



Ultrazvučna procjena dijafragme u predviđanju uspješnosti odvajanja od mehaničke ventilacije

Ultrasound guided assessment of the diaphragm in predicting success of weaning from mechanical ventilation

Marcela Čučković¹ , Jasminka Peršec^{1,2}

¹ Klinika za anesteziologiju, reanimatologiju i intenzivnu medicinu, Klinička bolnica Dubrava, Zagreb

² Katedra za anesteziologiju s reanimatologijom, Stomatološki fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb

Deskriptori

DIJAFRAGMA – patofiziologija, slikovna dijagnostika;
ULTRASONOGRAFIJA – metode;
ODVAJANJE OD VENTILATORA;
MEHANIČKA VENTILACIJA – komplikacije;
ATROFIJA

Descriptors

DIAPHRAGMA – diagnostic imaging, physiopathology;
ULTRASONOGRAPHY – methods;
VENTILATOR WEANING;
RESPIRATION, ARTIFICIAL – adverse effects;
ATROPHY

SAŽETAK. *Uvod:* Dijafragma je najvažniji mišić zadužen za udah. Većina bolesnika u jedinicama intenzivne medicine ima neki oblik poremećaja funkcije dijafragme koji se javlja u prvih nekoliko dana mehaničke ventilacije. Respiratorom inducirana disfunkcija dijafragme često je neprepoznata u kliničkoj praksi, a povezana je s otežanim odvajanjem od mehaničke ventilacije. *Rezultati:* Ultrazvuk dijafragme je sigurna i jednostavna metoda kojom se mogu mjeriti amplituda pokretljivosti, debljina te brzina kontrakcije dijafragme. *Rasprava:* Amplituda pokretljivosti dijafragme i frakcija zadebljanja dijafragme mogu biti prediktori uspješnog odvajanja od mehaničke ventilacije. Ultrazvuk dijafragme može se usporediti i s drugim široko prihvaćenim indeksima odvajanja od mehaničke ventilacije poput indeksa brzoga plitkog disanja. Prema ultrazvuku dijafragme može se voditi i protektivna ventilacija dijafragme. *Zaključak:* Tehnika ultrazvuka dijafragme ima svojih nedostataka, dosad provedena istraživanja su heterogena i ne postoje jasno definirani protokoli ultrazvučnih mjerenja kao niti referentne vrijednosti dobivenih rezultata mjerenja.

SUMMARY. *Introduction:* The diaphragm is the most important muscle responsible for inspiration. Most patients in intensive care units have some form of diaphragmatic dysfunction that occurs within the first few days of mechanical ventilation. Ventilator-induced diaphragmatic dysfunction is often unrecognized in clinical practice and is associated with difficult weaning from mechanical ventilation. *Results:* Diaphragmatic ultrasound is safe and simple method that can measure the amplitude of motion, thickness, and contraction velocity of the diaphragm. *Discussion:* Diaphragmatic motion amplitude and diaphragmatic thickening fraction can be predictors of successful weaning from mechanical ventilation. Diaphragmatic ultrasound can also be compared with other widely accepted indices of weaning from mechanical ventilation, such as the rapid shallow breathing index. Diaphragmatic ultrasound can also be used to guide diaphragm-protective mechanical ventilation. *Conclusion:* The technique of diaphragmatic ultrasound has its drawbacks; the conducted researches are heterogeneous and there are no clearly defined protocols for ultrasound measurements or reference values for obtained measurement results.

Dijafragma ili ošit je najvažniji mišić koji sudjeluje u procesu disanja, a smješten je između prsne i trbušne šupljine. Anatomski, dijeli se na središnju tetivu i periferne mišićne vlakna koja se dalje dijele na središnji, takozvani kruralni dio, koji polazi od slabinskih kralježaka i periferni rebreni dio, odnosno takozvanu zonu apozicije koja polazi od 7. do 12. rebra. Dijafragmu inerviraju frenični živci koji izlaze iz kralježnice na razini C3-C5. Za vrijeme kontrakcije dijafragma se pomiče kaudalno te se povećanjem volumena prsne šupljine stvara negativni tlak koji omogućava udah. Više od 60% bolesnika primljenih u jedinicu intenzivne medicine ima neki oblik poremećaja funkcije dijafragme koji može biti djelomičan ili potpun te zahvaćati jednu stranu ili cijelu dijafragmu.^{1,2,3} Disfunkcija dijafragme klinički se očituje otežanim i ubrzanim disanjem, a karakterističan znak je paradoksalno disa-

nje. Međutim, naročito kod jednostrane i djelomične paralize dijafragme te u bolesnika na mehaničkoj ventilaciji, često je ta disfunkcija neprepoznata u kliničkoj praksi.⁴ Disfunkcija dijafragme dovodi do produljenog odvajanja od mehaničke ventilacije, potrebe za ponovnom intubacijom, traheotomijom te naposljetku povećane stope mortaliteta u jedinici intenzivne medicine.¹ Procjena pravog trenutka odvajanja od mehaničke ventilacije predstavlja velik izazov u intenzivnoj medicini jer prerano odvajanje doprinosi razvoju respira-

Adresa za dopisivanje:

