

Nieinwazyjne metody pomiaru rzutu serca i ich znaczenie w codziennej praktyce klinicznej – aktualny stan wiedzy

Patrycja Stępnia¹, Andrzej Cacko^{1,2}, Agnieszka Kołodzińska¹, Marcin Grabowski¹

¹Katedra i Klinika Kardiologii Uniwersyteckiego Centrum Klinicznego Warszawskiego Uniwersytetu Medycznego

²Zakład Informatyki Medycznej i Telemedycyny Warszawskiego Uniwersytetu Medycznego

Artykuł jest tłumaczeniem pracy: Patrycja Stępnia et al. Non-invasive methods of cardiac output measurement and their importance in everyday clinical practice: the current state of knowledge. *Folia Cardiol.* 2021; 16(4): 237–241.

DOI: 10.5603/FC.2021.0036. Należy cytować wersję pierwotną

Streszczenie

Pojemność minutową serca, stanowiącą istotny parametr oceny hemodynamicznej pacjentów, można mierzyć wieloma metodami o różnym stopniu inwazyjności. Wyróżnia się metody inwazyjne (takie jak cewnikowanie tętnicy płucnej, termodylucja przepłucna, dylucja litu), mało-inwazyjne (analiza konturu krzywej ciśnienia tętniczego z użyciem cewnika, dopler przezprzełykowy) oraz nieinwazyjne (bioimpedancja elektryczna, echokardiografia przezklatkowa, pomiar wydychanego CO₂, analiza konturu fali tętna za pomocą urządzeń do ciągłego nieinwazyjnego pomiaru ciśnienia tętniczego). Wraz z rozwojem medycyny coraz bardziej umacnia się rola metod nieinwazyjnych serca jako alternatywy dla cewnikowania tętnicy płucnej. Niewątpliwą zaletą metod nieinwazyjnych są ich bezpieczeństwo dla pacjentów oraz powszechny i łatwy dostęp. Metody inwazyjne natomiast cechuje większa precyzja pomiaru. Do lekarza należy decyzja o ostatecznym wyborze metody monitorowania hemodynamicznego pacjentów w zależności od sytuacji klinicznej. Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie nieinwazyjnych metod pomiaru rzutu serca i ich zastosowania w codziennej praktyce klinicznej.

Słowa kluczowe: rzut serca/pojemność minutowa serca, nieinwazyjny pomiar, analiza fali tętna

Folia Cardiologica 2021; 16, 4: 242–247

Wstęp

Pomiar rzutu serca (CO, *cardiac output*) stanowi jedno z najpowszechniejszych i najczęściej stosowanych narzędzi do monitorowania hemodynamicznego pacjentów przebywających na oddziałach intensywnej opieki kardiologicznej i intensywnej terapii. Wartość tego parametru jest także ważnym czynnikiem prognostycznym u krytycznie chorych. Ocenę CO można przeprowadzać zarówno metodami inwazyjnymi, jak i tymi o ograniczonej inwazyjności. Choć eksperci wciąż uznają metody inwazyjne za „złoty standard” w ocenie hemodynamicznej, to zwiększa się rola metod nieinwazyjnych jako bezpiecznych i łatwo dostępnych sposobów pomiaru CO.

Metody pomiaru rzutu serca

Rzut serca (inaczej zwany pojemnością minutową) stanowi objętość krwi tłoczoną przez serce do aorty w ciągu jednej minuty – oblicza się go jako iloczyn objętości wyrzutowej i częstotliwości. Rzut serca jest jednym z kluczowych parametrów oceny funkcji serca i ma fundamentalne znaczenie w diagnostyce, leczeniu i ocenie rokowania w chorobach układu sercowo-naczyniowego [1]. Optymalne warunki hemodynamiczne pozwalają na utrzymanie prawidłowego utlenowania tkanek i homeostazy, co w efekcie zmniejsza częstość powikłań, zwłaszcza okołoperacyjnych. Znaczenie oceny CO w świetle wytycznych Europejskiego Towarzystwa

Adres do korespondencji: lek. Patrycja Stępnia, I Katedra i Klinika Kardiologii, Warszawski Uniwersytet Medyczny, ul. Banacha 1a, 02–097 Warszawa, tel. +48 22 599 19 58, e-mail: patrycja_st@onet.pl

