

Nelinearna obilježja temporalnih promjena u srčanoj aktivnosti

Nonlinear characteristics of temporal changes in cardiovascular activity

Ana Proroković, Matilda Nikolić*

Sažetak

Na osnovi dosadašnjih istraživanja koja su se bavila ispitivanjem dinamike kardiovaskularnog sustava može se reći da je to sustav koji, između ostaloga, ima nelinearna obilježja. Osnovni cilj ovoga istraživanja bio je ispitati promjene u nelinearnoj dinamici srčane aktivnosti u funkciji obavljanja psihomotornih zadataka različitoga informacijskog opterećenja (Fittsov tapping).

U ispitivanju je sudjelovalo 40 zdravih (bez kardiovaskularnih poremećaja) ispitanica, približno iste dobi (19 – 23 godine), čiji je zadatak bio obavljanje psihomotornih zadataka različitog informacijskoga opterećenja. Zadaci tappinga izvodili su se u trajanju od 15 minuta (prilagođeno je broju jedinica vremenske serija koje su dostatne za predviđene analize; minimalno 1000 podataka).

Rezultati su pokazali da kardiovaskularni sustav, bez obzira na složenost psihomotorne aktivnosti koja se obavlja, pokazuje karakter kaotične dinamike, budući da su svi dobiveni najveći Lyapunovljevi eksponenti pozitivni. Izračunate korelacijske dimenzije ukazuju na to da je riječ o sustavu srednje dimenzionalnosti. U funkciji povećanja težine zadataka Fittsovog tappinga, korelacijska dimenzija ima tendenciju redukcije, a postotak rekurenci i determinizma pokazuju značajno povećanje.

Cljučne riječi: nelinearna dinamika, kardiovaskularni sustav, najveći Lyapunovljev eksponent, korelacijska dimenzija

Summary

Based on the results of previous studies that have investigated the dynamics of the cardiovascular system, it can be said that this system, among other things, has nonlinear characteristics. The main aim of this study was to investigate changes in the nonlinear dynamic of cardiac activity during the performance of psychomotor tasks with different information load (Fitts' tapping).

The study included 40 healthy (with no cardiovascular disorders) participants who were approximately the same age (19 – 23 years). Their task was to perform psychomotor tasks with varying degrees of information load. Tapping tasks were performed for 15 minutes (adjusted to the number of units of time series, which are sufficient for the planned analyses, a minimum of 1000 data).

The results showed that the cardiovascular system, regardless of the complexity of the performed psychomotor activities, has the characteristics of chaotic dynamics since all obtained largest Lyapunov exponents were positive. The calculated correlation dimensions indicate that the system has a medium dimensionality. With increasing difficulty of Fitts' tapping tasks, the correlation dimension has a tendency of reduction, and the percentage of recurrence and determinism shows a significant increase.

Key words: nonlinear dynamics, cardiovascular system, largest Lyapunov exponent, correlation dimension

Med Jad 2014;44(3-4):77-84

Uvod

Svi sustavi kojima je glavna osobina da se unutar njih događaju varijacije u funkciji vremena (temporalne promjene), definiraju se kao dinamički sustavi. Stoga je očigledno da je većina prirodnih sustava (fizičkih, bioloških, društvenih i dr.) dinamičke

* Sveučilište u Zadru, Odjel za psihologiju (prof. dr. sc. Ana Proroković, dr. sc. Matilda Nikolić)

Adresa za dopisivanje / *Correspondence address:*
Ana Proroković, Sveučilište u Zadru, Odjel za psihologiju, Krešimirova obala 2, 23000 Zadar; e-mail: aprorok@unizd.hr

Primljeno / *Received* 2014-04-30; Ispravljeno / *Revised* 2014-07-21; Prihvaćeno / *Accepted* 2014-08-22

prirode, te da je važnost istraživanja njihove dinamike od primarnog interesa za svako područje i polje znanosti. Neki od spomenutih sustava su relativno jednostavni (npr. proučavanje sila koje djeluju na neko tijelo u slobodnom padu), dok su neki vrlo kompleksni, što se osobito odnosi na gotovo sve biološke sustave. Proučavanjem ovih dinamičkih procesa dobivamo uvid u to na koji način neke vanjske (okolinske) i unutrašnje promjene utječu na sustav, te kako sustav postiže optimalno stabilno stanje.¹

Prema najčešće korištenoj klasifikaciji, dinamički sustavi dijele se na slučajne i determinističke. Iako je pojam slučajne dinamike intuitivno jasan većini ljudi, davanje precizne definicije i nije tako jednostavno. Kod determinističkih sustava nam poznavanje početnih uvjeta, odnosno trenutnoga stanja u kojem se sustav nalazi, i njegove dinamike omogućuju da sasvim precizno predvidimo ponašanje toga sustava u budućnosti, dok kod slučajnih sustava to nije slučaj.² U zadnjih dvadesetak godina, međutim, veliki broj istraživanja pokazao je da se determinizam može shvatiti i na ponešto drugačiji način, te da dinamika naizgled vrlo složenih sustava, može biti generirana vrlo malim brojem jednostavnih subprocesa.³ Primjera radi, gotovo sva novija ispitivanja dinamike srčane aktivnosti pokazala su postojanje „skrivenih informacija“ i specifičnog determinizma koji nije vidljiv na prvi pogled i ne može se ekstrahirati konvencionalnim linearnim metodama analize.⁴ Ovim specifičnim oblikom determinizma bavi se tzv. teorija determinističkoga kaosa, odnosno, u širem kontekstu, teorija nelinearnih dinamičkih sustava. Prema učestaloj definiciji, kaotični sustav je onaj koji pokazuje naizgled slučajne promjene (kaos), ali se u njegovoj osnovi nalaze određene matematičke zakonitosti (determinizam).

