

SPREMLJANJE DELNEGA TLAKA OGLJIKOVEGA DIOKSIDA MED OŽIVLJANJEM

Helena Lenasi

UVOD

Spremljanje koncentracije oziroma delnega tlaka ogljikovega dioksida v končnem izdihanem zraku ($ETCO_2$, iz angl. *End-tidal CO₂*) in v arterijski krvi (P_{aCO_2}) predstavlja eno ključnih orodij za oceno učinkovitosti kardiopulmonalnega oživljanja (KPO) ter odraža učinkovitost ventilacije, perfuzije in njenega ujemanja v pljučih. $ETCO_2$ izmerimo neinvazivno s pomočjo kapnometrije (glej tudi poglavje Fiziološka načela oživljanja) in predstavlja nujen parameter v algoritmu naprednega oživljanja (ALS, iz angl. *Advanced Life Support*).

Ogljikov dioksid je končni produkt aerobne presnove, ki v celicah nenehno nastaja v procesih oksidativne razgradnje hranil (ogljikovih hidratov, maščob in beljakovin). V določenih fizioloških (denimo visokointenzivna telesna dejavnost) in patoloških pogojih, kadar ni na voljo dovolj kisika, nastaja tudi v procesih anaerobnih razgradenj. Iz celic CO_2 prehaja preko intersticija in kapilarnega omrežja v krvni obtok, s katerim se prenese do pljuč, kjer prek

alveolo-kapilarne membrane difundira v alveole, od koder ga izdihamo. Njegova koncentracija v izdihanem zraku zato neposredno odraža velikost celične presnove ter učinkovitost krvnega obtoka in alveolne ventilacije. Med srčnim zastojem in oživljanjem je določanje $ETCO_2$ izjemno občutljiv kazalnik učinkovitosti KPO.

Dejanski delni (parcialni) tlak CO_2 v arterijski krvi lahko določimo zgolj z odvzemom arterijske krvi, vendar med oživljanjem ni vedno zanesljiv, saj meritve ni kontinuirana in je odvisna od trenutka odvzema, zato ima določanje $ETCO_2$ prednost kot neinvazivni, kontinuirani in odzivni kazalnik trenutne učinkovitosti ventilacije in perfuzije.

V osnutkih smernic *European Resuscitation Council (ERC) Advanced Life Support 2025* konkretne številčne vrednosti še niso določene, a dokument *Consensus on Science and Treatment Recommendations (CoSTR)*, ki ga pripravlja Mednarodni usklajevalni odbor za oživljanje (ILCOR, iz angl. *International Liaison Committee on Resuscitation*), opredeljuje, da $ETCO_2$ ostaja nepogrešljiv pokazatelj kakovosti oživljanja in uspešnosti povrnitve spontane cirkulacije (ROSC, iz angl. *Return of Spontaneous Circulation*).

POMEN SPREMLJANJA $ETCO_2$ PRI OŽIVLJANJU

$ETCO_2$ je delni tlak CO_2 v končnem izdihanem zraku, ki predstavlja zrak iz alveolov. $ETCO_2$ tako odraža dinamično ravnovesje med alveolno ventilacijo, pljučno perfuzijo in celično presnovo.

$ETCO_2$ odraža preplet treh fizioloških spremenljivk:

1. Ventilacije – učinkovit pretok zraka in s tem prenos CO_2 iz alveolov
2. Perfuzije – pretok krvi skozi pljuča, transportni medij za CO_2
3. Presnove – tvorba CO_2 v tkivih

Zmanjšanje katere koli od zgoraj navedenih spremenljivk privede do znižanja $ETCO_2$ (tabela 1). Med srčnim zastojem se $ETCO_2$ zniža zaradi izrazito zmanjšanega pretoka krvi (perfuzije), kar vodi do kopičenja CO_2 v perifernih tkivih in krvi ter nezadostnega prenosa po krvnem obtoku v alveole. Med

učinkovitimi stisi prsnega koša umetno vzdržujemo krvni obtok (analog srčnega pretoka) in s tem perfuzijo. Krvni obtok, ki ga vzpostavimo mehansko, s stisi prsnega koša, seveda ni fiziološki in lahko doseže največ 25 % fiziološkega srčnega pretoka. $ETCO_2$ je tako posreden pokazatelj učinkovitosti stisov – višje vrednosti pomenijo boljšo umetno vzpostavitev krvnega obtoka (cirkulacije), torej tudi večjo perfuzijo.

