičkog konturnog tonometra [13]

Postupak merenja IOP-a DCT metodom se izvodi u lokalnoj anesteziji. Pacijent je u sedećem položaju na biomikroskopu. Silikonski tip se menja pre svakog merenja (glava GAT se dezinfikuje pre svakog merenja). Za adekvatno očitavanje rezultata potrebno je tokom merenja dobiti najmanje 5 kardijačnih krugova (preporučuje se između 5 i 8). Tri kratka jednobrazna zvučna signala označavaju završetak merenja. Rezultati IOP-a očitavaju se na LCD-u, merenje je na 100 Hz, a vrednosti su prikazane u rezoluciji od 0,1 mm. Na LCD-u očitava se okularna pulsna amplituda (OPA) koja predstavlja razliku između sistolnog i dijastolnog pritiska izraženu ummHg. Poslednja vrednost koja se očitava na LCD-u je Q-indikator kvaliteta merenja. Q može imati vrednosti od 1 do 5 (vrednosti 1 i 2 su odlične, 3 prihvatljive, 4 i 5 merenje treba ponoviti).

Indikacije za primenu PASCAL metode su: 1) keratokonusi, keratoglobusi,

2) visok asigmatizam rožnjače, 3) rožnjača nakon refraktivne hirurgije (LASIK, LASEK, PRK), 4) rožnjača izmenjena različitim vrstama povreda (hemijskim, termičkim, mehaničkim)[12].

Prednosti DCT metode merenja IOP-a su:

1) tonometar se lako montira na špalt lampu, 2) bezbedna je tj. nema potencijalnog prenošenja infekcije, 3) direktno meri IOP, 4) numerički rezultati se direktno očitavaju na LCD ekranu i može se dobitipisani zapis na štampaču, 5) ne zahteva kalibraciju, 6) ne zahteva izvor električne energije (ima bateriju).

Nedostaci DCT metode merenja IOP-a

[5,9,10,11,13] su: 1) rezultati nisu reproduibilni zato postupak merenja IOP-a obavljam tri puta, 2) produženo je vreme kontakta glave tonometra i rožnjače, 3) skuplji je za upotrebu.

Merenje IOP-a DCT metodom ne može zameniti GAT metodu, ali, predstavlja korisnu dopunu GAT metodi.

3. Ostale tonometrijske metode

a) Pneumotonometrija- Godine 1968. Langham je prikazao model aplanacione pneumotonometrije gde se merenje IOP-a vrši na osnovu pritiska gasa freona koji je potreban da se izvrši aplanacija određene površine rožnjače. Prolazak gasa freona kroz plastični tubus, čija se površina naslanja na rožnjaču, u momentu aplanacije površine rožnjače je onemogućen usled čega dolazi do povećanja pritiska u sistemu gasa aparata. Na osnovu visine ovog pritiska određuje se i visina intraokularnog pritiska.

Prednost ovog aparata je u tome da se pritisak može meriti u svakom položaju pacijenta. Ipak, izmerene vrednosti IOP-a se razlikuju od onih dobijenih Goldmannovom metodom i do 10 mmHg. Ovako velika odstupanja ograničavaju upotrebu ovog aparata[3,5].

b) OBF (Ocular Blood flow) tonometar služi za detekciju i monitoring glaukoma. To je brza, ali i veoma skupa metoda kod koje dobijene vrednosti IOP-a nezavise od centralne debljine rožnjače.

c) Nekontaktna tonometrija predstavlja merenje IOP-a na osnovu analize slikere flektiranog svetla sa rožnjače u momentu aplanacije. Komercijalno su dostupni sledeći nekontaktni tonometri:

— **Grolmanov vazdušni tonometar** je konstruisan 1972. god. u SAD-a. Snopsvetlosti pada na rožnjaču. Vreme koje je potrebno za maksimalnu refleksiju se pretvara u mmHg. Vreme očitavanja rezultata je 3 milisek. Merenje IOP-a ovim tonometrom ne zahteva lokalnu anesteziju.

