

ÖSSZEFOGLALÓ KÖZLEMÉNY

A kamrai izomzat szerkezetével és működésével kapcsolatos új ismeretek jelentősége a mindennapi klinikai gyakorlatban

VÁLYI Péter^{1,2}, KÉKES Ede³¹VALYTERÁPIA Egészségügyi és Szolgáltató Bt., Budapest²Érgondnok Rendelőház, Sopron³Pécsi Tudományegyetem, Általános Orvostudományi Kar, Kardiológiai Tanszék, Pécs

ÖSSZEFOGLALÁS – A forma és funkció összefüggése a kardiológiában is fontos. A szív igen összetett, háromdimenziós működését csak akkor érthetjük meg, ha a szívizomról, elsősorban a kamrai myocardiumról, annak szerkezetéről, működéséről alkotott korábbi ismereteinket rendszeresen felülvizsgáljuk. A kamrai izomzat rétegszerű szerkezete alapján ma már nem vagy csak korlátozottan érthető meg a korszerű vizsgálóeljárások (például mágneses rezonanciás képalkotás, a szív deformálódásának az elemzése) eredményei, nem vagy alig érthető a szív szerkezetváltozásával kapcsolatos funkcióváltozások. A kamrai izomzatnak a helicalis köteg (helical ventricular myocardial band) modellje alapján érthető meg, hogy a kamrák izomzata miért képez funkcionális egységet, miért képes a bal kamra szűkülni, tágulni, deformálódni, elfordulni, csavarodni, ezekkel ellentétes irányú mozgásokat végezni, amelyek alapvetően befolyásolják a szisztolés és a diasztolés működést. A szív ciklussal kapcsolatos korábbi ismeretek is felülvizsgálásra szorulnak. A kamrák működése nem homogén módon változik meg a szív betegségeiben, hanem az egyes szerkezeti elemek károsodásának a típusától, annak mértékétől függően változnak a szív funkciójának az összetevői. Mindezek ma már jól elemezhetők a korszerű vizsgálóeljárásokkal. A szívbetegségek mai kezelése jelenleg még elsősorban a funkcióváltozások, azok következményeinek a befolyásolására épül. A jövő kezelésének a szerkezeti változások megelőzésére, a károsodott kamrai szerkezet reparációjára, rekonstrukciójára kell irányulnia, ami a funkcionális következményeket is visszafordíthatja, mérsékelheti.

Kulcsszavak: kamrai szerkezet és működés, helicalis kamrai izomköteg modell, szív ciklus, kamrai alak- és funkcióváltozás

The relevance of new knowledge about the structure and function of the ventricular musculature for everyday clinical practice

Vályi P, Kékes E.

Summary – The relationship between form and function is also important in cardiology. The highly complex, three-dimensional function of the heart can only be understood if our previous knowledge of the myocardium, in particular the ventricular myocardium, its structure and function, is systematically reviewed. Today, the layered structure of the ventricular myocardium provides little or no understanding of the results of modern examination procedures (e.g. magnetic resonance imaging, analysis of cardiac deformation) and little or no understanding of the changes in function associated with structural changes in the heart. The helical ventricular myocardial band model provides a model for understanding why the ventricular myocardium forms a functional unit, why the left ventricle can contract, dilate, deform, rotate, twist and perform opposing movements that fundamentally affect systolic and diastolic function. Previous knowledge of the cardiac cycle also needs to be reviewed. The function of the ventricles is not homogeneously altered in heart disease, but the components of cardiac function vary according to the type and degree of damage to each structural element. All these can now be well analysed by modern testing techniques. Today's treatment of heart disease is still primarily based on influencing the changes in function and their consequences. Future treatment should be directed towards the prevention of structural changes, the repair and reconstruction of damaged ventricular structures, which can also reverse and reduce the functional consequences.

Keywords: ventricular structure and function, helical ventricular myocardial band model, cardiac cycle, ventricular structure and function changes

Levelező szerző:

Dr. Vályi Péter,

E-mail: dr.val.pet@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.33668/hn.28.025>

Hypertonia és Nephrologia
2024;28(4):207-17.

Bevezetés

A vérkeringés feladata a szervezet egyes részein az aktuális tevékenységi szinthez szükséges tápanyagigényeknek a kielégítése (beleértve az oxigénellátottságot is), illetve a normális tevékenység során keletkező, a működést már akadályozó anyagcseretermékeknek az elszállítása. Az egyes szervek, szövetek működéséhez szükséges véráramlást a szervezet két pontja közötti nyomáskülönbség biztosítja. Az egész szervezet működéséhez szükséges teljes véráramlást, az ezt biztosító nyomásgradienst a szív, mint sajátos, elektromechanikusan összehangolt működésű, szoros neuralis és hormonális kontroll alatt álló pumpa tartja fenn.

A még jelenleg is legelterjedtebb, az anatómiai, élettani, echokardiográfiai kézikönyvekben rendszeresen megismételt elképzelés szerint a bal kamrát alkotó izomrostok különálló rétegeket képeznek. Ezen nézet szerint a kamrák izomzata három rétegből tevődik össze: a külső ferde, a középső körkörös és a belső, hosszanti rétegből. A külső (subepicardialis) rostok nyalábjai az anulus fibrosuson erednek, a szív elülső felszínén jobbról, a basis felől balra, a csúcs felé haladnak, a hátsó felszínen fordítva, a basis bal oldala felől jobbra haladnak az

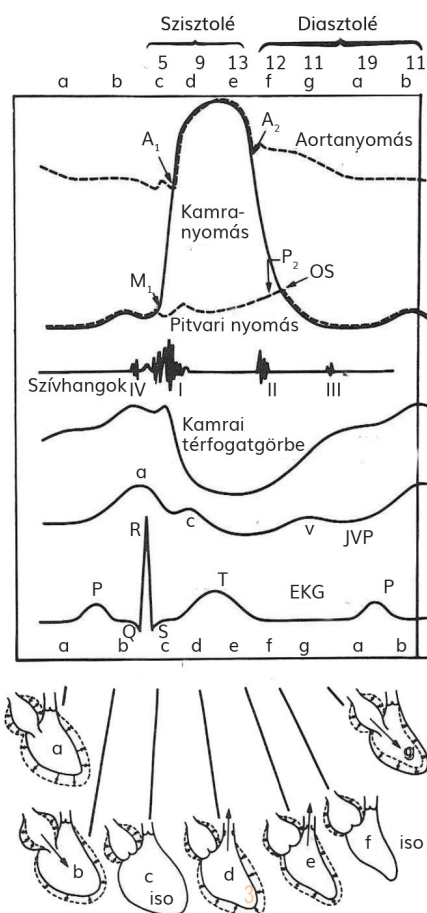
apexhez. A spirálisan leszálló izomnyalábok a csúcstól kissé jobbra létrehozzák a vortex cordist, ahol átfordulnak, az elülső rostok hátra, a hátsók előre kerülnek, a továbbiakban pedig a hosszanti lefutású belső (subendocardialis) réteget képezik. A középső körkörös rostok szintén az anulus fibrosuson erednek, de jóval laposabb spirálban haladnak lefelé, és a kamráknak csak a basalis kétharmadában találhatók meg, mivel a csúcstól teljes egészében a külső és a belső rostok alkotják (egymásba ágyazott szívizomrétegek modell – nested layer model). Ennek a klasszikus anatómiai és szövettani eljárásokra épülő elképzelésnek az alapján nehezen magyarázható meg a szív, ezen belül is a kamrák rendkívül összetett, háromdimenziós működése.

Egy másik elképzelés szerint, a syncytiumot alkotó szívizomsejtek vég a véghez és elágazódva egy igen komplex háromdimenziós hálózatot képeznek, amely a bal kamra izomzatának a középső rétegében körkörös elhelyezkedésű, onnan távolodva subendocardialisan és subepicardialisan egyre meredekebb lefutású, ellentétes irányú spirált képeznek. Ennek a modellnek (3D meshwork model) már jobban megmagyarázható a modern kardiológiai képalkotó vizsgálatok eredményei.

Az egyes szívverések alatt a szívben zajló elektromos változások, a szív üregeiben, az oda vezető és az onnan eredő

1. ábra. A szív ciklus (1, 2)

A szív ciklus	Időtartama századmásodpercben
Bal kamra kontrakció	
Izovolémiás kontrakció (c)*	5
Gyorsuló kiáramlás (d)	9
Bal kamra elernyedés	
Elernyedés kezdete, lassuló kiáramlás (e)	13
Izovolémiás relaxáció (f)	12
Gyors telődés (g)	11
Lassú telődés (a)	19
Pitvari kontrakció (b)	11



Az ábra bal oldalán a bal kamrai szisztolé és diasztolé egyes szakaszai, azok időtartama (századmásodpercben) láthatók. A jobb oldali panel a Wiggers-féle diagramnak a korszerűsített változatát mutatja: az ábra felső részén látható az aorta, alatta a bal kamra, majd a bal pitvar nyomásgörbéje. Ezután következik fonokardiogram, ami a szívhangok szív ciklusbeli elhelyezkedését mutatja, összevetve a bal szívfélből és az aortában végbemenő nyomásváltozásokkal. Ez alatt van a bal kamra térfogatváltozását mutató görbe, majd a vena jugularis pulzusgörbéje. Az elektromechanikus összefüggések megértését segíti az EKG-görbe. Az alsó részén láthatók a képalkotó eljárásokkal a szív ciklus alatt a bal szívfélből zajló térfogat- és áramlásváltozások, billentyűmozgások

nagyerekben végbemenő nyomás- és térfogatváltozások időbeli egymásutánosságát szív ciklusnak nevezzük. A szív ciklus pontos leírása akkor vált először lehetségessé, amikor állatkísérletben (kutyán), nyitott mellkas és mesterségesen fenntartott lélegeztetés mellett torzításmentesen regisztrálták a szívüreg nyomásváltozásait, és ezzel egyidejűleg a szívüreg térfogatváltozásait. A nyomásméréseket a későbbiekben szívkatéterezés és nyomástranzducerek segítségével emberen is elvégezték. (Invazív vizsgálati technika, diagnosztikai céllal ma is alkalmazzák.) A szív ciklusról való ismereteinket forradalmasította az echokardiográfia, ami nem invazív módon teszi láthatóvá és mérhetővé a működő emberi szív és a nagyerek geometriai adatait, a szív térfogatváltozásait, a verőtér fogatot, a billentyűk helyzetváltozásait (1, 2).

