

UNIVERSITATEA „BABEȘ-BOLYAI”
CLUJ-NAPOCA
FACULTATEA DE EDUCAȚIE FIZICĂ ȘI SPORT
ȘCOALA DOCTORALĂ DE EDUCAȚIE FIZICĂ ȘI SPORT

TEZĂ DE DOCTORAT

- REZUMAT -

Conducător de doctorat:
Prof. univ. dr. Hanțiu Iacob

Student-doctorand:
Pătrașcu Adrian

2019

UNIVERSITATEA „BABEȘ-BOLYAI”
CLUJ-NAPOCA
FACULTATEA DE EDUCAȚIE FIZICĂ ȘI SPORT
ȘCOALA DOCTORALĂ DE EDUCAȚIE FIZICĂ ȘI SPORT

*Sistem inteligent de control a dinamicii frecvenței
cardiace în antrenamentele aerobe pe covorul rulant*

Conducător de doctorat:
Prof. univ. dr. Iacob Hanțiu

Student-doctorand:
Adrian Pătrașcu

2019

Curpîns

Introducere.....	1
PARTEA I	
Fundamentarea teoretică a temei de cercetare.....	4
Capitolul 1. Efortul fizic în antrenamentul sportiv.....	4
1.1. Delimitări conceptuale.....	4
1.2. Parametrii efortului.....	6
1.3. Individualizarea antrenamentului.....	9
1.4. Sumar.....	11
Capitolul 2. Fiziologia cardiacă în efortul fizic.....	12
2.1. Performanța cardiacă la sportivi.....	12
2.2. Adaptarea cardiacă la efort.....	13
2.3. Răspunsul cardiovascular în efort.....	14
2.4. Dinamica frecvenței cardiace.....	14
2.5. Factorii care influențează evoluția frecvenței cardiace.....	15
2.6. Sumar.....	17
Capitolul 3. Frecvența cardiacă și antrenamentele aerobe de alergare.....	18
3.1. Monitorizarea frecvenței cardiace în antrenament.....	18
3.2. Utilizarea frecvenței cardiace în antrenament.....	20
3.3. Efectuarea controlată a efortului în antrenament.....	22
3.4. Dispozitive.....	23
3.5. Sumar.....	32
Capitolul 4. Sisteme inteligente de conducere.....	33
4.1. Sistem – concept și utilitate.....	33
4.2. Inteligență artificială.....	36
4.3. Semnificația inteligenței artificiale în contextul științelor motricității umane...	37
4.4. Sisteme inteligente de conducere: logica fuzzy.....	39
4.5. Sisteme de conducere și domeniul științelor motricității umane.....	45
4.6. Sumar.....	48
PARTEA a II-a	
Cercetare preliminară privind construirea, reglarea și validarea componentelor sistemului inteligent de conducere a dinamicii frecvenței cardiace.....	50
Capitolul 5. Proiectarea, construirea și verificarea sistemului de conducere a dinamicii frecvenței cardiace.....	50
5.1. Introducere.....	50
5.2. Scopul cercetării preliminare.....	54
5.3. Obiectivele cercetării preliminare.....	54
5.4. Ipotezele cercetării	54
5.5. Materiale și metode.....	55
5.6. Rezultate.....	64
5.7. Discuții.....	72
5.8. Concluzii.....	91
PARTEA a III-a	
Cercetări personale privind implementarea sistemului de control a dinamicii frecvenței cardiace în antrenament pe covor rulant.....	92
Capitolul 6. Studiu I. Funcționarea sistemului de control a dinamicii frecvenței cardiace în condiții de antrenament pe covorul rulant.....	92
6.1. Introducere.....	92
6.2. Scop.....	94
6.3. Obiective.....	94
6.4. Materiale și metode.....	95

6.5. Rezultate.....	97
6.6. Discuții.....	98
6.7. Concluzii.....	127
Capitolul 7. Studiu II. Aplicația MOTION-AE pentru determinarea intensității antrenamentului de alergare pe covorul rulant.....	128
7.1. Introducere.....	128
7.2. Scopul cercetării.....	133
7.3. Obiectivele cercetării.....	134
7.4. Materiale și metode.....	134
7.5. Rezultate și discuții.....	135
7.6. Concluzii.....	150
Concluzii generale.....	151
Bibliografie selectivă.....	152
Anexe.....	157

Cuvinte cheie: antrenament, sistem de conducere, frecvență cardiacă, intensitatea efortului, variabilitatea frecvenței cardiace, logica fuzzy

Introducere

Nevoia de a implementa sistemele inteligente de conducere în domeniul activităților fizice este susținută de Rudas et. al. (2012) care consideră că utilizarea unor exerciții executate greșit și cu intensitate, durată și frecvență neadaptate executantului sunt dăunătoare sănătății. Totodată, studiul lor consideră că utilizarea acestui tip de sistem permite înlocuirea modelelor cantitative clasice de antrenament, care nu pot să țină seama de eventualele probleme subiective care pot apărea. Studiul lor folosind logica fuzzy pentru a determina și calcula nivelul de risc al unui exercițiu ținând cont de caracteristicile vieții fiecărui subiect, astfel ajutându-se la alegerea exercițiilor perfect adaptate pentru acesta.

Tapia et. al. (2007) au utilizat un astfel de sistem inteligent pentru a identifica tipul și intensitatea activităților fizice folosind accelerometre și un senzor de frecvență cardiacă. Studiul lor a concluzionat că frecvența cardiacă joacă un rol discriminator foarte mic în a identifica tipul exercițiului.

Jacobs (1997) propune utilizarea unui model de control al poziției stând analizând cu logica fuzzy variabilele de orientare și aliniere a corpului, comparativ cu alte studii care folosesc poziționarea centrului de greutate. Sistemul său permite un control mai fin asupra mișcărilor, deoarece folosește gradele de libertate a tuturor articulațiilor determinate de acțiunea mușchilor, comparativ cu modelele de control clasice care vizionează mișcările subiectului ca cele ale unui pendul întors, punctul de origine fiind articulația gleznei.

Alaqtash et. al. (2011) au folosit un astfel de sistem pentru analiza mersului. Acest sistem a fost construit pentru a putea fi utilizat în testele clinice pentru a se determina gradul de mobilitate a persoanelor care suferă de scleroză multiplă, fiind în final o metodă obiectivă de măsurare cantitativă a mobilității.

Partea I

Fundamentarea teoretică a temei cercetate

Capitolul 1. Efortul fizic în antrenamentul sportiv

1.1. Delimitări conceptuale

Antrenamentul sportiv este considerat un proces ce are ca finalitate declanșarea unei adaptări a organismului la efort fizic și psihic (Dragnea, 1996). Efortul fizic utilizat în antrenamente poate fi concretizat în stresul la care este supus organismul în timpul antrenamentului (Cârstea, 2000).

Prin pregătire fizică se urmărește dezvoltarea calităților biomotrice și a indicilor morfo-funcționali ai organismului. Tot prin pregătirea fizică se poate crea contextul dobândirii unor priceperi și deprinderi noi sau îmbunătățirea celor existente (Dragnea, 1996).

Adaptarea la antrenament este un aspect important al pregătirii fizice care reprezintă totalitatea transformărilor rezultate în urma efectuării exercițiului fizic repetat și sistematic (Bompa, 2002; Dragnea, 1996).

1.2. Parametrii efortului

Controlul nivelului efortului în antrenamente poate fi efectuat prin acționarea asupra unor parametri ai efortului: volum, intensitate, densitate și complexitate (Bompa, 2002). Intensitatea poate fi definită ca fiind un raport între cantitatea de lucru mecanic efectuat și unitatea de timp în care s-a efectuat mișcarea. Ea reprezintă gradul de solicitare a organismului prin intermediul posibilităților proprii exprimate cel mai adesea de valorile frecvenței cardiace (Feher, 2017).

Potrivit lui Bompa (2002) la aceeași valoare a frecvenței cardiace, doi subiecți, pot prezenta valori diferite ale intensității de lucru în cadrul unui antrenament.

1.3. Individualizarea antrenamentului

Abilitatea de a modela conținutul unui antrenament pentru caracteristicile subiectului poate reprezenta cheia succesului pregătirii. Atenta urmărire a capacității de efort, și concomitent

a intensității, poate oferi o imagine asupra eficienței conținutului folosit (Mircescu & Cojocaru, 1970).

1.4. Sumar

Antrenamentul reprezintă forma de activitate organizată prin care se poate influența capacitatea fizică pentru a asigura progresul nivelului de pregătire. Studiul și analiza randamentului antrenamentului sunt vitale pentru avansarea cunoștințelor și pentru a asigura forma cea mai eficientă de desfășurare.

Intensitatea efortului reprezintă un parametru al antrenamentului care permite influențarea directă a desfășurării acestuia. Modul de manipulare a intensității poate determina transformarea obiectivului antrenamentului către un altul. În ceea ce privește antrenamentele aerobe, intensitatea se transpune în valoarea frecvenței cardiace, ceea ce permite evidența evoluției acesteia atât pe parcursul unui antrenament, cât și pe o perioadă mai lungă de timp. Astfel se poate controla nivelul intensității pentru a asigura randamentul optim al antrenamentelor pentru perioada respectivă.

Capitolul 2. Fiziologia cardiacă în efortul fizic

2.1. Performanța cardiacă la sportivi

Stoian (2007) considera debitul cardiac ca fiind principalul indicator al performanței cardiace în contextul efortului fizic extrem. Debitul cardiac este reglat de trei mecanisme intrinseci: presarcina, contractilitatea și postsarcina, la acestea adăugându-se frecvența cardiacă.

Un mijloc rapid de adaptare la stresul efortului fizic este reprezentat de frecvența cardiacă. Aceasta permite creșterea rapidă a debitului cardiac, prezentând eficiență optimă între valorile de 120-160 bpm (Sbenghe, 2008).

2.2. Adaptarea cardiacă la efort

Adaptarea cardiacă la efort se produce acoperind cinci planuri diferite: mărimea inimii, volumul-bătăie, frecvența cardiacă de repaus, debitul cardiac și tensiunea arterială.

2.3. Răspunsul cardiovascular în efort

Intensitatea efortului aerob și debitul cardiac sunt direct proporționale. Utilizarea și asimilarea oxigenului la nivel muscular, coroborate cu un debit cardiac ridicat, determină consumul de oxigen în timpul efortului. Până la valoarea de 190 bpm, frecvența cardiacă prezintă o creștere similară cu debitul cardiac. După această fază, debitul cardiac afișează un aspect deosebit, sigurul mod în care se poate produce creșterea acestuia este prin creșterea frecvenței cardiace mediată de mecanismele nervoase simpatice (Fu & Levine, 2013).

