

# RAZVOJ MODELA SUSTAVSKE DINAMIKE ZA PLANIRANJE Ljudskih POTENCIJALA U ODGOJU I OBRAZOVANJU

---

Tomljenović, Krešo

Doctoral thesis / Disertacija

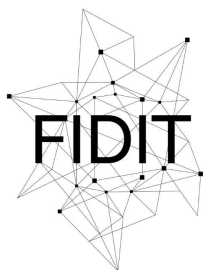
2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka / Sveučilište u Rijeci**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:195:947960>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-10**



Sveučilište u Rijeci  
Fakultet informatike  
i digitalnih tehnologija

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Informatics and Digital Technologies - INFORI Repository](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
FAKULTET INFORMATIKE I DIGITALNIH TEHNOLOGIJA

Krešo Tomljenović

**RAZVOJ MODELA SUSTAVSKE  
DINAMIKE ZA PLANIRANJE LJUDSKIH  
POTENCIJALA U ODGOJU I  
OBRAZOVANJU**

DOKTORSKI RAD

Rijeka, 2023.

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
FAKULTET INFORMATIKE I DIGITALNIH TEHNOLOGIJA

Krešo Tomljenović

**RAZVOJ MODELA SUSTAVSKE  
DINAMIKE ZA PLANIRANJE LJUDSKIH  
POTENCIJALA U ODGOJU I  
OBRAZOVANJU**

DOKTORSKI RAD

Mentor: prof.dr.sc. Vatroslav Zovko  
Komentorica: doc.dr.sc. Martina Holenko Dlab

Rijeka, 2023.

UNIVERSITY OF RIJEKA  
FACULTY OF INFORMATICS AND DIGITAL  
TECHNOLOGIES

Krešo Tomljenović

**A SYSTEM DYNAMIC MODEL  
DEVELOPMENT FOR HUMAN RESOURCES  
PLANNING IN EDUCATION**

DOCTORAL THESIS

Rijeka, 2023.

Mentor: prof.dr.sc. Vatroslav Zovko

Komentorica: doc.dr.sc. Martina Holenko Dlab

Doktorski rad obranjen je dana 27. listopada 2023. g. na Fakultetu informatike i digitalnih tehnologija Sveučilišta u Rijeci, pred povjerenstvom u sastavu:

1. prof. dr. sc. Ana Meštrović
2. izv. prof. dr. sc. Marina Ivašić - Kos
3. prof. dr. sc. Mario Dumančić

## Zahvala

„Svi modeli su pogrešni, ali neki su korisni.“ Hvala Georgeu E. P. Boxu na navedenom citatu koji mi se u procesu razvoja modela često vrtio po mislima i na nekoj čudnoj razini davao smisao cijeloj ovoj priči.

Zahvaljujem se mentorima prof. dr. sc. Vatroslavu Zovku na osobnom razumijevanju te doc. dr. sc. Martini Holenko Dlab na sveprisutnoj podršci, savjetima i motivaciji tijekom izrade disertacije.

Također zahvaljujem studentu Tvrtku Kaurinoviću i doc. dr. sc. Vedranu Miletiću na operativnoj pomoći pri realizaciji web sučelja modela. Hvala i povjerenstvu za ocjenu disertacije prof. dr. sc. Ani Meštrović, izv. prof. dr. sc. Marini Ivašić - Kos i prof. dr. sc. Mariju Dumančiću na doprinosu i sugestijama.

Učiteljskom Fakultetu Sveučilišta u Zagrebu hvala za financijsku potporu doktorskog studija, a kolegama s katedre i doktorandima s UFZG-a na međusobnom ohrabrivanju i poticaju.

Obitelji i prijateljima posebna zahvala što su se često nervirali više od mene i ponijeli dobar dio mog tereta zadnjih nekoliko godina, uvijek bili spremni saslušati dvojbe i otkloniti sumnje u uspjeh. Njihova potpora i ljubavi ovome radu daje poseban smisao.