A szív működésével kapcsolatos élettani, kóreltani és klinikai ismeretek alapját még mai is a Wiggers által 1916-ban publikált diagram jelenti. A részleteket illetően utalunk az élettani tankönyvekre (1, 2) (1. ábra).

A szemléletváltozás szükségessége a szívvel kapcsolatos újabb ismeretek tükrében

Az echokardiográfia elterjedése, a mindennapi gyakorlatban történő alkalmazása jelentős mértékben pontosították a szív működésével, annak időbeliségével kapcsolatos ismereteinket. Ennek ellenére sokaknak még mindig leegyszerűsített elképzeléseik vannak a szív működéséről, nem veszik figyelembe az újabb eredményeket, még ma is úgy gondolják, hogy a szív egy egyszerű nyomó-szívó pumpa, amely a szisztolés idején összehúzódva kilöki a vért, majd elernyedve passzívan telődik.

A szív szerkezetére, funkciójára vonatkozó, még ma is elterjedt nézetek három fő, ma már túlhaladottnak tartható ismeretanyagra vezethetők vissza:

1. Feltételezik, hogy az egyes szívüregeket alkotó szívizom homogén, minden szívizomrost egyidejűleg húzódik össze és ernyed el. Ez a szemlélet a múltban gyökerezik, amikor a szív üregét, alakját, az azokat körbevevő szívizmot még a legjobb esetben is csak kétdimenziós módszerekkel (echokardiográfiával, angiográfiával) tudták vizsgálni, márpedig a szív anatómiai szempontból is háromdimenziós szerv, amihez hozzáadódik a szívben zajló áramlások idő- és térbeli megjelenítése is.
2. A szívüreg, ezen belül a kamrák funkciójának a vizsgálata nem vette és még jelenleg is alig veszi figyelembe az igen bonyolult, a részleteket csak a közelmúltban megismert felépítést, a szívizomkötegek jelentős részének a kettős, ellentétes irányban csavarodó, spirált képező, a csúcs körül 8-as alakú hurkot alkotó lefutását, a sarcomereken belüli és a sarcomereken kívüli, intracelluláris vázfehérjék, az extracelluláris mátrix felépítését és szerepét.
3. A kétdimenziós képalkotás nem tette lehetővé, hogy pontosan feltérképezzük a kamrák, főleg a bal kamra igen összetett mozgását, a szisztolés alatti kontrakcióját, feszülését, elfordulását, csavarodását, a diasztolés idején az ellentétes irányú mozgások miatti aktív szívóhatást, amelyek jelentősen kihatnak a szív mechanikai sajátosságaira, így a szív ciklus alatt zajló eseményekre is.

A szív szerkezetére vonatkozó új ismeretek nélkül nem le-

hetne megmagyarázni, hogy a szívizom funkcionális egységét alkotó sarcomer körülbelül 13%-os rövidülése hogyan járhat a bal kamra 20%-os hosszirányú és körkörös megrövidülésével, a falvastagság 40%-os növekedésével, a bal kamrai ejekciós frakció 60%-ot meghaladó értékével.

Az új vizsgálómódszerekkel, modellezésekkel szerzett ismereteink jelentősen gazdagították a pitvarok és kamrák funkciójára vonatkozó tudásunkat is.

A finomabb, nagyobb felbontású, részletgazdagabb vizsgálati módszerek lehetővé teszik, hogy egyrészt még tünetmentes, korai szakban felfedezzük a betegségekhez vezető elváltozásokat, másrészt célzott, csak a felfedezett elváltozásokat befolyásoló, nem általános hatású kezelési módszerek kifejlesztését is elősegíthetjük.

A keringési rendszer, ezen belül a szív filogenezisét és a human embrionális szív fejlődését követve jól látható, hogyan alakul ki a kezdeti csőszerű szívből a rendkívül komplex szerkezetű és mozgású szív, aminek a későbbi szerkezetét, funkcióját folyamatosan befolyásolják a mindennapi étellel járó hemodinamikai igények (3–6).

Vajon minden embernél szükség lesz-e a bonyolult, költségigényes, ismételt vizsgálatok elvégzésére, hogy figyelemmel lehessen kísérni a szívben zajló anatómiai és funkcionális változásokat? A szív állapotát tükröző biológiai markereknek a vérből történő meghatározása, a bonyolult vizsgálatok eredményeiből a mesterséges intelligencia alkalmazásával származtatható, de már az egyszerűbb, „alap”-vizsgálatokkal is kimutatható eltérések integratív szintézise lehetőséget fog adni arra, hogy populációs szinten is meg lehessen határozni és követni a szív és az egész cardiovascularis rendszer aktuális állapotát.

A kamrák anatómiai felépítésével kapcsolatos új ismeretek

Az alábbiakban részletezett szívmodellt, a helicalis ventricularis myocardialis köteg (helical ventricular myocardial band – HVMB) modellt Torrent-Guasp spanyol kardiológus alkotta meg még 1972-ben. A szív kamrák izomzatát a sulcus interventricularis anteriorról, az izomrostok lefutását, fordulatát, áthajlásait követve, szét lehet hajtogatni egyetlen izomköteggé. Ezt az izomköteget összehajtván kiderült, hogy a kamrák izomzata a jobb és a bal kamra üregét körbevevő, egyetlen nagy izomköteget alkot, amelyik a truncus pulmonalistól az aortáig húzódik, két hurkot, a basalist és az apicalist képezve. A basalis hurok körkörös a sulcus interventricularis anteriorról, a jobb kamra infundibularis részét és a truncus pulmonalis gyököt fedve, mindkét kamra felső részének a hátsó falán a bal oldali trigonum fibrosumig halad. A basalis huroknak jobb és a bal szegmentuma különíthető el. A jobb oldali szegmentum a jobb kamra szabad falát alkotja a sulcus interventricularis anteriorról a posteriorig. A bal oldali szegmentum a jobb oldali szegmentum folytatásaként részt vesz a bal kamra szabad falának az alkotásában, majd a bal oldali trigonum fibrosumnál a hossz tengelye körül 180 fokot átfordulva, illetve a hosszanti lefutásával 90 fokos szöget bezárva az apicalis hurok subendocardialis elhelyezkedő, a szívcsúcs felé haladó descendalo szegmentumában folytatódik az anterior papillaris izomig. Az apicalis hurok descendalo szegmentuma a szív-