2.4. Dinamica frecvenței cardiace

Dinamica frecvenței cardiace este reprezentată de oscilația valorilor ridicate cu cele mici ale frecvenței cardiace pe parcursul unui antrenament. De cele mai multe ori un antrenament aerob prezintă trei părți: încălzirea (warm-up), zona de antrenament (poate avea mai multe trepte ale frecvenței cardiace) și liniștirea după efort (cool-down) (Stoian & Petrache, 2007).

2.5. Factorii care influențează evoluția frecvenței cardiace

Frecvența cardiacă prezintă o evoluție variată pe parcursul unui antrenament fizic. Anumiți factori sunt implicați direct în modelarea acestei evoluții: răspunsul frecvenței cardiace la efort, vârsta, genul, starea de antrenament și refacerea, starea de hidratare și nutriție, medicamentele, condițiile de mediu, temperatura corporală, poziția corpului, bolile, localizarea efortului, altitudinea, momentul de măsurare și drift-ul cardiovascular.

2.6. Sumar

Frecvența cardiacă este parametrul fiziologic care permite, într-o anumită măsură, urmărirea nivelului de influență a activității fizice asupra corpului. Modificări ale valorii frecvenței cardiace, în anumite situații, pot evidenția cauza care a determina aceste modificări, precum și amplitudinea acesteia.

Dinamica frecvenței cardiace joacă un rol important în analiza unui antrenament. Observarea, înregistrarea și interpretarea evoluției dinamicii frecvenței cardiace ar putea ajuta în creșterea randamentului pregătirii.

Atunci când se folosește frecvența cardiacă pentru analiza performanței fizice, trebuie să se țină cont de o serie de factori care pot influența negativ valorile observate. Acești factori pot fi interni sau externi, pot fi identificați în funcție de contextul în care se face observarea frecvenței cardiace, și, astfel, se poate alege metoda cea mai potrivită pentru a limita efectul negativ al acestora.

Capitolul 3. Frecvența cardiacă și antrenamentele aerobe de alergare

3.1. Monitorizarea frecvenței cardiace în antrenament

Succesul unui antrenament este în strânsă legătură cu eficiența monitorizării și controlului randamentului subiectului pe parcursul activității. Cuantificarea feedback-ului din partea subiectului pe parcursul antrenamentului este o modalitate simplă de a monitoriza evoluția subiectului și totodată de a evalua performanța acestuia. Feedback-ul oferit de subiect poate fi direct, oferit prin comunicarea verbală sau nonverbală, sau indirect, oferit în urma unor procese fiziologice involuntare (Stoian & Petrache, 2007).

3.2. Utilizarea frecvenței cardiace în antrenament

Frecvența cardiacă ar putea fi un indice al intensității efortului fizic ce poate fi utilizat pentru analiza efectelor antrenamentelor și controlarea efortului. Monitorizarea frecvenței cardiace permite analiza efectelor antrenamentului atât în condiții specifice activității practicate cât și în condiții controlate de laborator. Analizarea atentă a modului în care dinamica frecvenței cardiace evoluează în timpul și după antrenament poate oferi o imagine a randamentului proceselor de refacere. În funcție de acesta se pot astfel lua decizii privind raportul dintre intensitatea de lucru și refacerea sau odihna (Stoian & Petrache, 2007).

3.3. Efectuarea controlată a efortului în antrenament

Frecvența cardiacă poate fi măsurată și în timpul antrenamentului prin utilizarea de pulsometre care permit o vizualizare în timp real a evoluției acesteia pe parcursul efortului (Suh, 2015). În condițiile antrenamentului aerob posibilitatea urmării frecvenței cardiace în timp real constituie un mijloc util pentru a păstra valoarea acesteia în limitele dorite. Creșteri ale frecvenței

cardiace se corelează până la o anumită valoare cu creșteri ale intensității efortului (Dragnea, 1996). Dacă pe parcursul acestuia, în oricare moment, frecvența cardiacă depășește valorile stabilite anterior, se poate interveni prin scăderea intensității de lucru, astfel, limitându-se creșterea frecvenței cardiace.

3.4. Dispozitive

Pulsometrele sunt mijloace tehnice care permit monitorizarea frecvenței cardiace. Accesibilitatea actuală a acestor dispozitive permite utilizarea lor de către o populație mult mai largă decât în trecut. Astfel, acestea pot fi utilizate fie de către un sportiv de ocazie care dorește o cuantificare rapidă a efortului efectuat, fie de către un sportiv de performanță care urmărește o monitorizare eficientă a antrenamentului (Suh, 2015).

Există diverse modele de pulsometre, fiecare cu funcții și aspecte diferite dar la bază toate prezintă o componență duală: un senzor și un dispozitiv de afișare a semnalului receptat de senzor (Tang & Po, 2015).

3.5. Sumar

Frecvența cardiacă, printr-o înregistrare corectă și o analiză atentă, poate fi folosită pentru conducerea unui antrenament aerob de alergare pe covorul rulant. Programarea efortului pentru un antrenament sau pentru o perioadă de pregătire se poate construi pe baza analizei evoluției frecvenței cardiace. Totodată, controlul intensității în timpul efortului poate fi structurat tot folosind frecvența cardiacă prin asigurarea menținerii acesteia în limitele dorite.

În antrenamentele aerobe de alergare intensitatea antrenamentului poate fi controlată prin utilizarea frecvenței cardiace deoarece pot fi stabilite anumite intervale de valori în care se dorește menținerea acesteia pe tot parcursul antrenamentului. Astfel, dacă se dorește un control direct și imediat al intensității efortului se poate trece de la un interval la altul superior sau inferior în funcție de momentul din antrenament.

Modul în care variază frecvența cardiacă a subiectului în funcție de trecerile de la un interval la altul poate oferi informații referitoare la alegerea intervalului: dacă a fost bine ales, dacă trebuie schimbat, dacă trebuie mărit intervalul.

Mijlocul practic prin care se poate realiza controlul antrenamentului folosind frecvența cardiacă este reprezentat de pulsometru. Există mai multe modele de astfel de instrumente, fiecare cu avantaje și dezavantaje. Unele dintre ele înregistrează frecvența cardiacă și oferă o analiză a acesteia la sfârșitul antrenamentului sub formă de grafice, astfel putându-se lua o

decizie referitoare la următorul antrenament. Alte forme ale acestui instrument permit urmărirea evoluției frecvenței cardiace în timp real și astfel se poate lua o decizie imediată referitoare la efort și intensitate. Un al treilea tip poate fi folosit în componența unor sisteme complexe care permit luarea unei decizii cu ajutorul calculatoarelor. Dacă în cadrul acestor sisteme se vor adăuga și componente care permit modificarea de la distanță a mișcării, cum ar fi un covor rulant, se vor putea folosi datele furnizate de pulsometru pentru a interveni direct în timpul și fuleul de alergare modificând parametrii acestei componente. Astfel, se poate crea un sistem compus din mai multe elemente care permite, în totalitatea sa, controlul și conducerea antrenamentului asistat de calculator.

Există o serie de limitări și factori care pot influența funcționarea unui astfel de sistem compus din pulsometre, dar, construind cu grijă metodologiile și protocoalele de utilizare, se poate limita impactul acestora.

Capitolul 4. Sisteme inteligente de conducere

4.1. Sistem – concept și utilitate

Corpul uman în totalitatea lui este un sistem neliniar. O studiere a subsistemelor componente bazată pe posibila influență a unui factor extern asupra acestora, poate oferi o imagine statică a procesului biologic global. Pe baza existenței mai multor tipuri de sisteme putem defini corpul uman ca fiind un sistem cu memorie, neliniar, multivariabil cu componente continue și discrete bazat pe parametrii distribuiți cu un mod de funcționare stocastic prezentând forme de manifestare atât în buclă deschisă cât și în buclă închisă.

4.2. Inteligență artificială

Sistem inteligent de conducere este un sistem de conducere dezvoltat sau implementat utilizând tehnici sau metode inteligente, sau care emulează funcții specifice ființelor umane sau altor sisteme biologice. Astfel, se pot proiecta sisteme de conducere cu diverse tipuri și/sau grade de inteligență (Meystel & Albus, 2002).

4.3. Semnificația inteligenței artificiale în contextul științelor motricității umane

Utilizarea inteligenței artificiale în domeniul activității fizice umane poate fi o abordare atipică din cauza misiunii teoretic diferite pe care cele două domenii o posedă. Cu toate acestea, folosirea cunoștințelor oferite de domeniul inteligenței artificiale în activitatea motrică poate prezenta anumite oportunități atât pentru un domeniu cât și pentru celălalt. Construirea unui sistem inteligent care poate opera într-o anumită arie a motricității umane poate asigura creșterea eficienței sau a randamentului mijloacelor specifice de acțiune în acel segment al activității fizice.

4.4. Sisteme inteligente de conducere: logica fuzzy

Logica fuzzy este o metodă de luare a deciziilor bazată pe reguli folosită pentru conducerea sau modelarea proceselor. Lotfi Zadeh este cel responsabil pentru dezvoltarea logicii fuzzy în anii 60', bazându-se pe teoria mulțimilor fuzzy (Cîrtoaje, 2013).

4.5. Sisteme de conducere și domeniul științelor motricității umane

Există o legătură între domeniul sistemelor de conducere în general, dar și în special al sistemelor inteligente de conducere, și domeniul științelor motricității umane. Această legătură care permite o trecere fluidă a informațiilor dintr-un domeniu în altul este relativ greu de observat, deoarece se regăsește într-o manieră diferită și nu este exemplificată în mod direct.

4.6. Sumar

Conceptul de sistem se poate regăsi în multe domenii științifice acoperind o serie de fenomene cu diferite forme de manifestare. Definițiile noțiunii de sistem pot fi distincte în funcție de domeniul analizat, dar la bază reprezintă aceeași idee. Conceptul de sistem poate fi mai larg sau mai restrâns, însă între toate formele de manifestare se poate regăsi o punte comună care poate crea legături între diferitele domenii.

Astfel, se creează cadrul potrivit pentru a putea structura cercetări interdisciplinare care să genereze un flux de informație dintre un domeniu și altul. Informații din teoria sistemelor din inginerie pot fi utilizate și în domeniul activităților fizice. Corpul uman poate fi analizat prin

prisma tipurilor de sisteme descrise în domeniul ingineriei. Această posibilitate permite aplicarea unor mijloace și metode de interacționare cu corpul uman aparținând domeniului sistemelor în general, și domeniul sistemelor inteligente în particular.