Med oživljanjem se zato $ETCO_2$ uporablja kot realno-časovni pokazatelj kakovosti stisov prsnega koša in posredno tudi kot kazalnik možnosti za povrnitev spontanega obtoka.

Cilj KPO je vzdrževati $ETCO_2$ v območju, ki odraža ustrezno perfuzijo in ventilacijo – prenizek $ETCO_2$ med KPO kaže bodisi na nezadostno perfuzijo (oziroma analog srčno-črpalne funkcije) bodisi hiperventilacijo, previsok pa lahko nakazuje hipoventilacijo ali hipoperfuzijo. Razumevanje teh povezav je temeljno za pravilno interpretacijo podatkov med oživljanjem in pri nadaljnji oskrbi po ROSC.

Med oživljanjem, ko so spontan pretok krvi, ventilacija in presnova neustrezni, je $ETCO_2$ izjemno občutljiv kazalnik učinkovitosti zunanjih stisov prsnega koša. Z učinkovitimi stisi (kompresijami) ustvarjamo sicer izrazito omejen, a nujen pretok krvi (korelat srčnega pretoka), ki v tkivih in pljučih omogoča delno izmenjavo plinov. Za učinkovitost stisov so pomembni zlasti njihova globina, frekvenca in popolno sproščanje prsnega koša: ob optimalnih stisih je ustvarjeni krvni obtok večji, zato se lahko več CO_2 prenese iz tkiv v pljuča, od koder se CO_2 pretaka po dihalnih poteh v atmosfero, kar zaznamo kot višjo vrednost $ETCO_2$.

Stalno nizek $ETCO_2$ (< 10 mmHg) med oživljanjem kaže na nezadostno perfuzijo, kar lahko pomeni preplitke stise ali premajhno frekvenco stisov, prekinjeno ventilacijo ali mehansko oviro v dihalni poti. Poleg absolutne vrednosti $ETCO_2$ je pomembna tudi dinamika oziroma trend spremembe: nenaden porast $ETCO_2$ (npr. z 8 mmHg na > 30 mmHg) je pogosto prvi znak vzpostavitve učinkovite perfuzije, še preden zaznamo spremembe ostalih hemodinamskih parametrov, kot sta pulz in arterijski krvni tlak. Nenaden porast $ETCO_2$ kaže na vzpostavitev spontane srčne akcije (električne aktivnosti) in srčnega črpanja, ki poveča srčni pretok (tako sistemske kot pljučne cirkulacije) in s tem perfuzijo tkiv in pljuč, kar omogoči boljši prenos CO_2 v alveole. Nenaden

porast ETCO_2 je zato eden najzgodnejših in najzanesljivejših znakov uspešnega oživljanja.

ETCO_2 omogoča tudi oceno ustreznosti perfuzijskega tlaka v koronarni in možganski cirkulaciji. Študije kažejo, da vzdrževanje ETCO_2 nad 10–15 mmHg praviloma odraža koronarni perfuzijski tlak (CPP, iz angl. *Coronary Perfusion Pressure*) nad 15–20 mmHg – kar je minimalni prag za možnost ROSC.

Poleg ocene hemodinamike ETCO_2 omogoča tudi oceno ustreznosti umetnega predihavanja (ventilacije). Če so stisi učinkoviti, vrednost ETCO_2 pa postopoma upada, to lahko nakazuje hiperventilacijo ali pa zmanjšano nastajanje CO_2 zaradi zmanjšane presnove. Previsoke vrednosti ETCO_2 , ki ne sovpadajo s kliničnim stanjem, lahko pomenijo hipoventilacijo ali tehnično napako merjenja.

Sodobne smernice priporočajo kontinuirano spremljanje ETCO_2 pri vseh intubiranih bolnikih in pri bolnikih, kjer je uporabljen supraglotični pripomoček.

Tabela 1. Ventilacija, perfuzija in njun vpliv na ETCO_2 .

Fiziološki parameter	Sprememba	Učinek na ETCO_2	Klinični pomen
Ventilacija (↑)	Hiperventilacija	↓ ETCO_2	Znižanje pCO_2 zaradi prehitrega odstranjevanja
Ventilacija (↓)	Hipoventilacija	↑ ETCO_2	Povišanje pCO_2 v alveolah
Perfuzija (↓)	Slab »srčni iztis«	↓ ETCO_2	Slab pretok krvi skozi pljuča
Presnova (↑)	Povečana celična aktivnost	↑ ETCO_2	Hipertermija, sepsa
Presnova (↓)	Zmanjšana presnova	↓ ETCO_2	Hipotermija, znižan metabolizem

ETCO_2 , delni tlak ogljikovega dioksida (CO_2) v izdihanem zraku ob koncu izdih; pCO_2 delni tlak CO_2 ; ↑, zvišanje; ↓, znižanje.