Tabela 1. Znaczenie oceny rzutu serca (CO, *cardiac output*) w świetle wytycznych Europejskiego Towarzystwa Kardiologicznego (na podstawie [2–4])

Grupa pacjentów	Opis
Ostra/przewlekła niewydolność serca [2]	W diagnostyce niewydolności serca w badaniu echokardiograficznym wysiłkowym z zastosowaniem ergometru rowerowego w pozycji półleżącej W przypadku podejrzenia ostrej niewydolności serca zwłaszcza z niestabilnością hemodynamiczną w trybie pilnym w badaniu echokardiograficznym spoczynkowym – zmniejszony CO z towarzyszącymi objawami hipoperfuzji obwodowej [2]
Kardiomiopatia przerostowa [3]	Niska rezerwa CO sprzyja nieadekwatnej reakcji ciśnienia skurczowego na wysiłek fizyczny (obniżenie/brak wzrostu ciśnienia u ok. 1/3 dorosłych) [3]
Kobiety w ciąży [4]	Fizjologiczny wzrost CO w okresie ciąży o 40–50% do ok. 32. tygodnia ciąży – ważne przy planowaniu porodu [4]

Kardiologicznego (ESC, *European Society of Cardiology*) przedstawiono w tabeli 1 [2–4].

Na CO składają się cztery główne determinanty: częstość pracy serca, jego kurczliwość oraz obciążenie wstępne (*preload*) i następcze (*afterload*) [5]. Optymalny wybór metody hemodynamicznego monitorowania stanowi wynik indywidualnego podejścia do pacjenta [6]. Kluczowe jest zrozumienie zasad pomiaru i wskazań do zastosowania poszczególnych aktualnie dostępnych metod pomiaru CO. Pod względem stopnia inwazyjności podział stosowanych metod jest następujący [6] (tab. 2):

- metody inwazyjne;
- metody małoinwazyjne;
- metody nieinwazyjne.

Tabela 2. Podział metod pomiaru pojemności minutowej serca na podstawie stopnia inwazyjności

Metody inwazyjne
Cewnikowanie tętnicy płucnej
Termodylucja przezpłucna
Dylacja litu
Metody małoinwazyjne
Analiza konturu krzywej ciśnienia tętniczego z użyciem cewnika (jeden cewnik do obwodowego naczynia – tętnicy promieniowej)
Dopler przezprzelykowy
Metody nieinwazyjne
Bioimpedancja elektryczna (monitory typu ICON, AESCULON)
Echokardiografia przezklatkowa
Analiza konturu fali tętna – urządzenia do ciągłego nieinwazyjnego pomiaru ciśnienia tętniczego (monitory typu CNAP Monitor 500)
Pomiar wydychanego CO ₂ (monitory typu NICO)

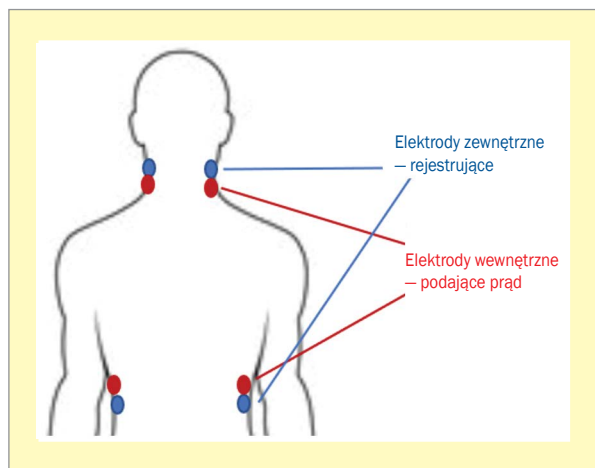
CNAP – *continuous noninvasive blood pressure monitoring*; NICO – *noninvasive cardiac output*

Nieinwazyjne metody pomiaru rzutu serca

Główną zaletą technik małoinwazyjnych jest bezpieczeństwo. W porównaniu z klasycznym bezpośrednim pomiarem z zastosowaniem cewnikowania tętnicy płucnej nie wiążą się one z występowaniem groźnych dla życia powikłań, takich jak zaburzenia rytmu serca, uszkodzenie tętnicy płucnej i sąsiednich tętnic, zawał płucny, uszkodzenie zastawek serca czy wysięk osierdziowy [7].