Modelarea logicii umane este una din preocupările studiului inteligenței artificiale. Posibilitatea generată de existența unor metode de transpunere a logicii umane în programe de inteligență artificială, oferă cadrul pentru implementarea raționamentului de control al frecvenței cardiace în timpul antrenamentului într-un astfel de program. Utilizarea inteligenței artificiale în domeniul activităților motrice structurează cadrul optim pentru generarea de noi cunoștințe atât într-un domeniu, cât și în celălalt. Științele motricității umane pot câștiga o nouă abordare a antrenamentului sportiv, iar domeniul ingineriei sistemelor inteligente câștigă o nouă formă de aplicare practică a noțiunilor elementare.

Dintre toate tipurile de programe care folosesc conceptul de inteligență artificială, cele mai potrivite pentru studiul nostru sunt cele bazate pe logica fuzzy. Aceasta din urmă permite transpunerea în forma unui program al principiilor generatoare de decizii pentru controlul frecvenței cardiace în antrenament. Logica fuzzy oferă flexibilitate în transpunerea raționamentului uman, ceea ce permite o modelare mai precisă a programului de control al frecvenței cardiace, prin interpretarea unor concepte vagi din punct de vedere terminologic: mai tare, mai încet, crește sau scade. În cadrul unui sistem care folosește logica fuzzy, regulile sunt “inima” întregului act decizional. Stabilirea acestora se face tot prin utilizarea unor cuvinte cu semnificație vagă, astfel hotărârea de a crește sau nu intensitatea din antrenament poate fi utilizată în forma ei “fuzzy”.

Arhitectura tipurilor de sisteme existente în corpul uman prezintă asemănare ridicată cu arhitectura conceptuală a unui sistem inteligent general. Această asemănare se observă la nivelul sistemului responsabil pentru controlul motor uman. Existența, în teorie, a două tipuri de control motor, cu buclă deschisă și închisă, oferă o punte de legătură mult mai solidă dintre cele două domenii.

Partea a II-a

Cercetarea preliminară privind construirea, reglarea și validarea componentelor sistemului inteligent de conducere a dinamicii frecvenței cardiace

Capitolul 5. Proiectarea, construirea și verificarea sistemului de conducere a dinamicii frecvenței cardiace

5.1. Introducere

Brodan et al. (1970) și Hajek et al. (1980) propun modele ale frecvenței cardiace pentru evoluția acesteia în timpul exercițiilor fizice și cele pentru recuperare. Aceste modele s-au dovedit a fi puțin fiabile pentru perioade în care efortul este prelungit, prezentând insuficiențe în puterea de predicție. Scalzi et al. (2012) propun un model al dinamicii frecvenței cardiace pentru perioade lungi petrecute pe covorul rulant.

Su et al. (2007) au identificat un model de ordinul întâi pentru dinamica frecvenței cardiace. Cheng et al. (2008) reușesc să dezvolte un sistem ce poate modela dinamica frecvenței cardiace în timpul și după ce se efectuează mers pe covorul rulant. Weng et al. (2010) au folosit un model al frecvenței cardiace într-un sistem de conducere în buclă închisă care ține cont atât de viteza covorului rulant cât și de înclinația acestuia. Dezavantajul acestui model este reprezentat de rigiditatea utilizării, acesta fiind gândit pentru exercițiul prestabilit, fiind nevoie de modificări și corecturi dacă se va dori utilizarea acestui model pentru un alt tip de exercițiu.

Toate aceste modele nu sunt ideale, din punctul nostru de vedere, deoarece abordează frecvența cardiacă ca fiind un proces liniar, ale cărui valori și modificări sunt approximate în funcție de tipul exercițiului. Pe lângă acest aspect, exercițiul folosit de aceste modele a fost acela de mers, deoarece conferă modelului o posibilă variație a frecvenței cardiace mult mai predictibilă și cu o posibilitate de variație liniară. Mazenc et al. (2011) au abordat aspectul de non-liniaritate a frecvenței cardiace și au reușit să structureze un model al acesteia dar rezultatul lor nu a ținut cont de variațiile diferiților parametri, modelul obținut la final putând fi folosit pentru o singură persoană și într-un context prestabilit.

Măsurarea VFC pentru a fi utilizată în monitorizarea antrenamentului și recuperării implică analiza variației bătăi la bătaie. Prin măsurarea exactă a intervalului de timp dintre bătăile

inimii, variația detectată poate fi utilizată pentru a măsura stresul psihologic și fiziologic și oboseala asupra corpului în timpul antrenamentului.

Controlul fuzzy permite rezolvarea unor probleme dificile. Cel mai des, procesele nu pot fi descrise de modele matematice care să permită sinteza unei legi de conducere prin metode clasice. Sistemele de conducere fuzzy sunt de preferat atunci când e vorba de procese complexe sau care nu se pretează analizei/proiectării convenționale. Astfel, experiența umană în conducerea procesului se poate materializa într-o bază de reguli atașată regulatorului fuzzy (Passino & Yurkovich, 1998).

5.2. Scopul cercetării preliminare

Scopul principal al acestei cercetări este reprezentat de încercarea noastră de a valida conceptele necesare pentru construirea sistemului inteligent de conducere: controler-ul fuzzy, modelul matematic al frecvenței cardiace în timpul alergării pe covorul rulant și softul pentru determinarea intensității antrenamentului.

Urmărim ca prin această cercetare, împărțită în 3 studii care abordează fiecare dintre aspectele importante ale sistemului de conducere, să demonstrăm faptul ca un astfel de sistem de conducere a dinamicii frecvenței cardiace poate fi viabil și prezintă posibilități de implementare.

5.3. Obiectivele cercetării preliminare

1. Testarea controler-ului fuzzy proiectat de noi pentru controlul dinamicii frecvenței cardiace în contextul a două sisteme-model propuse de literatura de specialitate;
2. Identificarea modelului matematic optim al FC în contextul antrenamentelor de alergare pe covorul rulant;
3. Proiectarea și construirea softului pentru determinarea intensității antrenamentului pe baza valorilor VFC;
4. Testarea și compararea softului pentru determinarea intensității antrenamentului cu metoda manuală de analiză a VFC.

5.4. Ipotezele cercetării

Pentru această cercetare ne-am stabilit o serie de 3 ipoteze, câte una pentru fiecare dintre cele trei părți:

1. Controler-ul fuzzy proiectat de noi poate fi implementat într-un sistem inteligent de conducere pentru controlul dinamicii frecvenței cardiace într-un antrenament de alergare pe covorul rulant;
2. Folosirea analizei prin algoritmi genetici putem identifica forma optimă a modelului matematic al comportamentului frecvenței cardiace în antrenamentele de alergare pe covorul rulant;
3. Softul conceput de noi pentru determinarea intensității antrenamentului poate fi un instrument fiabil și viabil în cadrul pregătirii pe covorul rulant.

5.5. Materiale și metode

Senzorul pentru frecvența cardiacă folosit în sistem este senzorul Polar Wearlink Bluetooth care este format dintr-o cutie de captare și transmitere a semnalului și o curea de prindere în jurul toracelui. Covorul rulant folosit în sistem este modelul Kettler Boston XL. Componenta software a fost dezvoltată în programul Matlab 2008. Tot în acest program au fost rulate și simulările și testările controler-ului fuzzy.



Figura Nr. 16 - Covorul rulant Kettler Boston XL



Figura Nr. 17 – Senzorul Polar Wearlink Bluetooth

Controler-ul fuzzy pentru controlul dinamicii FC

Sistemul conceput de noi este un circuit închis. Acesta este format dintr-un senzor de frecvență cardiacă, controler-ul fuzzy rulat pe un laptop și un covor rulant. Subiectul va purta senzorul de frecvență cardiacă în timpul alergării pe covorul rulant. Valoarea frecvenței cardiace este transmisă la calculator care, în urma rulării softwareului, modifică viteza benzii. Aceasta din urmă este transmisă mai departe către bandă. Toate cele trei componente sunt conectate între ele și datele sunt transmise în timp real.

$$\dot{y}(t) = \frac{1}{p_T(u(t))} (u(t)p_K(u(t)) - y(t))$$

$$p_K(u) = c_3u^3(t) + c_2u^2(t) + c_1u(t) + c_0$$

$$p_T(u) = b_3u^3(t) + b_2u^2(t) + b_1u(t) + b_0$$

Figura Nr. 20 – Sistemul-model creat de noi pe baza informațiilor din articolul lui Su et al. (2010) pentru controlul dinamicii frecvenței cardiace

Noi am analizat rezultatele obținute de Su et al. (2010) și am încercat să modificăm modelul lor pentru a lua în calcul nonliniaritățile în timp real ce pot fi prezente în timpul activității fizice. Folosind datele înregistrate de noi, am reușit să aproximăm prin simulări repetate un sistem-model care să țină cont de comportamentul frecvenței cardiace în contextul unui antrenament și am obținut modelul de la Figura Nr. 20.

După efectuarea simulării experimentale a controler-ului fuzzy a urmat o testare reală a întregului sistem.

În cadrul acestui test a fost inclus un subiect de gen masculin cu vârsta de 32 de ani.

Din cauza faptului că această rulare a sistemului este una de probă, am decis ca antrenamentul să aibă următoarea formă:

1. alergare la valoarea FC de 100 bpm – 6 minute;
2. alergare la valoarea FC de 120 bpm – 5 minute;
3. alergare la valoarea FC de 140 bpm – 3 minute;
4. alergare la valoarea FC de 120 bpm – 3 minute;
5. alergare la valoarea FC de 100 bpm – 3 minute.

Pentru a putea evalua randamentul și performanța sistemului în cadrul testului am folosit următorii indici matematici:

1. integrala erorii absolute (IEA) – ne va oferi informații referitoare la valoarea erorii, înregistrată de sistem global, a intervalului pentru care se calculează acest indice;
2. tendința de modificare (TM) – indice calculat pentru măsurătorile noastre care reprezintă tendința frecvenței cardiace de a se apropia sau depărta de referința propusă, calculat pentru o perioadă de 50 de minute de antrenament;
3. media erorii absolute (MEA) – ne va oferi valoarea reală a erorii sistemului în funcție de datele introduse în formula pentru calcularea indicelui pentru fiecare interval analizat.

Modelul matematic optim al FC pentru alergarea pe covorul rulant

Pentru a putea identifica modelul matematic care descrie comportamentul frecvenței cardiace în timpul unui antrenament de alergare pe covorul rulant am efectuat măsurători ale frecvenței cardiace în două etape diferite.

La acest studiu au participat doi subiecți de gen masculin cu vârstele de 24 și respectiv 33 de ani.

Protocolul pentru măsurătoarea din prima etapă a fost următorul:

1. 15 minute pregătirea organismului pentru efort;
2. 7 minute deplasare la 4 km/h; 7 minute la 6 km/h; 5 minute la 8 km/h;
3. 5 minute deplasare la 10 km/h;
4. 5 minute alergare la 12 km/h;
5. 5 minute alergare la 14 km/h;

6. 15 minute revenire graduală după efort;
7. 10 minute stretching post-efort.

