

Cilindrikacija kot mehanizem kvalitete akcije levega prekata »Cylindricity« as a mechanism of quality of left ventricle action

Bojan Knap*, Gojmir Južnič**, Susara Južnič***

Ključne besede
hemodializa
športi
srčni ventrikel
ehokardiografija
elektrokardiografija

Key words
hemodialysis
sports
heart ventricle
echocardiography
electrocardiography

Izvleček. Z originalno neinvazivno metodo smo eksperimentalno določili endokardno površino levega prekata z namenom razumeti mehanizem vpliva spremembe oblike levega prekata na izvedbo njegove pogonske funkcije. Uporabili smo ehokardiografijo in elektrokardiografijo koncem diastole in sistole; preiskali smo 3 skupine (športniki, nešportniki in dializni bolniki). Sprememba prostornine levega prekata predstavlja okvir njegove poganjalne akcije, površino levega prekata pa lahko razumemo kot indikator za dinamiko osi. Sferična in cilindrična oblika prostornine, ki jo izžene levi prekat, se v srčnem ciklu izmenjujeta in to lahko razumemo kot princip »cilindrikacije«. V diastoli je prekat bolj podoben krogli, v sistoli pa bolj cevast. Ta mehanizem je v bolezenskih razmerah spremenjen. Pojem cilindrikacije vključuje dejstvo, da imata dve telesi lahko isto prostornino, a različno površino. Eksperimentalno določena cilindrična oblika površine levega prekata se razlikuje od matematično določene sferične oblike. Cilindričnost normalnega levega prekata znaša v diastoli 7 %, v sistoli 20 %; dializni bolniki imajo v diastoli 16 %, v sistoli pa 24 %. Iz meritev, ki so opisane v tem članku, lahko sklepamo, da se v izjemnih razmerah princip cilindričnosti lahko spremeni v Laplaceov zakon. To dejstvo nam pojasnjuje, kakšne posledice ima izguba principa cilindričnosti za funkcijo levega prekata in za njegovo prognozo.

Abstract. The endocardial surface and the volume of the left ventricle were determined experimentally by an original noninvasive method with the goal of understanding the mechanism of the influence of the change of left ventricle shape on the execution of its pumping function. The chore parameters were studied by Echocardiography and ECG at the end of diastole and systole. Three groups of patients (sportsmen, subjects taking part in no sports and dialysis-patients) were evaluated. The change in the volume of left ventricle represents the frame of the left ventricle pumping action, while the change of surface can be interpreted as an indicator of the axis' dynamics. A spherical and the cylindrical shapes of the volume ejecting left ventricle during the heart cycle and that can be understood as a principle, called »cylindricity«. In diastole the left ventricle is more spherical, in systole more tube like. This mechanism is in pathological conditions changed. The term of cylindricity encompasses the fact, that two bodies with the same volume can have different surface areas. The experimentally determined value of the cylindrical form of surface deviates from the mathematically determined spherical form of surface. Cylindricity of a normal left ventricle in diastole is 7 %, and systolic cylindricity 24 %; diastolic cylindricity of the dialysis patients is 16 %, in systole 24 %. The results obtained suggest, that in pathological conditions the principle of cylindricity is replaced by the law of Laplace, which can explain the consequences of the loss of the cylindricity, principle for the left ventricle function and its prognosis.

*Mag. Bojan Knap, dr. med., Nefrološka klinika, Klinični center, 1525 Ljubljana

**Prof. dr. sc. Gojmir Južnič, dr. med., Institut za fiziologijo, Medicinska fakulteta, Zaloška 4, 1005 Ljubljana

***Dr. Susara Južnič, Institut za fiziologijo, Medicinska fakulteta, Zaloška 4, 1005 Ljubljana

Uvod

Silo levega prekata (LV) predstavlja produkt tlaka in notranje površine (površina endokarda $\times$ pritisk v levem prekatu = $SLV \times PLV$) (1). Spremembe tlaka so opisane in izmerjene s katetskimi metodami. Spremembe SLV so do sedaj malo opisane (2). Meritve površine z neinvazivnimi metodami so se pojavile šele z razvojem primernih ehokardiografskih metod (3). Natančnejših in poglobljenih analiz dinamike SLV zaradi različnih vzrokov doslej niso naredili. Natančne meritve SLV so zahtevne in vsebujejo na prvi pogled manj podatkov kakor meritve prostornin. Prostornina LV nam ponazarja vsebino pogona LV (namen, funkcija) (4–7), sprememba SLV pa nam posreduje način izvedbe pogona (8). Pri opredelitvi izvedbe akcije srca smo izmerili kratko in dolgo os LV (9) in dinamiko obeh (5, 10). Iskali smo parameter, ki bi upošteval spremembo SLV in merljivo ovrednotil optimalno spremembo geometrije LV.