## Sažetak

Osiguranje adekvatnog i održivog broja ljudskih potencijala preduvjet je kvalitete nastave. Hrvatska je među tri europske zemlje koje ne provode sustavne analize tržišta rada u kontekstu predikcije zapošljivosti nakon završenog višeg obrazovanja svih struka pa tako niti učitelja i nastavnika. Metodološki okvir razvoja dinamičkih modela za modeliranje ljudskih potencijala u sustavu odgoja i obrazovanja primijenjen u ovom radu predstavlja doprinos koji će omogućiti strateško planiranje te alat za simulacijsko eksperimentiranje s ciljem smanjivanja neizvjesnosti pri planiranju u budućem periodu. Primijenjeni model se temelji na metodi sustavske dinamike s elementima modeliranja temeljenom na agentima. Koristeći prednosti obiju metoda je izrađen hibridni model koji implementira prednosti suvremene informacijsko-komunikacijske tehnologije te omogućava fleksibilnost u razvoju modela i primjenjivost u različitim područjima.

Vlastitim metodološkim okvirom se predlažu četiri faze u razvoju modela: definicija, dizajn, analiza i verifikacija te validacija. Važno je naglasiti da se postupak vrednovanja modela razdvaja u dvije faze, verifikaciju odnosno unutarnju potvrdu valjanosti modela, te validaciju odnosno vanjsku potvrdu od strane korisnika. To podrazumijeva značajniju interakciju korisnika modela i istraživača jer se osim točnosti dobivenih vrijednosti ispituje primjenjivost i korisnost modela.

Metodološki okvir je primijenjen na sustav primarnog obrazovanja u Republici Hrvatskoj. Izrađeni model je verificiran temeljem relevantnih podataka iz razdoblja od 2010. do 2021. godine. Razvijeni su scenariji unutar kojih korisnik može interaktivno mijenjati vrijednosti parametara te pratiti promjene. Takvim simulacijama se postiže bolji uvid u zakonitosti unutar sustava te omogućava bolje planiranje u odnosu na uobičajene metode planiranja. Kako bi se korisniku omogućilo samostalno korištenje modela i kreiranih scenarija bez poznavanja programskog koda ili metoda simulacijskog modeliranja, razvijeno je i grafičko korisničko sučelje. Scenarijima i grafičkim korisničkim sučeljem se omogućila validacija izrađenog modela te je na temelju ocjena stručnjaka prikupljenih putem ankete zaključeno kako je model koristan za upravljanje ljudskim potencijalima i upisnom politikom.

Konačno, zaključeno je kako razvijeni metodološki okvir omogućava podršku odlučivanju pri planiranju ljudskih potencijala u sustavu odgoja i obrazovanja.

**Ključne riječi:** planiranje ljudskih potencijala, podrška odlučivanju, sustavska dinamika, sustav odgoja i obrazovanja, upisna politika, metodološki okvir, AnyLogic

## Abstract

Ensuring an adequate and sustainable quantity of human resources is a prerequisite for teaching quality. Croatia is one of just three nations in Europe that doesn't conduct systematic labor market analyses in order to forecast employability for all professions after graduation from higher education, including teachers. The methodological framework for the development of dynamic models for modeling human potential in the education system proposed in this dissertation represents a significant contribution to facilitating strategic planning and serves as a tool for simulation experiments aimed at reducing planning uncertainty in the future. The proposed model is based on the system dynamics method with agent-based modeling elements. By using the advantages of both methods, a hybrid model was created that implements the advantages of modern information and communication technology and enables flexibility in model development and applicability in different areas.

Own methodological framework proposes four stages in model development: definition, design, analysis and verification, and validation. It is important to emphasize that the process of evaluating the model is divided into two phases, verification or internal confirmation of the model's validity, and validation or external confirmation by the user. This means that the user of the model and the researcher work more closely together, as not only the accuracy of the values obtained is verified, but also the applicability and usefulness of the model.

The methodological framework was applied to the system of primary education in the Republic of Croatia. The developed model was verified using relevant data from the years 2010 to 2021. Scenarios were developed in which the user can interactively change parameter values and monitor changes. Compared to conventional planning methods, such simulations offer a deeper understanding of the regularities in the system and enable better planning. A graphical user interface was developed that allows the user to independently use the model and the scenarios created without knowledge of program code or simulation modeling methods. The model was validated using scenarios and a graphical user interface, and it was found that the model was useful for managing enrollment policy and human resources based on expert opinions collected through a survey.