A doua etapă a avut următorul protocol pentru efectuarea înregistrării frecvenței cardiace:

1. 15 minute organismului pentru test;
2. 5 minute deplasare la 6 km/h; 5 minute alergare la 12 km/h;
3. 10 minute revenirea graduală după efort.

Softul pentru determinarea intensității antrenamentului

Pentru a simula și valida softul pentru determinarea intensității, a fost realizată o implementare Matlab "Analizator al intensității din antrenament" (Figura Nr. 21). Folosind aplicația rezultată, pentru fiecare dintre variabilele de intrare, operatorul are nevoie să introducă două valori: "Referința intervalului R-R", "Interval R-R înainte de sesiune", "Frecvența cardiacă de lucru de acum două sesiuni" și "Ritmul cardiac de lucru din ultima sesiune". Apăsând butonul "Calculează" se întoarce "Intensitatea recomandată pentru antrenamentul viitor", care sugerează creșterea sau scăderea (în funcție de semnul valorii procentuale) intensității pentru următoarea sesiune de antrenament și cu cât de mult.



Figura Nr. 21 – Interfața softului pentru setarea intensității antrenamentului cu denumirea "Analizator al intensității din antrenament"

Pentru testarea și validarea softului, au fost selectați 4 subiecți, de gen feminin, cu vârsta cuprinsă între 21 și 23 de ani. Pentru testare și validare, sunt necesare măsurători precise ale variabilității frecvenței cardiace și ale ritmului cardiac de lucru.

5.6. Rezultate

Validarea controler-ului fuzzy creat de noi

În Tabelul Nr. 3 este prezentată funcționarea controler-ului proiectat de noi în contextul celor două sisteme-model. În urma testelor, controler-ul nostru a fost stabil în cadrul ambelor sisteme-model pe întreaga perioadă a simulării, prezentând o deviație a FC sub limita de 5%.

Rezultatele acestui test au confirmat faptul că putem folosi controler-ul fuzzy proiectat de noi pentru a controla dinamica frecvenței cardiace pe parcursul unei întregi sesiuni de antrenament pe covorul rulant.

Tabelul Nr. 3 - Rezultatele validării sistemului

	Primul Model (nonlinear)	Al doilea Model (variabile de ordinul întâi)
<i>Deviația ritmului stabil</i>	0.4% ÷ 2.1%	0.5% ÷ 2.5%
<i>Timpul de stabilizare la creșterea FC</i>	40 ÷ 55 secunde	5 ÷ 7 secunde
<i>Timpul de stabilizare la scăderea FC</i>	28 ÷ 63 secunde	4 ÷ 9 secunde
<i>Viteza maximală a covorului rulant</i>	7.2 km/h	7.2 km/h
<i>Viteza minimală a covorului rulant</i>	2 km/h	2 km/h
<i>Sistem stabil</i>	da	da

Tabelul Nr. 4 – Valorile indicilor TM, IEA și MEA pentru datele obținute la testarea preliminară a sistemului

	TM (bpm/s)	IEA	MEA (bpm)
General	9.80	10873	12.54
T100	18.51	6533	23.58
T120	4.37	1092	5.84
T140	4.88	878	6.27
T120	7.13	1284	9.17
T100	6.79	1086	8.83

Legenda abrevierilor din tabelul Nr. 4:

TM – tendința de modificare a erorii frecvenței cardiace

IEA – integrala erorii absolute

MEA – media erorii absolute

General – Întregul antrenament

T100 – Treapta din antrenament cu FC de 100 bpm

T120 – Treapta din antrenament cu FC de 120 bpm

T140 – Treapta din antrenament cu FC de 140 bpm
T120 – Treapta din antrenament cu FC de 120 bpm
T100 – Treapta din antrenament cu FC de 100 bpm

În Tabelul Nr. 4 sunt prezentate valorile indicilor TM, IEA și MEA care ne oferă o imagine a performanței sistemului în timpul antrenamentului de test. Indicele MEA reprezintă limita sistemului în ceea ce privește menținerea FC la nivelul referinței. Valoarea acestui indice pentru întregul antrenament înregistrat este de 12.54 bpm, care este mai mare decât limita de 10 bpm pe care ne-am propus-o sistemului. Depășirea limitei se explică prin valoarea foarte mare a indicelui MEA pentru prima treaptă a antrenamentului, la care subiectul a trebuit să alerge la o FC de 100 bpm. Cauzele pot fi multiple dar această descoperire ne-a arătat că trebuie ajutat sistemul pentru a putea controla FC la valori mici ale referinței care se regăsesc în partea de început a unui antrenament.

În cazul celorlalte trepte de antrenament, 120 bpm, 140 bpm, 120 bpm și 100 bpm, sistemul se comportă conform așteptărilor cu valori ale indicelui MEA între 9.17 și 5.84.

Tendința de modificare (TM) reprezintă sensibilitatea sistemului cu privire la modificările pe care le induce frecvenței cardiace. Acest indice este o viteză cuantificată în bpm/s. Faptul că acest indice are o valoare de 9.80 bpm/s pentru întregul antrenament înregistrat înseamnă că sistemul poate modifica FC în timpul antrenamentului cu o rapiditate de 9.8 bătăi pe minut. Ca și în cazul indicelui MEA, și aici se observă că începutul antrenamentului este excepția cu o valoare foarte mare. Totodată, în cazul celorlalte părți ale înregistrării, TM devine mic, la o valoare de sub 7.13 bpm/s care sugerează că sistemul este optim conceput pentru controlul dinamicii FC în timpul alergării pe covorul rulant.

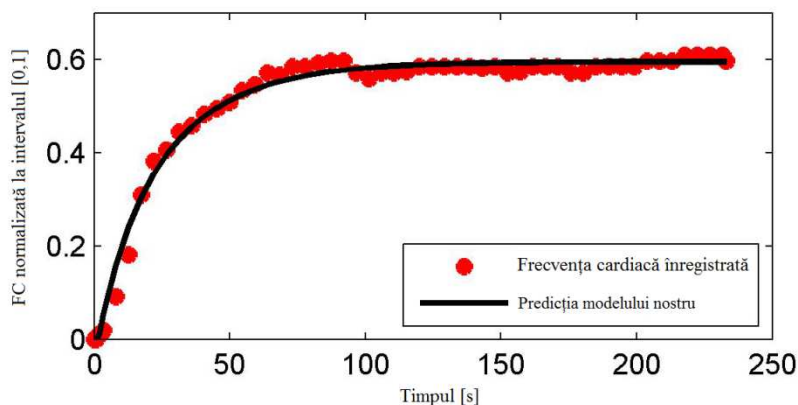
Toți cei trei indici calculați converg către aceeași concluzie: sistemul execută controlul dinamicii FC în contextul unor frecvențe cardiace de peste 120 bpm în timpul alergării pe covorul rulant, dar are probleme la partea de început a antrenamentului. Aspect care ne confirmă reușita creării unui controler fuzzy optim și ne întărește rezultatul simulărilor în contextul unor sisteme-model.

Determinarea modelului matematic optim al FC pentru alergarea pe covorul rulant

$$H(s) = K \cdot \frac{(T_1s + 1)}{(T_2s + 1)(T_3s + 1)}$$

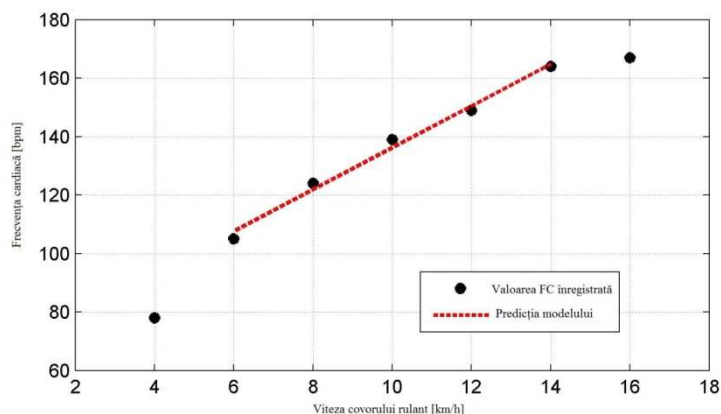
Figura Nr. 23 – Modelul dezvoltat de noi care descrie comportamentul FC în cadrul antrenamentului de alergare pe covorul rulant

După analiza acestui model matematic am reușit să identificăm faptul că acesta este capabil să evidențieze diferențe în ceea ce privește: nivelul pregătirii fizice a doi subiecți diferiți, impactul pregătirii aerobe sau anaerobe asupra frecvenței cardiace și mici variații ale frecvenței cardiace în antrenamente diferite.



Graficul Nr. 11 – Predicția modelului matematic propus noi și valorile frecvenței cardiace înregistrate de noi

Modelul propus de noi a fost supus aceleiași simulări ca în cazul celorlate modele. Modelul nostru se comportă asemănător cu cel propus de Su et al. (2010) având o performanță bună atât în partea de mers sau alergare la viteze mici, cât și în partea de alergare la viteze mai mari.



Graficul Nr. 12 – Predicția modelului nostru comparativ cu valorile FC înregistrate în raport cu viteza covorului rulant

În Graficul Nr. 12 este prezentată o simulare a modelului nostru. Valorile frecvenței cardiace în raport cu viteza covorului rulant prezintă o liniaritate în timpul antrenamentului de alergare care este observabilă și în cazul predicției oferite de model.

Validarea softului pentru determinarea intensității antrenamentului de alergare pe covorul rulant

Tabelul Nr. 6 – Evoluția intervalului R-R și referința intervalului R-R

	A	B	C	D
Referința înaintea zilei 11	6.01	5.19	5.87	5.14
Intervalul R-R ziua 11	6.44	5.21	6.12	5.14
Referința înaintea zilei 12	6.03	5.17	5.88	5.13
Intervalul R-R ziua 12	6.39	5.30	5.40	5.31
Referința înaintea zilei 13	6.05	5.17	5.75	5.14
Intervalul R-R ziua 13	6.50	5.19	5.80	5.27

Notă tabelul Nr. 6:

Intervalul R-R = intervalul de timp dintre fiecare vârf al băților inimii

Referința intervalului R-R = diferența dintre media intervalului și abaterea standard a acesteia

Așa cum se poate observa în Tabelul Nr. 6, subiecții A și B au avut o creștere treptată a ritmului cardiac de lucru cu scăderi mici și puține, în timp ce ceilalți doi subiecți aveau multe variații relativ mari. Necesitatea de a controla în mod obiectiv variația ritmului cardiac de lucru în timpul unui program de antrenament lung pe parcursul a mai multe luni, este fundamental pentru menținerea nivelului de oboseală sub control.