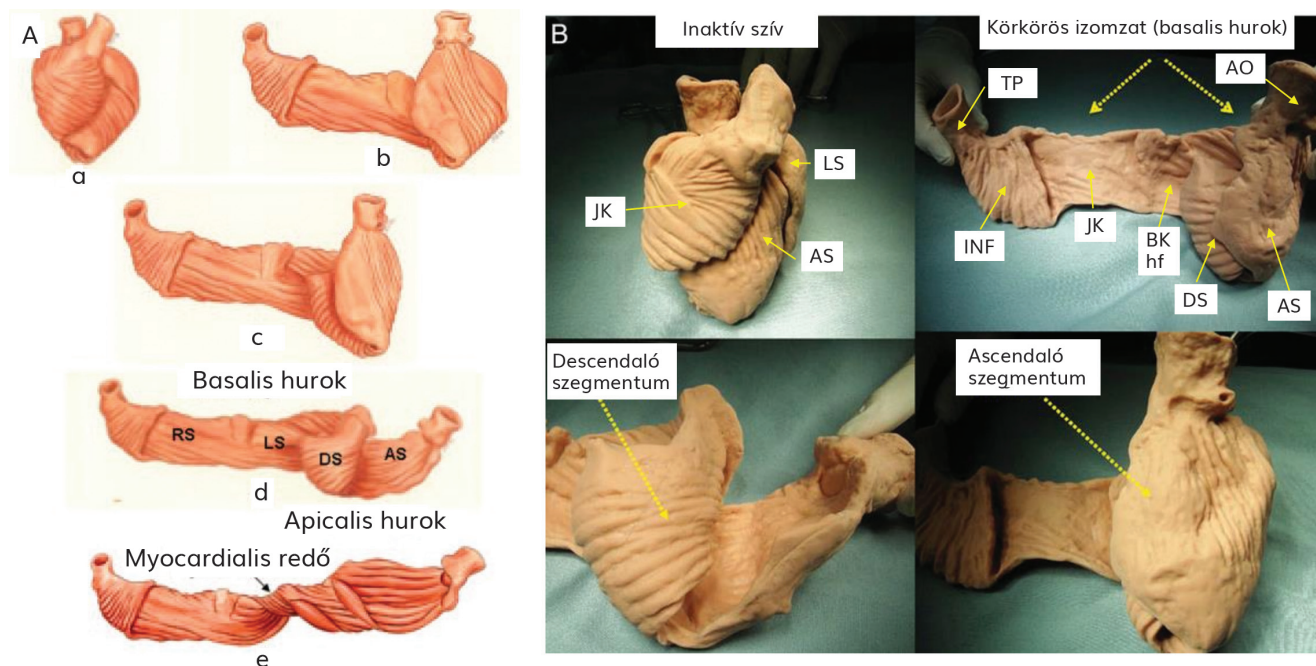
csúcsonál részben a hossz tengelye mentén a subendocardialis felszín subepicardialisba történő átfordulásával, illetve a szívcsúcs körül 8-as alakú hurkot képezve, örvényszerűen (vortex cordis) az ascendalo apicalis szegmentumba megy át, az aorta kezdetéig haladva. Az apicalis hurok descendalo szegmentumát alkotó szívizomrostok a basalis huroktól a szívcsúcs felé haladva egyre meredekebb lefutásúvá válnak, illetve az ascendalo szegmentumot alkotó szívizomrostok meredeksége a csúcs felől a kamra bázisa felé haladva egyre kevésbé meredek, azaz a szív horizontális síkjával egyre kisebb szöget zár be. Ennek köszönhető, hogy fiziológiás körülmények között a bal kamra a csúcs felé szűkülve kúp alakú, kóros körülmények között a szívcsúcs lekerekítetté, a bal kamra alakja golyó alakúvá válik. A descendalo és az ascendalo szegmentumok kontrakciója ellentétes hatású, a csúcsi résznek az óramutató járása szerinti (horális) vagy azzal ellentétes (antihorális), hossz tengely körüli elfordulását, a bal kamra megrövidülését vagy meghosszabbodását váltja ki. Az interventricularis septum jobb oldali részét az ascendalo, a bal oldali részét a descendalo szegmentum képezi. A septumban hosszanti lefutású szívizomrostok nincsenek, ezért az interventricularis septum mozgása is igen összetett. Az egyes rétegek fedésben vannak egymással, számos irányba képesek elmozdulni. Ehhez az is hozzájárul, hogy a szívizom nemcsak kontraktilis elemeket, hanem az összehúzódásra nem képes, sarcomereken belül és kívül, valamint az extracelluláris mátrixban elhelyezkedő vázfehérjéket is tartalmaz, amelyek a szívizom stabilitását, rugalmasságát, sokirányú mozgását képesek biztosítani (7–9).

A 2. ábra mutatja a szív natív, majd fokozatosan széthajtogatott állapotban, illetve a teljes szíven a subendocardialis és subepicardialis spirált képező izomrostokat.

Fontos megemlíteni, hogy Trainini és munkatársai kimutatták, hogy a transversalis hurok eredésénél, illetve az ascendalo hurok tapadásánál egy csontos/porcos/inas (a vizsgált species szívéből függően, felnőtt emberben porcos-inas) anatómiai struktúra található, amit *fulcrumnak* neveztek el, és a szívizomköteg felfüggesztési pontjait képezik. A fulcrum jól megjeleníthető komputeres tomográfiával is. A szerzők, ellentétben a korábbi leírásokkal, nem tudták kimutatni, hogy a kamrai izomzat a jobb és a bal oldali trigonum fibrosum kötőszöveti állományából eredne és itt tapadna. Ugyanez a munkacsoport mutatta ki, hogy a helicalis szerkezet komplex, háromdimenziós mozgását, a súrlódást akadályozó „kenőanyagként” a hialuronsav teszi lehetővé (10).

Ahhoz, hogy az újabb, a szív anatómiájával és működésével összefüggő ismereteket jobban megértsük, néhány, más tudományágban jól ismert és alkalmazott tényre rá kell mutatni. A Möbius-szalag mutatja meg, hogy a hajtogatások irányának a változtatásával milyen geometriai alakzatok hozhatók létre. Háromszoros, különböző irányú hajtogatással megalkotható a spirális (helicalis) ventricularis myocardialis köteg (helical ventricular myocardial band – HVMB) modell. Ugyancsak érthetőbbé teszi a kamrai izomzat felépítésének a megértését a két kamra izomzatát alkotó izomrostok lefutását mutató, kötélből készült modell. Mindezek alapján érthetőbbé válik a szív-kamrák felépítését bemutató rajz (3. ábra).

2. ábra. A helicalis kamrai szívizomköteg-modell (helical ventricular myocardial band model) (9)



Az ábra bal oldalán (A) az a), a b) és a c) paneleken a szív „összehajtogatott”, natív, majd fokozatosan széthajtogatott állapotban látható. A d) panel mutatja a basalis hurkot alkotó, a körtörös elhelyezkedésű jobb és bal oldali szegmentumokat (RS, illetve LS), az apicalis hurkot képező descendalo és ascendalo, spirálisan futó rostokat (DS és AS). Az e) panelen látható a teljesen széthajtogatott, a csúcsi területen két, szögben elforduló, ellentétesen, bal és jobb mentes csavaronak megfelelően tekeredő spirál átfordulása. Az ábra jobb oldalán közelebről látható a körtörösen haladó basalis hurok, a subendocardialis descendalo, illetve subepicardialis ascendalo, a szívcsúcson örvényszerűen átforduló helicalis szerkezetet mutató szegmentum. TP = truncus pulmonalis; INF = infundibulum; JK = jobb kamra; BK hf = bal kamra hátsó fala; AO = aorta; DS = descendalo szegmentum; AS = ascendalo szegmentum.

A kamrák funkciójával kapcsolatos új ismeretek (8, 9, 11–13)

Annak ellenére, hogy a kamrai izomzat HVMB modellje évtizedek óta létezik, ez mindaddig nem ment át a szakmai köztudatba, ameddig a háromdimenziós (3D) képalkotás nem tette lehetővé a szív mozgásának, funkciójának a pontos elemzését. Ugyanakkor, a 3D képek elemzése is csak a Torrent–Guasp-modell alapján vált teljes értékűvé. Fontos, hogy a HVMB-modellnek megfelelően a jobb és a bal kamra anatómiai és funkcionális egységet alkot. Bár a nagy vérkörnek és a kis vérkörnek „saját pumpája” van, a két vérkör egységes, sorba kapcsolt rendszert képez, a rendszer bármely pontján egységnyi idő alatt azonos vérmennyiség áramlik át. Ennek fontos feltétele, hogy a szív a legkisebb energiaráfordítással, a leghatékonyabban, optimálisan időzítve lökje ki és fogadja a vért.

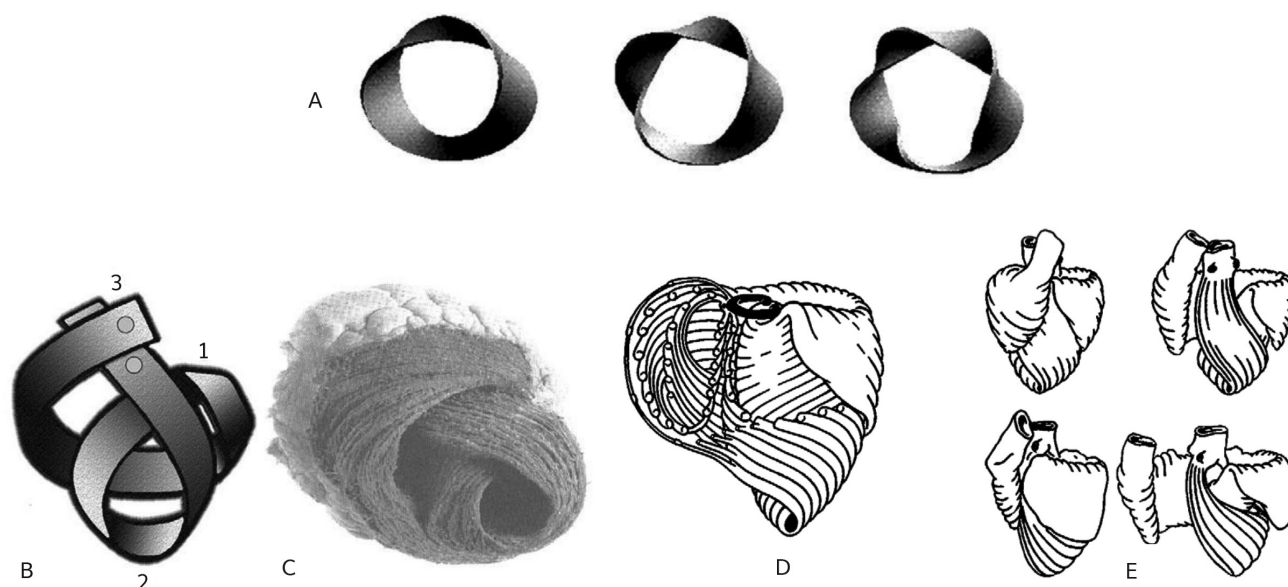
A kamrák izomzatának a három alkotóeleme (a basalis transversalis hurok, az apicalis hurok subendocardialis descendalo és a subepicardialis ascendalo szegmentuma) a következő mozgásokat teszik lehetővé a szisztolés és a diasztolés idején: falvastagodás, falvékonyodás, szűkülés, tágulás, rövidülés, meghosszabbodás, elfordulás, csavarodás, visszacsavarodás (visszarúgás). Az egyes mozgásokban a basalis hurok és az apicalis szegmentumok különböző mértékben, eltérő vagy azonos irányba elmozdulva vesznek részt. Az elmozdulás mértékét befolyásolja az adott szegmentum mozgásának az időbelisége, ereje is. A basalis izomzat körkörös elhelyezkedése miatt a bal kamrát szűkíti vagy rotációját okozza. A descendalo és ascendalo helicalis rostok összehúzódása rövidíti vagy meghosszabbítja a kamrákat, de a szív rotációjában is részt vesz-