Bioimpedancja elektryczna

Bioimpedancja elektryczna (TEB, *thoracic electrical bioimpedance*) to metoda oparta na założeniu, że opór klatki piersiowej zależy od ilości płynu zawartego w obrębie jej kompartmentu. Obecnie jest dostępnych wiele systemów opartych na tej metodzie (monitory typu ICON, AESCULON i in.) [8]. Zastosowanie tej techniki pomiaru w praktyce klinicznej opisano po raz pierwszy w 1966 [9], a następnie w 1986 roku [10]. Zakłada ona, że maksymalna zmiana oporu w obrębie klatki piersiowej wykazuje związek ze szczytowym przepływem krwi w aorcie – następuje wówczas zwiększenie przewodnictwa klatki piersiowej [6, 11] (ryc. 1). Bioimpedancja klatki piersiowej jest zatem zależna od cyklu pracy serca (skurcz komór będzie powodował jej spadek, natomiast jej wartość będzie wzrastać w fazie rozkurczu komór). Wynika to między innymi z faktu, że w fazie skurczu komór eryocyty układają się w sposób zgodny, co powoduje mniejszy opór dla przepływającego prądu [11]. Od strony technicznej metoda polega na umieszczeniu na ciele pacjenta ośmiu elektrod. Cztery z nich to elektrody nadawcze, będące źródłem prądu o wysokiej częstotliwości i niskim natężeniu, a cztery pozostałe to elektrody odbiorcze rejestrujące zapis elektrokardiograficzny i zmiany napięcia. Elektrody są rozmieszczane parami: jedna elektroda nadawcza i jedna towarzysząca jej – odbiorcza. Dwie pary elektrod umieszcza się na szyi pacjenta po obu stronach, kolejne dwie natomiast na klatce piersiowej w linii pachowej



Rycina 1. Rozkład elektrod – metoda bioimpedancji

środkowej na wysokości wyrostka mieczykowatego mostka (ryc. 1). Ponieważ zgodnie z prawami fizyki zmiany napięcia i zmiany oporu są wartościami do siebie wprost proporcjonalnymi, to – wykorzystując te pomiary – można badać zmiany bioimpedancji klatki piersiowej, co z kolei za pomocą odpowiednich algorytmów pozwala obliczyć takie parametry hemodynamiczne, jak objętość wyrzutowa i CO [13], ale również poziom utlenowania tkanek czy kurczliwość serca. Należy jednak pamiętać, że pomiar tą metodą może wpływać na działanie innych urządzeń emitujących pole elektromagnetyczne i odwrotnie. Dlatego nie zaleca się stosowania tej metody u pacjentów z implantowanym układem kardiowertera-defibrylatora. Nie jest to również metoda zalecana osobom z wszczepionymi metalowymi implantami ani kobietom w ciąży. Warto zauważyć, że urządzenia wszczepialne stosowane w elektrokardiologii mają możliwość oceny oporności klatki piersiowej. Jest to czynnik predykcyjny zaostrzenia niewydolności serca. Zmiany oporności klatki piersiowej odbywają się jednak w innym mechanizmie, tj. wskutek gromadzenia dodatkowego płynu poza sercem. Pomiar impedancji w tym przypadku należy rozumieć następująco: im większa jest ilość płynu między urządzeniem a elektrodą, tym mniejsza wartość impedancji [14].

Pomiar CO₂ w wydychanym powietrzu

Założenia metody, polegającej na pomiarze CO₂ w wydychanym powietrzu, po raz pierwszy opisał Adolph Fick. Wykazał on, że cała objętość tlenu pobierana podczas wymiany gazowej w płucach jest całkowicie przenoszona do krwi. Na podstawie tego założenia można obliczyć pojemność minutową serca jako stosunek między zużyciem tlenu a różnicą tętniczo-żylną [15]. W toku rozwoju medycyny tworzone nowe wariacje z wykorzystaniem różnych substytutów tlenu. Jedną z tych metod jest zmodyfikowana zasada Ficka dla

CO₂, czyli zależność wydalanego CO₂ od krwi pompowanej przez serce.