Osim teoretskog značenja, najveća postignuća teorije kaosa su upravo aplikacije velikoga broja nelinearnih matematičkih modela na različite prirodne i društvene fenomene, a praktična primjena (pokušaj da se u različitim dinamičkim procesima pronađu indikatori koji ukazuju na kaotičnu dinamiku) pokazala je do sada najznačajnije rezultate.⁵ U stvarnosti, zbog velikoga broja mjerenja potrebnog da bi se u nekom sustavu identificirao kaos, ova praktična primjena ograničena je uglavnom na analize vremenskih serija, odnosno na ona istraživanja koja obuhvaćaju brojčane podatke dobivene prikupljanjem većega broja vrijednosti neke varijable u funkciji vremena.

Općenito, najvažniji doprinos nelinearnih analiza proizašlih iz teorije determinističkoga kaosa odnosi se na bolje razumijevanje procesa koji su u osnovi

dinamike različitih ponašajnih sustava kod čovjeka,⁶ a klinička primjenjivost nelinearnih metoda vidljiva je osobito na području dinamike srčane aktivnosti, gdje je njihov doprinos dijagnostici i prognostici koronarno arterijskih bolesti (angina pectoris, infarkt miokarda, spontane ventikularne fibrilacije i dr.) od iznimne važnosti.^{7, 8, 9, 10} Iako je varijabilnost rada srca poznata od davnina, tek spoznajom da su uz linearne i nelinearni mehanizmi uključeni u dinamiku srčanoga rada, otvorena je široka mogućnost analize fluktuacija tih dinamičkih promjena, te razlučivanja patoloških od normalnih srčanih zbivanja.¹¹ S druge strane, u psihofiziologiji, analiza varijabiliteta srčanih otkucaja, najčešće se koristi za indirektnu procjenu stupnja mentalnog opterećenja, ali se osim kognitivne aktivnosti, na njene promjene reflektiraju i emocionalna stanja, te stres općenito.^{12, 13, 14} Budući da se rad ovih sustava uglavnom dijagnosticira analizom vremenskih serija podataka koje se baziraju na poligrafskim snimanjima (EKG, EEG, EMG i dr.), osim teoretske važnosti, nelinearne metode imaju upravo na ovom području i svoj bitan empirijski značaj.

Mjerenje i kvantificiranje kaotičnosti nekog dinamičkog sustava uključuje primarno tzv. mjere kompleksnosti (dimenzionalnosti) i mjere predvidljivosti. Informacija o dimenzionalnosti nekog dinamičkog sustava može biti od velikog značaja i u praktičnim primjenama, osobito u medicini. Na primjer, pokazalo se da redukcija tzv. korelacijske dimenzije (do određene kritične razine) kod srčane aktivnosti čovjeka prethodi iminentnoj ventrikularnoj fibrilaciji.^{15, 16} Također, u novije vrijeme se sve češće koriste različite mjere kompleksnosti, dimenzionalnosti i samosličnosti za dijagnozu ranih tumora na histološkoj i vizualnoj razini (nuklearna magnetska rezonancija), što uvelike doprinosi razumijevanju razvoja karcinoma.^{17, 18, 19} Nadalje, dimenzionalnost sustava nije uvijek nužno povezana s predvidljivošću ponašanja, što znači da veća kompleksnost (ili dimenzionalnost) ne znači nužno i veću kaotičnost.

Unutar teorije nelinearnih sustava za procjenu nekih aspekata predvidljivosti i kaotičnosti sustava najčešće se koristi tzv. najveći Lyapunovljev eksponent (LLE). Ako je eksponent negativan, sustav konvergira ka jednoj točki, i karakterističan je za stabilna stanja. Ako je eksponent 0, znači da je riječ o slučajnim oscilacijama ili periodičnom sustavu (putanje se u funkciji vremena preklapaju). Ako je eksponent pozitivan, najvjerojatnije je riječ o kaotičnom sustavu. U empirijskim istraživanjima se pokazalo da izračun LLE-a na nekom promatranom sustavu može biti od koristi, ne samo za detekciju eventualne kaotične dinamike, već i diferencijaciju određenih fizioloških stanja. Na primjer, Ganz i

suradnici²⁰ su pokazali da je LLE temporalnih varijacija u srčanoj aktivnosti značajno manji kod ispitanika s multiplom sklerozom u odnosu na „zdrave“ ispitanike, a Su i suradnici²¹ su utvrdili da se vrijednost LLE-a srčane aktivnosti značajno smanjuje pri epileptičkom napadaju, a sustav od aperiodičnog i visokokompleksnog prije napada, prelazi u niskodimenzionalni poslije napada.