Această situație poate fi observată și în Tabelul Nr. 7, care afișează valoarea frecvenței cardiace de lucru. Aici se poate observa că prin utilizarea aplicației noastre nivelul de oboseală pentru cei doi subiecți este ținut sub control și la o valoare individuală mai mică, permițând o pregătire mai eficientă. Este nevoie de un instrument obiectiv care să poată oferi în mod viabil o interpretare a variabilității frecvenței cardiace. Datorită faptului că prin utilizarea aplicației noastre am reușit să controlăm nivelurile de oboseală prin ajustarea constantă cu un anumit procent din încărcătura de lucru, am dezvoltat un instrument ușor de folosit atât pentru sportivi profesioniști, cât și pentru cei amatori.

Pe de altă parte, cei doi subiecți pentru care s-a folosit interpretarea subiectivă a VFC au prezentat un nivel de oboseală aproape la limită sau care a variat considerabil de la o zi la alta.

Tabelul Nr. 7- Frecvența cardiacă de lucru pentru toți subiecții pe parcursul ultimelor 4 zile

	A	B	C	D
Ziua 11	120	120	130	122
Ziua 12	132	124	141	123
Ziua 13	150	136	129	139
Ziua 14	145	140	134	145

5.7. Discuții

În concepția clasică, intensitatea efortului în alergare este proiectată în valoarea frecvenței cardiace. Valoarea din antrenament a frecvenței cardiace stabilită anterior este privită ca fiind frecvența cardiacă de lucru, cu alte cuvinte nivelul de intensitate propus pentru antrenamentul respectiv. Frecvența cardiacă în orice punct al antrenamentului este intensitatea curentă a efortului.

Problema apare la definirea în practică a următoarelor elemente: frecvența cardiacă de referință și viteza covorului rulant.

În concepția noastră, frecvența cardiacă de referință reprezintă valoarea la care se dorește menținerea frecvenței cardiace pe parcursul antrenamentului. Aceasta este de fapt transpunerea frecvenței cardiace de lucru în programul construit de noi. Setarea valorii frecvenței cardiace de referință reprezintă modul prin care programul înțelege la ce valoare de lucru a frecvenței cardiace se dorește efectuarea activității.

În ceea ce privește viteza covorului rulant, definirea conceptului este oarecum dificilă. Nu este nici intensitatea de lucru și nici intensitatea curentă. Aceste două noțiuni fiind deja definite folosind frecvența cardiacă. Viteza covorului rulant, și ca urmare viteza de alergare a subiectului, este elementul generator de intensitate, însă nu este intensitatea în sine. Fluctuația valorilor acesteia generează o modificare în frecvența cardiacă. Astfel, am introdus termenul de *magnitudine a efortului*.

Magnitudinea efortului reprezintă nivelul consumului de energie a subiectului în momentul efectuării activității fizice, în cazul nostru de alergare pe covorul rulant. Consumul ridicat de energie este corespondent unei magnitudini mărite, cuantificată în valoarea numerică a vitezei covorului rulant. Astfel, modificarea magnitudinii permite generarea unui intensități mărite prin nivelul amplitudinii consumului de energie. Trebuie remarcat că, în contextul acestei definiții, pentru subiecți diferiți la valori identice de intensitate pot corespunde valori diferite de magnitudine.

Interfața sistemului de conducere a dinamicii frecvenței cardiace este prezentat în Figura Nr. 26. Aceasta are posibilitatea să afișeze grafic valoarea frecvenței cardiace în timpul antrenamentului, precum și valorile numerice pentru principalele variabile: pulsul, referința FC, viteza curentă a covorului rulant și cea anterioară, și incrementul modificării vitezei covorului rulant.

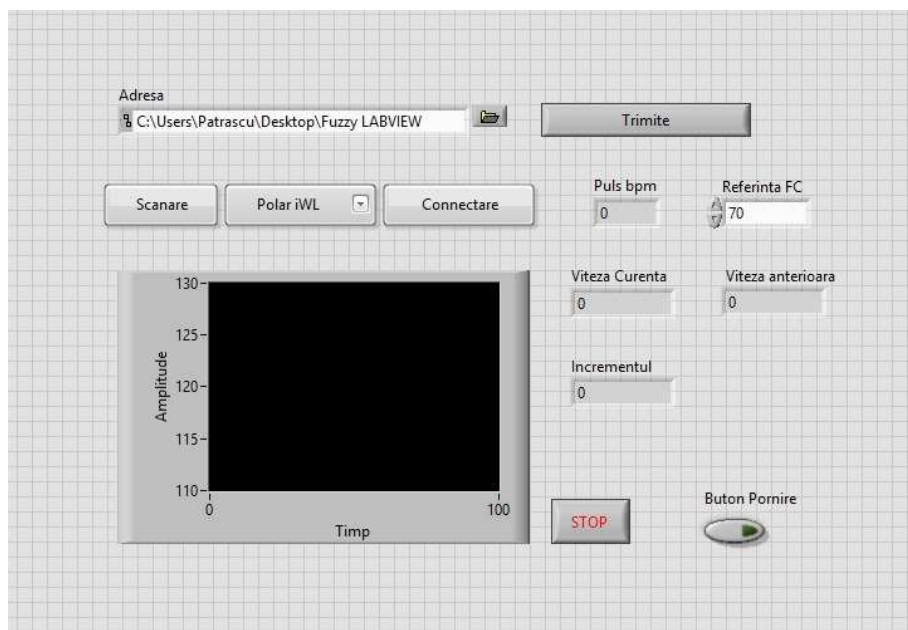
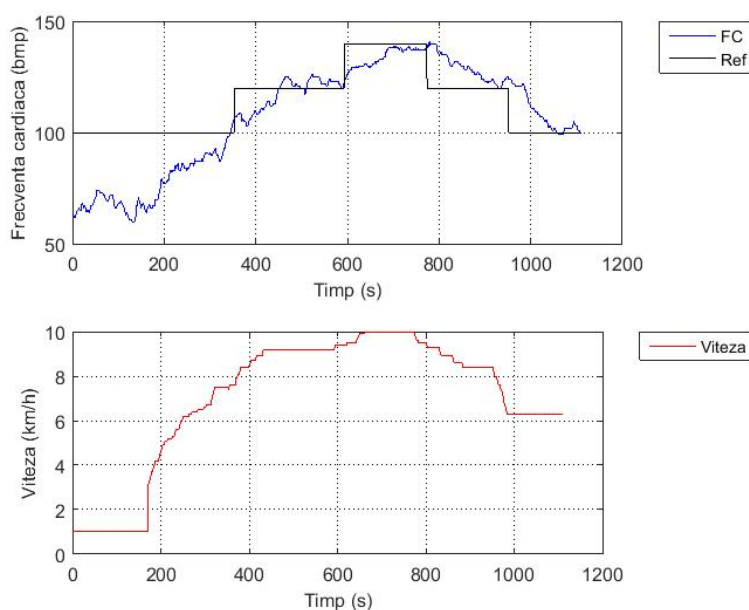


Figura Nr. 26 – Interfața sistemului de conducere a dinamicii frecvenței cardiace

În Graficul Nr. 13 sunt prezentate evoluțiile frecvenței cardiace și a vitezei în timpul testului preliminar al sistemului. Modul slab în care sistemul controlează dinamica frecvenței cardiace în timpul perioadei de început a antrenamentului se regăsește tot în acest grafic. Se poate observa cum viteza covorului rulant acompaniază creșterea sau scăderea FC pe tot parcursul înregistrării. Viteza maximă atinsă de subiect a fost de 10 km/h din partea cu intensitatea de 140 bpm. În contextul acestui test preliminar al sistemului se poate identifica totuși o fluctuație permanentă pe tot parcursul înregistrării. Această instabilitate nu este un factor determinant negativ, ci ne-a arătat punctele în care trebuie ajustat sistemul pentru a diminua această variație.



Graficul Nr. 13 – Frecvența cardiacă (FC), Referința (Ref) și Viteza înregistrată în testul preliminar al sistemului de conducere a dinamicii frecvenței cardiace pentru toate treptele de intensitate alese

Un alt aspect pe care l-am observat este că, pe parcursul înregistrării, FC este adusă la nivelul dorit spre finalul treptei de intensitate. Din acest motiv am efectuat o serie de modificări în sistem pentru a-l putea optimiza și în cazul unor situații în care se cere o treaptă mai scurtă ca timp.

5.8. Concluzii

1. Primul studiu al acestei cercetări s-a concentrat asupra identificării soluției optime pentru un sistem de conducere nonliniar a dinamicii frecvenței cardiace în antrenamentele de alergare pe covorul rulant. Rezultatele analizei au arătat că controler-ul proiectat de noi și-a menținut performanța în limitele ideale, astfel oferindu-ne încrederea că îl vom putea folosi pentru controlul unui antrenament în condiții normale;

2. Metoda de analiză folosind algoritmi genetici ne-a oferit o modalitate de identificare și calculare a unui model matematic viabil a comportamentului frecvenței cardiace în timpul antrenamentelor de alergare pe covorul rulant;

3. Aplicația noastră pentru determinarea intensității antrenamentului utilizează optim informațiile din literatura de specialitate referitoare la folosirea variabilității frecvenței cardiace. Acest instrument permite creșterea sau scăderea graduală a intensității pe o perioadă lungă de pregătire. Integrarea informațiilor din antrenamentele anterioare permite ajustarea mai bună a procentului de modificare a intensității pentru următorul antrenament. Rezultatul acestui studiu ne-a deschis calea către implementarea acestui soft într-o aplicație pe dispozitivele mobile smart;

4. Modul în care sistemul se adaptează procesului de alergare oferă o soluție dinamică pentru o problemă non-liniară. Prin integrarea elementelor de fiziologie și antrenament aerob sistemul permite o adaptare internă la modul în care subiectul reacționează. Sistemul oferă o metodă de control a dinamicii frecvenței cardiace ușor de utilizat. Controlul frecvenței cardiace se realizează ținând cont de modul nonliniar în care corpul uman reacționează în timpul alergării;

5. S-a reușit construirea unui sistem inteligent care permite integrarea raționalizării umane din punct de vedere metodologic în controlul frecvenței cardiace;

6. Am propus introducerea unui concept nou în ceea ce privește antrenamentele aerobe de alergare pe covorul rulant – magnitudinea efortului;

7. Construirea și implementarea sistemului au acoperit o arie a literaturii de specialitate rămasă relativ nestrăbătută: controlul dinamicii frecvenței cardiace folosind regulatorul fuzzy în timp real și în timpul alergării.