— **AIR PUFF tonometar** je nekontaktni, aplanacioni tonometar kod kojeg vazdušni mlaz izaziva kratkotrajnu aplanaciju pogođene površine rožnjače da bi se u tom momentu projektovala slika na taj deo rožnjače. Ako je slika pala na aplanirani deo rožnjače, ona se reflektuje i aktivira fotoćeliju. Ne zahteva lokalnu anesteziju, lak je za upotrebu, pogodan je za skrining metode. Mogućnost prenošenja infekcije, upotrebom ove vrste tonometra, je minimalna [3,5].

— **Ocular Response Analyzer (ORA)** Modifikacija air puff tonometra išla je u smi-

slu uvođenja novog aparata za merenje IOP-a koji se zove Ocular Response Analyzer. To je vrsta dinamičke tonometrije. Ova metoda ne zahteva upotrebu anestetika, automatizovana je, digitalizovana, koorelira sa GAT-om za vrednosti do 27mmHg. Stvara se generisan pritisak u vidu vazdušne struje. Postoji vreme na osnovu kojeg se aproksimativno određuje IOP. Slika je veoma značajna zato što je vrlo važan kvalitet suznog filma ina osnovu toga se određuje IOP. Slika se dobije uz pomoć senzora u stanju aplanirane rožnjače pri ugibanju površine rožnjače na unutra i na spolja.

Nekontaktna tonometrija ne podleže kardijalnim fluktuacijama vezanim za sistolni i dijastolni pritisak. Našla je primenu u svim vrstama kornealne patologije gde se ne remeti suzni film. Mogućnost prenošenja infekcije je minimalna i može da sekoristi već „nulti“ dan postoperativno, dok se tokom kontaktne tonometrije mogu preneti infekcije: adenovirusni konjunktivitis, HIV, hepatitis B, bakterijski konjunktivitis. Nekontaktna tonometrija negativno koorelira sa centralnom debljinom rožnjače. Veće vrednosti IOP-a se dobijaju kod debljih rožnjača ($CCT > 580\mu m$) [5, 14].

d) Mackay-Marg električni tonometar konstruisan 1959. godine je vrsta tonometra koja počiva između principa aplanacije i indentacije bulbusa. Iako se ovom metodom dobijaju veće vrednosti IOP-a u odnosu na vrednosti dobijene Goldmanovom aplanacionom tonometrijom, praktična primena je kod edematozno-rožnjače i drugih oblika iregularnosti prednje površine rožnjače.

e) Tono-Pen je modifikacija Mackay-Marg električnog tonometra. To je ručni kontaktni tonometar sa sondom koji se prislanja na rožnjaču i softverom koji automatski obrađuje primljene podatke i daje srednju vrednost IOP-a [3,5].

f) Proview Phosphene Tonometer je vrsta tonometra koja počiva na vizuelnom fenomenu označen kao fosfen (phosphen spot). Postupak merenja se izvodi tako što se tip ovog tonometra nasloni na zatvoreno oko (trepavice), a pritisak se čita sa skale u momentu kad pacijent detektuje fosfen. Jednostavan je za upotrebu, ne zahteva lokalnu anesteziju, ni fluorescein. To je neaplanacioni metod merenja IOP-a. Ne zahteva kontakt sa rožnjačom, tako da se može upotebiti i kod edematozne rožnjače, astigmatizma, posle refraktivne hirurgije.

g) Rebound Tonometry (RBT) je napravljen za ispitivanje i merenje IOP-a u životinjskom modelu glaukoma. Sastoji se od dve koaksijalne opruge koje proizvode magnetno polje. Pomerajući magnet sa oprugom stvara se razlika u voltaži na dva kraja opruge i nastaje magnetno polje koje detektuje senzor ovog tonometra. Tonometar ima plastični pokrov- tip dijametara 1mm kako bi oštećenje rožnjače bilo minimalno. Ova vrsta merenja IOP-a ne zahteva upotrebu lokalne anestezije [5,12,14].

Vrednosti za normalan IOP su dobijene ispitivanjem velikih populacionih grupa. Gornja i donja granica sta-

tističke normale određivane su unutar raspona od $2 \pm SD$. Brojni su podaci u literaturi za prosečnu statističku normalnu vrednost IOP-a. Goldmann (1957) dobija aplanacionom tonometrijom vrednost 15,5 mmHg, Leydhecker (1958) vrednost 15,5 mmHg, Kanski (1989) vrednost 16 mmHg, Cvetković i sar. (1970) dobijaju impresionim tonometrom Schiotza srednju vrednost IOP-a $16,85 \pm 3$ mmHg; u okviru istog projekta Tomić dobija aplanacionom tonometrijom prosečan IOP od $16,47 \pm 3$ mmHg.