Marcela Čučković, dr. med., univ. spec. med., <https://orcid.org/0000-0003-1064-1875>
Klinika za anesteziologiju, reanimatologiju i intenzivnu medicinu,
Klinička bolnica Dubrava, Avenija Gojka Šuška 6, 10000 Zagreb,
e-pošta: marcelamarcec@gmail.com

Primljeno 20. svibnja 2025., prihvaćeno 11. studenoga 2025.

tornih komplikacija i produljenju boravka u jedinici intenzivne medicine.⁵ Otežano odvajanje od mehaničke ventilacije događa se u do 25% bolesnika⁶, a prema Bolesu i sur. definira se kao nemogućnost odvajanja od mehaničke ventilacije nakon tri ili više neuspješnih testova spontanog disanja ili mehanička ventilacija dulja od tjedan dana nakon prvoga provedenog testa spontanog disanja.⁷ Ultrazvuk dijafragme je visoko osjetljiva i specifična metoda te sigurna, neinvazivna i jednostavna tehnika koja se izvodi uz krevet bolesnika, a kojom se mogu mjeriti pokretljivost, debljina te kontraktilnost tog kupolasto oblikovanog mišića.^{3,8}

Cilj i metode rada

Cilj je ovog rada dati pregled literature vezane uz primjenu ultrazvuka dijafragme u jedinicama intenzivne medicine prilikom odvajanja od mehaničke ventilacije.

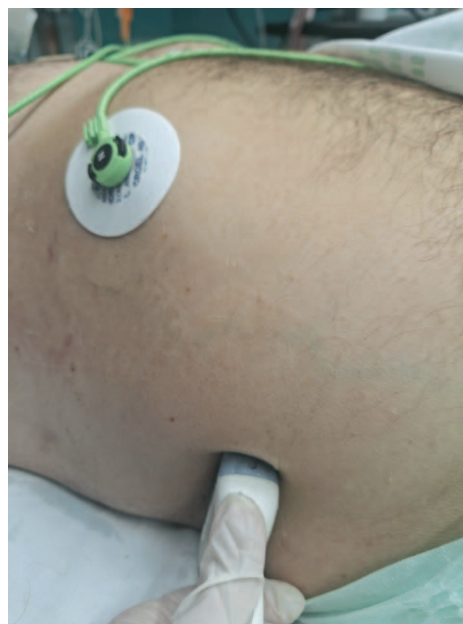
Pretražena je elektronička baza podataka PubMed do travnja 2025. godine, na engleskom jeziku, bez ograničenja prema vrsti istraživanja i godini objave članka te prema ključnim riječima: „*diaphragm ultrasound*“ (hrv. ultrazvuk dijafragme), „*diaphragm and weaning*“ (hrv. dijafragma i odvajanje), „*diaphragm dysfunction*“ (hrv. disfunkcija dijafragme), „*diaphragm thickness*“ (hrv. debljina dijafragme), „*diaphragm excursion*“ (hrv. pokretljivost dijafragme). Eliminacijom nepovezanih i ponavljajućih članaka i nakon probira prema sažetcima, pročitani su cjeloviti radovi i preuzete su relevantne referencije te je napravljen sistematizirani pregled literature.

Priložene slike su originalno djelo autora rada.

Rezultati ultrazvučnih mjerenja dijafragme

Ultrazvukom dijafragme najčešće se mjere amplituda pokretljivosti i debljina dijafragme te brzina kontrakcije. U novijoj literaturi spominju se i novije ultrazvučne tehnike,⁹ no s obzirom na nedostatan broj istraživanja iste nisu navedene u ovom radu. Kako se struktura i funkcija dijafragme neprestano mijenjaju, potrebno je više ultrazvučnih mjerenja kako bi se dobila prava slika dinamike funkcije dijafragme u vremenu.^{10,11} U intubiranih bolesnika, debljinu i pokretljivost dijafragme trebalo bi mjeriti s minimalnom potporom respiratora ili ako je moguće bez nje, kako bi se dobili realniji rezultati.¹² Preferirani položaj bolesnika jest supinacijski zbog boljeg prikaza dijafragme, jednostavnosti i manje varijabilnosti između vremenski odvojenih mjerenja, iako se dijafragma može mjeriti i u polusjedećem, sjedećem ili rijetko stajaćem položaju.¹

Pokretljivost dijafragme mjeri se konveksnom ultrazvučnom sondom frekvencije između 2 i 5 MHz položenom subkostalno koristeći jetru odnosno slezenu



SLIKA 1. SUBKOSTALNI POLOŽAJ ULTRAZVUČNE SONDE ZA PRIKAZ POKRETLJIVOSTI DIJAFRAGME

FIGURE 1. SUBCOSTAL PLACEMENT OF THE ULTRASOUND PROBE TO DISPLAY THE MOVEMENT OF THE DIAPHRAGM

kao akustični prozor (slika 1). Dijafragma se najbolje prikazuje u M-modu kao zadebljala ehogena linija (slika 2). Pokretljivost dijafragme mjeri se na početku i kraju udaha odnosno izdaha te je obično veća straga i postranično te u muškaraca.^{9,13,11}