Nadalje, često korišteni kvantitativni parametri proizašli iz nelinearnih analiza vezuju se i uz tzv. analizu rekurenci. Analiza rekurenci pokazala se iznimno korisnom za interpretaciju osnovnih karakteristika nekog dinamičkog sustava.²² To se osobito odnosi na tri najčešće korištena parametra: postotak rekurenci, postotak determinizma, indeks determinizma i divergenca. Postotak determinizma i indeks determinizma obično su najviši za periodične i kvaziperiodične procese, a najniži za slučajne varijacije. Kod kaotičnih procesa, postotak determinizma je negdje u sredini. Stoga je ovaj parametar vezan i uz predvidljivost nekoga sustava, jer su linearni sustavi najpredvidljiviji, dok su slučajne promjene posve nepredvidljive. Ovaj parametar je vrlo koristan i kod usporedbe sustava kod kojih je već izračunata dimenzionalnost (odgovara na pitanje je li riječ o višedimenzionalnom sustavu ili slučajnim promjenama) i najveći Lyapunovljev eksponent (odgovara na pitanje je li riječ o linearnom ili nelinearnom determinizmu).⁵

Promjene, odnosno dinamika srčane aktivnosti operacionalizirana kroz temporalne promjene veličine R-R intervala,^{*1} smatra se neinvazivnim načinom opažanja funkcioniranja autonomnog živčanog sustava,²³ te je s vremenom postala jedna od ključnih zavisnih varijabli u različitim psihofiziološkim ispitivanjima. Analizom dinamike vremenske serije R-R intervala moguće je dobiti brojne kvantitativne pokazatelje efekata različitih eksternalnih i internalnih faktora na modulaciju srčane aktivnosti. Dosadašnja su istraživanja pokazala da je tzv. „zdrava“ dinamika fizioloških sustava pozicionirana negdje između linearnog determinizma i posve slučajnih temporalnih promjena.² Drugim riječima, upravo su kaotični sustavi ujedno i „zdravi“ sustavi. S tim u vezi,

identificirana su i dva obrasca koji vode patološkim stanjima; povećanje linearne regularnosti dinamike nekoga sustava ili s druge strane, prijelaz sustava u potpuno nepredvidljive promjene (slučajne varijacije). Dakle, normalna kardiovaskularna dinamika je relativno niskodimenzionalna i kaotična²⁴ dok u slučaju oboljenja dolazi do smanjenja njene kompleksnosti, odnosno povećanja linearnosti.^{25,26} Nadalje, koristeći zadatke različitog mentalnog opterećenja, Sammer¹³ je u svom istraživanju koristio nelinearne parametre (korelacijska dimenzija i najveći Lyapunovljev eksponent) kao mjere kompleksnosti i predvidljivosti ponašanja sustava, a nezavisne varijable su bile vrsta zadataka (kognitivni i fizički), te opterećenje (pojedinačno i simultano obavljanje zadataka). Rezultati ovoga istraživanja ukazali su na to da je kompleksnost srčane dinamike povezana s vrstom zadatka koji pojedinac obavlja, a da je njena predvidljivost povezana s mentalnim opterećenjem.

Ipak, dosadašnja vrlo rijetka istraživanja nisu dala posve jasan i detaljniji pogled na kardiovaskularne promjene nelinearnoga tipa u funkciji porasta mentalnog opterećenja općenito. Stoga je u ovom ispitivanju odabran tzv. Fittsov tapping zadatak, koji se sastoji od zadataka različitog radnog opterećenja i takvih kod kojih se informacijsko opterećenje može definirati u bitima. Također, dosadašnja ispitivanja razine mentalnog opterećenja i njegovih refleksija na dinamiku fizioloških sustava, nisu koristila parametre proizašle iz analize rekurenci, već uglavnom samo korelacijsku dimenziju ili neke mjere entropije. Na temelju dosadašnjih istraživanja može se pretpostaviti da će dinamika kardiovaskularnog sustava imati karakteristike nelinearnosti, odnosno kaotičnosti, te da će se s povećanjem složenosti zadataka koje pojedinac obavlja mijenjati i neki parametri koji upućuju na kompleksnost kardiovaskularnog sustava. Stoga je osnovni cilj ovoga ispitivanja bio utvrditi prirodu temporalnih promjena srčane aktivnosti za vrijeme obavljanja psihomotornih zadataka u funkciji porasta informacijskoga opterećenja. Slijedom toga, pokušalo se ispitati postoje li značajne razlike u nekim parametrima nelinearne dinamike (kvantitativne mjere proizašle iz analize rekurenci, korelacijska dimenzija i najveći Lyapunovljev eksponent) s obzirom na težinu psihomotorne aktivnosti koja se obavlja.

*¹ U literaturi se gotovo kao sinonimi upotrebljavaju pojmovi srčanog ciklusa ili perioda i pojam R-R interval. Ipak, pojam srčani ciklus (period) je apstraktniji jer nije vezan za neku točno određenu početnu točku tog ciklusa., dok je R-R interval puno precizniji termin i većina aparata kojima se vrši mjerenje najčešće mjere upravo vrijeme koje protekne između dva uzastopna R-vala. Ovaj val predstavlja najveću promjenu potencijala u jednom EKG ciklusu.