Namen raziskave je preveriti hipotezo, ali obstaja določena značilna sprememba SLV , ki bi specifično označevala funkcijo LV kljub enaki pogonski akciji (minutni volumen srca). V predhodnih poskusih se je pokazala »cilindrikacija« kot primerna metoda za doseg tega cilja.

Obstaja neka idealna geometrija LV za optimalno ekonomično funkcijo kardiovaskularnega sistema (KVS). Pri tem predpostavljamo, da je radialna sila srca (11) štirikrat večja od vlečne sile srca. Prvo predpostavljamo pri kroglastih telesih, drugo pri cilindrih. Optimalno zdravo srce je dolgo srce aerobno treniranih športnikov (7, 12, 13). Bolno, insuficientno srce je pretežno sferično, prekomerno povečano tudi v prečnem preseku (14). Za opis vlečne sile srca je uporaben princip cilindrikacije (5, 6, 12, 13). V odstotkih izraženo odstopanje od sferične oblike smo imenovali cilindrikacijo. Nameravali smo jo preveriti na skupini športnikov, skupini mladih nešportnikov in skupini bolnikov z insuficientnim srcem (dializni bolniki), katerih značilnost je kronična volumnska obremenitev.

Te preiskave bi pomembno prispevale k praktični uporabi principa cilindrikacije kot koristnega načina študija dinamike SLV . Cilindrikacija pomeni za funkcijo srca bolj ekonomično akcijo, ker (tako predpostavljamo) srce deluje po principu vlečne sile, ki je štirikrat manjša od radialne sile (Laplace). Nekaj rezultatov teh raziskav, ki so v teku, naj prikaže današnji prispevek.

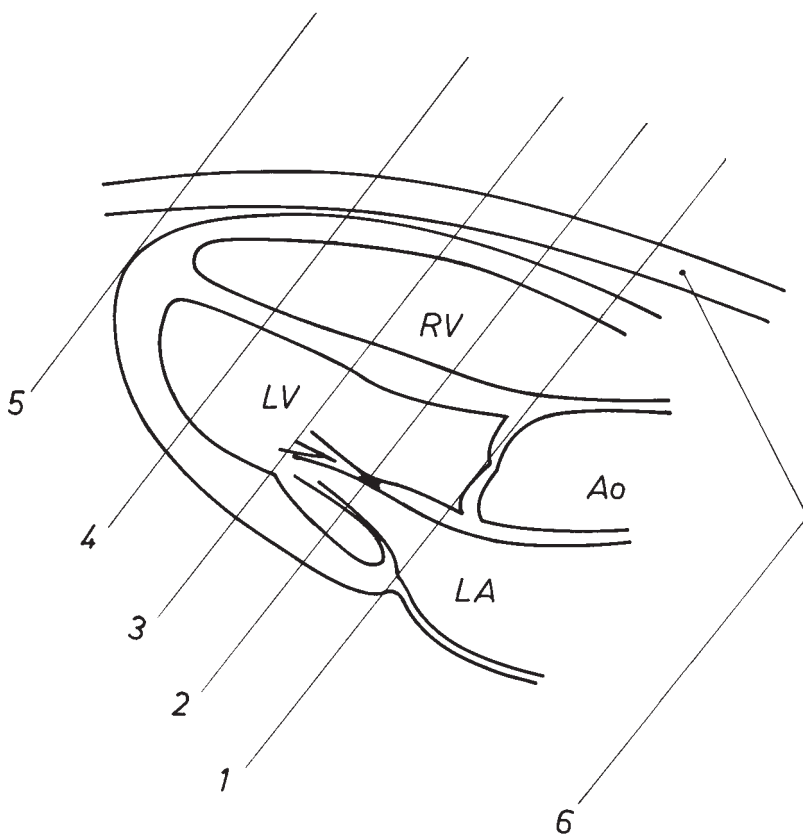
Metodika

Razvili smo neinvazivno metodo za določanje notranje površine in prostornine LV kot prisekanega stožca (15) z uporabo ehokardiografije (3, 16, 17). Meritve smo opravili z aparatom Echocardiography Acuson 128XP computed Sonography System 2D in M-mode. Eksperimentalni del smo zasnovali leta 1990 in ga računalniško podprli. Dolge in prečne osi srca smo izmerili s klasičnimi ehokardiografskimi projekcijami (»parasternal long axis view« ter »parasternal short axis view«, (18)). Z uporabo Simpsonovega pravila smo srce razdelili s 5 ravninami:

- ventilna ravnina,
- konec mitralnih lističev (klasična dimenzija prečne osi LV, uporabljena v standardnih ehokardiografskih meritvah),

- prirastišče papilarnih mišic,
- mesto zožitve LV proti apeksu in
- apeks.

S tem smo dobili 4 rezine; ta delitev prostornine LV je prikazana na sliki 1. Prereze, ki so dejansko eliptični, smo smatrali kot okrogle, očrtali smo njihove obrise, aparat nam je izračunal površine presekov; premere »krožnih« presekov in debeline rezin smo vnesli v enačbo za površino in prostornino prisekanega stožca (15). Z računalniškim programom (za PC-XT), izdelanim v našem laboratoriju, smo izračunali SLV in prostornino (Vol LV) ob koncu diastole (na EKG Q-zobec) in ob koncu sistole (na EKG konec T-vala).



Slika 1. Slika predstavlja vzdolžni prerez srca. Nakazani so prerezi, ki so osnova modelu za izračunavanje površine in prostornine levega prekata. Ravnine rezov so naslednje: 1 – ravnina zaklopk, 2 – lističi mitralne zaklopke, 3 – papilarne mišice, 4 – prehod v zoženi del levega prekata, 5 – apeks. Nakazana je torakalna stena – 6, LV – levi prekat, RV – desni prekat, Ao – aorta, LA – levi predvor.

Matematične enačbe za površino in prostornino modela, ki ga sestavljajo rezine iz prisekanih stožcev:

$$S = \pi \left(\frac{d_1}{2} \right)^2 + \sum_{i=1}^n S_i \quad \text{Enačba 1}$$

S = celotna površina srca

d_1 = premer rezine

s_i = površina priskekanega stožca

Površino modela (S) sestavimo iz ravnine zaklopka in 4 plaščev rezin:

$$S_i = \pi(r_1 + r_2) \sqrt{(r_2 - r_1)^2 + h^2} \quad \text{Enačba 2}$$

r_1 = polmer spodnje ploskve priskekanega stožca

r_2 = polmer zgornje ploskve priskekanega stožca

h = višina priskekanega stožca

Prostornino modela (V) sestavimo iz 4 rezin:

$$V = \sum \frac{\pi \cdot h}{3} (r_1^2 + r_2^2 + r_1 r_2) \quad \text{Enačba 3}$$

h = debelina rezine

Predpostavljamo tudi, da je prečni prerez ventrikla krog in ne elipsa.

Napravili smo meritve na skupini 10 vrhunskih aerobnih športnikov, skupini 10 mladih, zdravih nešportnikov in skupini 8 dializnih bolnikov (10 let nadomestnega zdravljenja s hemodializo (HD) zaradi končne odpovedi ledvic). Metodika je popolnoma neinvazivna, prvi dve skupini sta bili prostovoljni, bolniki pa so bili pregledani v okviru redne kontrole KVS.

Uporabili smo princip (v tehniki je dobro znan), da ima krogla v primerjavi s cilindrom enakega volumna najmanjšo površino.

Cilindrikacijo (CYL) določimo na naslednji način:

$$CYL = \frac{SLV(\text{eksper}) - SLV(\text{krogla} - \text{matem})}{SLV(\text{krogla} - \text{matem})} \cdot 100 = \% \quad \text{Enačba 4}$$

SLV (eksper) = eksperimentalna površina

SLV (krogla-matem) = matematična površina krogle

Za izračun CYL iz eksperimentalnega podatka za SLV in eksperimentalnega podatka za volumen LV je bil napravljen program za mini-računalnik HP-41C. Najprej izračunamo SLV za preiskovani LV (enačba za prisekani stožec), potem prostornino za isti LV. Potem ob predpostavki, da pretvorimo ta LV v kroglo enake prostornine, izračunamo še površino te fiktivne krogle. Nato lahko uporabimo gornjo enačbo za CYL (enačba 4).