It was found that the created methodological framework provides decision support for human resources planning in the education system.

**Keywords:** human resources planning, decision support, systemic dynamics, education system, enrollment policy, methodological framework, AnyLogic



# Sadržaj

1.	Uvod .....	1
1.1.	Motivacija .....	2
1.2.	Ciljevi, hipoteze i znanstveni doprinosi.....	3
1.2.1.	Ciljevi.....	3
1.2.2.	Hipoteze .....	3
1.2.3.	Znanstveni doprinosi.....	3
1.3.	Struktura rada.....	4
2.	Simulacije i simulacijsko modeliranje.....	5
2.1.	Simulacijsko modeliranje.....	6
2.1.1.	Sustavska dinamika (SD) .....	10
2.1.1.1.	Dijagram uzročnih petlji.....	12
2.1.1.2.	Dijagram zaliha i protoka.....	14
2.1.1.3.	Statistika sustavsko dinamičkog modela.....	16
2.1.2.	Modeliranje temeljeno na agentima .....	17
2.1.3.	Hibridno modeliranje.....	19
2.1.4.	Primjeri simulacijskog modeliranja.....	21
2.1.4.1.	Primjeri SD modela .....	21
2.1.4.2.	Primjeri ABM modela.....	22
2.1.4.3.	Primjeri hibridnih modela.....	23
2.2.	Alati za simulacijsko modeliranje.....	24
2.3.	Verifikacija i validacija modela.....	27
2.3.1.	Testovi verificiranja modela .....	28
2.3.2.	Delphi metoda.....	30
3.	Modeliranje ljudskih potencijala u sustavu odgoja i obrazovanja.....	34
3.1.	Ljudski potencijali u odgoju i obrazovanju .....	35
3.2.	Pristupi modeliranju ljudskih potencijala u sustavu odgoja i obrazovanja.....	36
4.	Metodološki okvir sustavske dinamike za planiranje ljudskih potencijala u sustavu odgoja i obrazovanja .....	39
4.1.	Faze razvoja modela .....	40
4.2.	Faza definicije modela .....	43
4.3.	Faza dizajna modela .....	47
4.4.	Faza analize i verifikacije modela .....	52

4.5. Faza validacije modela .....	53
5. Razvoj modela za planiranje ljudskih potencijala u primarnom obrazovanju RH .....	56
5.1. Definicija modela primarnog obrazovanja RH .....	56
5.2. Dizajn modela primarnog obrazovanja RH .....	57
5.2.1. Model Učitelj .....	59
5.2.1.1. Ukupno stanovništvo Republike Hrvatske .....	60
5.2.1.2. Maturanti i studenti primarnog obrazovanja u R. Hrvatskoj..	62
5.2.1.3. Učitelji razredne nastave u Republici Hrvatskoj .....	65
5.2.2. Model Učiteljski Fakultet .....	68
5.3. Analiza i verifikacija modela primarnog obrazovanja RH.....	75
5.3.1. Rezultati i verifikacija modela <i>Učitelj</i> .....	79
5.3.2. Rezultati i verifikacija modela <i>Učiteljski Fakultet</i> .....	82
5.4. Validacija modela primarnog obrazovanja RH.....	83
5.4.1. Sudionici i metode istraživanja.....	84
5.4.2. Scenariji .....	84
5.4.3. Grafičko korisničko sučelje .....	88
5.4.3.1. Naslovnica.....	89
5.4.3.2. Model UČITELJ .....	90
5.4.3.3. Model UČITELJSKI FAKULTET .....	92
5.4.4. Anketa o korisnosti modela i sučelja za podršku odlučivanju .....	93
5.4.5. Rezultati ankete o korisnosti modela i sučelja za podršku odlučivanju .....	96
6. Rasprava .....	106
6.1. Znanstveni doprinosi i potvrda hipoteza H1 i H2 .....	114
7. Zaključak .....	116
Literatura.....	121
Popis slika .....	139
Popis tablica.....	141
Popis privitaka.....	143
Privitak 1. Programska podrška AnyLogic.....	144
Privitak 2. Podaci za model <i>Učitelj</i> i <i>Učiteljski Fakultet</i> .....	146
Privitak 3. Dizajn grafičkog korisničkog sučelja .....	152
Privitak 4. Anketa .....	160