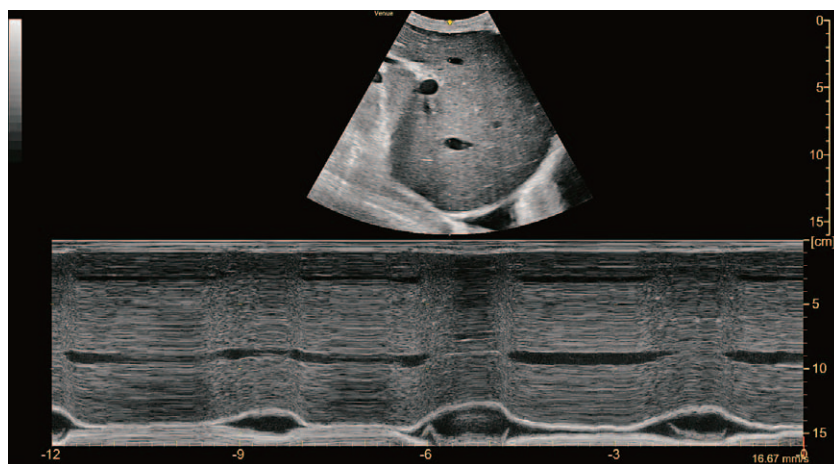
Donje referentne vrijednosti amplitude pokretljivosti dijafragme razlikuju se i u plitkom i dubokom disanju; u plitkom disanju te vrijednosti iznose 0,9 cm za žene i 1 cm za muškarce, a u dubokom disanju 3,6 cm za žene odnosno 4,7 cm u muškaraca.⁴ Na disfunkciju dijafragme ukazuje i prisutnost paradoksalnih pokreta.³

Uz pokretljivost dijafragme moguće je izmjeriti i brzinu kontrakcije dijafragme koja kvantitativno odražava snagu kontrakcije.¹⁴

Debljina dijafragme mjeri se linearnom ultrazvučnom sondom frekvencije 7–12 MHz u području zone apozicije. Sonda se položi između 8. i 10. međurebrenog prostora, u kranio-kaudalnom smjeru u prednjoj aksilarnoj liniji ili između prednje i srednje aksilarne linije (slika 3).

Dijafragma se prikazuje u B-prikazu kao hipoehogena linija između pleure i peritoneuma; najdeblja je na kraju udaha, a najtanja na kraju izdaha. U paralizirane dijafragme nema razlike u debljini dijafragme u udahu i izdahu. Donja granica normalnih vrijednosti u zdravih pojedinaca je između 0,8 i 1,6 mm (slika 4).

Mora se napomenuti kako dobivene vrijednosti debljine dijafragme ovise o položaju bolesnika, tjelesnoj konstituciji te međurebrenom prostoru; donji dijelovi



SLIKA 2. DIJAFRAGMA SE UOČAVA KAO EHOGENA LINIJA UZ JETRU; NORMALAN NALAZ DIJAFRAGME U B-MODU I M-MODU

FIGURE 2. THE DIAPHRAGM IS SEEN AS AN ECHOGENIC LINE NEXT TO THE LIVER; NORMAL FINDING OF THE DIAPHRAGM IN B- AND M-MODE



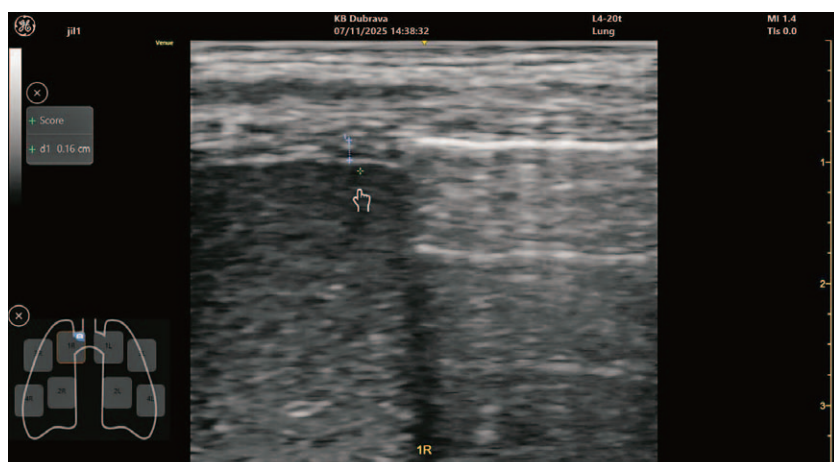
SLIKA 3. POLOŽAJ ULTRAZVUČNE SONDE U ZONI APOZICIJE ZA MJERENJE DEBLJINE DIJAFRAGME

FIGURE 3. THE POSITION OF THE ULTRASOUND PROBE IN THE APPPOSITION ZONE FOR MEASURING THE THICKNESS OF THE DIAPHRAGM

dijafragme su deblji nego gornji.^{9,13} Dijafragma može biti paradoksalno zadebljana u određenih neuromuskularnih bolestima, a na debljinu dijafragme utječu i životna dob, spol i pušenje.⁴ Ako se, prilikom višestrukih mjerenja, debljina dijafragme smanji za više od 10% od prvobitno izmjerene vrijednosti, može se govoriti o atrofiji dijafragme.⁹

Precizniju procjenu atrofije dijafragme daje frakcija zadebljanja dijafragme (engl. *diaphragmal thickness fraction*, DTF) koja se najbolje opisuje sljedećom formulom: razlika u debljini dijafragme na kraju udaha i na kraju izdaha podijeljeno s debljinom dijafragme na kraju izdaha, izraženo u postotku.^{3,13} Frakcija zadebljanja dijafragme odražava sposobnost kontrakcije dijafragme tijekom ciklusa disanja.¹⁵