Rezultati

Vrednosti za površine SLV v sistoli in diastoli vseh 3 skupin so zbrane v tabeli 1. Podatki so reducirani na m^2 telesne površine. Pri športnikih so opazne največje vrednosti SLV in najizdatnejša sprememba SLV med sistolo in diastolo. V skupinah športniki in nešportniki je videti homogenost, medtem ko so rezultati bolnikov heterogeni, s precejšnjo standardno deviacijo. Dimenzije srca dializnih bolnikov niso statistično značilno različne od skupine nešportnikov.

Vrednosti cilindrikacije LV CYL so v tabeli 2. Izračunane so po enačbi 4 in podane v odstotkih. V skupini športnikov je največja razlika CYL med sistolo in diastolo (13 %). Vlečna sila srca se tu najbolj odraža. V skupini bolnikov je razlika CYL najmanjša. Športniki imajo statistično značilno višje vrednosti CYL kot dializni bolniki ($p < 0,05$), kot skupina nešportnikov pa ne. Sorazmerno velika cilindrikaličnost bolnikov v diastoli je omogočena s slabo krčljivostjo dolge osi srca. SLV športnikov v primerjavi z nešportniki so statistično značilno različne (v diastoli in sistoli: $p < 0,001$ in $p < 0,01$) (tabela 1). Cilindrikaličnost med obema skupinama (tabela 2) ni statistično značilno različna, kar potrjuje, da športno srce deluje v fizioloških mejah.

Znatneje se CYL razlikuje v sistoli in diastoli med športniki in nešportniki. Primerjava nešportnikov z bolniki kaže večjo razliko v SLV v sistoli in obratno, večjo razliko CYL v diastoli obeh skupin. Statistično značilnost opazamo še v vrednosti CYL nešportnikov in dializnih bolnikov (na meji statistične značilnosti).

Tabela 1. Vrednosti notranje površine levega prekata (SLV) (cm^2/m^2). Navedene so srednje vrednost in standardni odkloni.

	Športniki	Nešportniki	Dializni bolniki
Diastola	100,30 ± 11,99	78,60 ± 10,30	87,87 ± 34,01
Sistola	69,60 ± 11,35	53,60 ± 8,66	75,50 ± 38,21
Število preiskovancev	10	10	8

Tabela 2. Vrednosti cilindrikacije levega prekata (CYL). navedene so srednje vrednosti in standardni odkloni. Razlika med športniki in dializnimi bolniki je statistično značilna ($p < 0,05$).

	Športniki	Nešportniki	Dializni bolniki
Diastola	7,33 % ± 3,36	7,83 % ± 2,56	10,53 % ± 3,73
Sistola	20,39 % ± 6,65	18,00 % ± 5,22	18,06 % ± 4,29
Razlika	13,02 % ± 6,10	10,20 % ± 4,91	7,53 % ± 2,80
Število preiskovancev	10	10	8

Razprava

Natančna meritev SLV je zahtevna naloga (2, 5, 19). V primerjalno fizioloških raziskavah na 5 vrstah sesalcev je bila narejena pred nekaj desetletji (20). Na invaziven način smo jo naredili pred leti (1979) (21). Neinvazivne meritve so nedavno napravili z uporabo »cross-sectional Eho.« (2, 3). Podatke so primerjali s podatki na avtopsijah umrlih preiskovanih bolnikih. Meritve dimenzij, ki jih je fizikalno in eksperimentalno težko definirati, so vedno obremenjene s subjektivno in objektivno napako. Zato smo razvili svoj eksperimentalno-matematični model za določitev SLV in prostornine LV, ki naj bi se približal realnosti (5–8, 13). Rezultati bi bili točnejši, če bi vzeli dovolj veliko število rezov. Idealno bi bilo vzeti rezine debeline 1 mm, da bi zadostili Simpsonovemu pravilu. Vzeli naj bi jih vsaj 10. Dodatno izboljšanje bi prinesel drug način meritev (npr. transezofagealna ehokardiografija, magnetna resonanca). V naši raziskavi smo meritve opravili s transtorakalnim ehokardiogramom. Vzeli smo 4 rezine. Naši rezultati so zelo podobni invazivnim meritvam (20) kot tudi rezultatom z drugačno neinvazivno tehniko (2). Kljub velikemu stresanju vrednosti za SLV in CYL v tabelah 1 in 2, sta se ta parametra pokazala kot ugoden način za oceno ekonomičnosti akcije LV. Ni važno le, ali srce izvrže nek utripni volumen ter minutni volumen, ampak tudi na kakšen način: kroglasto srce z majhno diferenco CYL med sistolo in diastolo je neugoden kompleks za izgon primerne količine krvi.