nek. Mivel a subendocardialis és a subepicardialis rétegekben elhelyezkedő rostok összehúzódása a kamra reciprok irányú rotációjával jár, a kamra mozgásának a végső iránya attól függ, hogy melyik hélix mozgása a domináns, illetve, hogy az adott esetben a basalis hurok milyen mozgást végez. A dominancia elvének az ismerete azért fontos, mert nem biztos, hogy az elektromos ingerület hatására a legkorábban aktiválódott szívizomterület lesz a felelős a teljes kamrai tevékenységért. A kardiológusok számára jól ismert a szív sokirányú mozgása. Ennek ellenére a „globális mutatókat” (például ejekciós frakció) használják általánosan a bal és a jobb kamra funkciójának a jellemzésére, ezek változása alapján ítélik meg a kezelés hatékonyságát. Csak tudományos céllal elemzik a szegmentális változásokat, amelyek jóval korábban megjelennek a globális eltéréseknél.

A kamrákban a 3D deformáció, annak változásai a legérzékenyebben, legpontosabban mágneses rezonanciás képalkotással (MRI) vizsgálható. A 3D echokardiográfia sok esetben jól alkalmazható, de egyrészt a transthoracalis képalkotás korlátait, másrészt a vizsgálati eredmények intraindividuális és interindividuális eltéréseit is figyelembe kell venni. A hibalehetőséget csökkenti, hogy a deformáció iránya (hosszirányú, körkörös, sugárirányú), nagysága, üteme jól meghatározható speckle-tracking echokardiográfiával.

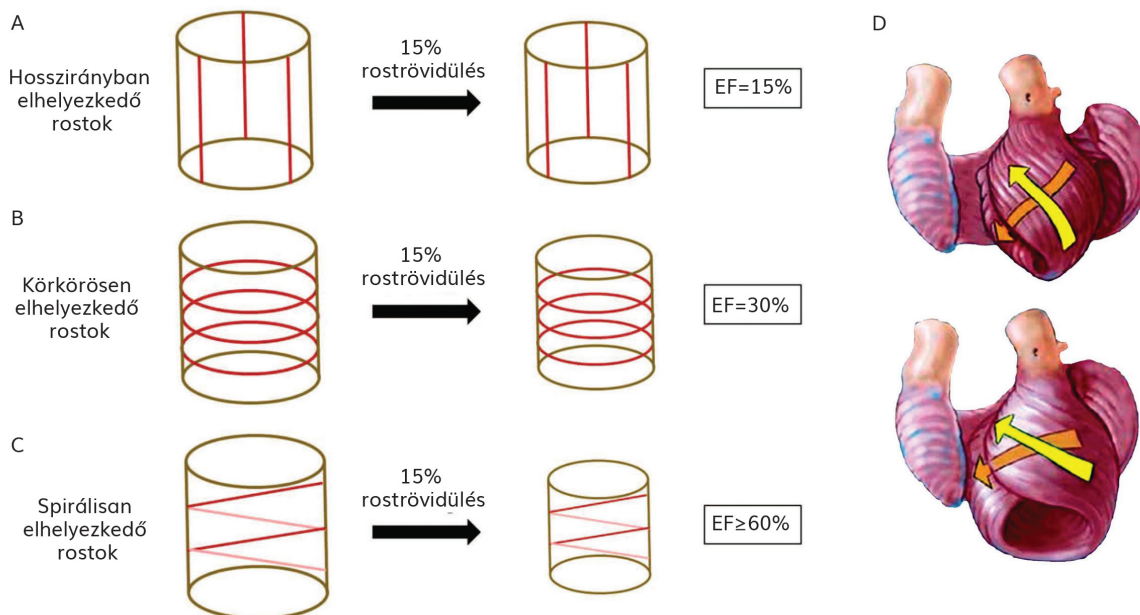
A helicalis kamrai myocardialis köteg modell alapján lehet megmagyarázni, hogy a sarcomerek mindössze 12-15%-os rövidülése lehetővé teszi, hogy a bal kamra a végdiasztolés térfogat mintegy 60%-át kilökje az aortába. A 4. ábrán látható, ha a kamrai izomrostok hosszirányban helyezkednének el (azaz gumihoz hasonlóak lennének), az ejekciós frakció maximum 15% lehetne. A körkörös elrendeződő rostok (hason-

3. ábra. A Möbius-szalagtól a kamrai izomzat kettős spirál modelljéig (7)



A panel. Az ábra felső sorában látható a Möbius-szalag hajtogatása. Az alsó sor bal oldalán, a **B** panelen láthatók a hurkokat képező kamrai izomkötegek: 1. basalis hurok, 2. az apicalis huroknak a szívcsúcson 8-as alakban átforduló descendalo szegmentuma, 3. az apicalis hurok ascendalo szegmentuma. Az alsó sor **C** paneljén még jobban látható a basalis és az apicalis hurkot alkotó szegmentumok rosthálózata. A **D** panel rajzban mutatja be a kamrák izomzatának a felépítését. A bal kamra és a jobb kamra szabad falának egy része eltávolításra került, így jobban látható a szegmentumok lefutása. Az **E** panel rajzain felül, bal oldalon látható a „natív” szív, jobb oldalon a jobb kamra infundibularis részét és a truncus pulmonalis kezdeti részét fedő jobb kamrai szabad fali rostokkal kezdődő basalis, transversalis vagy körkörös hurok, illetve az apicalis huroknak a csúcsi áthajlás után az aortához haladó ascendalo szegmentuma. Bal oldalon alul a szív hátulról, bal oldalról, jobb oldalon előlről látható.

4. ábra. A kamrai szívmuszköteg kettősspirál-modelljének funkcionális jelentősége (14)



Az ábra bal felén, az **A, B, C** paneleken látható, hogy hosszirányban, körkörösén és spirálisan elhelyezkedő rostok azonos mértékű rövidülése milyen következményekkel jár az ejekciós frakcióban. A **D** panel azt mutatja, hogy milyen jelentősége van a kamrai geometriának (a kúp vagy gömb alaknak), a spirálisan futó szegmentumok által bezárt szögnek a kamrai teljesítményben (részletesebben l. a szövegben).

lőan az összenyomott lemezrugóhoz) 30%-os ejekciós frakcióra lennének képesek. Csak a rostok spirális elhelyezkedése (a spirálrugóhoz hasonlóan) teremti meg a 60%-os ejekciós frakció lehetőségét (9, 14). Az is belátható, hogy minél nagyobb a descendalo és ascendalo hurok meredeksége a horizontális síkhoz képest, annál jobban összenyomhatók, illetve annál inkább képesek az eredeti állapotukat helyreállítani, „visszarúgni”. Az utóbbi a kamrák szintjén, elsősorban a bal kamrában, úgy érvényesül, hogy minél nagyobb az apicalis hurok descendalo és ascendalo szegmentumainak a meredeksége, annál inkább lesz kúp alakú a bal kamra, annál inkább képes deformálódni, illetve visszanyerni az eredeti állapotát, annál jobb lesz a szisztolés és diasztolés tevékenysége. A szegmentumok szögének a csökkenésekor (például a bal kamra dilatációjakor), a bal kamra gömb alakúvá válásakor az apicalis hélixek nem lesznek képesek olyan mértékben és sebességgel deformálódni és „visszarúgni”, hogy az biztosíthatná a megfelelő szisztolés és diasztolés működést.

Fontos azt is megemlíteni, hogy az erőteljes, körkörös, basalis izomhurok kontrakciója lefelé, mintegy összenyomja a kamrák apicalis részét, majd ellazulva, mintegy hirtelen felengeti a nyomást, lehetőséget adva a helicalis szegmentumok hirtelen visszarúgására, elősegítve a kamrák gyors telődését.

A szív ciklus új értelmezése

A szív ciklus alatti, a kamrákban végbemenő eseményeket mutatjuk be a következőkben. Ennek azért van jelentősége, mert a korszerű vizsgálómódszerekkel, elsősorban az MRI-vel, speckle-tracking echokardiográfiával vizsgálva, már nagyon korán, olyan szakban kimutathatók a regionális/szegmentális kontrakciós és relaxációs zavarok, amikor azok még a teljes

kamrafunkciót nem érintik, ezért a leggyakrabban alkalmazott 2D echokardiográfiával sem állapíthatók meg (15). Bár a szegmentális falmozgásoknak a 2D echokardiográfiai elemzése elterjedt, különösen a szívizom-ischaemia által érintett kamrai izomzat nagyságának a meghatározásában, az önkényes basalis, középső és csúcsi beosztás nem ad felvilágosítást arról, hogy a valóságban mi ezeknek a falmozgászavaroknak az anatómiai és működési oka.