Zmodyfikowana reguła Ficka dla CO₂ przedstawia się następująco:

$$CO = VCO_2 / (CpaCO_2 - CsaCO_2),$$

gdzie: CO – rzut serca, CpaCO₂ – ciśnienie parcjalne CO₂ w krążeniu płucnym, CsaCO₂ – ciśnienie parcjalne CO₂ w krążeniu obwodowym [16].

Metoda ta jest wykorzystywana u chorych wentyloowanych mechanicznie. Komercyjnie dostępnym na rynku urządzeniem jest między innymi system NICO (*noninvasive cardiac output*). Monitor NICO składa się z czujnika CO₂ (absorbującego światło podczerwone), czujnika przepływu powietrza oraz pulsoksymetru. Należy podkreślić ograniczenia tej metody oceny CO. Jak dowiedziono w badaniach, NICO nie jest optymalną metodą do stosowania u pacjentów z oddechem spontanicznym. Wykazano, że wartości pomiarów pojemności minutowej serca w tej grupie pacjentów były istotnie wyższe niż wartości pomiaru uzyskane z użyciem termodylucji [15]. Ponadto podaje się pod wątpliwość wiarygodność pomiarów z użyciem NICO u pacjentów z uszkodzeniem płuc.

Nieinwazyjna analiza fali tętna

Ciśnienie tętnicze jest jednym z podstawowych parametrów służących ocenie funkcjonowania układu sercowo-naczyniowego. Dotychczas monitorowanie ciśnienia tętniczego w sposób ciągły typu *beat-to-beat* wymagało postępowania inwazyjnego z koniecznością założenia cewnika dotętniczego [17]. Postęp medycyny pozwolił na opracowanie kilku urządzeń, które rejestrują ciśnienie tętnicze w sposób ciągły i nieinwazyjny (monitory typu CNAP 500, FinaPress, ClearSight). Urządzenia te są także wyposażone w funkcję oceny szerszych parametrów hemodynamicznych, w tym pojemności minutowej serca [8, 18]. Podstawą tej techniki wykorzystywanej we wspomnianych urządzeniach, zwanej zasadą Penaza (opisaną przez niego po raz pierwszy w 1973 r.), jest analiza konturu fali tętna. Metoda pomiaru polega na umieszczeniu na palcach wskazującym i środkowym pacjenta czujników (*finger cuff methods*), które wykrywają przepływ krwi w tętnicach. W mankiecie czujnika pomiarowego znajduje się detektor oraz świecąca dioda. Zmiana światła przechodzącego przez palec (oznaczająca zmianę objętości krwi w palcu) jest wykrywana przez detektor. Ta informacja jest przekazywana do pompki powodującej zmianę ciśnienia w mankiecie. W ten sposób ciśnienie mierzone w mankiecie odzwierciedla ciśnienie tętnicze przy każdym uderzeniu serca, po uprzednim skalibrowaniu układu standardową metodą oscylometryczną. Najczęściej czujnik palca jest dostępny w trzech rozmiarach (*small, medium, large*), co pozwala na odpowiednie dopasowanie i wiarygodne pomiary. Czujnik jest połączony za pomocą sterownika z mankiem naramiennym do



Rycina 2. Pomiar parametrów hemodynamicznych z użyciem monitora CNAP (*continuous noninvasive blood pressure monitoring*)