Partea a III-a

Cercetări personale privind implementarea sistemului de control a dinamicii frecvenței cardiace în antrenament pe covor rulant

Capitolul 6. Studiu I. Funcționarea sistemului de control a dinamicii frecvenței cardiace în condiții de antrenament pe covorul rulant

6.1. Introducere

Dat fiind faptul că ideea aplicării controlului automat al exercițiilor fizice prin intermediul unui sistem inteligent de conducere este inovatoare, valoarea teoretică este atinsă la un nivel ridicat. Totodată, datorită complexității care apare prin încercarea de a utiliza o aplicație ce folosește inteligența artificială (programarea utilizând logica fuzzy) într-un domeniu ce îșidesfășoară activitatea într-un ocean de factori variabili, mulți dintre aceștia având impact asupra eficienței exercițiului folosit, putem preconiza că posibilitatea publicării rezultatelor va fi optimă, astfel importanța și contribuțiile aduse domeniului vor fi ridicate.

Valoarea practică a acestei teme este constituită din aspectele pe care cercetarea le oferă în ceea ce privește: soluția aleasă, rezultatele și inovarea oferită domeniului. Această nouă abordare pe care cercetarea o va aduce în ceea ce privește exercițiul fizic, este de fapt soluția aleasă pentru temă. Inovarea este cea care primează în ceea ce privește valoarea practică a temei, dat fiind faptul că se încearcă eliminarea factorului decizional uman în procesul de conducere, obținând-se astfel o modalitate obiectivă de control al efortului în timpul antrenamentului, crescând astfel eficiența exercițiului folosit.

6.2. Scop

Scopul cercetării noastre își regăsește necesitatea din ipoteza propusă. Acesta se concretizează în demonstrarea faptului că sistemele automate de conducere pot fi folosite în controlul dinamicii frecvenței cardiace în timpul antrenamentelor aerobe pe un covor rulant. Pentru a putea demonstra acest lucru trebuie abordate două aspecte ale cercetării:

1. robustețea sistemului
2. fiabilitatea din punct de vedere al fiziologiei efortului

6.3. Obiective

Pentru a putea îndeplini scopurile propuse anterior și, totodată, testarea ipotezei, ne-am propus o serie de obiective de îndeplinit:

1. înregistrarea frecvenței cardiace în timpul unui antrenament aerob folosind sistemul
2. calcularea indicatorului privind eroarea sistemului
3. calcularea randamentului de funcționare a sistemului
4. identificarea diferențelor dintre categoriile de subiecți
5. identificarea adaptabilității sistemului

6.4. Materiale și metode

Dispozitivele și protocoalele utilizate în acest studiu au fost cele descrise și testate în cercetgarea preliminară.

Subiecții

În acest studiu au participat un număr de 13 subiecți. Dintre aceștia 7 au fost de gen feminin și 6 de gen masculin. Intervalul de vârstă a fost cuprins între 20 și 37 de ani.

Subiecții au fost aleși pentru a acoperi trei criterii:

1. criterial vârstă – sub și peste 30 de ani;
2. criteriul pregătire fizică – antrenați și neantrenați;
3. criterial gen – bărbați și femei.

6.5. Rezultate

Pe parcursul ședinței de antrenament s-au înregistrat trei variabile principale: frecvența cardiacă a subiectului, referința la care se dorea ca acesta să alerge și viteza covorului rulant. Aceste înregistrări s-au efectuat în timp real o dată cu funcționarea sistemului, având un pas de salvare de aproximativ 0.3 secunde.

După înregistrarea valorilor variabilelor urmărite acestea au fost folosite pentru a calcula indicii matematici menționați anterior: TM, IEA și MEA.

Tabelul Nr. 8 – Mediile valorilor indicilor pentru întregul antrenament și pentru fiecare treaptă a acestuia

Trepte	Indici		
	TM (bpm/s)	MEA (bpm)	IEA
Global	5.51±1.04	7.98±1.5	16529.62±3145.24
T100	8.07±4.4	9.15±4.6	1451.77±793.37
T110	4.48±3.15	5.85±3.7	1074.23±756.29
T120	3.19±1.15	4.04±1.39	573.38±207.86
T130	2.27±0.4	2.92±0.5	1362.31±245.27
T140	2.42±0.65	3.19±0.83	1449.54±391.30
T150	2.75±1.59	4.47±2.37	1652.54±955.23
Revenire	15.13±4.85	29.10±8.65	9077.31±2914.96

Legenda abrevierilor din tabelul Nr. 8:

TM – tendința de modificare a erorii frecvenței cardiace

IEA – integrala erorii absolute

MEA – media erorii absolute

General – Întregul antrenament

T100 – Treapta din antrenament cu FC de 100 bpm

T110 – Treapta din antrenament cu FC de 110 bpm

T120 – Treapta din antrenament cu FC de 120 bpm

T130 – Treapta din antrenament cu FC de 130 bpm

T140 – Treapta din antrenament cu FC de 140 bpm

T150 – Treapta din antrenament cu FC de 150 bpm

Revenire – Treapta de la sfârșitul antrenamentului

Rezultatele finale ne arată că sistemul are o eroare de 7,98 bpm pentru controlul treptelor frecvenței cardiace pe toată perioada unui antrenament aerob. În partea de început a antrenamentului (T100, T110 și T120) eroarea sistemului este de 9,15 bpm, 5,85 bpm și 4.04 bpm. Partea de conținut a antrenamentului, adică pentru treptele de 130, 140 și 150 bpm, eroarea sistemului este de 2,92 bpm, 4,19 bpm și 4,47 bpm. Ultima parte din antrenament, revenirea, prezintă o eroare de 29,10 bpm.

În ceea ce privește robustețea și randamentul sistemului, indicele TM calculat pe toată durata antrenamentului ne oferă o tendință a frecvenței cardiace de 5.51 bpm/s pentru un antrenament de 50 de minute. Toate treptele antrenamentului, până la partea de revenire, prezintă un indice TM cuprins între 2.27 și 8.07. Ultima parte a antrenamentului are o tendință a frecvenței cardiace de 15.13 bpm/s.

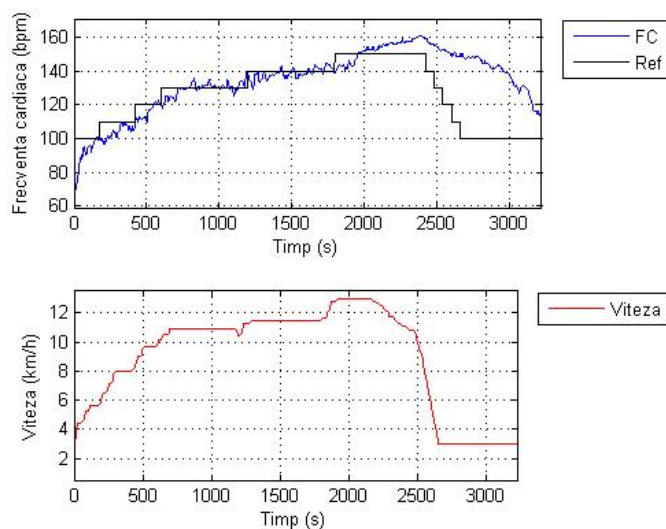
6.6. Discuții

Interpretarea indicilor

Primul indice despre care merită discutat este MEA – Global. Acesta reprezintă eroarea sistemului pentru întregul antrenament. Valoarea de 7,98 bpm a acestuia indică faptul că la un antrenament format din 7 trepte diferite de frecvență cardiacă sistemul poate să controleze frecvența cardiacă pe parcursul întregii sesiuni de pregătire cu o precizie de 7,98 bpm. Această valoare se încadrează în limita de 10 bpm inerentă sistemului pentru controlul dinamicii efortului pe parcursul unei sesiuni de antrenament. Din punctul de vedere al modului în care a fost construit sistemul, valoarea minimă admisă între treptele antrenamentului trebuie să fie de 10 bpm. Așadar, sistemul s-a dovedit a fi precis în ceea ce privește controlul treptelor antrenamentului, oferind posibilitatea unei diferențe minime între trepte de doar 7,98 bpm.

Eroarea sistemului scade sub limita de 6 bpm pe care acesta o are imediat ce subiectul începe să alerge sau să se deplaseze cu o viteză mai mare decât cea a mersului lejer. Se poate observa că încă din această parte de început a antrenamentului eroarea sistemului ajunge cu 2 unități sub cea propusă prin construcție.

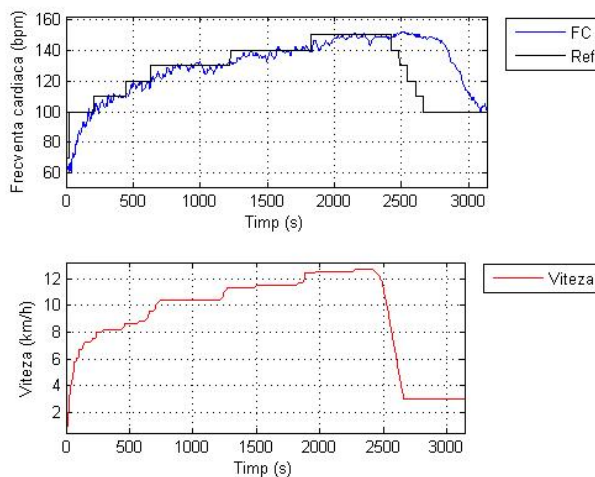
Analiza graficelor



Graficul Nr. 28 – Valorile FC și a vitezei înregistrate pentru un subiect feminin antrenat de peste 30 de ani – reacție ideală a organismului

Graficul Nr. 28 prezintă o reacție ideală a sistemului. Controlul dinamicii treptelor antrenamentului este vizibil prin panta de creștere a vitezei covorului rulant, iar controlul

dinamicii frecvenței cardiace se concretizează în păstrarea valorilor frecvenței cardiace aproape de linia de referință. Lipsa unor elemente perturbatoare permite observarea clară a modului în care sistemul menține controlul dinamicii frecvenței cardiace prin modificarea vitezei covorului rulant pentru a duce frecvența cardiacă la valoarea dorită.



Graficul Nr. 29 – Valorile FC și a vitezei înregistrate pentru un subiect masculin antrenat de peste 30 de ani – reacție ideală a organismului

Graficul Nr. 29 reprezintă modul în care sistemul a controlat o ședință de antrenament pentru un subiect masculin antrenat cu vârsta peste 30 de ani. Și în acest caz, lipsa factorilor perturbatori permite vizualizarea unei reacții optime a sistemului.

Datorită specificului sistemului, adică abilitatea de a aștepta o reacție a organismului după orice modificare a vitezei, este permis un control mai fin asupra dinamicii frecvenței cardiace. Flexibilitatea stabilirii vitezei covorului rulant permite renunțarea la stabilirea off-line a intensității de lucru deoarece la o anumită valoare a acesteia magnitudinea efortului poate fi modificată pentru a menține nivelul dorit.