Preejekciós izovolémiás kontrakció

Ebben a periódusban a bal kamra ürege meghosszabbodik és szűkül. A mágneses rezonanciás vizsgálat (MRI) adatai alapján mind a kamrák basalis része, mind az apicalis része az óramutató járásával szemben elfordul (antihorális rotáció). A rotáció irányát a szívcsúcs felől nézve határozzuk meg. Echokardiográfiával gyakran a csúcsi rész horális rotációja látható, ez azonban a vizsgálómódszer korlátaiból fakad, mert nem mindig lehet a valódi szívcsúcsot látótérbe hozni, illetve gyakori, hogy csak az endocardialis falrész hozható látótérbe. A bemutatott eseménysor egy komplex elektromechanikus aktiválódásnak az eredője. Az intraventricularis ingerületvezető rendszer fiziológiai sorrendű aktiválódásának megfelelően legelőször az interventricularis septum bal oldala kerül ingerületbe, majd a moderátor kötegen keresztül a basalis hurok jobb oldali szegmentumának és a bal posterior fasciculuson keresztül az apicalis hurok subendocardialis, descendalo szegmentumának a kontrakciója észlelhető. 10 ms elteltével, a hátsó fal paraseptalis területének az ingerületbe jutásával a basalis hurok bal szegmentuma is összehúzódik. A subepicardialis, ascendalo hélix nem kontrahál, hanem megfeszül, ami a Frank–Starling-mechanizmussal mintegy előké-

szíti a bekövetkező ejekciót. Az egész bal kamra elfordulása, egyes területek megfeszülése, a helicalis rostok kompressziója mintegy előkészítik az ejekciót, mint amikor a puska kakasának a felhúzása előkészíti a lövést. A szív ciklusnak ebben a szakaszában a kamrai térfogat nem változik, azt azonban nem lehet mondani: az izomzat „izotóniás állapotban” van, ezért helyesebb a preejekciós izovolémiás kontrakció elnevezés.

Ejekció és csavarodás

A bal kamra falai megvastagodnak, az ürege szűkül és megrövidül. A csúcsi rész erőteljesen antihorálisan, a basalis rész horálisan rotál, emiatt a bal kamra csavarodása következik be. A bal kamrai nyomás növekedése kinyitja az aortabillentyűt, mind a basalis hurok, mind az apicalis hurok descendalo és ascendalo szegmentumait alkotó izomrostok összehúzódnak, megkezdődik a bal kamrai ejekció. A basalis, circumferentialis rostok kontrakciója szűkíti a bal kamra basalis részét, beleértve a mitralis anulust is, ellenállást jelentve a bal kamra ejekciója idején bekövetkező gyors, intenzív nyomásnövekedésnek. A descendalo szegmentum kontrakciójának többirányú hatása van: a szív basisát a csúcs felé közelítve rövidíti a kamrát, elősegíti az ejekciót, kiváltja a bal kamra basalis részének a horális rotációját, a papillaris izmokat közelítve és az ínhúrokat megfeszítve, a fixált helyzetű gyűrűben elhelyezkedő mitralis billentyűvitorlákat is a helyén tartja, megakadályozva a bal kamrai nyomásemelkedés miatti átfordulásukat. A hosszabb, ascendalo szegmentum ekkor már nem kontrahál, már nem vesz részt a bal kamrai ejekcióban, sőt a deformáció elemzését lehetővé tevő vizsgálómódszerek (MR, speckle tracking echokardiográfia) alapján megnyúlik, de a descendalo szegmentum kontrakciójával összefüggő tehetetlenségi nyomaték miatt a csúcstól antihorális irányba fordítja el. A basalis és a csúcsi rész ellentétes irányú elfordulása a bal kamra csavarodását okozza, ami facsaró mozgással teszi teljessé, örvényszerűvé a bal kamrai ejekciót. Az interventricularis septumban, amit a descendalo és az ascendalo csúcsi szegmentumok közösen alkotnak, jól látható az ellentétes irányú mozgásuk, egy echogén septalis sáv formájában. Az ejekció későbbi szakaszában már az ascendalo szegmentum is kontrahál, de ez a hatás már kevés az ejekció gyorsaságának a fenntartására, mert a circumferentialis basalis rostok és a descendalo helicalis rostok kontrakciója már megszűnik, ami domináns hatás lesz az ascendalo szegmentum kontrakciója okozta hatással szemben („lassuló ejekciós szakasz”). Mint látható, a basalis hurok rostjainak és mindkét csúcsi szegmentumnak a kontrakciója és a kontrakciójuk megszűnése időben eltérő folyamatok, amelyeknek hatásuk van a nyomás- és áramlásvizonyokra is.

Posztejekciós izovolémiás szakasz

Az ejekciót követően a bal kamra ürege meghosszabbodik, kitágul és globálisan az óramutató járása szerint fordul el. Mivel a preejekciós izovolémiás kontrakció szakaszában az egész bal kamra antihorálisan fordult el, amit az ejekciós szakban (a basalis rész horális, a csúcsi rész antihorális rotációja miatti) csavarodás (torzió) követett, ezek a mozgások a posztejekciós izovolémiás (PEIV) szakaszban ellenkező irányban zajlanak, helyreállítva a kiindulási állapotot. Ezek a három dimenzió-

ban végbemenő változások megelőzik a mitralis beáramlást, alacsony vagy negatív nyomást alakítanak ki a bal kamrában, előkészítve az utóbbit a korai, gyors telődésre, amikor – a PEIV befejeződése után – a kamrai nyomás a pitvarinál alacsonyabbra csökken. Az irodalomban vita van arról, hogy a PEIV mikor fejeződik be, azaz mikor kezdődik a mechanikus diasztolé. Vannak, akik a pitvari és a kamrai nyomás kiegyenlítését, mások a mitralis billentyűvitorlák szeparációjának a kezdetét és vannak, akik a bal pitvarból a bal kamrába történő áramlás, azaz a mitralis beáramlás kezdetét jelölik meg. Ezek időben eltérő időpontok. A kamrai események 3D, elsősorban MRI elemzésével derült ki, hogy a mitralis billentyűvitorlák nyitása nem hemodinamikai oknak, azaz a kamrai nyomást meghaladó pitvari nyomásnak a következménye, hanem az a kamrai izomrostok helicalis modelljének az ismeretében magyarázható meg. A mitralis billentyű nyitása még a kamrai szisztolé idején, az aortabillentyű záródása előtt bekövetkezik. A magyarázat az, hogy az ejekció végén a basalis, circumferentialis szegmentumok és a descendalo helicalis szegmentum kontrakciója megszűnik, a preejekciós izovolémiás időszakban antihorális rotációt végző, az ejekciós szakban megcsavarodó bal kamra ellentétes irányú mozgást végez, megszűnik a csavarodása, horális irányba fordul vissza, eltávolítva egymástól a papillaris izmokat, a megrövidülő ínhúrok kinyitják a mitralis vitorlákat. A mitralis billentyű nyitása egybeesik a kamrai nyomásesés kezdetével.