Na debljinu dijafragme kratkotrajno i reverzibilno utječu i intravenski anestetici, i to najviše propofol, koji smanjuju debljinu dijafragme na kraju izdaha.¹⁶ I pozitivni tlak na kraju izdaha (engl. *positive end-expiratory pressure*, PEEP) ima utjecaja na debljinu i funkciju dijafragme. Naime, pri većim vrijednostima PEEP-a dolazi do skraćivanja mišićnih vlakana dijafragme te time dolazi do zadebljanja dijafragme i smanjenja snage kontrakcije, stoga su frakcija zadeblja-



SLIKA 4. IZMJERENA DEBLJINA DIJAFRAGME OD 0,16 CM (OZNAČENO PLAVIM POKAZIVAČEM) U PACIJENTA NA MEHANIČKOJ VENTILACIJI

FIGURE 4. MEASURED DIAPHRAGM THICKNESS OF 0.16 CM (MARKED WITH A BLUE POINTER) IN A PATIENT ON MECHANICAL VENTILATION

nja dijafragme i amplituda pokretljivosti dijafragme manje.¹⁰

Rasprava

Uloga ultrazvuka dijafragme u odvajanju od mehaničke ventilacije

Čak 80% bolesnika razvije atrofiju dijafragme u prvih 48 sati mehaničke ventilacije, što se u literaturi naziva respiratorom inducirana disfunkcija dijafragme, koja je povezana s nemogućnošću odvajanja i produljenom mehaničkom ventilacijom.^{2,3} Uzroci razvoja disfunkcije dijafragme brojni su, međutim, u kontekstu mehaničke ventilacije najčešći uzrok je previsoka tlačna potpora respiratora koja dovodi do atrofije mišića, kao i kontrolirani modaliteti mehaničke ventilacije u usporedbi sa spontanim modalitetima.¹⁶ Patofiziologija navedene disfunkcije osim atrofije mišićnih vlakana uključuje i oksidativni stres, poremećaj homeostaze unutarstaničnog kalcija i proteolizu mišića.^{14,17} Kod kontroliranih modaliteta mehaničke ventilacije dolazi do svakodnevnog smanjenja debljine dijafragme za 6%, dok započinjanjem ventilacije u asistiranom modalitetima zbog aktivacije dijafragmalnih mišićnih vlakana dolazi do postupnog oporavka debljine.¹⁸ Na smanjenje debljine dijafragme u kritično oboljelih bolesnika utječe i generalizirana mišićna slabost te stanja poput primjerice sepse.¹⁹ Osim toga, u stanjima teške hipoksije, poput septičnog šoka ili zatajenja srca, funkcija dijafragme nije uvijek poremećena, već povećan rad disanja dovodi do nemogućnosti odvajanja od mehaničke ventilacije.¹¹ U određenog dijela bolesnika debljina dijafragme se ne mijenja ili se čak povećava, što se pripisuje pokušaju kompenzacijske hipertrofije mišića.¹³

Protokoli odvajanja od mehaničke ventilacije razlikuju se između ustanova. Test spontanog disanja uglavnom uključuje odvajanje pomoću T-nastavka, prilikom čega bolesnik ostaje intubiran, ali bez potpore respiratora, s ciljem održavanja periferne saturacije iznad 92%. Druga opcija je test spontanog disanja uz minimalnu tlačnu potporu respiratora (najčešće 5 cm H₂O). Uspješnim odvajanjem uglavnom se smatra adekvatno spontano disanje više od 48 sati nakon ekstubacije.^{5,18}

Provedena istraživanja vezana uz ulogu ultrazvuka dijafragme u odvajanju od mehaničke ventilacije heterogena su, odnosno nema jasno definiranih referentnih vrijednosti mjerenja i različiti su zaključci studija. Amplituda pokretljivosti dijafragme i frakcija zadebljanja dijafragme, s osjetljivošću i specifičnošću iznad 80%, mogu biti prediktori uspješnog odvajanja od mehaničke ventilacije.¹⁰ Jedna metaanaliza je pokazala kako ultrazvukom izmjerena amplituda pokretljivosti dijafragme veća od 10 mm, kao i frakcija zadebljanja dijafragme iznad 30%, mogu biti prediktori uspješnog odvajanja od

TABLICA 1. REZULTATI METAANALIZA ULTRAZVUČNIH MJERENJA DIJAFRAGME KAO PREDIKTORA USPJEŠNOG ODVAJANJA OD MEHANIČKE VENTILACIJE

TABLE 1. RESULTS OF META-ANALYSES OF ULTRASOUND MEASUREMENTS OF THE DIAPHRAGM AS A PREDICTOR OF SUCCESSFUL WEANING FROM MECHANICAL VENTILATION

Metaanalize Meta-analyses	Broj uključenih studija Number of included studies	Vrijednosti ultrazvučnih mjerenja povezane s uspješnim odvajanjem od mehaničke ventilacije (osjetljivost/specifičnost) Ultrasound measurement values associated with successful weaning from mechanical ventilation (sensitivity/specificity)
Parada-Gereda i sur./et al. ⁵	19	DTF 29% (85%/75%) DE >1 cm (80%/80%)
Mahmoodpoor i sur./et al. ⁸	19	DTF >30% (87%/77%)