Intraokularni pritisak je vrednost koja se neprekidno menja. Prilikom svake sistole IOP poraste za 0,77 do 2,31 mmHg i opada za istu vrednost prilikom diastole. Istovremeno svaki inspirijum podiže lagano IOP, dok se u ekspirijumu ponovo spušta. Dnevne varijacije IOP-a se normalno kreću od 3,08 do 3,85 mmHg.

Posebno mesto u dijagnostici glaukoma predstavlja praćenje dnevne krive IOP-a tj. redovno merenje IOP-a na 2 sata u periodu od 7 časova ujutru do 22 časa uveče. IOP na desnom i levom oku iste osobe je praktično jednak, kao normalna se prihvata razlika od 3,08 mmHg. Kod žena je prosečna vrednost IOP-a nešto veća nego kod muškaraca istih godina starosti, ali bez statistički značajne razlike [15].

ZAKLJUČAK

Goldmanova aplanaciona tonometrija idalje predstavlja zlatni standard za merenje IOP-a. Ona je tačna, ali ne i potpuno precizna. U cilju dobijanja preciznijih

vrednosti IOP-a mogu se koristiti i druge metode merenja IOP-a.

Literatura

1. European Glaucoma Society. Introduction. In: Terminology and Guidelines for Glaucoma. 4rd Edition. Savona, Italy: DOGMA; 2014; p: 79-89.
2. Kontić Đ. Tonometrija. U: Cvetković D, Kontić Đ, Hentova Senčanić P (eds). Glaukom: dijagnoza i lečenje. Beograd: Zavod za udžbenike i nastavna sredstva. 1996; pp. 43-71.
3. Garg A. Tonometry. In: Garg A, Melamed Sh, Mortensen J. Mastering the Techniques of Glaucoma Diagnosis and Management. New Delhi: Jitendar P, Vij Jaypee Brothers Medical EMCAHouse; 2006; pp. 65-72.
4. Lanza M, Rinaldi M, Carnevale UAG, di Staso S, Sconocchia MB, Costagliola C. Analysis of differences in intraocular pressure evaluation performed with contact and non-contact devices. BMC Ophthalmol. 2018; 18(1):233. doi: 10.1186/s12886-018-0900-5.
5. Kim HJ, Seo YH, Kim BH. New intraocular pressure measurement method using reflected pneumatic pressure from cornea deformed by air puff of ring-type nozzle. PLoS One. 2017; 12(12): e0186738. doi:10.1371/journal.pone.0186738.
6. Kouchaki B, Hashemi H, Yekta A, Khabazkhoob M. Comparison of current tonometry techniques in measurement of intraocular pressure. J Curr Ophthalmol. 2016; 29(2): 92-7. doi: 10.1016/j.joco.2016.08.010.
7. Blagojević M. Tehnika oftalmoloskog pregleda. U: Litričanin O, Blagojević M, Cvetković D (eds). Oftalmologija. Beograd: Medicinska knjiga; 1997; p. 15-54.
8. Estrovich IE, Chris S, Yvonne C, Crawford DJ, Stuart S, Michael S, et al. Schiotz Tonometry Accurately Measures Intraocular Pressure in Boston Type 1 Keratoprosthesis Eyes. Cornea: 2015; 34(6): 682-5. doi: 10.1097/ICO.0000000000000406.
9. Quigley HA. 21st century glaucoma care. Eye (Lond). 2019; 33(2): 254-60. doi: 10.1038/s41433-018-0227-8.
10. Punjabi O, Kniestedt Ch, Stemper RL, Lin ShC. Dynamic contour tonometry: principle and use. Clin Exper Ophthalmol. 2006; 34: 837-40. doi.org/10.1111/j.1442-9071.2006.01389.
11. Saenz-Frances F, Sanz-Pozo C, Borrego-Sanz L, Jañez L, Morales-Fernandez L, Martinez-de-la-Casa JM et al. Dependence of dynamic contour and Goldmann applanation tonometries on peripheral corneal thickness. Int J Ophthalmol. 2017; 10(10): 1521-7. doi: 10.18240/ijo.2017.10.07
12. De Bernardo M, Rosa N. Evaluation of Goldmann applanation tonometry, rebound tonometry and dynamic contour tonometry in keratoconus. J Optom. 2018;11(2):130-1. doi: 10.1016/j.optom.2017.10.001.
13. Ing E, Zhang A, Michaelov E, Wang W. Comparison of Dynamic Contour Tonometry and Non-contact Tonometry in Older Patients Presenting with Headache or Vision Loss. Open Ophthalmol J. 2018; 12: 104-109. doi: 10.2174/1874364101812010104.