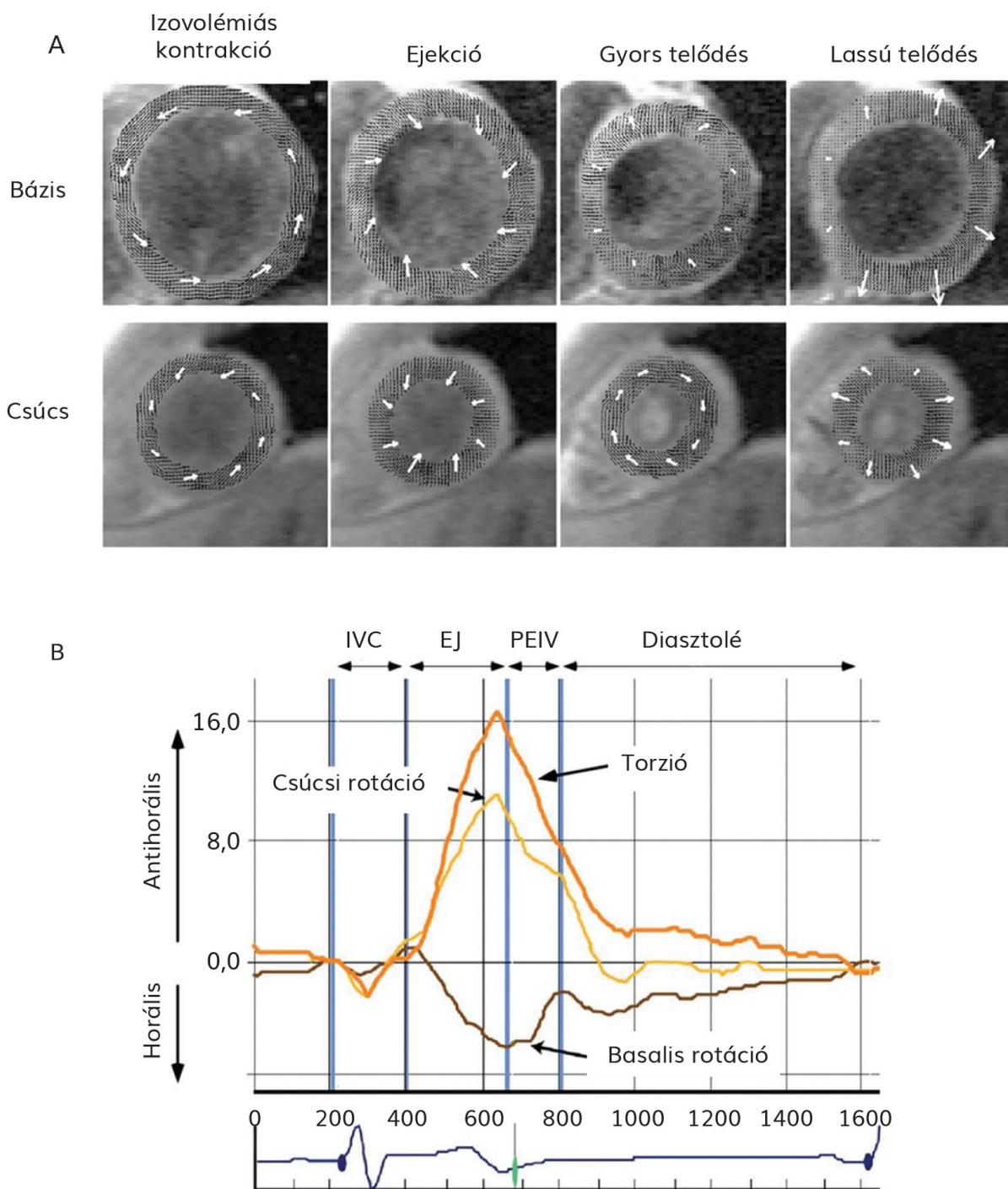
A posztejekciós izovolémiás szakaszt korábban izovolumetriás (izovolémiás) relaxációs szakasznak hívták, és sokan nevezik még ma is így, Wiggers nyomán (lásd korábban). Az aortabillentyű záródásától a mitralis billentyű nyitásáig tartó időszakot nevezték így, amikor a bal kamra relaxációja elkezdődik, de a zárt billentyű miatt a térfogata nem változik. A modern vizsgálóeljárásoknak, elsősorban a 3D képalkotást lehetővé tevőknek köszönhetően, ma már ismert, hogy az aortabillentyű még nincs zárva, a mitralis billentyű már nyitva van, az ascendalo helicalis szegmentum kontrakciója pedig még ebben a szakban is folytatódik, csak a volumen nem változik. Emiatt az „izovolémiás relaxációs szak” elnevezést idejétmúltnak kell tartani és posztejekciós izovolémiás szaknak helyesebb nevezni.

Gyors diasztolés telődés és szívóhatás

A posztejekciós izovolémiás szakasz után a gyors diasztolés telődés következik, a bal kamra ürege meghosszabbodik és kitágul, folytatódik az előző szakban megkezdődő csúcsi horális rotáció, szívóhatás lép fel, amikor a kamrai nyomás a pitvarinál alacsonyabbra csökken.

Ennek a feltétele, hogy az ascendalo helicalis szegmentum még folyamatban lévő kontrakciója megszűnjön, horális rotációval az alapállapotba kerüljön vissza. Ennek a szegmentumnak az alapállapotba történő gyors visszatérése (a gyakran használt angol megnevezés recoil) váltja ki a csúcs óramutató járása szerinti rotációjának az erőteljesebbé válását, az intraventricularis centrifugális erő miatt a szívóhatás kialakulását. Az izom alapállapotba visszatérésében fontos szerepet játszanak a szívizom kontraktilis elemein kívüli intrasarcomer és extrasarcomer vázfehérjék (főleg a titin), valamint az extracellularis fehérjék, főleg a kollagén. Ebben az időszakban az ascendalo szegmentum alapállapotba kerülését tartják a

5. ábra. A szív ciklus idején végbemenő eseménysor korszerű képi megjelenítése (9)



Az **A** panelen látható mágneses rezonanciás felvételek mutatják be a szív ciklus különböző szakaszaiban a bal kamra basalis (felső sor), illetve a csúcsi szegmensumban (alsó sor) zajló eseményeket. Az izovolémiás kontrakció idején mind a basalis, mind a csúcsi rész elfordul antihorális irányba. Az ejekciós periódusban mind a basalis, mind a csúcsi rész szűkül. A gyors telődés szakában a basalis rész tágul, a csúcsi rész óramutató-járási rotációt végez, aminek a megfelelő intenzitása és tartama esetén aktív szívóhatás lép fel, elősegítve a diasztolé korai szakaszában zajló diasztolés telődést. A lassú telődés idején a bal kamrának mind a basalis, mind a csúcsi része kitágul. A **B** panelen a szív ciklus idején zajló csúcsi és basalis események láthatók a bal kamra deformációját mutató speckle tracking B módú echokardiográfiás vizsgálat alapján. Jól látható a basalis és apicalis rész horális és antihorális mozgása, az ellentétes irányú rotáció okozta csavarodás (torzió) az ejekció idején. IVC=izovolémiás kontrakció
EJ = ejekció; PEIV = posztejekciós izovolémiás szak.

bal kamra csavarodását végleg megszüntető és a gyors telődésért felelős fő mechanizmusnak. Ez hasonló ahhoz, amikor a posztejekciós izovolémiás szakaszban a basalis hurok horális rotációja a fő helyreállító mechanizmus. A descendalo szegmentum kontrakciójának a posztejekciós izovolémiás szakban befejeződése és az ascendalo szegmentum kontrakciójának a befejeződése között legalább 90 ezredmásodpercnél (ms) el kell telnie, hogy a megfelelő szívóhatás lépjen fel. A gyors telődés előtti kamrai visszacsavarodásnak legalább a 40-60%-a erre a 90 ms-ra esik. Minden olyan állapot, amelyik elhúzó-dóvá teszi a descendalo szegmentum kontrakcióját, lerövidíti a diasztolés telődés előtti, az ascendalo szegmentum optimális horális rotációjához, végső soron a megfelelő szívóhatás kialakulásához szükséges időt. Ilyen állapotok a balkamra-hypertrophia, a szívizom-ischaemia stb. Következésképpen, a szisztolés diszfunkció diasztolés diszfunkciót is okoz.

A lassuló diasztolés telődés szakasza

A szívizomrostok repolarizációjával azok nyugalmi állapotba kerülnek, a kora diasztolében észlelhető, a pitvarból a kamrába beáramlást felgyorsító aktív szívóhatás megszűnik, a csökkenő pitvar-kamrai nyomáskülönbségből adódó beáramlás kevésbé intenzív lesz, a beáramló vér mind a bal kamrának, mind a basalis, mind az apicalis részét kitágítja, az izomrostok megfeszülése miatt a beáramlás ellenállásba ütközik. Az emelkedő intraventricularis nyomás közelíti az atrioventricularis billentyű vitorláit. A szív ciklus során zajló, a spirális ventricularis myocardiális köteg modellt figyelembe vevő eseményeket mutatja be az 5. ábra.

A pitvari szisztolé

A pitvari szisztolé a kamrai diasztolé utolsó szakaszára esik, a még nyitott atrioventricularis billentyűkön keresztül a kamrába kilökött vér hozzáadódik a kamrai diasztolé korábbi szakaszai alatt beáramlott vérmennyiséghez, a kamrák térfogata pedig eléri a végső, végdiasztolés értéket (a nemzetközi irodalomban használt angol elnevezés: end diastolic volume – EDV). A kamrai végdiasztolés vértérfogat a kamrafal disztenziibilitásától függően növeli az intraventricularis nyomást (végdiasztolés nyomás: end diastolic pressure – EDP), ami viszont a kamrai végdiasztolés rosthosszúság növelésével (egy bizonyos határig) fokozza a következő kamrai kontrakció erejét. Következésképpen, a pitvari kontrakció szerepet játszik a kamrai izomzat működésében, mintegy előerősítő pumpa szerepét betöltve.

Az interventricularis septum működése

Az interventricularis septum a kamrai izomtömeg mintegy 25-40%-át teszi ki.

A jobb oldali részét az apicalis ascendalo, a bal oldalát a descendalo szegmentum alkotja, amelyeket az echokardiográfiával jól látható sav választ el. A subaorticus része csak az ascendalo szegmentum rostjaiból áll. A septum csavaró mozgást végez, amire szükség van a vérnek a nagy nyomású szisztémás keringésbe történő kilökéséhez. A septum mindkét kamra működésében részt vesz, tehát egy közös működési egység, és nem a bal kamra része (9, 12, 13).

A jobb kamra

A jobb kamra szabad falát a basalis, transversalis hurok kezdeti része alkotja. Ennek a viszonylag gyenge izomzatnak a fújtatószerű mozgása elegendő a normális, a szisztémás vérköri nyomás egyhatodát képező, kis vérköri nyomással szembeni ejekcióhoz. A kis vérköri nyomás növekedésekor egyre inkább szükség van az interventricularis septum működéséhez. A jobb kamra anatómiai és funkcionális paraméterei megfelelően vizsgálhatók 2D echokardiográfiával és jól vizsgálhatók 3D módszerekkel (echokardiográfiával, MRI-vel stb.). Ugyanazokat a mutatókat elemezhetjük, mint a bal kamra anatómiai és funkcionális viszonyainak a vizsgálatakor (9, 11, 12, 16).