6.8. Concluzii

Analiza datelor culese în urma desfășurării studiului au evidențiat o serie de concluzii care delimitează funcționalitatea sistemului, în cadrul unui antrenament normal. Studiul a confirmat așteptările noastre și ipoteza studiului. Cercetarea desfășurată a evidențiat o serie de aspecte privind adaptabilitatea sistemului în condiții neașteptate de antrenament. Din studiul desfășurat se pot desprinde următoarele:

1. Eroarea medie a sistemului pentru controlul frecvenței cardiace pe parcursul întregului antrenament indiferent de numărul perioadelor de intensitate diferită este de 7,98 bpm. Astfel, sistemul este capabil să controleze dinamica frecvenței cardiace pentru trepte cu diferență minimă de 7,89 bpm. Acuratețea sistemului se situează astfel sub valoarea de 10 bpm dintre diferite trepte ale antrenamentului conform cu limita proiectată inițial;
2. Sistemul poate controla frecvența cardiacă în ceea ce privește partea de conținut a antrenamentului cu o precizie cuprinsă între 2 și 5 bpm pentru valori ale referinței frecvenței cardiace între 120 și 150 bpm. Partea de început a antrenamentului, care nu presupune întotdeauna ca fiind formată din alergare, are o eroare medie de 9 bpm;
3. Sistemul se poate adapta la alți factori decât cei strict legați de aspectul fiziologic: tehnica de alergare sau deplasare;
4. Sistemul prezintă o adaptabilitate în ceea ce privește unele neregularități ale sistemului respirator pe parcursul antrenamentului;
5. Flexibilitatea stabilirii vitezei covorului rulant permite renunțarea la stabilirea off-line a intensității de lucru deoarece la o anumită valoare a acesteia magnitudinea efortului poate fi modificată pentru a menține nivelul dorit;
6. Sistemul prezintă abilitatea de a se adapta pe variațiile individuale ale frecvenței cardiace a subiecților prin modificarea atât a valorii magnitudinii efortului direct în momentul necesar, cât și creșterea ulterioară corespundență cu nevoile situației;
7. Tipul respirației este un factor pentru care sistemul prezintă o abilitate de adaptabilitate inteligentă în timpul antrenamentului;
8. Sistemul poate controla un început de antrenament diferențiat pentru subiectul antrenat și cel neantrenat. Sistemul își îndeplinește scopul pentru această treaptă: introducerea subiectului în efort și controlarea frecvenței cardiace prin aducerea ei la valoarea dorită.

Capitolul 7. Studiu II. Aplicația MOTION-AE pentru determinarea intensității antrenamentului de alergare pe covorul rulant

7.1. Introducere

MOTION-AE (Figura Nr. 27) a fost conceput cu intenția de a putea determina intensitatea antrenamentului într-un mod off-line. Aceasta combină câteva avantaje ale dispozitivelor stand-alone cu avantajele telefoanelor smartphone, dar nu este o soluție hibridă. Datele necesare aplicației pot fi înregistrate cu orice sistem purtător și deci datele utilizate pentru a determina nivelul intensității antrenamentului următor sunt corecte. Aplicația de luare a deciziilor este independentă de sistemul portabil, în sensul că utilizatorii pot înregistra datele de instruire și apoi le pot introduce în aplicație. Dispozitivul portabil nu trebuie să fie conectat cu smartphone-ul și utilizatorii își pot lăsa smartphone-ul acasă în timpul antrenamentului.

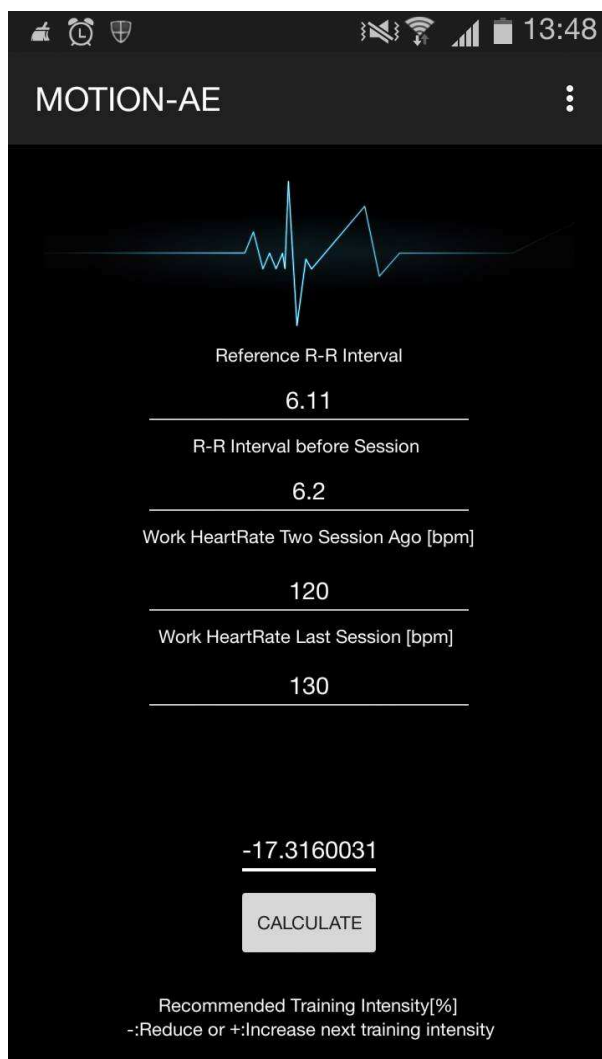


Figura Nr. 27 – Interfața aplicației pe dispozitivele mobile Motion-AE

Interfața prin care utilizatorul poate folosi aplicația Motion-AE este ilustrată în Figura Nr. 27. Prin intermediul acesteia utilizatorul poate introduce valorile pentru referința intervalului R-R din ziua precedentă și pentru ziua curentă. Pe lângă acestea se vor introduce și valorile frecvenței cardiace cu care s-au efectuat ultimele două antrenamente. Folosind aceste date aplicația calculează procentul cu care ar trebui modificată intensitatea de lucru a următorului antrenament. Valorile pozitive ale propunerii reprezintă creșteri procentuale, iar valorile negative indică necesitatea scăderii intensității.

Această interfață este similară în structură cu cea prezentată în cercetarea preliminară, însă cu o formă diferită determinată de dispozitivul pentru care a fost creată.

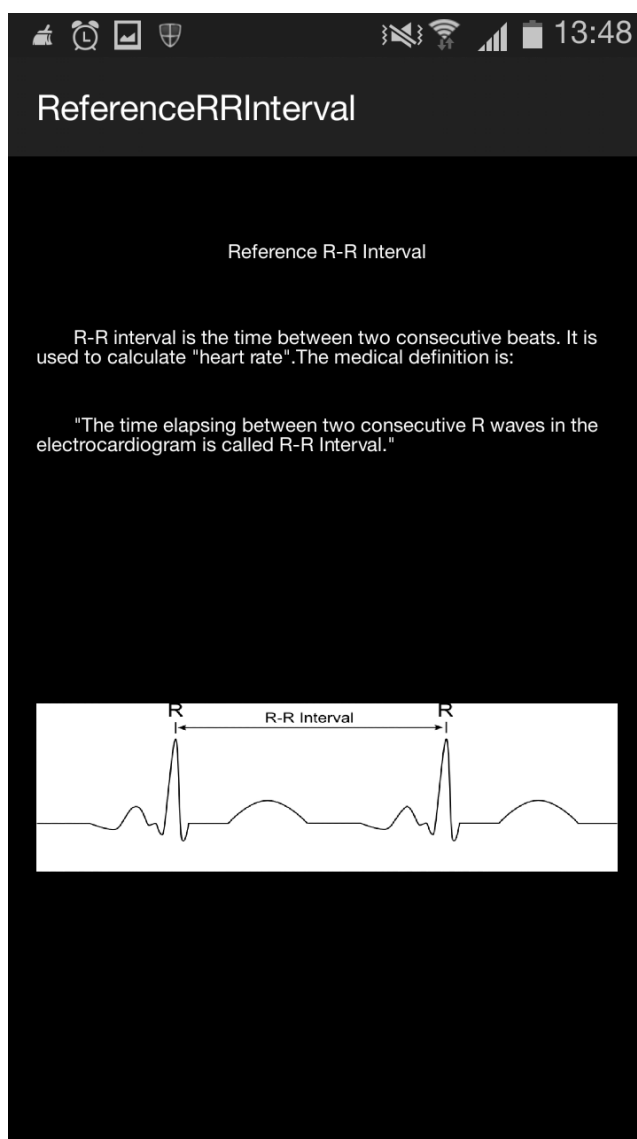


Figura Nr. 28 – Fereastra aplicației Motion-AE în care este explicat intervalul R-R

Informații legate de intervalul R-R sunt oferite utilizatorului într-o fereastră din meniul aplicației (Figura Nr. 28). În Figura Nr. 29 este prezentată o altă fereastră în care este explicată semnificația frecvenței cardiace și o serie de informații legate de folosirea acesteia.

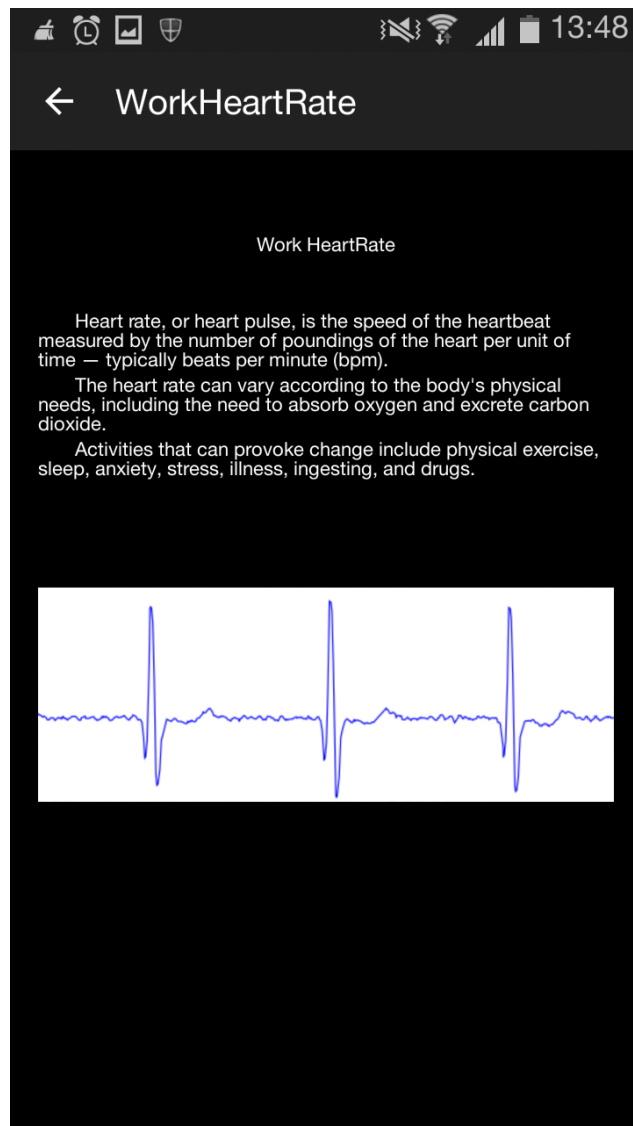


Figura Nr. 29 – Ferestra aplicației Motion-AE în care este explicată frecvența cardiacă cu care se lucrează în antrenament

7.2. Scopul cercetării

Scopul acestei cercetări este de a demonstra faptul că aplicația pentru dispozitivele mobile cu sistem de operare Android construită de noi respectă limitele optime de funcționare demonstrate în cercetarea preliminară.