# 1. Uvod

Učinkovit sustav odgoja i obrazovanja je temelj budućnosti svake zemlje. Prema američkom pedagogu Karlu Fischu „*trenutno pripremamo studente za poslove i tehnologije koje još ne postoje, kako bismo riješili probleme za koje još niti ne znamo da su problem*“ (Fisch, 2007). Izjava ilustrira problem u planiranju potreba i prohtjeva u sustavu odgoja i obrazovanja u budućnosti. Posebno bi razvoj kreativnosti, inovativnosti i motivacije trebali igrati vitalnu ulogu, što je teško ukalupiti u norme i predvidive procedure. Sustav odgoja i obrazovanja zahtjeva promišljeno upravljanje i predviđanje smjera njegovog razvoja. Jedna od komponenti tog kompleksnog sustava je stanje ljudskih potencijala odnosno kadrova koji su nositelji sustava i provoditelji potencijalnih reformi.

Nerijetko se kroz medije i javni diskurs provlače teze o neadekvatnom broju nastavnog kadra u Hrvatskoj. Primjerice navodi se preveliki broj učitelja, premali broj odgojitelja, nepostojanje interesa za studiranje pojedinih nastavnih smjerova, previše profesora u odnosu na sve manji broj učenika, itd. Najčešće takve rasprave nisu utemeljene na znanstvenim istraživanjima ili se u boljem slučaju pozivaju na neke statističke podatke, no zbog interesa javnosti o temi nerijetko tako prezentirani stavovi figuriraju kao relevantni. Ozbiljnije analize nastoje sveobuhvatno sagledati višegodišnje statističke trendove te dati preporuke za upisne politike na temelju statističkih podataka. Publikacije na temelju podataka Eurydice mreže prikazuju detaljne informacije o obrazovnim sustavima i politikama, opise nacionalnih obrazovnih sustava, tematske komparativne studije, pokazatelje i druge podatke u području obrazovanja 37 zemalja Europe (Eurydice, 2020b). Podaci tvorcima politika u području obrazovanja omogućuju donošenje kvalitetnih odluka. Publikacija mreže Eurydice iz 2013. godine, u dijelu studije koja se osvrće na mjere za praćenje ponude i potražnje nastavnika (poglavlje 5.1, str. 102.), navodi da gotovo sve zemlje provode perspektivno planiranje ili praćenje tržište rada, dok samo Hrvatska, Cipar i Srbija nemaju nikakvih mjera (Eurydice, 2015). Postoji potreba za obuhvatnijem istraživanjem kompleksnosti sustava odgoja i obrazovanja i potreba za razvojem modela koji bi omogućio argumentirano upravljanje sustavom.

U Republici Hrvatskoj Državni zavod za statistiku vodi precizne podatke o kadrovima zaposlenim u sustavu odgoja i obrazovanja koji se zatim prenose i donekle analiziraju u raznim studijama, primjerice brojno stanje učenika, učitelja i nastavnika te uspjeh na kraju školske godine 2017./2018. (Državni zavod za statistiku, 2019a). Procjene potreba za ljudskim potencijalima radi kvalitetnog planiranja i optimizacije obrazovnog sustava kreću od podataka o stvarnom stanju i svjesnosti da je takav sustav dinamičan te da zahtjeva promišljeno upravljanje. U Hrvatskoj ne postoje sustavne analize koje bi dale projekcije potreba za obrazovnim kadrovima u budućem razdoblju, a koje bi uzimale u obzir međudjelovanje raznih čimbenika te se reflektirale na politiku zapošljavanja, upravljanja mrežom obrazovnih institucija i upisnih kvota fakulteta. Pod sustavnim analizama podrazumijeva se proučavanje kompleksnosti

sustava (eng. *systems thinking*), naročito mehanizmi kako pojedini elementi sustava utječu jedni na druge i promjene sustava u vremenu.