Metoda

Sudionici

U ispitivanju je sudjelovalo 40 zdravih (bez kardiovaskularnih poremećaja) sudionica, dešnjakinja, približno iste dobi (od 19 do 23 godine). Ispitanice su dobrovoljno sudjelovale u ispitivanju, koje je bilo dio većeg i zahtjevnijeg istraživačkog projekta u trajanju od mjesec dana, uključivši i predispitivanje, te ponovljena mjerenja. Stoga je uzorak bio djelomično prigodan, ali se pritom nastojalo kontrolirati što veći broj čimbenika koji potencijalno imaju efekte na dinamiku srčane i moždane aktivnosti. U tom kontekstu, uzorak je bio homogen obzirom na spol i dominantnost ruke (zbog utjecaja na stupanj lateralizacije), te dob (utjecaj na brzinu obrade informacija). Nadalje, eventualni cirkadijurni efekti kontrolirani su na način da su ispitanice uvijek u isto doba dana dolazile na ispitivanje, a faze menstrualnoga ciklusa ispitanica su po slučaju raspoređene tijekom trajanja cijeloga istraživanja.

Pribor

1. Kompjuterizirani višekanalni poligrafski sustav PowerLab

Ovaj sustav omogućuje kontinuirano registriranje različitih fizioloških promjena (EKG, EMG, EOG, EDR), a u ovom ispitivanju korišten je isključivo za praćenje srčane aktivnosti, odnosno pohranjivanje R-R intervala (u milisekundama), u različitim eksperimentalnim situacijama.*ⁱⁱ

2. Modificirana elektronička verzija Fittsovog tappinga

Elektronička verzija se sastoji od podloge koja je spojena s računalom i 12 ploča A4 formata koje se mogu umetnuti u podlogu. Na svakoj od ploča, koje zapravo predstavljaju jedan zadatak, nalaze se dvije trake iste širine (ciljevi), od 0,5, 1, 2 ili 4 cm, koje ispitanik alternativno gađa kontaktnim štapićem na udaljenostima (amplitude pokreta) od 4, 8 ili 16 cm. Mogućih kombinacija opterećenja s obzirom na širine cilja i amplitude je 16, a u ovom ispitivanju korištena su tri zadatka, s indeksom opterećenja od 2, 4 i 6 bita.*ⁱⁱⁱ Navedeni zadaci su korišteni jer se među-

sobno razlikuju po složenosti u terminima informacijskoga opterećenja.

Postupak

Predispitivanje se provelo s ciljem privikavanja sudionica na laboratorijske uvjete i izvođenje zadatka, a u glavnom dijelu ispitivanja sudionice su obavljale zadatke Fittsovog tappinga (u sjedećem položaju) u trajanju od 15 min (prilagođeno je broju jedinica vremenske serija koje su dostatne za predviđene analize; minimalno 1000 podataka).

Prije i za vrijeme obavljanja zadataka pratila se srčana aktivnost, jednako kao i u predispitivanju. Slijed izvođenja zadataka rotiran je po pricipu latinskog kvadrata. Sva mjerenja su se vršila u popodnevnim satima kako bi se izbjegao cirkadijurni efekt i to u razdoblju od 13:00 do 20:00 sati. Naime, u nekim dosadašnjim istraživanjima je utvrđeno da su tjelesna temperatura, te veličina i varijabilitet R-R intervala, upravo u ovom razdoblju stabilni.²⁷

Rezultati i rasprava

Kako je jedan od najvažnijih problema na koji se nailazi prilikom praktične primjene nelinearnih metoda na eksperimentalnim podacima, vezan uz postojanje šuma (buke) koji je najčešće superimponiran na podatke dobivene mjerenjem (ova kontaminacija podatka otežava izračun i interpretaciju kvantitativnih parametara nelinearne dinamike), prvi korak prije analize vremenskih serija je bio prilagoditi i „očistiti“ različite artefakte iz registriranih podataka korištenjem tzv. SVD metode.*^{iv} Ovom metodom se testira linearnost vremenske serije, a zatim se rezultati koji odstupaju od linearnosti zamjenjuju prosjekom njima najbližih rezultata (misli se na najbliže s obzirom na poziciju u vremenskoj seriji), kako se ne bi narušila dinamika serije, ali da se šum ipak reducira. Na ovako „pročišćenim“ podacima, a s

one kombinacije za koje je utvrđeno da najmanje odstupaju od pravca regresije dobivenoga između težine zadatka i brzine njegova izvođenja. Za 2 bita to je kombinacija $A = 8$ i $W = 4$, a za 4 bita $A = 16$ i $W = 2$.

*^{iv}SVD metoda dekompozicije singularne vrijednosti (*eng. singular valuedecomposition*) slična je analizi glavnih komponenti koja se u psihometriji često koristi kao osnova faktorske analize mjernih instrumenata. Vektori kojima su predstavljene glavne komponente su zapravo linearne transformacije originalnih vektora, kako bi se maksimizirala varijanca svake sukcesivne komponente. Kako su originalne varijable prije transformacije normalizirane, totalna varijanca ne može preći dimenzionalnost prostora u kojem su smješteni originalni podaci (Proroković, 2014).

*ⁱⁱ Za izračun nelinearnih parametara dinamike korišteni su programi *Data Plore* i *Visual Recurrence Analysis*.

*ⁱⁱⁱ Za opterećenje od 6 bita postoji samo jedna kombinacija amplitude i širine mete, no za 2 bita postoje dvije, a za 4 bita tri moguće kombinacije. U ovom ispitivanju uzete su

ciljem utvrđivanja prirode dinamike srčane aktivnosti, izračunato je više statističkih parametara vezanih za nelinearne osobine (najveći Lyapunovljev eksponent (LLE), korelacijska dimenzija (CD_2), postotak rekurenci (% RECUR) i postotak determinizma (% DETER)) ispitivanog sustava. Analize su rađene na vremenskim serijama R-R intervala, dobivenim za vrijeme obavljanja Fittsovog tappinga.