Demonstrarea posibilității transpunerii softului dezvoltat în cercetarea preliminară într-o aplicație pentru un dispozitiv smart a reprezentat pentru noi un al doilea scop al acestui studiu.

7.3. Obiectivul cercetării

Utilizând aplicația MOTION-AE prezentată în această lucrare ne-am propus să demonstrăm că aceasta poate controla intensitatea în aceeași măsură ca softul din cercetarea preliminară.

7.4. Materiale și metode

Această aplicație are la bază sa structura softului dezvoltat în cercetarea preliminară. Datorită asemănării scheletului celor două aplicații, pentru a demonstra că MOTION-AE funcționează conform așteptărilor am comparat rezultatul oferit de aceasta cu rezultatul oferit de softul preliminar.

Pentru analiza situațiilor de utilizare a aplicației Motion-AE s-au utilizat datele înregistrate a patru subiecți, de gen feminin, cu vârsta cuprinsă între 21 și 23 de ani. Primul dintre acești subiecți a fost o persoană antrenată, sportivă de performanță. Al doilea subiect a fost o persoană antrenată fără a fi și sportiv de performanță. Ceilalți doi subiecți sunt persoane neantrenate.

7.5. Rezultate și discuții

Tabelul Nr. 14 – Intensitățile calculate de cele două aplicații: cea preliminară și MOTION-AE

Referința intervalului R-R	Referința intervalului R-R înainte de antrenament	FC de lucru cu un antrenament în urmă [bpm]	FC de lucru cu două antrenamente în urmă[bpm]	Intensitatea calculată de softul preliminar [%]	Intensitatea calculată de MOTION-AE [%]	Diferență [%]
6.01	6.66	120	140	-24.6	-24.58	0.02
6.01	6.66	120	170	-25.5	-25.31	0.19
6.01	6.66	120	100	-10.5	-10.49	0.01
6.01	6.66	120	80	-10.2	-10.35	0.15
6.01	6.01	120	132	0.3	0.06	0.24
6.01	6.3	120	132	-17.4	-17.45	0.05
6.01	5.7	120	132	8.1	8.32	0.21

Conform Tabelului Nr. 14, diferența dintre intensitatea oferită de aplicația MOTION-AE, prin comparație cu softul preliminar, este între 0.02% și 0.24%. Aceste valori sunt neglijabile pentru rezultatul final.

Pe baza faptului că aplicația Motion-AE nu prezintă diferențe mari de calcul comparativ cu softul dezvoltat anterior, putem analiza cinci situații în care aplicația Motion-AE poate fi utilizată. Aceste cinci situații sunt: frecvența cardiacă din antrenament rămâne neschimbată în zile succesive, frecvența cardiacă din antrenament crește cu 20 bpm în zile succesive, frecvența cardiacă din antrenament crește cu 30 bpm în zile succesive, frecvența cardiacă din antrenament scade cu 20 bpm în zile succesive, frecvența cardiacă din antrenament scade cu 30 bpm în zile succesive.

7.6. Concluzii

1. Aplicația mobilă MOTION-AE îmbunătățește performanța antrenamentului aerobic, oferind un mod gradual și controlat de stabilire a intensității antrenamentului, comparativ cu interpretarea clasică a variabilității ritmului cardiac pentru stabilirea intensității antrenamentului;

2. Aplicația MOTION-AE urmărește sesiunile anterioare de exerciții și performanțele realizate de subiect, oferind formatorilor și antrenorilor un instrument obiectiv care poate fi utilizat în programele de formare aerobă;

3. Aplicația MOTION-AE deschide calea către o implementare într-un sistem de conducere mai mare pentru antrenamentul de anduranță aerobă, oferind puncte de referință pentru sistemele de conducere al ritmului cardiac în stabilirea sesiunilor de antrenament specializate. Prin implementarea unui instrument de luare a deciziilor fuzzy, aplicația asigură astfel că incertitudinile în măsurători și variația parametrilor de intrare datorită caracteristicilor fizice ale indivizilor sunt luați în considerare atunci când se calculează intensitatea optimă pentru următoarea sesiune de antrenament;

4. Datorită portabilității sale ca aplicație mobilă și a costului său scăzut de utilizare, MOTION-AE poate indica cu succes intensități de instruire chiar și pentru utilizatorii de zi cu zi care au nevoie de ajutor în îmbunătățirea antrenamentelor lor aerobe.

Concluzii generale

1. Cercetarea noastră a confirmat posibilitatea de adaptare și modelare a cunoștințelor din teoria sistemelor de conducere inteligente în domeniul științelor motricității umane prin identificarea elementelor comune celor două domenii;

2. Aplicarea cunoștințelor comune celor două domenii a rezultat dezvoltarea unui sistem inteligent de conducere care permite controlul dinamicii frecvenței cardiace în cadrul unui antrenament de alergare pe covorul rulant. Intervalul de precizie obținut pentru sistemul a fost de +/- 6 bpm, această valoare fiind mult mai mică decât valoarea proiectată inițial pentru sistem +/- 10 bpm;

3. Totodată, am reușit prin sistemul dezvoltat să obținem un mijloc obiectiv de conducere a unui proces nonliniar prin definiție: corpul uman. Caracterul adaptativ al sistemului permite o flexibilitate în ceea ce privește depășirea evenimentelor neașteptate din timpul unui antrenament de alergare pe covorul rulant: împiedicare, tuse, schimbarea ritmului de alergare sau a fuleului;

4. Pe lângă sistemul inteligent de conducere am reușit să creăm o aplicație, MOTION-AE, pentru dispozitive mobile (telefoane, tablete) care permite stabilirea intensității antrenamentului folosind variabilitatea frecvenței cardiace într-un mod inovator. Această aplicație asigură evitarea pe cât posibil a atingerii pragului de oboseală într-o perioadă de pregătire fizică, dar permite atingerea potențialului maxim prin oferirea valorii optime a intensității pentru sesiunea următoare de antrenament.

Bibliografie selectivă

- Alaqtash, M., Yu, H., Brower, R., Abdelgawad, A., & Sarkodie-Gyan, T. (2011). Application of wearable sensors for human gait analysis using fuzzy computational algorithm. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 1018–1025.
- Bompa, T. (2002). *Periodizarea: teoria si metodologia antrenamentului*. Bucuresti: Ex Ponto.
- Brodan, V., Hajek, M., & Kuhn, E. (1970). An analog model of pulse rate during physical load and recovery. *Physiologia Bohemoslovaca*, 189-198.
- Cârstea, G. (2000). *Teoria și Metodica Educației Fizice și Sportului*. București: AN-DA.
- Cheng, T., Savkin, A., Celler, B., Su, S., & Wang, L. (2008). Nonlinear modelling and control of human heart rate response during exercise with various work load intensities. *Biomedical Engineering*, 2499-2508.
- Cîrtoaje, S. S. (2013). *Teoria sistemelor automate*. Ploiești: UPG.
- Dragnea, A. (1996). *Antrenamentul sportiv*. Bucuresti: Didactica si Pedagogica.
- Feher, J. (2017). *Quantitative Human Physiology (Second Edition)*. Academic Press. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800883-6.00030-6>
- Fu, Q., & Levine, B. D. (2013). Chapter 13 - Exercise and the autonomic nervous system. *Handbook of Clinical Neurology*, 117, pg. 147-160.
- Hajek, M., Potucek, J., & Brodan, V. (1980). Mathematical model of heart rate regulation during exercise. *Automatica*, 191-195.
- Jacobs, R. (1997). Control model of human stance using fuzzy logic. *Biological Cybernetics*, 63-70.
- Mazenc, F., Malisoff, M., & De Querioz, M. (2011). Tracking control and robustness analysis for a nonlinear model of human heart rate during exercise. *Automatica*, 968-974.
- Meystel, A., & Albus, J. S. (2002). *Intelligent Systems - Architecture, Design, and Control*. New York: John Wiley & Sons. Inc.
- Mircescu, L., & Cojocaru, V. (1970). *Individualizarea antrenamentului sportiv*. București : Editura Consiliului Național pentru Educație Fizică și Sport.
- Passino, K., & Yurkovich, S. (1998). *Fuzzy Control*. Menlo Park: Addison Wesley Longman.
- Rudas, I., Takacs, M., & Laufer, T. E. (2012). Risk and Uncertainties of Physiological Processes Handled by the Fuzzy Implementation. *WSEAS International Conference on System Science and Simulation in Engineering*, 37-43.
- Sbenghe, T. (2008). *Kinesiologie - Știința mișcării*. București: Editura Medicală.
- Scalzi, S., Tomei, P., & Verrelli, C. (2012). Nonlinear control techniques for the heart rate regulation in treadmill exercises. *Biomedical Engineering*, 599-603.
- Stoian, I., & Petrache, A. (2007). *Monitorizarea antrenamentului: puls sau lactat?* București: LightHouse.
- Su, S., Wang, L., Celler, B., Savkin, A., & Guo, Y. (2007). Identification and control for heart rate regulation during treadmill exercise. *Biomedical Engineering*, 1238-1246.
- Suh, M. (2015). *Electronic Textiles*. Woodhead Publishing.
- Tang, S., & Po, L. (2015). *Textiles for Sportswear*. Woodhead Publishing.
- Tapia, E. M., Intille, S. S., Haskell, W., & Larson, K. (2007). Real-Time Recognition of Physical Activities and Their Intensities Using Wireless Accelerometers and a Heart Rate Monitor. *11th IEEE International Symposium on Wearable Computers*, 37-40.
- Weng, K., Turk, B., Dolores, L., Nguyen, T., Celler, B., Su, S., & Nguyen, H. (2010). Fast tracking of a given heart rate profile in treadmill exercise. *Engineering in Medicine and Biology Society*, 2569-2572.