pomiaru ciśnienia tętniczego. Monitor wyświetla krzywą dynamiczną ciśnienia tętniczego, o dużej rozdzielczości, w czasie rzeczywistym. Pomiar ciśnienia wyświetla się na monitorze w sposób ciągły w postaci numerycznej bądź graficznej [19]. Rejestracja krzywej ciśnienia tętniczego jest analizowana przez system (z uwzględnieniem takich zmiennych, jak wiek, wzrost i masa ciała) i pozwala na wyliczenie CO z odpowiedniego algorytmu [6]. Monitory tego typu pozwalają także na określenie bezpośrednio z krzywej ciśnienia tętniczego innych parametrów hemodynamicznych, takich jak: pojemność wyrzutowa serca (SV, *stroke volume*), ogólnoustrojowa oporność naczyniowa (SVR, *systemic vascular resistance*), zmienność ciśnienia tętna (PPV, *pulse pressure variation*), zmienność pojemności wyrzutowej serca (SVV, *stroke volume variation*), oraz w przeliczeniu na powierzchnię ciała w formie zindeksowanej: wskaźnik wyrzutowy serca (SVI, *stroke volume index*), wskaźnik sercowy (CI, *cardiac index*), wskaźnik ogólnoustrojowej oporności naczyniowej (SVRI, *systemic vascular resistance index*) [19]. Poprzednim urządzeniom tego typu zarzucano błędy pomiaru wynikające ze zmian naczynioruchowych. Oczywiście jest, że pacjenci przebywający na oddziałach intensywnej opieki otrzymują duże dawki leków wazoaktywnych. Wywołują one szybkie zmiany ciśnienia tętniczego, ale także zmieniają napięcie naczyniowe tętnic obwodowych [17]. Monitory CNAP (*continuous noninvasive blood pressure monitoring*) zaprojektowano w sposób pozwalający na wyeliminowanie tych ograniczeń poprzez zastosowanie odpowiednich algorytmów. Monitor CNAP 500 jest niezależnym sprzętem, który można wykorzystywać samodzielnie, ale można go także podłączyć do innych systemów monitorowania pacjentów [19]. Wówczas uzyskuje się całościowy obraz pacjenta z uwzględnieniem nie tylko stanu układu sercowo-naczyniowego. Wykorzystania tej

metody nie zaleca się u pacjentów z wysokim oporem obwodowym, osób w hipotermii ani w przypadku występowania obrzęków obwodowych, zwłaszcza obrzęków palców [18]. Ponadto nie zaleca się jego stosowania u dzieci poniżej 4. roku życia [19]. Przeprowadzone dotychczas analizy Wagner i wsp. [20], w których pomiar CO z użyciem monitora CNAP porównywano z pomiarem uzyskiwanym metodą termodylucji przezpłucnej, wskazują na akceptowalną zgodność wyników w większości sytuacji klinicznych, co pozwala twierdzić, że opisywane wyżej urządzenia mogą być z powodzeniem wykorzystywane także u chorych w stanach krytycznych [20]. Pomiar parametrów hemodynamicznych z użyciem monitora CNAP przedstawiono na rycinie 2.

Echokardiografia przezklatkowa

Pomiar CO w badaniu echokardiograficznym wymaga od echokardiografisty zastosowania dwóch projekcji — pięciojamowej i przymostkowej w osi długiej. W projekcji pięciojamowej, poprzez umieszczenie bramki doplera pulsacyjnego poniżej płatków zastawki aortalnej i obrysowanie spektrum przepływu przez lewe ujście tętnicze, uzyskuje się wartość całki przepływu prędkości w czasie (VTI, *velocity time integral*). Projekcja przymostkowa w osi długiej pozwala natomiast na pomiar średnicy drogi odpływu lewej komory tuż pod zastawką aortalną [21].

W celu oceny pojemności minutowej serca otrzymane wartości należy podstawić do poniższego wzoru:

$$CO = VTI \times S \times HR = VTI \times \pi(1/2d)^2$$

gdzie: CO (*cardiac output*) — rzut minutowy, VTI (*velocity time integral*) — całka prędkości przepływu w czasie, S — pole powierzchni analizowanego ujścia, HR (*heart rate*) — częstość pracy serca, d (*diameter*) — średnica drogi odpływu lewej komory.

Wady tej metody to subiektywność badania, zależność od doświadczenia echokardiografisty, a co za tym idzie jego mała powtarzalność. Cenną zaletą jest natomiast powszechna dostępność sprzętu — nie tylko na oddziałach kardiologii i intensywnej terapii, ale także w ramach szpitalnych oddziałów ratunkowych czy oddziałów internistycznych.

Zastosowanie — kiedy i u kogo?