DTF = diaphragmal thickness fraction/hrv. frakcija zadebljanja dijafragme
DE = diaphragm excursion / hrv. pokretljivost dijafragme

mehaničke ventilacije, no uz značajnu heterogenost različitih studija, prvenstveno u smislu različitog položaja bolesnika za vrijeme ultrazvučnih mjerenja. Prema istoj metaanalizi upitno je i koliko vrijeme provedeno na mehaničkoj ventilaciji utječe na funkciju dijafragme odnosno uspješnost odvajanja od respiratora.⁵ Prema većini istraživanja, vrijednost frakcije zadebljanja dijafragme iznad 36% u korelaciji je s uspješnim odvajanjem od mehaničke ventilacije nakon testa spontanog disanja, dok vrijednost ispod 20% ukazuje na vjerojatnu paralizu odnosno atrofiju dijafragme.^{3,13} Frakcija zadebljanja dijafragme ima pozitivnu prediktivnu vrijednost za bolesnike koji će se uspješno odvojiti od mehaničke ventilacije i ekstubirati bez razvoja komplikacija.⁶ S druge strane, u oboljelih od COVID-19 frakcija zadebljanja dijafragme nije se pokazala kao prediktor neuspješnog odvajanja od mehaničke ventilacije.²⁰ Nadalje, prema jednom istraživanju brzina kontrakcije dijafragme iznad 8 mm u sekundi ima visoku osjetljivost i specifičnost za uspješnu ekstubaciju.¹⁴

Tablica 1 prikazuje rezultate metaanaliza, odnosno granične vrijednosti te osjetljivost i specifičnost ultrazvučnih parametara povezanih s uspješnim odvajanjem od mehaničke ventilacije.

Smjernice Europskog društva intenzivne medicine (engl. *European Society of Intensive Care Medicine*, ESICM) za korištenje ultrazvuka u jedinicama intenzivne medicine iz 2021. godine navode slabu preporuku za ultrazvučnu procjenu pokretljivosti dijafragme kao osnovne vještine u procjeni funkcije dijafragme u bolesnika koji su u procesu odvajanja od mehaničke ventilacije. Za indeks zadebljanja dijafragme ne mogu dati preporuku jer je zahtjevnija tehnika za izvođenje.²¹

Međutim, neki su bolesnici unatoč dokazanoj disfunkciji dijafragme ipak uspješno odvojeni od mehaničke ventilacije.¹⁰ Navedeno se objašnjava činjenicom kako uspješno odvajanje od mehaničke ventilacije ovisi o više čimbenika: oporavku od bolesti, radi li se o akutnoj infektološkoj bolesti ili primjerice akutizaciji kronične bolesti poput kronične opstruktivne bolesti pluća te ostalim kroničnim komorbiditetima. Kako se bolesnik oporavlja od osnovne bolesti tako se i funkcija pluća popravljaju te se time i kompenzira atrofija dijafragme.^{17,22} Nakon uspješnog testa spontanog disanja ultrazvučno dijagnosticirana disfunkcija dijafragme nije povezana s neuspješnim odvajanjem.¹⁰ Ultrazvuk dijafragme je stoga možda bolji prediktor uspješnosti testa spontanog disanja nego same ekstubacije, zato bi prva mjerenja trebalo učiniti i prije početka testa spontanog disanja.¹²

U bolesnika s akutnim respiratornim distres sindromom frakcija zadebljanja dijafragme sama po sebi ne može previdjeti ishod odvajanja od mehaničke ventilacije i ekstubacije, no u kombinaciji s ultrazvukom pluća i indeksom brzoga plitkog disanja (engl. *Rapid Shallow Breathing Index*, RSBI) na kraju testa spontanog disanja može predvidjeti uspješnost ekstubacije.¹⁵ RSBI je omjer frekvencije disanja i udisajnog volumena; vrijednost ispod 105 udara u minuti po litri udisajnog volumena ukazuje na vjerojatno uspješnu ekstubaciju. Široko je upotrebljavan indeks prvenstveno zbog svoje jednostavnosti, visoke osjetljivosti i specifičnosti, no uzima u obzir ulogu svih mišića zaduženih za udah, a ne isključivo individualnu funkciju dijafragme. Također, može biti lažno pozitivan budući da kod disfunkcije dijafragme drugi mišići mogu kompenzirati nedostatnu funkciju dijafragme za ostvarenje adekvatnog volumena udara, no ti isti mišići brzo se zamore i više ne mogu ostvariti kompenzaciju te se javlja potreba za reintubacijom.¹⁴ Nekoliko studija na manjem broju bolesnika pokazalo je kako je ultrazvuk dijafragme bolji indeks predviđanja uspješne ekstubacije od RSBI-a,^{23,24} pogotovo u starijoj populaciji,²⁵ no daljnja istraživanja na većem broju bolesnika ipak su potrebna kako bi se dobili značajniji rezultati. Jedna metaanaliza je pokazala kako je indeks zadebljanja dijafragme točnija metoda od drugih ultrazvučnih mjerenja kao i od RSBI-a.⁸ Neki autori su predložili omjer frekvencije disanja i amplitude pokretljivosti dijafragme kao prediktor odvajanja od mehaničke ventilacije (tzv. D-RSBI, odnosno, omjer RR/DE), no pitanje je koliko prediktivnu vrijednost taj omjer uistinu ima. S druge strane, omjer frekvencije disanja i frakcije zadebljanja dijafragme (omjer RR/DTF), s osjetljivošću većom od 87% i specifičnošću od 75%, potencijalno je dobar prognostički indeks odvajanja od mehaničke ventilacije jer uzima u obzir individualnu funkciju dijafragme u procesu disanja kao i sam rad disanja.^{11,26} Također, jedna manja studija je pokazala