Vremenska dinamika je odlika simulacijskih modela (Bala et al., 2017), a međudjelovanje čimbenika uključenih u sustav se matematički može reprezentirati sustavom jednadžbi. Prikladna metoda simulacijskog modeliranja za funkcionalno povezivanje parametara sustava i povratnih međudjelovanja je *sustavska dinamika* (Forrester, 1961), naročito u slučaju nelinearnih veza među parametrima sustava, povratnih veza i vremenske dinamike, što je odlika sustava odgoja i obrazovanja. Modeliranje *temeljeno na agentima* je s druge strane sve zastupljenija metoda modeliranja slijedom sve dostupnijih kvalitetnih podataka za obradu, korisnički orijentirane suvremene informacijsko-komunikacijske tehnologije i računalnih resursa. Istraživanje mogućnosti primjene sustavske dinamike i modeliranja temeljenog na agentima u sustavu odgoja i obrazovanja daje novu perspektivu za podršku upravljanju i donošenju strateških odluka. Metode su uz primjenu adekvatnih programskih alata prepoznate kao potpora u procesu odlučivanja (Zovko et al., 2006).

Na temelju Uredbe Vlade RH iz 2010. godine o obavezi praćenja, analize i predviđanja potreba tržišta rada za pojedinim zvanjima, te izrade i uzimanja u obzir preporuka za obrazovnu upisnu politiku, a u cilju provedbe reforme sustava obrazovanja (NN 93/2010, 2010), Hrvatski zavod za zapošljavanje proveo je analizu i prognozu potreba tržišta rada za pojedinim zvanjima te je izradio preporuke za obrazovnu upisnu politiku (Hrvatski zavod za zapošljavanje, 2020). Preporuke se uglavnom ne poštuju te je potrebna daljnja argumentirana diskusija o potrebama tržišta rada utemeljena na kvalitetnim analizama. Ovim istraživanjem se nastoji doprinijeti takvoj diskusiji te temeljem rezultata sustavsko dinamičkog modela dati podršku odlučivanju pri planiranju ljudskih potencijala u sustavu odgoja i obrazovanja.

Pregledom dostupnih istraživanja uočava se potreba za primjenom simulacijskog modeliranja u području upravljanja ljudskim potencijalima u sustavu odgoja i obrazovanja (Eurydice, 2020a; Kennedy, 2011). Pritom je potreban metodološki okvir razvoja modela za upravljanje ljudskim potencijalima u sustavu odgoja i obrazovanja na temelju metode sustavske dinamike. Ovim istraživanjem se predlaže metodološki okvir u četiri faze, na temelju metoda simulacijskog modeliranja. Faze u razvoju modela su definicija, dizajn, analiza i verifikacija te validacija. Primijenjen je hibridni model sustavske dinamike s elementima modeliranja na temelju agenata, kojim se može ponuditi kvalitetniji uvid u mehanizme strateških odluka složenog sustava odgoja i obrazovanja.

## **1.1. Motivacija**

Osiguranje adekvatnog i održivog broja ljudskih potencijala preduvjet je kvalitete nastave na kojoj počiva svaka intervencija ili reforma odgoja i obrazovanja. U fokusu ovog istraživanja je razvoj dinamičkog modela za kvalitetnije planiranje kadrova u sustavu odgoja i obrazovanja. Dinamički model podrazumijeva primjenu neke od metoda simulacijskog modeliranja koja implementira prednosti suvremene

informatičko-komunikacijske tehnologije (IKT) i objektno orijentiranog programiranja (Bala et al., 2017; Zeigler et al., 2000).

Motivacija za ovo istraživanje je potreba za modeliranjem ljudskih potencijala i resursa koje može dati podršku strateškom planiranju u sustavu odgoja i obrazovanja, odnosno potreba za alatom koji može simulacijskim eksperimentima smanjiti neizvjesnost pri planiranju u budućem periodu.