Jednosmjernom analizom varijance (ponovljena mjerenja) provjerena je značajnost razlika u veličini izračunatih parametara nelinearne dinamike s obzirom na razinu opterećenja zadacima. Rezultati ovih analiza prikazani su u Tablici 1, a pripadajuća deskriptivna statistika u Tablici 2.

Tablica 1. Rezultati analize varijance nelinearnih parametara srčane dinamike s obzirom na razinu opterećenja zadacima Fittsovog tappinga

Table 1 Analysis results of non-linear variability parameters in heart rate dynamics considered the level of Fitts' tapping task load

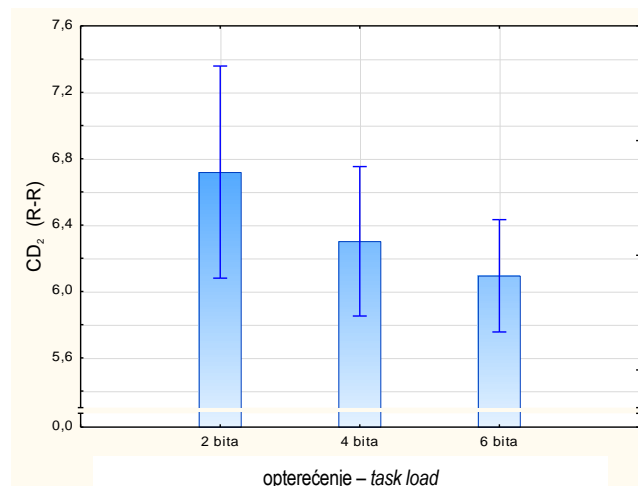
Izvor varijabiliteta Variability source	df	F	p (F)
CD_2	2/78	1,709	0,188
LLE	2/78	1,061	0,351
%RECUR	2/78	6,813	0,002
%DETER	2/78	5,089	0,008

Tablica 2. Aritmetičke sredine i standardne devijacije nelinearnih parametara srčane dinamike s obzirom na razinu opterećenja zadacima Fittsovog tappinga

Table 2 Arrhythmic environments and standard deviations of non-linear parameters in heart rate dynamics considered the level of Fitts' tapping task load

Parametar Parameter		M	sd
CD_2	2 bita/bits	6,719	1,998
	4 bita/bits	6,302	1,407
	6 bita/bits	6,094	1,057
LLE	2 bita/bits	0,719	0,174
	4 bita/bits	0,752	0,197
	6 bita/bits	0,699	0,116
%RECUR	2 bita/bits	46,552	19,939
	4 bita/bits	59,489	19,877
	6 bita/bits	60,408	17,659
%DETER	2 bita/bits	48,146	23,229
	4 bita/bits	60,199	21,935
	6 bita/bits	60,851	23,581

Kada je riječ o kompleksnosti sustava koja je procijenjena preko korelacijske dimenzije, može se reći da je kardiovaskularni sustav srednje dimenzionalan (korelacijske dimenzije okvirno se kreću u rasponu od 6 do 7). Analizom varijance nije utvrđeno da postoji razlika u kompleksnosti kardiovaskularnoga sustava, ovisno o težini (razini opterećenja) zadatka koji se izvodi. Međutim, na Slici 1 može se uočiti tendencija smanjenja korelacijske dimenzije (prilično linearna) u funkciji povećanja opterećenja zadatkom (značajno na razini $p < 0,2$).

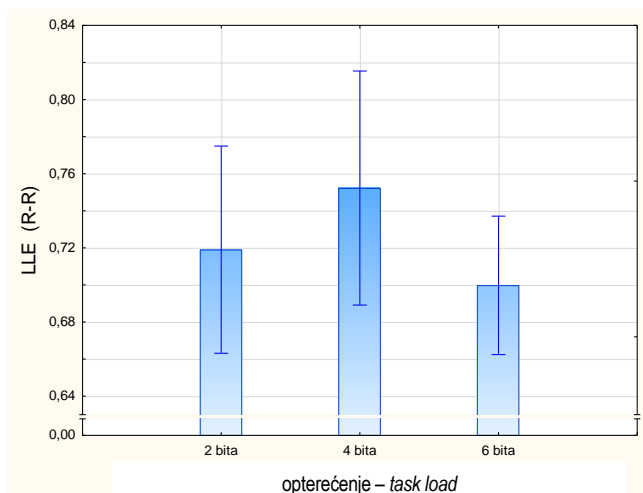


Slika 1. Korelacijska dimenzija srčane dinamike s obzirom na razinu opterećenja zadacima Fittsovog tappinga

Picture 1 Correlation dimension of heart rate dynamics considered the level of Fitts' tapping task load