kako je ultrazvuk dijafragme jednakovrijedan tradicionalnim kliničkim prediktorima odvajanja od mehaničke ventilacije poput hemodinamske stabilnosti, izostanka respiratornog distresa i održavanja normalnih vrijednosti tlakova dišnog sustava.²⁷

Osim predviđanja uspješnosti odvajanja od mehaničke ventilacije, ultrazvuk dijafragme može imati ulogu i u predviđanju uspješnosti neinvazivne ventilacije u bolesnika s akutnom egzacerbacijom kronične plućne bolesti. Naime, istraživanja su pokazala kako je unutar jednog sata od započinjanja neinvazivne ventilacije pokretljivost dijafragme veća od 1,8 cm povezana s padom PaCO₂ odnosno sa smanjenjem dinamičke hiperinflacije. Predviđanje uspješnosti neinvazivne ventilacije smanjuje rizik zakašnjelog započinjanja mehaničke ventilacije.¹⁹

Ultrazvuk dijafragme ima svoju ulogu u praćenju oporavka debljine i funkcije mišića¹³ te, u skladu s navedenim, može biti alternativna metoda procjene poslijeoperacijskoga ostatnog neuromišićnog bloka kao uzroka produljenog vremena do ekstubacije.²⁸

Naposlijetku, treba uzeti u obzir kako produljena mehanička ventilacija, razvoj respiratornih komplikacija, a time i dulji boravak u jedinici intenzivne medicine značajno povećava financijske troškove liječenja bolesnika. Stoga u bolesnika s normalnom funkcijom dijafragme vrijeme do ekstubacije može i treba biti skraćeno primjenom ultrazvuka dijafragme.¹⁸

Protektivna ventilacija dijafragme

Posljednjih se godina u objavljenim radovima, uz protektivnu plućnu ventilaciju, spominje i protektivna ventilacija dijafragme prema kojoj treba izbjeći preamalu kao i preveliku tlačnu potporu respiratora. Tlačnu potporu respiratora trebalo bi pažljivo titrirati prema bolesnikovom disanju kako bi se postigle optimalne vrijednosti frakcije zadebljanja dijafragme između 15% i 40%.¹⁰ Ako je frakcija ispod 15%, trebalo bi smanjiti tlačnu potporu respiratora, dok kod vrijednosti iznad 30 – 50% tlačnu potporu treba povišiti kako bi se izbjegla hiperinflacija pluća. Naravno, neophodno je i usporedno promatranje ostalih parametara kao što su primjerice volumen udara i frekvencija disanja te acidobazni status. Iako je idealna razina aktivnosti same dijafragme još uvijek nepoznata, smatra se kako ona odgovara ezofagealnom tlaku između 4 i 8 cm H₂O.¹⁹ Naravno, osim titracije same tlačne potpore, ponekad bolesnicima ipak treba uvesti sedaciju, intermitentnu relaksaciju ili dodatnu analgeziju kako bi se omogućila protektivna ventilacija.²⁹

Ograničenja ultrazvuka dijafragme

Ultrazvučna procjena dijafragme ovisi o iskustvu i subjektivnoj interpretaciji i mjerenjima ultrasoničara. Veliki su rasponi normalnih vrijednosti jer nema stan-

dardizacije ultrazvučne tehnike, odnosno odabira i pozicije ultrazvučne sonde, dubine i svjetline te B-moda ili M-moda. Također, dobivena mjerenja ovise o položaju bolesnika, spolu, pretilosti i drugim patološkim stanjima samih pluća i prsne šupljine. Nadalje, u do 15% kritično oboljelih bolesnika ne može se prikazati cijela dijafragma, najčešće lijeva strana i to zbog pomicanja pluća, plinova u probavnoj cijevi i malog akustičnog prozora slezene. Ponekad se pokreti dijafragme bolje prikažu ako se sonda pomakne kaudalnije te se smanji kut sonde u odnosu na trbušnu stijenku. Mišljenja su stručnjaka da su dovoljna mjerenja na desnoj strani koja se mogu aproksimirati na cijelu dijafragmu, osim ako ne postoji sumnja na patologiju jedne strane dijafragme, primjerice kao kod jednostrane ozljede freničnog živca. Mjerenje debljine dijafragme napredna je vještina koja zahtijeva velik broj pregleda pod nadzorom iskusnog ultrasoničara. Ne postoji jasan zaključak treba li uključiti i pleuru i peritoneum u mjerenja debljine dijafragme. Nadalje, nije jasno definirano u kojem bi točno trenutku respiratornog ciklusa trebalo izmjeriti navedene parametre (primjerice ima li razlike u mjerenju u trenutku samog vrhunca udaha ili na kraju samog udaha) te ima li to utjecaja na konačne rezultate i zaključke i u kojoj mjeri.^{4,9,11,13} I zaključno, u slučaju teške upale odnosno edema dijafragme, ultrazvuk dijafragme je značajno manje osjetljiva metoda za procjenu funkcije dijafragme.³⁰