## 1.2. Ciljevi, hipoteze i znanstveni doprinosi

### 1.2.1. Ciljevi

Opći cilj ovog istraživanja je sustavsko dinamičkim modeliranjem ljudskih potencijala i resursa u sustavu odgoja i obrazovanja omogućiti podršku odlučivanju pri donošenju upisne politike.

Specifični ciljevi su pritom:

- identificirati parametre koji utječu na upisnu politiku visokoškolskih ustanova za obrazovanje nastavnih kadrova;
- realizirati model u obliku računalnog programa;
- identificirati najpotentnije prediktore za ponašanje modela;
- izraditi scenarije upravljanja ljudskim potencijalima u razrednoj nastavi simulacijskim eksperimentima razvijenim modelom.

### 1.2.2. Hipoteze

U istraživanju su postavljene dvije istraživačke hipoteze:

**H1: Razvijeni sustavsko dinamički model dobro reprezentira stanje ljudskih potencijala u sustavu odgoja i obrazovanja.**

**H2: Razvijeni model daje podršku odlučivanju pri donošenju upisne politike visokoškolskih ustanova.**

### 1.2.3. Znanstveni doprinosi

Ovim istraživanjem se modeliranje provodi sustavskom dinamikom i modeliranjem temeljenom na agentima, te se pokazuje da su metode primjenjive i korisne za analizu i planiranje unutar sustava odgoja i obrazovanja. Razvijen je model te je primijenjen na primarno obrazovanje u Republici Hrvatskoj kao dio sustava odgoja i obrazovanja. Potom su definirani scenariji kojima se može eksperimentirati sa strateškim promjenama unutar sustava.

Prilikom izrade ovog rada postignuti su sljedeći znanstveni doprinosi:

- razvoj hibridnog modela za planiranje upisnih kvota i ljudskih resursa primjenom alata sustavske dinamike;
- simulacija scenarija za podršku strateškom odlučivanju vezano za upisnu politiku u sustavu odgoja i obrazovanja;
- implementacija hibridnog modela sustavske dinamike za planiranje upisnih kvota i ljudskih potencijala u odgoju i obrazovanju.

### 1.3. Struktura rada

Drugo poglavlje sadrži teorijski okvir korišten pri razvoju metode i modela. Razmatraju se znanstveni pristupi i metode simulacijskog modeliranja koje su obuhvaćene istraživanjem za ovu disertaciju. Najprije se prezentira ideja simulacijskog modeliranja i daje pregled različitih paradigmi u pristupu modeliranju. Poblje se prezentiraju metode *sustavska dinamika* i *modeliranje temeljeno na agentima*, dvije metode primijenjene u ovom istraživanju kroz razvoj hibridnog modela. Prezentiraju se primjeri metoda u raznim područjima ljudskog djelovanja, od inženjerskih problema do društvenih pojava. Daje se potom pregled alata dostupnih za simulacijsko modeliranje, te poblje predstavlja AnyLogic kojim je realiziran model u ovom istraživanju. Nakon toga slijedi dio o metodama verifikacije i validacije modela, te teorijski okvir Delphi metode koja se primjenjuje u postupku validacije modela.

Treće poglavlje predstavlja teorijski dio o upravljanju ljudskim potencijalima, s naglaskom na sustav odgoja i obrazovanja te primjere istraživanja o modeliranju ljudskih potencijala u sustavu odgoja i obrazovanja.

Četvrto poglavlje predstavlja metodološki okvir razvoja modela u sustavu odgoja i obrazovanja. Predstavlja se koncept razvoja modela kroz četiri faze: definicija, dizajn, analiza i verifikacija te validacija.

Peto poglavlje predstavlja primjenu metodološkog okvira na primarno obrazovanje u Republici Hrvatskoj. Zasebno se predstavlja model *Učitelj*, podmodel *Učiteljski Fakultet* kao potrebna razrada modela *Učitelj* te rezultati verifikacije modela. Slijedi dio o validaciji modela za primarno obrazovanje te rezultati validacije modela. Time je izvršena i validacija metodološkog okvira.