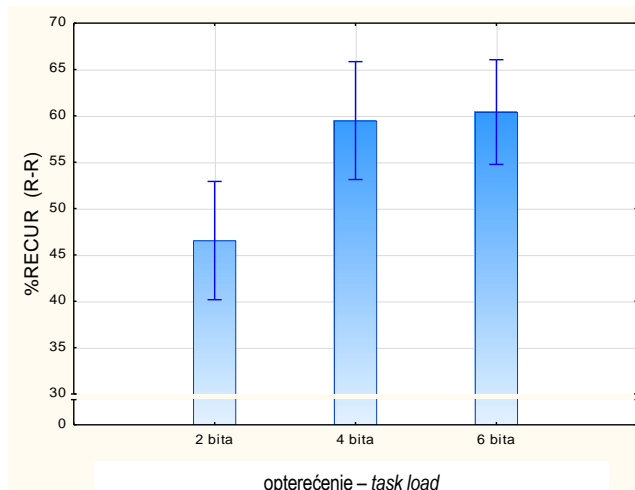
Može se pretpostaviti da bi većom varijacijom opterećenja zadacima i uključivanjem većega broja ispitanika, razlika bila značajna i na znatno strožoj statičkoj razini odbacivanja hipoteze. Ovakvi rezultati su dijelom očekivani i u skladu s prethodnim istraživanjima kojima se također ispitala srčana dinamika²⁸ gdje je utvrđeno da s povećanjem kompleksnosti zadatka dolazi do smanjenja kompleksnosti srčane dinamike. Smanjenje kompleksnosti sustava u funkciji povećanja kompleksnosti zadatka autori pripisuju mogućem smanjenju efekata nekontrolabilnih čimbenika (motivacija, fluktuacija pažnje), odnosno dominantnijem utjecaju samog mentalnog opterećenja na dinamiku kardiovaskularnog sustava, kao posljedicu povećanja težine zadatka. I u ovom se ispitivanju može pretpostaviti kako je na dinamiku kardiovaskularnog sustava vjerojatno utjecao velik broj različitih čimbenika (eksternalnih i internalnih) koji su u stalnoj interakciji, ali se globalna dinamika srčane aktivnosti uglavnom može opisati sa 6 do 7 temeljnih čimbenika koji je determiniraju.

Najveći Lyapunovljev eksponenti dinamike srčane aktivnosti kreću se u rasponu od 0,69 do 0,76 (Slika 2). Analizom varijance nije utvrđeno da postoji razlika u veličini ovoga parametra, ovisno o razini opterećenja psihomotornim zadacima. To implicira da kardiovaskularni sustav možemo definirati kao kaotični sustav, jer su sve navedene vrijednosti pozitivne, ali i da ova mjera „kaotičnosti“ nije osjetljiva na promjene u kognitivnoj i motornoj aktivnosti pojedinca. Budući da je osnovni cilj ovoga ispitivanja bio utvrditi prirodu temporalnih promjena srčane aktivnosti za vrijeme obavljanja psihomotornih zadataka različite složenosti, može se zaključiti kako je dinamika kardiovaskularnog sustava nelinearnog karaktera, točnije deterministički kaotična i srednje dimenzionalnosti. Nastavno na ovaj zaključak, u daljnjim analizama pokušale su se utvrditi i neke druge značajke srčane aktivnosti koje se tiču prvenstveno veličine i tipa determinizma sadržanog u temporalnim promjenama R-R intervala. Kako bi se dobio odgovor na ova pitanja, računata su dva (najvažnija) parametra proizašla iz analize rekurenci: postotak rekurenci i postotak determinizma.



Slika 2. Najveći Lyapunovljev eksponent srčane dinamike s obzirom na razinu opterećenja zadacima Fittsovog tappinga
Picture 2 Highest Lyapunov heart rate dynamics exponent considered the level of Fitts' tapping task load

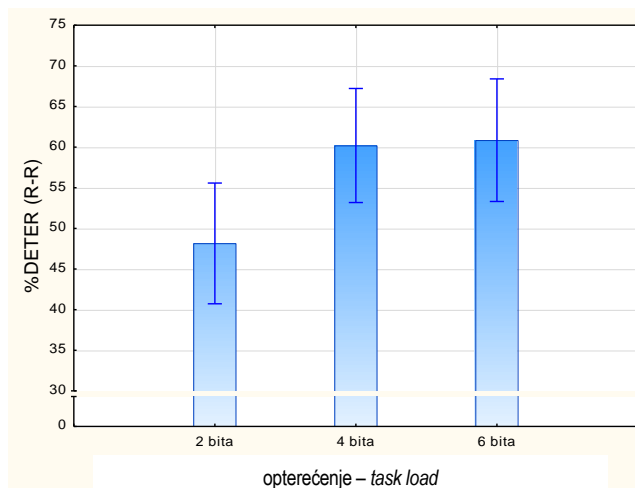
Analiza varijance pokazala je postojanje statistički značajne razlike u postotku rekurenci opažene srčane dinamike s obzirom na razinu opterećenja zadacima (Slika 3). Bonferroni *post hoc* test pokazao je da su opažene razlike statistički značajne između postotka rekurenci za opterećenje od 2 bita u odnosu na opterećenja od 4 ($p < 0,01$) i 6 bita ($p < 0,01$).



Slika 3. Postotak rekurenci srčane dinamike s obzirom na razinu opterećenja zadacima Fittsovog tappinga
Picture 3 Recurrence percentage of heart rate dynamics exponent considered the level of Fitts' tapping task load

Picture 3 Recurrence percentage of heart rate dynamics exponent considered the level of Fitts' tapping task load

Nadalje, analiza varijance pokazala je i postojanje statistički značajnih razlika u postotku determinizma srčane dinamike s obzirom na razinu opterećenja zadacima (Slika 4). Slično kao i kod postotka rekurenci, Bonferroni *post hoc* test pokazao je da su razlike u postotku determinizma statistički značajne između opterećenja od 2 bita u odnosu na opterećenja od 4 ($p < 0,05$) i 6 bita ($p < 0,05$).