A pitvarok működése

Hagyományosan a pitvarok háromféle funkciója különböztethető meg: a rezervoár funkció (a nagyvénákból beáramló vér tárolása a kamrák szisztolája alatt), a vezető (konduktív) funkció (a nagyvénákból beáramló vér passzív átvezetése a kamrák felé), kontraktilis funkció (a pitvarokban lévő vér aktív ürítése a kamrákba a kamrák diasztolájának az utolsó szakában, a Frank-Starling-mechanizmussal a kamrai kontraktilitás növelése, az úgynevezett nyomásfokozó funkció). Az echokardiográfiával és MRI-vel meghatározott anatómiai és funkcionális mutatóknak nemcsak diagnosztikai, hanem prognosztikai jelentősége is van (17, 18). Fontos szerepe van a pitvaroknak a hormonális szabályozásban (natriureticus faktorok termelése és elválasztása), a szív működés reflexes szabályozásában.

A kamrák felépítésével és működésével kapcsolatos ismeretek klinikai jelentősége

Bal kamrai diszfunkció

Szisztolés diszfunkció: A bal kamra izomzatának globális feszülését okozó betegségek, az ischaemiás szívbetegség a hegesedés és a távolabbi izomzat feszülése miatt, a billentyűbetegségek (aortainsufficiencia, mitralis regurgitatio) a volumenterhelés miatt, a nem ischaemiás cardiomyopathiák a szívizomsejtek közvetlen károsodása miatt, a bal kamra dilatatív típusú átépülését okozzák. A bal kamra geometriája megváltozik, a fizioológiai körülmények között a basalis-apicalis irányban kúp vagy elnyújtott ellipszis alakból gömb alakúvá válik. A bal kamra hosszirányú kontrakciójáért, csúcsrotációjáért, az egész bal kamra csavarodásáért leginkább felelős descendalo és ascendalo szegmentumok által bezárt, optimálisan 60 fokok hegyesszög ellapul, gyakran 30 foknál is kisebbé válik. A szívizomrostok megváltozó terhelése miatt azok átépülnek, egyre inkább a basalis hurokhoz válnak hasonlónvá, aminek a fő feladata a kompresszió. Az egyes alapbetegségek azonban nem egyformán károsítják a helicalis szegmentumokat, azok működését. Az ischaemiás szívbetegség, főleg az akut formája, de krónikus ischaemiás szívbetegségben az intermittáló ischaemia (például terheléskor) főleg a subendocardialis területen jelentkezik, ezért elsősorban az apicalis descendalo szegmentum működését befolyásolja. Az ischaemia súlyosbodásával, transmuralis terjedésével, hegesedés kialakulásával azonban az ascendalo szegmentumban is morfológiai

elváltozások következnek be, annak funkcionális következményeivel. A regurgitációval járó billentyűhibák a volumenterhelés miatt mindkét szegmentumban morfológiai, majd funkcióváltozást okoznak. Ugyanez vonatkozik a nem ischaemiás cardiomyopathiára, amikor a szívizomsejtek közvetlenül károsodnak. A geometriai változás jelentős funkciókárosodással jár, a körkörös vagy ahhoz egyre inkább hasonló lefutásúvá váló descendalo és ascendalo szegmentumok összehúzódása a bal kamrai végdiasztolés térfogatnak csak körülbelül 30%-át képes a szisztolés idején kilökní, szemben az ép szerkezetű bal kamra 60%-os vagy azt meghaladó ejekciós frakciójával (11–14), (4. ábra). Következésképpen, a bal kamrai izomrostok károsodása, funkcióváltozása az oka a globális szisztolés funkció csökkenésének. A bal kamra szisztolés funkciójának az ejekciós frakció alapján történő minősítése korlátozottan alkalmas a globális funkció jellemzésére, kicsi az érzékenysége, az eredménye jelentősen függ a bal kamra terhelési viszonyaitól (elő- és utóterhelésétől) és nem ad felvilágosítást arról, hogy a változásának milyen anatómiai és funkcionális okai vannak. A bal kamra szisztolés funkciójának a károsodása, annak fenotípusa már korábban kimutatható a bal kamra általános és regionális deformációját mutató speckle tracking echokardiográfiával, mágneses rezonanciás vizsgálattal, valamint a bal kamrai munkának a vizsgálatával. Ezek eredménye alapján nemcsak a globális bal kamrai szisztolés funkció változása, hanem annak az okai, fenotípusai is vizsgálhatók. Ahogy a bal kamra szisztolés funkciója károsodik, egyre inkább nő a bal kamrai végszisztolés térfogat. Körülbelül 60 ml/m² végszisztolés volumenindex az a határ, amikor már egyre inkább várható a malignus kamrai ritmuszavar fellépése, a szívéltelenség egyre súlyosabbá válása. A ma használatos kezelési eljárások (például gyógyszeres kezelés, coronariarevascularisatio, a billentyűregurgitatio megszüntetése) a bal kamrai szívizom feszülésének az okára hatnak, de nem befolyásolják magát a feszülést, a bal kamrának kórossá vált geometriáját. A bal kamra geometriájának a műtéti helyreállítása vagy a keringéstámogató eszközök megfelelő alkalmazása jelentősen javíthatja a prognózist (11).

Az összejtkezelés jövőbeni alkalmazása új utat jelenthet a károsodott kamrai működés kezelésében, a szív működés reparálásában.

Az ascendalo és descendalo szegmentumok geometriájának a megváltozása, egyre romló működése a szisztolés funkció károsodása mellett a diasztolés funkciót is jelentősen rontja, mert a bal kamra nem megfelelő deformációja, a csavarodásának, torziójának a nem megfelelő mértéke, üteme a visszarendeződéssel összefüggő mechanikai, hemodinamikai eseményekre is kihat.

Diasztolés diszfunkció: A még ma is gyakori elképzelés szerint a relaxált bal kamra telődése passzív módon, a pitvar-kamrai nyomásgradiensnek megfelelően történik. Minden, ami akadályozza a bal kamra telődését, még megtartott szisztolés funkció esetén is, telődési zavart, azaz diasztolés diszfunkciót okoz.

Ezeket az elképzeléseket látszanak alátámasztani azok az ismeretek, amelyek a rossz tágulékenységű, kis disztenziilitású, a pitvarból beáramló vérrel szemben fokozott ellenállást kifejtő, az intraventricularis nyomást jelentősen emelő bal kamra működésével kapcsolatosak.

A normális működésű bal kamra telődésének 70%-a a diasztolés első egyharmadában, azon belül is a gyors telődés szaka-

szára esik, amit nehéz a passzív telődés alapján megmagyarázni.

A fentiekben részletezett HVMB-modell alapján viszont lényegesen jobban megmagyarázható a diasztolés diszfunkció. A bal kamrának a preejekciós periódusban végbemenő rotációja, az ejekció idején történő deformálódása, csavarodása a kinetikai energiának olyan felhalmozásával jár, ami ezeknek az eseményeknek a megszűnésekor felszabadulva egy aktív szívóhatással segíti, felgyorsítja a kora diasztolés telődést, amikor a kamrai nyomás a pitvarinál alacsonyabbra csökken. Következésképpen a diasztolés funkciót jelentős mértékben meghatározzák az előző szisztolés idején zajló mechanikai események. Nagyon fontos hogy az előző szisztolés ne húzódjon el, az apicalis descendalo szegmentum kontrakciójának a posztejekciós izovolémiás szakba befejeződése és az ascendalo szegmentum kontrakciójának a befejeződése között legalább 90 ms teljen el, hogy a megfelelő intenzitású és tartamú csúcsi horális rotáció intenzív szívóhatást tudjon kifejezni. Minden olyan állapot, beleértve az idősödést és a különböző, a szisztolés elhúzódnásával járó betegségeket, amelyek még nem okozzák a szisztolésnak az olyan globális károsodását, hogy az az ejekciós frakciót csökkentse, de már károsítják a gyors diasztolés telődést, a diasztolés későbbi szakaszára posztponálva a telődés nagyobb részét (11–13).

Hypertrophia

A szívizom hypertrophiája a szívizomsejteknek a rendszeres vagy hosszan tartó terhelés okozta feszülésre adott adaptív vagy kóros válasza.

A sportolással kapcsolatos adaptív hypertrophia korszerű vizsgálatáról *Szauder (19)*, a fiziológias és kóros balkamra-hypertrophia korszerű vizsgálatáról *Kovács (20)* számolt be részletesen. Csak az utóbbi munkában szerepel érintőlegesen, a korábbi anatómiai elképzelésre utalva, a korszerű funkcionális anatómiai alap.