Zaključak

Ultrazvuk dijafragme je jednostavna i sigurna metoda za procjenu funkcije dijafragme. Dosadašnja istraživanja pokazala su kako ultrazvuk dijafragme za vrijeme testa spontanog disanja može ukazati na poremećaj funkcije dijafragme i može biti jedan od prediktora uspješnog odvajanja od mehaničke ventilacije, no zbog heterogenosti dosadašnjih istraživanja i ograničenja ultrazvučne tehnike potrebna su daljnja istraživanja na većem broju bolesnika kako bi se točnije definirale referentne tehnike i vrijednosti mjerenja. Budući da je cilj svake jedinice intenzivne medicine smanjiti vrijeme provedeno na mehaničkoj ventilaciji, može se zaključiti kako ultrazvuk dijafragme ima svoje mjesto u budućnosti svakodnevne kliničke prakse u jedinicama intenzivne medicine.

KRATICE

DTF	– engl. <i>diaphragmal thickness fraction</i> (frakcija zadebljanja dijafragme)
PEEP	– engl. <i>positive end expiratory pressure</i> (pozitivni tlak na kraju izdaha)
DE	– engl. <i>diaphragm excursion</i> (pokretljivost dijafragme)
ESICM	– engl. <i>European Society of Intensive Care Medicine</i> (Europsko društvo intenzivne medicine)

RSBI	– engl. <i>Rapid Shallow Breathing Index</i> (indeks brzoga plitkog disanja)
PaCO ₂	– parcijalni tlak ugljikovog dioksida u arterijskoj krvi
RR/DE	– engl. <i>respiratory rate / diaphragm excursion</i> (frekvencija disanja / pokretljivost dijafragme)
RR/DTF	– engl. <i>respiratory rate / diaphragmal thickness fraction</i> (frekvencija disanja / frakcija zadebljanja dijafragme)

INFORMACIJE O SUKOBU INTERESA

Autori nisu deklarirali sukob interesa relevantan za ovaj rad.

INFORMACIJA O FINANCIRANJU

Za ovaj članak nisu primljena financijska sredstva.

DOPRINOS AUTORA

KONCEPCIJA ILI NACRT RADA: MČ, JP

PRIKUPLJANJE, ANALIZA I INTERPRETACIJA PODATAKA: MČ

PISANJE PRVE VERZIJE RADA: MČ

KRITIČKA REVIZIJA: MČ, JP

LITERATURA

1. Santana PV, Cardenas LZ, Albuquerque ALP, Carvalho CRR, Caruso P. Diaphragmatic ultrasound: a review of its methodological aspects and clinical uses. *J Bras Pneumol*. 2020; 46(6):e20200064.
2. Vetrugno L, Orso D, Bove T. Ultrasound of the diaphragm-an essential tool for pulmonologists and intensivists. *J Bras Pneumol*. 2020;46(6):e20200367.
3. Ferrari G, De Filippi G, Elia F, Panero F, Volpicelli G, Aprà F. Diaphragm ultrasound as a new index of discontinuation from mechanical ventilation. *Crit Ultrasound J*. 2014;6(1):8.
4. Posavec ALj, Huzjan Korunić R, Piskac Živković N. Ultrazvuk dijafragme i njegova primjena u kliničkoj praksi. *Med Flumin*. 2023;59(3):273–79.
5. Parada-Gereda HM, Tibaduiza AL, Rico-Mendoza A, Molano-Franco D, Nieto VH, Arias-Ortiz WA i sur. Effectiveness of diaphragmatic ultrasound as a predictor of successful weaning from mechanical ventilation: a systematic review and meta-analysis. *Crit Care*. 2023;27(1):174.
6. Samanta S, Singh RK, Baronia AK, Poddar B, Azim A, Gurjar M. Diaphragm thickening fraction to predict weaning – a prospective exploratory study. *J Intens Care*. 2017;5:62.
7. Boles JM, Bion J, Connors A, Herridge M, Marsh B, Melot C i sur. Weaning from mechanical ventilation. *Eur Respir J* 2007;29:1033–56.
8. Mahmoodpoor A, Fouladi S, Ramouz A, Shadvar K, Ostadi Z, Soleimanpour H. Diaphragm ultrasound to predict weaning outcome: systematic review and meta-analysis. *Anaesthesiol Intens Ther*. 2022;54(2):164–74.
9. Haaksma ME, Smit JM, Boussuges A, Demoule A, Dres M, Ferreri G i sur. EXPert consensus On Diaphragm UltraSonography in the critically ill (EXODUS): a Delphi consensus state-