Ujemanje ventilacije s perfuzijo

Učinkovita ventilacija med KPO ne pomeni le dovajanja kisika, temveč predvsem ohranjanje optimalnega razmerja med predihavanjem (ventilacijo) in prekravitvijo (perfuzijo). Ta dva procesa sta fiziološko povezana, saj le

optimalno razmerje med ventilacijo in perfuzijo omogoča optimalno dobavo kisika tkivom in oddajanje CO₂ v alveole in od tam v okolico. Med srčnim zastojem in KPO ventilacija in perfuzija pogosto postaneta disociirani, zato je za kar najbolj učinkovito KPO ključno razumevanje vpliva tlakov v prsnem košu na hemodinamiko (glej tudi poglavje Fiziološka načela oživljanja).

Med vsakim stisom prsnega koša se poveča intratorakalni tlak (ITP), kar omogoči potiskanje krvi iz srca v sistemski obtok. Ko se prsni koš sprosti, tlak pade, kar omogoči venski priliv v srce (»preload«). Če izvajalec umetnega predihavanja (PPV, iz angl. *Positive Pressure Ventilation*) bolnika predihava s prevelikim volumnom ali frekvenco, se povprečni intratorakalni tlak ne zniža dovolj – zato se zmanjša venski priliv, s tem »preload« in posledično »iztis«. To zmanjša pretok krvi skozi koronarne in možganske arterije, perfuzijo pljuč in zmanjša izmenjavo plinov ter poslabša izid oživljanja.

Sodobne smernice ERC ALS 2025 zato poudarjajo, da mora biti ventilacija zmerna, usklajena s stisi in fiziološko prilagojena. Namen ventilacije med KPO ni hiperventilacija, temveč vzdrževanje minimalne alveolne ventilacije, ki še omogoča odstranjevanje CO₂ in tako preprečuje acidozo, ter omogoča oksigenacijo, ne da bi pri tem ovirala venski priliv in s tem krvni obtok in perfuzijo.

Hiperventilacija povzroči hipokapnijo (znižan arterijski delni tlak CO₂, P_{aCO₂}). Ker je avtoregulacija v možganih tudi med srčnim zastojem deloma ohranjena, znižan P_{aCO₂} povzroči vazokonstrikcijo možganskih in koronarnih arterij in s tem manjšo perfuzijo možganov in srca, kar neposredno poslabša možnosti za uspešen ROSC. Hkrati hipokapnija vodi v alkalozo, kar poveča afiniteto hemoglobina za kisik, zato je oddajanje kisika v tkivih dodatno zmanjšano, torej je tkivna oksigenacija še slabša.

Hipoventilacija pa povzroči hiperkapnijo (povišan P_{aCO₂}), kar vodi v respiratorno acidozo, vazodilatacijo možganskih arterij in posledično povečanje intrakranialnega tlaka (ICP), zlasti po ROSC, ko je možganska avtoregulacija motena. Povišan ICP kljub vazodilataciji zniža perfuzijski tlak v možganih (CerPP). Zmanjšana perfuzija možganov povečuje tveganje za sekundarne poškodbe možganov.

S fiziološkega vidika je torej cilj dinamično ravnovesje med stisi in predihavanjem – vzdrževanje takšne ventilacije, ki podpira krvni obtok (cirkulacijo) in

s tem perfuzijo ter hkrati omogoča učinkovito odstranjevanje CO₂, ne da bi se povečal ITP, kar bi ogrozilo hemodinamiko.

V praksi se zato priporoča:

- Frekvenca PPV približno 10 vpihov na minuto (asinhrono ob dobrem tesnjenju maske, supraglotičnega pripomočka ali endotrahealne cevke).
- »Dihalni« volumen (gre za dihalni volumen, s katerim predihavamo bolnika) približno 6–7 mL/kg idealne telesne mase.
- ETCO₂ ohranjamo v območju nad 10–20 mmHg med oživljanjem in nad 30–35 mmHg po vzpostavitvi ROSC.

Upoštevanje teh smernic omogoča vzdrževanje ustreznih delnih tlakov plinov (CO₂ in kisika) v alveolih in arterijski krvi, preprečuje prekomerno ekspanzijo pljuč in ohranja optimalen venski priliv ter s tem pretok krvi in zadostno perfuzijo možganov in srca.