A patológias balkamra-hypertrophia oka leggyakrabban a magas vérnyomás, de kialakulhat billentyűhibák (például aortabilis-lyű szűkülete) miatt, lehet autoszómáisan domináns örökletes betegség következménye (hypertrophiás cardiomyopathia). Ritkábban a balkamra-hypertrophiát a szívizomsejtekben vagy a kötőszöveti állományban lerakódó, felhalmozódó anyagok okozzák (például amyloidosis, Fabry-betegség). A szekunder balkamra-hypertrophiában kezdetben a subendocardialis elhelyezkedő ascendalo szegmentum feszülése a legkifejezettebb, de az ascendalo szegmentum működészavarában a subendocardialis réteg rosszabb coronariakeringése is szerepet játszhat. Viszonylag korán kimutatható mind a longitudinális deformáció, mind a rotáció kórossá válása, mértékének és ütemének a csökkenése, elhúzódnása. Az utóbbi miatt a diasztolés funkció is károsodik, elsősorban a gyors diasztolés telődés lerövidülése, az aktív szívóhatás elmaradása miatt. A balkamra-hypertrophiát kiváltó ok tartós hatása esetén a feszülés transmuralissá válik, az ascendalo szegmentumot és a basalis hurok bal oldali szegmentumát is érinti, az apicalis hurok szegmentumai által bezárt szög ellapul, a bal kamra golyó alakúvá válik, a globális szisztolés funkció is károsodik. Bár a kardiológiai köztudatban a balkamra-hypertrophia elsősorban diasztolés diszfunkciót okoz, a szisztolés funkció károsodása is kimutatható

már a korai szakban, megfelelő vizsgálómódszerekkel (például speckle-tracking echokardiográfiával) (20).

Intraventricularis vezetési zavar, pacemaker-kezelés és reszinkronizáló kezelés

Fiziológiás körülmények között a kamrai izomzat aktiválódása a vezetőrendszeren keresztüli elektromos ingerületbe jutást követi. Az intraventricularis ingerületvezetési zavarok jelentős mechanikus következménnyel is járnak, hiszen a kamrai izomzat a normálistól eltérő sorrendben jut ingerületbe. Mind a szisztolés, mind a diasztolés működés szétzúródottá, aszinkronná válik. Mint már korábban volt róla szó, a szív csak egy rendkívül koordinált háromdimenziós tevékenységgel, számos mozgásformával képes maradéktalanul eleget tenni a feladatainak. Főleg bal-Tawara-szár-blokkban megváltozik a bal kamra hosszirányú, radialis és körkörös deformációja, romlik a globális balkamra-funkció, az interventricularis septum és a bal kamra szabad falát alkotó myocardialis hurkok működésének a sorrendje, a bal kamra szisztolés alatti rotációja, csavarodása, illetve posztisztolés ellentétes irányú mozgása rendezetlené válik.

Pacemaker-kezeléskor minél távolabb történik a kamrai ingerlés a normális lefutású vezetőrendszertől, annál inkább szétzúródzik a kamrák mechanikus működése. Nem véletlen, hogy a jobb kamra csúcsából történő szívingerlés jelentősen rontja a kamraműködés szinkronizáltságát, a hosszirányú, a körkörös és a radiális deformálódást, szétzúrdelve a szívizomrostok kontrakciójának az egymásutániságát, a szív elfordulását, csavarodását, jelentősen rontva a szisztolés funkciót, illetve a mechanikus tevékenység visszarendeződési sorrendjének a megváltoztatásával a diasztolés funkciót is.

A hagyományos, a jobb és a bal kamrát is ingerlő reszinkronizáló kezelés során is sérül az ingernek a kamrai izomzaton belüli lefutása, gyakran szembemenve a korábban már ismertetett, rendkívül összehangolt működésű helicalis kamrai szívizomköteg, az azt alkotó hurkok, szegmentumok működésével.

A bal-Tawara-szár ingerlésével lehet jelenleg legjobban elérni a kamrai izomzat összehangolt tevékenységét, a kamrák megfelelő ütemű és mértékű alakváltozását, deformálódását, mechanikai működését.

Összefoglalás

A fent leírtakat összefoglalva, a szív összehangolt, rendkívül összetett működését, az új vizsgálómódszerekkel szerezhető egyre bővülő információk jelentőség csak a korábbi anatómiai és élettani ismeretek rendszeres felülvizsgálatával érthetjük meg. A kamrai izomzat helicalis köteg (helical ventricular myocardial band) modellje, annak fejlesztése, felhasználása a számítógépes modellezésben, a mesterséges intelligencia egyre bővülő alkalmazása hozzájárulhatnak ahhoz, hogy jobban megismerjük a normális szív fiziológiás működését, megértsük a szívét károsító tényezők hatását a szív szerkezetére és működésére, időben korlátozni tudjuk ezeket a hatásokat, szükség esetén célzott kezelést legyünk képesek alkalmazni.

Irodalom

1. Fonyó A. Az élettan tankönyve. 5. kiadás. Budapest: Medicina; 2011.
2. Guyton AC, Hall J, Hall M. Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology, 14e. Elsevier 2021.
3. Sengupta PP, Korinek J, Belohlavek MK, et al. Left Ventricular Structure and Function Basic Science for Cardiac Imaging. JACC 2006;48(10):1988-2001. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2006.08.030>
4. Sengupta PP, Krishnamoorthy VK, Jorinek J, et al. Left Ventricular Form and Function Revisited: Applied Translational Science to Cardiovascular Ultrasound Imaging. J Am Soc Echocardiogr 2007;20(5):539-51. <https://doi.org/10.1016/j.echo.2006.10.013>
5. Sengupta PP, Jamil Tajik AJ, Chandrasekaran A, et al. Twist Mechanics of the Left Ventricle: Principles and Application. JACC Cardiovascular Imaging 2008;1(3):366-76. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2008.02.006>
6. Buckberg GD, Nanda NC, Nguyen C, et al. What Is the Heart? Anatomy, Function, Pathophysiology, and Misconceptions. J Cardiovasc Dev Dis 2018;5(33):1-29. <https://doi.org/10.3390/jcdd5020033>
7. Kocica MJ, Corno AF, Carreras-Costa F, et al. The helical ventricular myocardial band: global, three-dimensional, functional architecture of the ventricular myocardium. European Journal of Cardio-thoracic Surgery 2006;29S:S21-S40. <https://doi.org/10.1016/j.ejcts.2006.03.011>
8. Buckberg G, Hoffman JIE, Mahajan A, et al. Cardiac Mechanics Revisited. The Relationship of Cardiac Architecture to Ventricular Function. Circulation 2008;118:2571-87. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.107.754424>
9. Buckberg GD, Hoffman JIE, Coghlan HC, et al. Ventricular structure-function relations in health and disease: Part I. The normal heart. Eur J Cardiothorac Surg 2015;47:587-601. <https://doi.org/10.1093/ejcts/ezu278>
10. Trainini J, Lowenstein J, Beraudo M. Myocardial torsion and cardiac fulcrum, Morphologie 2021;105(348):15-23. <https://doi.org/10.1016/j.morpho.2020.06.010>
11. Buckberg GD, Hoffman JIE, Coghlan HC, Nanda NC. Ventricular structure-function relations in health and disease: Part II. Clinical considerations. Eur J Cardiothorac Surg 2015;47:778-87. <https://doi.org/10.1093/ejcts/ezu279>
12. Antúnez-Montes OY, Kocica MJ, Olavarria AS, et al. Helical structure of the ventricular myocardium. A narrative review of cardiac mechanics. Echocardiography 2023;40:161-73. <https://doi.org/10.1111/echo.15515>
13. Buckberg G, Nanda NC, Hoffman JIE, et al. Newer Aspects of Structure/Function to Assess Cardiac Motion. In: Comprehensive Textbook of Echocardiography 2nd ed. Ed: Nanda NC. 1206-1239. Jaypee Brothers Medical Publishers 2020.
14. Triposkiadis F, Giamouzis G, Boudoulas KD, et al. Left ventricular geometry as a major determinant of left ventricular ejection fraction: physiological considerations and clinical implications. European Journal of Heart Failure 2018;20:436-44. <https://doi.org/10.1002/ehfj.1055>
15. Kovács A, Ágoston G. Speckle-tracking echokardiográfia a klinikai gyakorlatban. Cardiologia Hungarica 2018;48:58-68. <https://doi.org/10.26430/CHUNGARICA.2018.48.1.58>
16. Lakatos B, Kovács A, Tokodi M, et al. A jobb kamrai anatómia és funkció korszerű echokardiográfiai vizsgálata: patológiai és fiziológiai eltérések. Orv Hetil 2016;157(29):1139-46.
17. Maceira AM, Cosin-Sales J, Prasad SK, et al. Characterization of left and right atrial function in healthy volunteers by cardiovascular magnetic resonance. J Cardiovasc Magn Reson 2016;18:64. <https://doi.org/10.1186/s12968-016-0284-8>
18. Inoue K, Kawakami H, Akazawa Y, et al. Echocardiographic Assessment of Atrial Function: From Basic Mechanics to Specific Cardiac Diseases. J Cardiovasc Dev Dis 2022;9(3):68. <https://doi.org/10.3390/jcdd9030068>
19. Szauder I. Állóképességi és erősportolók vizsgálata modern echokardiográfiai (speckle tracking) módszerekkel. Doktori tézisek. Budapest: Testnevelési Egyetem Sporttudományok Doktori Iskola; 2015.
20. Kovács A. A bal kamra mechanikájának vizsgálata speckle tracking echokardiográfiai fiziológiai és patológiai hipertrófiában. Doktori értekezés. Budapest: Semmelweis Egyetem Elméleti Orvostudományok Doktori Iskola; 2015.