Slika 4. Postotak determinizma srčane dinamike s obzirom na razinu opterećenja zadacima Fittsovog tappinga
Picture 4 Determinism percentage of heart rate dynamics exponent considered the level of Fitts' tapping task load

Općenito se može zaključiti kako postotak rekurenci i determinizma srčane aktivnosti raste u funkciji povećanja složenosti zadatka koje pojedinac obavlja. Kako su postotak rekurenci i postotak determinizma obično najviši za periodične i kvazi-periodične procese, najniži za slučajne varijacije, a kod kaotičnih procesa negdje u sredini, u usporedbi s dobivenim korelacijskim dimenzijama i najvećim Lyapunovljevim eksponentima, može se pretpostaviti kako s porastom psihomotornog opterećenja dolazi do redukcije nelinearnog determinizma srčane aktivnosti, te porasta linearne determinističke komponente. Kod jednostavnijih zadataka *Fittsovog tappinga* moguća je veća fluktuacija pažnje i manja usmjerenost na obavljanje zadatka, ali povećanjem težine kontrole pokreta, fokusiranost na zadatak postaje sve dominantniji čimbenik koji utječe na dinamiku srčane aktivnosti na način da reducira efekte ostalih manje kontrolabilnih čimbenika, te povećava linearnu komponentu determinizma u sustavu (veća ritmičnost pri obavljanju zadatka).

Zaključak

Dobiveni rezultati potvrđuju pretpostavke o važnosti proučavanja upravo temporalnih psihofizioloških promjena pri obavljanju psihomotornih aktivnosti. Potrebno je naglasiti da su ovakva ispitivanja još uvijek dosta rijetka, osobito u Hrvatskoj, te da kreću od ponešto drugačije istraživačke paradigme. Naime, tradicionalni modeli većinom su temeljeni na linearnosti i/ili slučajnosti promjena u vremenu, iako je očigledno da se kompleksnost fizioloških sustava ne može adekvatno shvatiti korištenjem uobičajenih statističkih metoda.²⁹ I ovo ispitivanje pokazalo je da se varijabilitet promjena u srčanoj aktivnosti ne može pripisati nesistematskim varijabilnim čimbenicima, već očigledno determinističkim procesima koje na prvi pogled nije lako raspoznati. Ovaj determinizam je vrlo specifičan i primarno je kaotičnog karaktera. Iz dobivenih rezultata može se zaključiti kako je korelacijska dimenzija kao parametar dobar pokazatelj kompleksnosti dinamike kardiovaskularnog sustava, dok se tradicionalnim metodama analize ne može dobiti ova bitna informacija (npr. izračunavanjem različitih deskriptivnih parametara i spektralnom analizom varijabiliteta srčane aktivnosti). Dakle, riječ je o parametru koji vjerojatno govori o samoj prirodi i kvaliteti dinamike sustava koji se ispituje, a koji nije nužno u relaciji s kvantitativnim promjenama učinka na temelju kojih se često neizravno i pogrešno zaključuje o kompleksnosti pratećih psihofizioloških reakcija. Također, postotak rekurenci i determinizma

pokazali su se vrlo korisnim parametrima srčane aktivnosti koji su osjetljivi na unutrašnje i vanjske promjene kojima je pojedinac izložen. Pritom je važno naglasiti da povećanjem zahtjeva za ispitanika dolazi do smanjenja dimenzionalnosti srčane aktivnosti, ali i povećanja varijance linearnog determinizma u sustavu. Ovakvi rezultati su u skladu i s novijim teorijama kompleksnosti i samoorganizacije u kojima središnje mjesto zauzimaju tzv. kompleksni adaptivni sustavi, u koje spadaju i psihomotorni, i kardiovaskularni i živčani sustav.^{2,5} Naime, bez obzira na broj unutrašnjih i vanjskih čimbenika koji djeluju na sam sustav, oni teže optimalizaciji po načelu da je cjelina puno važnija od pojedinih dijelova, te se na taj način prilagođavaju novim okolnostima (npr. promjena težine zadatka u ovom istraživanju). Ono što je također važno naglasiti je postojanje značajnih interindividualnih razlika u nelinearnim aspektima srčane dinamike, kao i intraindividualnih sličnosti pri obavljanju zadataka različite težine, što ostavlja prostor za daljnja slična istraživanja na ovom području.

Na kraju se potrebno osvrnuti i na nedostatke ovoga ispitivanja, od kojih je neke bilo teško izbjeći (npr. tehnička ograničenja mjernih instrumenata na koje istraživač nije mogao utjecati), te vrsta dostupne opreme za prikupljanje podataka i programa za njihovu analizu. Naime, kada je riječ o dinamici kardiovaskularnog sustava, analize su rađene na vremenskim serijama R-R intervala koji u ovom ispitivanju vjerojatno nisu najbolji pokazatelj kardiovaskularne dinamike. Do tog zaključka se dolazi ako usporedimo trajanje „radnih“ ciklusa i R-R intervala. U nekim slučajevima (kod jednostavnijih zadataka) se za vrijeme samo jednog R-R intervala dogodi i dva ili više „radnih“ ciklusa, pa je opravdano pretpostaviti da je R-R interval „pregruba“ mjera praćenja dinamike kardiovaskularnog sustava. U budućim istraživanjima, možda bi bilo bolje registrirati neke kraće intervale koji su također dio srčanog ciklusa, kao npr. PR interval, ili QT interval i sl., ili pak da se umjesto registriranja vremenskih intervala bilježe kontinuirane promjene u veličini potencijala. Također, ispitivanje bi trebalo ponoviti na znatno većem uzorku ispitanika, te koristeći sofisticiranije tehnike za redukciju šuma iz podataka i testiranje nelinearnosti.