Fiziološko gledano je to najboljši kompromis med dvema nasprotujočima ciljema: zagotoviti tkivom dovolj kisika za aerobno presnovo ob hkratnem odvajanju CO₂, ne da bi s tem ogrozili krvni pretok.

Klinični pomen za tim oživljanja

Čeprav smernice ERC ALS 2025 še ne uvajajo natančno določenih ciljnih vrednosti za ETCO₂ in/ali P_{aCO₂}, dokumenti CoSTR dosledno poudarjajo, da višje vrednosti ETCO₂ med KPO korelirajo z večjo verjetnostjo preživetja in povrnitve ROSC. Izidi so praviloma boljši, kadar je ETCO₂ ≥ 10–20 mmHg med reanimacijo ter ETCO₂ > 30 mmHg po ROSC, kar odraža zadostno perfuzijo in učinkovito ventilacijo (tabela 2).

Kadar ETCO₂ kljub pravilnemu ritmu in globini stisov vztraja pod 10 mmHg, mora tim najprej preveriti vse mehanske in fiziološke dejavnike, ki lahko omejujejo učinkovitost oživljanja:

- Učinkovitost ventilacije: ali zrak dejansko vstopa v pljuča (izključiti zaporo dihalne poti, pnevmotoraks ali napihovanje želodca).
- Tesnjenje dihalne poti: preveriti namestitve maske, supraglotičnega pripomočka ali endotrahealne cevke.
- Moč in globina stisov: ali so stisi dovolj globoki (5–6 cm pri odraslih) in se prsni koš med stisi popolnoma sprosti.

- Reverzibilni vzroki srčnega zastoja (5 H in 5 T): hipovolemija, hipoksija, hipo-/hiperkaliemija, hipotermija, tamponada srca, tenzijski pnevmotoraks, tromboza, toksini ipd.

Spremembe v vrednosti $ETCO_2$ pomenijo takojšnje posredno sporočilo o tem, kaj se dogaja s srčno-žilnim sistemom in ventilacijo. Nenadno znižanje $ETCO_2$ med oživljanjem pogosto pomeni ponovni zastoj cirkulacije, nenaden porast pa najverjetneje ROSC. Za tim oživljanja mora biti $ETCO_2$ signal za nadaljnje ukrepanje in prilagajanje KPO spremenjenim razmeram.

Spremljanje $EtCO_2$ v realnem času je zato neprecenljivo orodje za dinamično prilagajanje oživljanja: omogoča oceno kakovosti stisov, odločanje o nadaljevanju ali prekinitvi oživljanja in razlikovanje med učinkovitimi ter neučinkovitimi ukrepi.

Tabela 2. Klinični pomen vrednosti $ETCO_2$ med oživljanjem.

Vrednost $ETCO_2$ (mmHg)	Možna razlaga	Klinični pomen
< 10	Nezadostne kompresije, slaba perfuzija	Nizka možnost ROSC
10–20	Zmerna učinkovitost KPO	Sprejemljivo, potrebno spremljanje
20–35	Učinkoviti ventilacija in perfuzija	Optimalno območje med oživljanjem
> 35	Možna hipoventilacija ali ROSC	Preveriti spontani obtok (ROSC)

$ETCO_2$, delni tlak ogljikovega dioksida (CO_2) v izdihanem zraku ob koncu izdih; ROSC, povrnitev spontane cirkulacije; KPO, kardiopulmonalno oživljanje.

Pomen izobraževanja

Za fiziologa, inštruktorja ali vodjo tima ALS ima lahko $ETCO_2$ tudi izobraževalno vrednost – uči, kako se nekatere fiziološke spremenljivke odražajo v kliničnem parametru, ki ga lahko spremljamo pri bolniku. $ETCO_2$ torej omogoča, da se odločanje med oživljanjem opira na objektivne in takoj merljive podatke.

Z izobraževalnega vidika je torej pomembno, da fiziolog ali inštruktor ALS, ki pripravlja učni modul, poudari, da $ETCO_2$ ni le tehnični parameter, temveč fiziološki kazalnik kakovosti celotnega procesa oživljanja. Razumevanje mehanizmov, ki vplivajo na $ETCO_2$, omogoča reanimacijskemu timu, da v realnem času prepozna morebitne napake in jih takoj odpravi.

Sodobni trendi v izobraževanju temeljijo na simulacijskem pristopu, kjer spremljanje $ETCO_2$ ni samo dodatek, temveč integralni del ocene kakovosti oživljanja. Takšne simulacije fiziološko povežejo teorijo in prakso: udeleženci se učijo, kako spremembe $ETCO_2$ v nekaj sekundah odražajo učinkovitost ukrepov in kako lahko ustrezna interpretacija parametra poveča preživetje.

