

Secțiunea „Rezultate studiu clinic”

AVANSAREA ÎN TERAPIA INTENSIVĂ CU GEMENI DIGITALI: INTEGRAREA MODELĂRII DINAMICII SISTEMULUI CIRCULATOR

Victor Iapăscuță^{1,2}

¹ Universitatea Tehnică a Moldovei, Chișinău, Republica Moldova

² Universitatea de Medicină și Farmacie Nicolae Testemițanu, Chișinău, Republica Moldova

Introducere. Gemenii digitali, replici virtuale ale sistemelor fizice, sunt din ce în ce mai mult aplicați în domeniul sănătății pentru a îmbunătăți monitorizarea în timp real și intervențiile personalizate, în special în unitățile de terapie intensivă (UTI) unde bolile cardiovasculare domină morbiditatea și mortalitatea. Literatura de specialitate evidențiază limitele modelelor statice în captarea interacțiunilor fiziologice dinamice, ceea ce determină adoptarea modelării dinamicii sistemului (SDM) pentru simularea sistemului circulator uman. Studiile anterioare pun accentul pe modelele cu parametri grupați pentru simulări specifice pacientului, integrând date în timp real de la dispozitive portabile și învățare automată pentru a prezice rezultatele în afecțiuni precum insuficiența cardiacă și infarctul miocardic (IM). Această lucrare extinde lucrările anterioare asupra unui SDM bazat pe NetLogo al sistemului circulator, poziționându-l ca un nucleu pentru potențiali gemeni digitali pentru UTI.

Scurtă prezentare a cazului. „Cazul” se concentrează pe un SDM care simulează sistemul circulator cu șase compartimente (de exemplu, camerele inimii, circuitele sistemic și pulmonar), încorporând peste 30 de parametri precum volumul, elasticitatea, rezistența, etc. Simulările au replicat dinamica fiziologică, inclusiv un scenariu de infarct miocardic în care buclele presiune-volum s-au micșorat, indicând o funcție cardiacă redusă. Datele din seriile temporale au arătat parametri precum presiunea ventriculului stâng (69,24–78,26 mm Hg) și debitul cardiac (4,14 L/min), analizate prin complexitatea Kolmogorov-Chaitin, dezvăluind o scădere a complexității post-IM.

Managementul cazului și direcții viitoare. Managementul implică ajustări dinamice ale parametrilor prin intermediul cursoarelor și integrarea datelor în timp real de la dispozitive portabile, pentru actualizări ale modelului. Învățarea automată poate rafina predicțiile, sprijinind instrumente de decizie clinică precum alerte și tratamente personalizate. Direcțiile viitoare includ modele hibride SDM-învățare automată, validare extinsă cu date clinice și scalabilitate pentru gemeni digitali multi-organ în UTI.

Discuție. Deși SDM permite vizualizarea holistică a buclelor de feedback și a intervențiilor, persistă provocări în ceea ce privește confidențialitatea datelor (de exemplu, conformitatea cu HIPAA), validarea modelelor și interoperabilitatea. Beneficiile includ educație îmbunătățită, dezvoltarea de medicamente și strategii de sănătate publică, depășind limitările prin progresele tehnologice continue.

Concluzii. Constatările demonstrează eficacitatea SDM în simularea dinamicii circulatorii și a infarctului miocardic, cu relevanță clinică în evaluarea riscului în UTI și îngrijirea personalizată, reducând potențial mortalitatea. Acest lucru subliniază rolul transformator al gemenilor digitali în managementul cardiovascular.

Cuvinte cheie: gemeni digitali, modelarea dinamicii sistemului, sistem circulator, terapie intensivă, infarct miocardic

Studiul a fost finanțat de Agenția Națională pentru Cercetare și Dezvoltare (ANCD) din Moldova în cadrul grantului 25.00208.5007.07/PD pentru proiectul „Metode și algoritmi software inteligenți pentru terapie intensivă: o abordare prin prisma științei complexității”, implementat la Universitatea Tehnică a Moldovei.

Section „Clinical study results”

ADVANCING CRITICAL CARE WITH DIGITAL TWINS: INTEGRATING SYSTEM DYNAMICS MODELING OF THE CIRCULATORY SYSTEM

Victor Iapăscuță^{1,2}

¹ Technical University of Moldova, Chișinău, Republic of Moldova

² Nicolae Testemițanu University of Medicine and Pharmacy, Chișinău, Republic of Moldova

Introduction. Digital twins, virtual replicas of physical systems, are increasingly applied in healthcare to enhance real-time monitoring and personalized interventions, particularly in intensive care units (ICUs) where

cardiovascular diseases dominate morbidity and mortality. Literature highlights the limitations of static models in capturing dynamic physiological interactions, prompting the adoption of system dynamics modeling (SDM) for simulating the human circulatory system. Prior studies emphasize lumped parameter models for patient-specific simulations, integrating real-time data from wearables and machine learning to predict outcomes in conditions like heart failure and myocardial infarction (MI). This paper extends earlier work on a NetLogo-based SDM of the circulatory system, positioning it as a core for potential ICU digital twins.

Brief Account of Case. The "case" centers on an SDM simulating the circulatory system with six compartments (e.g., heart chambers, systemic and pulmonary circulations), incorporating over 30 parameters such as volume, elastance, and resistance. Simulations replicated physiological dynamics, including a myocardial infarction scenario where pressure-volume loops shrank, indicating reduced cardiac function. Time-series data showed parameters like left ventricle pressure (69.24–78.26 mm Hg) and cardiac output (4.14 L/min), analyzed via Kolmogorov-Chaitin complexity, revealing a complexity drop post-MI.

Case Management and Future Directions. Management involves dynamic parameter adjustments via sliders and real-time data integration from wearables, cloud computing, and APIs for model updates. Machine learning can refine predictions, supporting clinical decision tools like alerts and personalized treatments. Future directions include hybrid SDM-machine learning models, expanded validation with clinical data, and scalability for multi-organ digital twins in ICUs.

Discussion. While SDM enables holistic visualization of feedback loops and interventions, challenges persist in data privacy (e.g., HIPAA compliance), model validation, and interoperability. Benefits include enhanced education, drug development, and public health strategies, outweighing limitations through ongoing technological advances.

Conclusions. Findings demonstrate SDM's efficacy in simulating circulatory dynamics and MI, with clinical relevance in ICU risk assessment and tailored care, potentially reducing mortality. This underscores digital twins' transformative role in cardiovascular management.

Keywords: digital twins, system dynamics modeling, circulatory system, intensive care, myocardial infarction

The study was funded by the National Agency for Research and Development (NARD) of Moldova under grant number 25.00208.5007.07/PD for the project "Intelligent Software Methods and Algorithms for Intensive Care: A Complexity Science Approach", implemented at the Technical University of Moldova.