Literatura

1. Morrison, F. Threat of modelling dynamic systems, New York: Wiley; 1991.
2. Nikolić M. Linearne i nelinearne značajke dinamike psihomotornog sustava, [doktorski rad]. Zagreb: Filozofski fakultet, 2012.
3. Lewin R. Complexity, Life at the edge of chaos, London: The University of Chicago Press; 1999.
4. Proroković A. A new approach in time series. Rev Psychol. 2002;9:59-65.
5. Proroković A. Deterministički kaos za nematematičare – uvod u nelinearne analize, Jastrebarsko: Naklada Slap; 2014.
6. Proroković A, Gregov Lj. Dynamics of two psychomotor activities: Chaotic properties. Rev Psychol. 2004;11:35-44.
7. Lehnerz K. Non-linear time series analysis of intracranial EEG recordings in patients with epilepsy – an overview. Int J Psychophysiol. 1999;34:45-52.
8. Yu D, Small M, Harrison RG, et al. Measuring temporal complexity of ventricular fibrillation. Physic Letters A. 2000;265:68-75.
9. Fell J, Mann J, Roschke, M, Gopinathan MS. Nonlinear analysis of continuous ECG during sleep II. Dynamical measures, Biol Cybern. 2000;82:477-483.
10. Small M, Yu D, Harrison RG, et al. Deterministic nonlinearity in ventricular fibrillation. Chaos. 2000; 10:268-277.
11. Krstačić G. Nelinearna dinamika i „teorija kaosa“ u kardiologiji. Medix, 2004;54-55:45-46.
12. Mulder LJM, Mulder G. Cardiovascular reactivity and mental work-load. U: R.I. Kitney, O. Rompelman (Ur.), The beat-to-beat investigation of cardiovascular function: Measurement, analysis and application: Oxford, Clarendon; 1987, str. 216-253.
13. Sammer G. Heart period variability and respiratory changes associated with physical and mental load: non-linear analysis. Ergonomics. 1998;41:746-755.
14. Proroković A. Testiranje kaotične dinamike metodom kontrolnih podataka. Medica Jadertina. 2003;32: 107-113.
15. Skinner JE, Pratt CM, Vybiral T. A reduction in the correlation dimension of heartbeat intervals precedes imminent ventricular fibrillation in human subjects. Am Heart J. 1993;125:731-43.
16. Filipecki A, Trusz-Gluza M, Szydło K, Giec L. Value of heart rate variability parameters for prediction of serious arrhythmic events in patients with malignant ventricular arrhythmias. Pacing Clin Electrophysiol. 1996;19:1852-6.
17. Landini G, Ripplin JW. How important is tumour shape? Quantification of the epithelial-connective tissue interface in oral lesions using local connected fractal dimension analysis. J Pathol. 1996;179:210-217.
18. Baish JW, Jain RK. Fractals and cancer. Cancer Res. 2000;60:3683-3688.
19. Tez M. Complexity theory can help to explain breast carcinogenesis. Eur J Surg Sci. 2011;2:5-8.
20. Ganz RE, Weibels G, Stäcker KH, Faustmann PM, Zimmermann CW. The Lyapunov exponent of heart rate dynamics as a sensitive marker of central autonomic organization: an exemplary study of early multiple sclerosis. Int J Neurosci. 1993;71:29-36.
21. Su ZY, Wu T, Yang PH, Wang YT. Dynamic analysis of heart beat rate signals of epileptics using multi dimensional phase space reconstruction approach. Physica A. 2008;387:2293-2305.
22. Webber CL, Zbilut JP. Dynamical assessment of physiological systems and states using recurrence plot strategies. J Appl Physiol. 1994;76:965-973.
23. Sztajzel J. Heart rate variability: a non-invasive electrocardiographic method to measure the autonomic nervous system – Review. Swiss Med Wkly. 2004;134:514-522.
24. Babloyantz A, Destexhe A. Is the normal heart a periodic oscillator? Biol Cybern. 1988;58:203-211.
25. Goldberger AL. Fractal variability versus pathologic periodicity: complexity loss and stereotype in disease. Perspect Biol Med. 1997;40:543-561.
26. Goldberger AL, Amaral LA, Hausdorff JM, Ivanov PCh, Peng CK, Stanley HE. Fractal dynamics in physiology: alterations with disease and aging. Proc Natl Sci USA. 2002;995 Suppl 1:2466-2472.
27. Gregov Lj. Utjecaj tzv. cirkadijurnog stresa na promjene rezidualnog mentalnog kapaciteta [doktorski rad]. Zagreb: Filozofski fakultet; 2003.
28. Valerjev P, Šimić N. How do sound rhythms affect heart beat: Comparison of linear and non-linear analysis of R-Rintervals. Rev Psychol. 2004;11:3-10.
29. Heath RA. Nonlinear Dynamics: Techniques and Applications in Psychology, USA: Lawrence Erlbaum Associates; 2000.