Według niektórych autorów nieinwazyjne metody pomiaru CO powinny być rozważane w okresie okołoperacyjnym u pacjentów poddawanych operacjom niekardiologicznym z uwzględnieniem indywidualnych czynników ryzyka operowanej osoby oraz zależnych od rodzaju zabiegu. Pacjentów poddawanych operacjom na otwartym sercu zaleca się monitorować technikami inwazyjnymi i mało-inwazyjnymi (najczęściej cewnikowanie tętnicy płucnej lub dopler przezprzełykowy) [6]. Wydaje się natomiast, że techniki nieinwazyjne są dobrym rozwiązaniem dla pacjentów poddawanych operacjom mało i średnio ryzykownym oraz tych, u których dotychczas nie stosowano intensywnego monitorowania hemodynamicznego (takich jak zabiegi w znieczuleniu miejscowym czy blokady nerwów obwodowych) [22]. Przydatność kliniczną monitora CNAP 500 wykazano między innymi w odniesieniu do operacji bariatrycznych u osób dorosłych oraz u pacjentów pediatrycznych o masie ciała 20–40 kg [23]. Ponadto wydaje się idealnym wyborem u pacjentów z trudnością kaniulacji tętnicy promieniowej, z pozytywnym wynikiem testu Allena czy u chorych poddawanych operacjom naczyniowym, u których ograniczona jest dostępność kaniulacji naczynia [24]. Zwraca się również uwagę na przydatność metod nieinwazyjnych w trakcie diagnostyki kardiologicznej, między innymi podczas wykonywania testów wysiłkowych [25]. Ponadto monitory nieinwazyjne mogą być idealnym rozwiązaniem w przypadku konieczności transportu medycznego pacjentów i stanowić swoisty pomost między monitorowaniem chorego w miejscu zdarzenia medycznego a salą intensywnego nadzoru [26].

Podsumowanie

Nieinwazyjne metody pomiaru CO odgrywają istotną rolę we współczesnej medycynie. Należy się spodziewać, że w przyszłości ich pozycja będzie się wzmacniać. W wielu badaniach wykazano, że monitorowanie CO i optymalizacja tego parametru skraca czas pobytu pacjentów na oddziałach intensywnej opieki medycznej [27, 28]. Potrzeba coraz nowszych i szerszych badań do dalszego rozwoju metod nieinwazyjnego hemodynamicznego monitorowania pacjentów oraz ich wdrażania w różnych sytuacjach klinicznych. Na podstawie dostępnej literatury wydaje się, że CO jest parametrem wnoszącym istotną wartość do oceny stanu układu sercowo-naczyniowego. Kolejnym celem badaczy powinno

być wyselekcjonowanie konkretnych grup pacjentów, którzy mogliby odnieść szczególną korzyść z oceny tego parametru. Szansę na rozwój badań zwiększa dostępność metod mało-inwazyjnych, które eliminują zagrożenie wynikające ze stosowania metod inwazyjnych, takich jak cewnikowanie dużych naczyń.

Konflikt interesów

Autorzy deklarują brak konfliktu interesów.