- ment on the measurement of diaphragm ultrasound-derived parameters in a critical care setting. *Crit Care*. 2022;26(1):99.
10. Mousa A, Klompemaker P, Tuinman PR. Setting positive end-expiratory pressure: lung and diaphragm ultrasound. *Curr Opin Crit Care*. 2024;30(1):53–60.
 11. Boussuges A, Rives S, Finance J, Brégeon F. Assessment of diaphragmatic function by ultrasonography: Current approach and perspectives. *World J Clin Cases*. 2020;8(12):2408–24.
 12. Dres M, Demoule A. Monitoring diaphragm function in the ICU. *Curr Opin Crit Care*. 2020;26(1):18–25.
 13. Laghi FA Jr, Saad M, Shaikh H. Ultrasound and non-ultrasound imaging techniques in the assessment of diaphragmatic dysfunction. *BMC Pulm Med*. 2021;21(1):85.
 14. Banerjee A, Mehrotra G. Comparison of Lung Ultrasound-based Weaning Indices with Rapid Shallow Breathing Index: Are They Helpful? *Indian J Crit Care Med*. 2018;22(6):435–40.
 15. Liu Y, Zhou Y, Liu P, Ying W, Wu H, Dong Z. Combined lung and diaphragm ultrasound predicts extubation outcomes in ARDS: a prospective study. *Eur J Med Res*. 2024;29(1):510.
 16. Pearson SD, Lin J, Stutz MR, Lecompte-Osorio P, Pohlman AS, Wolfe KS *i sur*. Immediate Effect of Mechanical Ventilation Mode and Sedative Infusion on Measured Diaphragm Thickness. *Ann Am Thorac Soc*. 2022;19(9):1543–50.
 17. Grosu HB, Ost DE, Lee YI, Song J, Li L, Eden E *i sur*. Diaphragm Muscle Thinning in Subjects Receiving Mechanical Ventilation and Its Effect on Extubation. *Respir Care*. 2017;62(7):904–11.
 18. McCool FD, Oyieng'o DO, Koo P. The Utility of Diaphragm Ultrasound in Reducing Time to Extubation. *Lung*. 2020;198(3):499–505.
 19. Tuinman PR, Jonkman AH, Dres M, Shi ZH, Goligher EC, Goffi A *i sur*. Respiratory muscle ultrasonography: methodology, basic and advanced principles and clinical applications in ICU and ED patients-a narrative review. *Intens Care Med*. 2020;46(4):594–605.
 20. Vetrugno L, Orso D, Corradi F, Zani G, Spadaro S, Meroi F *i sur*. Diaphragm ultrasound evaluation during weaning from mechanical ventilation in COVID-19 patients: a pragmatic, cross-section, multicenter study. *Respir Res*. 2022;23(1):210.
 21. Robba C, Wong A, Poole D, Al Tayar A, Arntfield RT, Chew MS *i sur*. European Society of Intensive Care Medicine task force for critical care ultrasonography*. Basic ultrasound head-to-toe skills for intensivists in the general and neuro intensive care unit population: consensus and expert recommendations of the European Society of Intensive Care Medicine. *Intens Care Med*. 2021;47(12):1347–67.
 22. Fritsch SJ, Siemer AG, Dreher M, Simon TP, Marx G, Bickenbach J. Diaphragm ultrasound in patients with prolonged weaning from mechanical ventilation. *Quant Imaging Med Surg*. 2024;14(5):3248–63.
 23. Alam MJ, Roy S, Iktidar MA, Padma FK, Nipun KI, Chowdhury S *i sur*. Diaphragm ultrasound as a better predictor of successful extubation from mechanical ventilation than rapid shallow breathing index. *Acute Crit Care*. 2022;37(1):94–100.
 24. Lalwani LK, Govindagoudar MB, Singh PK, Sharma M, Chaudhry D. The role of diaphragmatic thickness measurement in weaning prediction and its comparison with rapid shallow breathing index: a single-center experience. *Acute Crit Care*. 2022;37(3):347–54.
 25. Er B, Mızrak B, Aydemir A, Binay S, Doğu C, Kazancı D *i sur*. Is diaphragm ultrasound better than rapid shallow breathing index for predicting weaning in critically ill elderly patients? *Tuberk Toraks*. 2023;71(3):197–202.
 26. Eksombatchai D, Sukkratok C, Sutherasan Y, Junhasavasdikul D, Theerawit P. The ratio of respiratory rate to diaphragm thickening fraction for predicting extubation success. *BMC Pulm Med*. 2023;23(1):109.
 27. Toledo TG, Bacci MR. Value of Diaphragm Ultrasonography for Extubation: A Single-Blinded Randomized Clinical Trial. *Crit Care Res Pract*. 2023;2023:8403971.
 28. Lang J, Liu Y, Zhang Y, Huang Y, Yi J. Peri-operative diaphragm ultrasound as a new method of recognizing post-operative residual curarization. *BMC Anesthesiol*. 2021;21(1):287.
 29. de Vries HJ, Jonkman AH, de Grooth HJ, Duitman JW, Girbes ARJ, Ottenheijm CAC *i sur*. Lung- and Diaphragm-Protective Ventilation by Titrating Inspiratory Support to Diaphragm Effort: A Randomized Clinical Trial. *Crit Care Med*. 2022;50(2):192–203.
 30. Francis CA, Hoffer JA, Reynolds S. Ultrasonographic Evaluation of Diaphragm Thickness During Mechanical Ventilation in Intensive Care Patients. *Am J Crit Care*. 2016;25(1):e1–8.