Poleg tehničnega obvladovanja meritev $ETCO_2$, njihove interpretacije in ustreznega odziva, torej ukrepanja, je zato pomembno tudi razumevanje fiziološkega pomena CO_2 kot kazalnika interakcije med srcem, pljuči in možgani.

ZAKLJUČEK

Merjenje $ETCO_2$ med KPO je eden najzanesljivejših neinvazivnih kazalnikov kakovosti zunanjih stisov prsnega koša in ustreznega predihavanja, saj v realnem času odraža, kako učinkovito KPO zagotavlja perfuzijo in izmenjavo plinov med KPO.

$ETCO_2$ odraža velikost nastajanja CO_2 v procesih presnove ter dinamično ravnovesje med delovanjem srca (oziroma stisi prsnega koša med KPO), krvnega obtoka in pljuč (PPV med KPO). Vsaka sprememba v katerem koli od teh sistemov se v nekaj sekundah odrazi v spremembi $ETCO_2$, kar omogoča neposreden vpogled v učinkovitost KPO. Nizke vrednosti $ETCO_2$ opozarjajo na neučinkovite stise in slab pretok krvi, nenaden porast pa pogosto napoveduje ROSC, zato je $ETCO_2$ tudi zgodnji pokazatelj povrnitve cirkulacije.

V učnem in simulacijskem okolju mora biti $ETCO_2$ obravnavan kot temeljno orodje za razumevanje fiziologije oživljanja, s čimer krepi tudi klinično presojo, timsko komunikacijo in prilagodljivost med oživljanjem.

Spremljanje $ETCO_2$ naj bi torej postalo temeljno diagnostično orodje ALS.

Literatura

- Bhende MS, Thompson AE. End-tidal carbon dioxide monitoring in the emergency department: clinical utility and limitations. *Ann Emerg Med.* 2021;78(3):295–303. doi:10.1016/j.annemergmed.2021.03.016.
- Callaham M, Barton C. Prediction of outcome of cardiopulmonary resuscitation from end-tidal carbon dioxide concentration. *N Engl J Med.* 1990;322(5):301–6. doi:10.1056/NEJM199002013220503.
- Gradišek P, Križmarić M, Kocijančič A, et al. Spremljanje bolnika v intenzivni terapiji: dihalna in hemodinamska podpora. *Zdrav Vestn.* 2019;88(9–10):431–41. doi:10.6016/ZdravVestn.2801.
- Grmec Š, Klemen P. Capnometry in cardiac arrest: early prognostic indicator of successful resuscitation? *Crit Care.* 2001;5(3):R171–6. doi:10.1186/cc1025.
- Kodali BS, Urman RD. Capnography during cardiopulmonary resuscitation and post-resuscitation care. *Anesth Analg.* 2022;135(1):69–80. doi:10.1213/ANE.0000000000005903.
- Kolar M, Klemen P, Grmec Š, et al. Partial pressure of end-tidal carbon dioxide successful predicts cardiopulmonary resuscitation in the field: a prospective observational study. *Crit Care.* 2008;12(5):R115. doi:10.1186/cc7002.
- Križmarić M, Balažic P, Košir A, et al. Monitoring end-tidal CO₂ in prehospital cardiac arrest – prognostic value and ethical implications. *Resuscitation.* 2020;152:230–6. doi:10.1016/j.resuscitation.2020.03.008.
- Perkins GD, Gräsner JT, Semeraro F, et al. European Resuscitation Council Guidelines 2021: Adult advanced life support. *Resuscitation.* 2021;161:115–51. doi:10.1016/j.resuscitation.2021.02.010.
- Soar J, Böttiger BW, Carli P, et al. European Resuscitation Council Guidelines 2025: Adult Advanced Life Support. *Resuscitation.* 2025;215(Suppl 1):110769. doi:10.1016/j.resuscitation.2025.
- Soar J, Nolan JP, Böttiger BW, et al. International Consensus on Cardiopulmonary Resuscitation Science With Treatment Recommendations (CoSTR). *Resuscitation.* 2022;170:1–39. doi:10.1016/j.resuscitation.2022.02.015.
- Šoštarič M, Novak J, Križmarić M, et al. Vpliv hiperventilacije na cerebralno perfuzijo med oživljanjem: fiziološki vidiki in klinični pomen. *Zdrav Vestn.* 2023;92(7–8):352–8. doi:10.6016/ZdravVestn.3432.