Piśmiennictwo

- McGuinness S, Parke R. Using cardiac output monitoring to guide perioperative haemodynamic therapy. *Curr Opin Crit Care*. 2015; 21(4): 364–368, doi: [10.1097/MCC.0000000000000212](https://doi.org/10.1097/MCC.0000000000000212), indexed in Pubmed: [26103145](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26103145/).
- Ponikowski P, Voors AA, Anker SD, et al. Grupa Robocza Europejskiego Towarzystwa Kardiologicznego (ESC) do spraw diagnostyki i leczenia ostrej i przewlekłej niewydolności serca. Dokument opracowano przy szczególnym udziale Heart Failure Association (HFA) ESC. Wytyczne ESC dotyczące diagnostyki i leczenia ostrej i przewlekłej niewydolności serca w 2016 roku. *Kardiol Pol*. 2016; 74(10): 1051–1052, doi: [10.5603/KP.2016.0141](https://doi.org/10.5603/KP.2016.0141).
- Elliott PM, Anastakis A, Borger MA, et al. Grupa Robocza Europejskiego Towarzystwa Kardiologicznego (ESC) do spraw rozpoznawania i postępowania w kardiomiopatii przerostowej. Wytyczne ESC dotyczące rozpoznawania i postępowania w kardiomiopatii przerostowej w 2014 roku. *Kardiol Pol*. 2014; 72(11): 1091, doi: [10.5603/KP.2014.0212](https://doi.org/10.5603/KP.2014.0212).
- Regitz-Zagrosek V, Roos-Hesselink JW, Bauersachs J, et al. Grupa Robocza Europejskiego Towarzystwa Kardiologicznego ds. postępowania w chorobach układu sercowo-naczyniowego podczas ciąży. Wytyczne ESC dotyczące postępowania w chorobach układu sercowo-naczyniowego podczas ciąży (2018). *Kardiol Pol*. 2019; 78(3): 253–254, doi: [10.5603/KP.2019.0049](https://doi.org/10.5603/KP.2019.0049).
- Vincent JL. Understanding cardiac output. *Crit Care*. 2008; 12(4): 174–172, doi: [10.1186/cc6975](https://doi.org/10.1186/cc6975), indexed in Pubmed: [18771592](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18771592/).
- Saugel B, Vincent JL. Cardiac output monitoring. *Curr Opin Crit Care*. 2018; 24(3): 165–172, doi: [10.1097/mcc.0000000000000492](https://doi.org/10.1097/mcc.0000000000000492).
- Sangkum L, Liu GL, Yu L, et al. Minimally invasive or noninvasive cardiac output measurement: an update. *J Anesth*. 2016; 30(3): 461–480, doi: [10.1007/s00540-016-2154-9](https://doi.org/10.1007/s00540-016-2154-9), indexed in Pubmed: [26961819](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26961819/).
- Saugel B, Cecconi M, Wagner JY, et al. Noninvasive continuous cardiac output monitoring in perioperative and intensive care medicine. *Br J Anaesth*. 2015; 114(4): 562–575, doi: [10.1093/bja/aeu447](https://doi.org/10.1093/bja/aeu447), indexed in Pubmed: [25596280](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25596280/).
- Kubicek WG, Karnegis JN, Patterson RP, et al. Development and evaluation of an impedance cardiac output system. *Aerosp Med*. 1966; 37(12): 1208–1212, indexed in Pubmed: [5339656](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/5339656/).
- Bernstein DP. A new stroke volume equation for thoracic electrical bioimpedance: theory and rationale. *Crit Care Med*. 1986; 14(10): 904–909, doi: [10.1097/00003246-198610000-00017](https://doi.org/10.1097/00003246-198610000-00017), indexed in Pubmed: [3757533](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/3757533/).
- Żuchowski B, Guzik P. Elektryczna bioimpedancja klatki piersiowej. *Anestezjologia i Ratownictwo*. 2008; 2: 434–442.
- Guzik P, Bychowicz B, Wysocki H. Nieinwazyjna ocena układu krążenia z wykorzystaniem elektrycznej bioimpedancji klatki piersiowej. *Forum Kardiologów*. 2003; 8(1): 29–33.