14. Herndon WL. Best Instruments for Measuring IOP. Measuring IOP: Adjustments for Corneal Thickness and New Technologies. New Orleans, LA November, 2007.

15. Cvetković D. Hidrodinamika oka. U: Cvetković D, Kontić Đ, Hentova Senčanić P (eds). Glaukom dijagnoza i lečenje. Beograd: Zavod za udžbenike i nastavna sredstva; 1996; p.23-41.

Korespodencija:

Elena Jordanova

Kliničko bolnički centar Zemun

ul. Vukova 9

e-mail adresa: jordanova.elena@gmail.com

Rad primljen: 12.01.2019.

Prihvaćen: 20.08.2019

DIFFERENT METHODS FOR MEASURING INTRAOCULAR PRESSURE

Elena JORDANOVA¹, Paraskeva HENTOVA-SENĆANIĆ², Ivan MARJANOVIĆ^{3,4}, Ivan SENĆANIĆ⁵, Marko BARALIĆ⁶, Ivana STEFANOVIĆ⁷, Tanja PAVLOVIĆ⁸

¹Clinical Hospital Centre Zemun, Clinic for Internal Medicine, Department of Nephrology, Belgrade, Serbia; ²Medigroup – Ophthalmology Infirmary Oftalmika, Belgrade, Serbia; ³Clinical Centre of Serbia Eye Clinic, ⁴University of Belgrade School of Medicine, Belgrade, Serbia; ⁵Clinical Hospital Centre Zvezdara Eye Clinic, Belgrade, Serbia; ⁶Clinical Centre of Serbia Nephrology Clinic, Belgrade, Serbia; ⁷Municipal Institution for Emergency Medical Aid, Belgrade, Serbia; ⁸Clinical Hospital Centre Zemun, Clinic for Internal Medicine, Department of Nephrology, Belgrade, Serbia

ABSTRACT

Tonometry is a method for measuring intraocular pressure (IOP). Goldmann applanation tonometry (GAT) represents a golden standard for measuring IOP. The measurement is conducted by measuring the force needed to straighten out a certain area of the cornea. Errors do occur when using the GAT method: inadequate shape and arrangement of fluorescent pictures, bulbar pressure, wrong calibration, astigmatism, corneal pathology (edema, distortion, central corneal thickness), body posture, obesity, the Valsalva maneuver. Modifications of Goldmann's applanation tonometry are methods by Dreger, Perkins and Halberg. Alternative ways to measure IOP are: the digital method and the impression method using Schiotz tonometer. The dynamic contact tonometry (DCT, PASCAL) uses contact, but is a non-applanation method of measuring IOP. It is based on the matching shapes of the head of the tonometer and the cornea, enabling the head of the tonometer to take on the role of the bulbar sheath. Therefore, it directly measures the force transferred onto the bulbar sheath, which is the result of IOP. DCT is an ophthalmology device available commercially since 2004 that measures IOP directly by measuring dynamic pulsatile fluctuations in IOP using a piezoelectric sensor embedded into the tip that touches the cornea. Other tonometry methods are: a) pneumotonometry, b) Ocular Blood flow (OBF), c) non contact tonometry: Grolman's air tonometer, Air-puff tonometer, Ocular Response Analyser (ORA), d) Mackay-Marg electric tonometer, Tono-Pen, Proview Phosphene tonometer, Rebound tonometer. Goldmann applanation tonometry continues to be the golden standard in measuring IOP. It is exact, but not too precise. If more precise measurements are needed other methods of measuring IOP are available.

Key words: intraocular pressure, Goldmann applanation tonometry, dynamic contour tonometer