Enako dinamiko rezultatov geometrije LV je pri matematičnem eksperimentiranju ugotovil Drzewiecki (14). Prave analize rezultatov notranje površine LV, razen teh, ki jih je dobil Južnič (20, 21) (primerjal je invazivne rezultate z rezultati električnega modela), nismo zasledili. V zadnjem času se precej omenja oblika LV kot pokazatelj funkcije LV (22). Rezultati, ki smo jih dobili v okviru SLV in CYL odpirajo nove možnosti tudi za oceno primerov iz kardiološke prakse (npr. zgodnji stadiji aortne stenoze). To z drugimi pristopi potrjujejo tudi drugi avtorji (9, 14). V fizikalnem oziru je SLV bistven parameter srčne funkcije. Mnogi avtorji (1, 11, 23) so predpostavljali obliko krogle. Glede na Laplaceov zakon (1, 24) je pri manjšem radiju potrebna manjša napetost v steni za razvoj istega pritiska v okroglem ventriklu (11).

Velika površina je neugodna za ekonomično srčno akcijo, kar potrjuje klinična praksa (cor bovinum). Če obstaja neko idealno odstopanje od sferične oblike ventrikla, ki je patološka, potem obstaja tudi neka optimalna vrednost CYL (denimo v diastoli CYL = 5 %, v sistoli CYL = 20 %). Subtilna sprememba CYL je lahko zgođen znak manj ekonomične srčne akcije, čeprav je volumna akcija še zadovoljiva. CYL ne popisuje samo absolutnih vrednosti SLV, ampak tudi dinamiko sprememb dolgih in prečnih osi srca. Temelji na fiziološko zelo pomembnem dejstvu, da imajo telesa enakih prostornin lahko različno površino. Majhne spremembe površine velikega insuficientnega, sferičnega srca (24), ki deluje po načelu Laplaceovega zakona in s tem radialne sile srca, pomeni zadostno spremembo prostornine, toda za visoko presnovno ceno, kar je prognostično neugodno. Srce športnikov je dolgo in se še relativno podaljša zaradi izdatnejše prečne skrčitve v sistoli (6, 13), ima pa majhen rezidualni volumen. Deluje po principu vlečne sile srca, ki je štirikrat manjša od celokupne, radialne sile srca. Cilindričacija nepo-

sredno kvantitativno vrednoti ekonomičnost srčne akcije. Ali je CYL dovolj občutljiva metoda za spoznavo arhitektonskih sprememb LV na meji normale, bodo pokazale študije CYL takoj po naporu in rezultati CYL pri klasičnih volumskih in tlačnih obremenitvah LV iz klinične prakse.

V zaključku lahko rečemo, da omogoča notranja površina LV, ki jo določamo na dovolj enostaven in neinvaziven način z ehokardiografsko tehniko, izraziti dinamiko njenih sprememb s pojmom cilindrikacije. Ta pojem predstavlja matematični odstop oblike levega ventrikla od neugodne sferične k cilindrični, pri čemer oblika krčenja, kjer se uporablja radialna sila srca (celokupna sila srca), preide k cilindrični, kjer se uporablja natezna obremenitev, ta pa je štirikrat manjša od radialne (uporaba tlačne sile srca) akcije srca. Menjava cilindrične in sferične oblike srca pomeni optimalen mehanizem, ki zagotavlja ekonomično akcijo srca.