13. Strobeck JE, Silver MA. Beyond the four quadrants: the critical and emerging role of impedance cardiography in heart failure. *Congest Heart Fail.* 2004; 10(2 Suppl 2): 1–6, doi: [10.1111/j.1527-5299.2004.03405.x](https://doi.org/10.1111/j.1527-5299.2004.03405.x), indexed in Pubmed: [15073477](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15073477/).
14. Piotrowicz R, Krzesiński P, Balsam P, et al. Rozwiązania telemedyczne w kardiologii — opinia ekspertów Komisji Informatyki i Telemedycyny Polskiego Towarzystwa Kardiologicznego, Sekcji Elektrokardiologii Nieinwazyjnej i Telemedycyny Polskiego Towarzystwa Kardiologicznego oraz Komitetu Nauk Klinicznych Polskiej Akademii Nauk. *Kardiol Pol.* 2018; 76(3): 698–707, doi: [10.5603/KP.a2018.0058](https://doi.org/10.5603/KP.a2018.0058).
15. Young BP, Low LL. Noninvasive monitoring cardiac output using partial CO(2) rebreathing. *Crit Care Clin.* 2010; 26(2): 383–92, table of contents, doi: [10.1016/j.ccc.2009.12.002](https://doi.org/10.1016/j.ccc.2009.12.002), indexed in Pubmed: [20381727](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20381727/).
16. Thiele RH, Bartels K, Gan TJ. Cardiac output monitoring: a contemporary assessment and review. *Crit Care Med.* 2015; 43(1): 177–185, doi: [10.1097/CCM.0000000000000608](https://doi.org/10.1097/CCM.0000000000000608), indexed in Pubmed: [25251758](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25251758/).
17. Fortin J, Wellisch A, Maier K. CNAP — evolution of continuous non-invasive arterial blood pressure monitoring. *Biomed Tech (Berl).* 2013; 58(Suppl 1), doi: [10.1515/bmt-2013-4179](https://doi.org/10.1515/bmt-2013-4179), indexed in Pubmed: [24042825](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24042825/).
18. Ameloot K, Palmers PJ, Malbrain ML. The accuracy of noninvasive cardiac output and pressure measurements with finger cuff: a concise review. *Curr Opin Crit Care.* 2015; 21(3): 232–239, doi: [10.1097/MCC.0000000000000198](https://doi.org/10.1097/MCC.0000000000000198), indexed in Pubmed: [25922896](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25922896/).
19. Podręcznik użytkownika CNAP Monitor 500. 2008.
20. Wagner JY, Grond J, Fortin J, et al. Continuous noninvasive cardiac output determination using the CNAP system: evaluation of a cardiac output algorithm for the analysis of volume clamp method-derived pulse contour. *J Clin Monit Comput.* 2016; 30(4): 487–493, doi: [10.1007/s10877-015-9744-1](https://doi.org/10.1007/s10877-015-9744-1), indexed in Pubmed: [26227161](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26227161/).
21. Lipiec P, Hoffmann P. ed. Echokardiografia kliniczna. Podręcznik sekcji Polskiego Towarzystwa Kardiologicznego. i-medica, Warszawa 2017: 35–36.
22. Nicklas JY, Saugel B. Non-invasive hemodynamic monitoring for hemodynamic management in perioperative medicine. *Front Med (Lausanne).* 2017; 4: 209, doi: [10.3389/fmed.2017.00209](https://doi.org/10.3389/fmed.2017.00209), indexed in Pubmed: [29218310](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29218310/).
23. Tobias JD, McKee C, Herz D, et al. Accuracy of the CNAP™ monitor, a noninvasive continuous blood pressure device, in providing beat-to-beat blood pressure measurements during bariatric surgery in severely obese adolescents and young adults. *J Anesth.* 2014; 28(6): 861–865, doi: [10.1007/s00540-014-1835-5](https://doi.org/10.1007/s00540-014-1835-5), indexed in Pubmed: [24789660](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24789660/).
24. Kumar GA, Jagadeesh AM, Singh NG, et al. Evaluation of continuous non-invasive arterial pressure monitoring during induction of general anaesthesia in patients undergoing cardiac surgery. *Indian J Anaesth.* 2015; 59(1): 21–25, doi: [10.4103/0019-5049.149444](https://doi.org/10.4103/0019-5049.149444), indexed in Pubmed: [25684809](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25684809/).
25. Vignati C, Cattadori G. Measuring cardiac output during cardiopulmonary exercise testing. *Ann Am Thorac Soc.* 2017; 14(Suppl_1): S48–S52, doi: [10.1513/AnnalsATS.201611-852FR](https://doi.org/10.1513/AnnalsATS.201611-852FR), indexed in Pubmed: [28441030](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28441030/).
26. van Heerden PV, Baker S, Lim SI, et al. Clinical evaluation of the non-invasive cardiac output (NICO) monitor in the intensive care unit. *Anaesth Intensive Care.* 2000; 28(4): 427–430, doi: [10.1177/0310057X0002800412](https://doi.org/10.1177/0310057X0002800412), indexed in Pubmed: [10969371](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10969371/).
27. Pearse R, Dawson D, Fawcett J, et al. Early goal-directed therapy after major surgery reduces complications and duration of hospital stay. A randomised, controlled trial [ISRCTN38797445]. *Crit Care.* 2005; 9(6): R687–R693, doi: [10.1186/cc3887](https://doi.org/10.1186/cc3887), indexed in Pubmed: [16356219](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16356219/).
28. Rhodes A, Cecconi M, Hamilton M, et al. Goal-directed therapy in high-risk surgical patients: a 15-year follow-up study. *Intensive Care Med.* 2010; 36(8): 1327–1332, doi: [10.1007/s00134-010-1869-6](https://doi.org/10.1007/s00134-010-1869-6), indexed in Pubmed: [20376431](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20376431/).