Literatura

1. Tigerstedt R. *Physiologie des Kreislaufes*. Berlin: W de Gruyter, 1921: 230.
2. Wilkins GT, Southern JF, Choong CY, et al. Correlation between echocardiographic endocardial surface mapping of abnormal wall motion and pathologic infarct size in autopsied hearts. *Circulation* 1988; 5: 978–87.
3. Weiman AE. *Cross-sectional echocardiography*. Philadelphia: Lea & Febiger, 1982: 98.
4. Drexler M, Erbel R, Muller V, Wittlich Mahr-Kahaly S, Meyer J. Measurement of intracardiac dimensions and structures in normal young adult subjects by transesophageal echocardiography. *Am J Cardiol* 1990; 65: 1491–6.
5. Južnič G, Južnič SCJE, Knap B. The inner surface of the left ventricle – a new noninvasive parameter of left ventricular function. *Biomed Tech* 1992; 37: 116–8.
6. Južnič G, Južnič SCJE, Knap B. The inner surface of left ventricle – a new noninvasive parameter of left ventricular function. In: *Lecture presented during »Le giornate mediche del ospedale S. Orsola«*. Brescia: Ospedale S. Orsola, 1992.
7. Južnič G, Knap B, Južnič SCJE, Pečar J. Left ventricular surface – its physiological significance. In: *Proc 13 Int Conf IEEE/EMBS*. New York: IEEE/EMBS, 1991: 2075–6.
8. Južnič G, Knap B, Južnič SCJE, Pečar J. The indicative value of the inner surface of the left ventricle versus its compliance. *Med Razgl* 1991; 30: Suppl 2: 11–9.
9. Jones CJH, Raposo L, Gibson DG. Functional importance of the long axis dynamics of the human left ventricle. *Br Heart J* 1990; 3: 215–20.
10. Tanaka K, Joshimura T, Sumida S, et al. Transient responses in cardiac function below, at, and above anaerobic threshold. *Eur J Appl Physiol* 1986; 55: 356–61.
11. Burch GE, Ray CT, Cronvich JA. Certain mechanical peculiarities of the human cardiac pump in normal and diseased states. *Circulation* 1952; 5: 504–13.
12. Južnič G, Knap B, Južnič SCJE, Peterec D. The inner surface of Left ventricle as an indicator of its function. In: *Proc 5th World Congress on Noninvasive Cardiovascular Dynamics*. Piscataway: Rutgers University, 1993: Session 4.1.
13. Južnič G, Knap B, Južnič SCJE, Peterec D. The inner surface of left ventricle as an indicator of its function. In: *Proceed 15th Ann Intern Conf*. San Diego: IEEE/EMBS, 1993: 1853–4.
14. Drzewiecki G, KJ Li. A relationship between ventricular hypertrophy and reduced myocardial contractility. In: *Proc 5th World congress on noninvasive cardiovascular dynamics*. Piscataway: Rutgers University, 1993: Session 4.2.
15. Žabkar A. Matematični vodnik. *Življenje in Tehnika* 1963 nov 5: 202.
16. Južnič G, Bardorfer I, Pečar J, Peterec D. A positive feed-back mechanism enhancing the heart beat. In: *Proc 11th Ann Conf*. Seattle: IEEE/EMBS, 1989: 130–1.

17. Roelandt J, Surtherland RG and Hugenholtz PG. The 1980's renaissance in cardiac imaging: The role of ultrasound. *Eur Heart J* 1989; 10: 680–4.
18. Feigenbaum H. *Echocardiography*. Philadelphia: Lea & Febiger, 1981: 302.
19. Bragason JA, Ray G. Functional imaging of hemodynamic parameters to identify ischemic left ventricule. In: *Ann Int Conf of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. New York: IEEE, 1990; 12: 722–3.
20. Južnič G. *Vergleichende Untersuchungen uber die mechanische Herzleistung bei Kleintieren und beim Menschen*. Doktorska disertacija. Bonn: Universitat Bonn, 1964.
21. Južnič G, Peterec D, Jagodic A. Further observations of modelling cardiovascular function (CVF) in electrical model. *Bibl Cardiol* 1979; 37: 195–208.
22. Goldstein S. Modifying the processes of remodelling. In: *Reports from the XIVth Congress of the European Association of Cardiology*. Brescia: European association of cardiology, 1992: 2.
23. Hermann H. La force du coeur. In: Roger GH, Binet L, eds. *Traite de Physiologie*. Paris: Masson, 1932: 78.
24. Knap B, Južnič G, Južnič SCJE, et al. Cylindricity of left ventricle indicating its function. In: *Proc 6th Annual Meeting of Mediterranean Association of Cardiology and Cardiac Surgery*. Corfu: Association of Cardiology and Cardiac Surgery, 1993:90.

Raziskavo je financiralo Ministrstvo za znanost in tehnologijo RS, pogodba P3-5310-0381-93 in PECO 1995 (Evropska skupnost) dodatna pogodba No ERBCIPDCT940206.

Prispelo 15. 11. 1993