Šesto poglavlje donosi raspravu dobivenih rezultata, kao i prijedloge za daljnje istraživanje koje su ispitanici artikulirali kroz raspravu pri prezentaciji modela i u anketnim odgovorima. Na kraju poglavlja se daje evaluacija znanstvenih doprinosa te prve i druge hipoteze ovog rada.

Sedmo poglavlje donosi zaključke ovog istraživanja. Nakon zaključka slijede popis literature korištene u radu, popisi slika i tablica te privici.

## 2. Simulacije i simulacijsko modeliranje

Ovim istraživanjem se problematizira modeliranje ljudskih potencijala u sustavu odgoja i obrazovanja. Pritom se navedeni sustav smatra kompleksnim sustavom, za što je potrebno razmotriti koje su odlike takvih sustava.

Prema Stermanu (2001) kompleksnost nekog sustava proizlazi iz više svojstava, prikazanih u Tablici 1. Kompleksni sustavi kao predmet istraživanja povezuju se i nastavljaju na područja operacijskih istraživanja, industrijskog i sustavskog inženjeringa. S inženjerskih i tehnoloških problema fokus se širi na društvena i humanistička područja te se u istraživanjima u medicini, ekonomiji, društvenim znanostima, sociologiji i drugdje proučavaju složenosti sustava.

Tablica 1. Svojstva kompleksnog sustava

stalna promjena	promjena cjelokupnog sustava proizlazi iz stalnih promjena pojedinih dijelova sustava
čvrsta povezanost	postoji snažna interakcija među dijelovima sustava
povratne veze	dinamika sustava proizlazi iz povratnih veza; zbog čvrste povezanosti promjena u jednom elementu utječe na promjene drugih elemenata, čija promjena stvara novu situaciju koja povratno utječe na prvi element
nelinearnost	uzrok je rijetko proporcionalan posljedici; na ishod utječe više faktora, pa ukupni efekt često nije linearna ovisnost
nepovratnost	većina događaja je ireverzibilna i utječe na ishod drukčije nego bi utjecali različiti početni uvjeti, koji su posljedica proteklih stanja sustava
samoorganiziranost	dinamika sustava spontano proizlazi iz unutarnje strukture; male promjene se uslijed povratnih veza mogu pojačati i bitno utjecati na daljnju strukturu
adaptiranost	tijekom vremena se promjene događaju uslijed učenja iz iskustva te izvlačenja pouka iz proteklih događaja
vremenske odgode	u povratnim vezama može doći do odgođene reakcije odnosno odgođenog odgovora na neki događaj
kontraintuitivnost	uzroci određenog problema nisu uvijek očiti i skloni smo tražiti uzroke i posljedice na bliskim skalama jer je teško sagledati širu sliku
otpornost na politike	složenost sustava nadvladava našu sposobnost razumijevanja istog što rezultira nemogućnosti sagledavanja očitih rješenja

Pritom se uočava da problem proizlazi ne samo zbog velikog broja čimbenika i raznih ishoda sustava, što je donekle problem kombinatorike u optimizaciji najpovoljnijeg ishoda, nego se kompleksnost odražava u dinamici odnosno interakciji tijekom vremena pojedinih čimbenika sustava.

Sustav odgoja i obrazovanja ima sve navedene odlike navedene u Tablici 1. te se može tvrditi da je nedvojbeno kompleksan sustav. No posebno su se ovim istraživanjem razmatrala svojstva stalne promjene, povratne veze, nelinearnost, nepovratnost i adaptiranost. Navedena svojstva su u fokusu kroz dizajn modela sustavske dinamike.

Formalno se sustav može opisati kao apstraktni koncept koji opisuje ponašanje elementa sustava u vremenu (Barros, 1997). Nadalje, sustav možemo reprezentirati osmeročlanim skupom prikazanim izrazima:

$$S = (t, X, \Omega, Q, q_0, Y, \delta, \lambda); \delta : Q \times \Omega \rightarrow Q; \lambda : Q \rightarrow Y; \quad (1)$$

pri čemu je  $t$  vrijeme,  $X$  je skup ulaznih vrijednosti,  $\Omega$  je interval ulaznih vrijednosti,  $Q$  je skup stanja sustava,  $q_0$  je početno stanje,  $Y$  je skup izlaznih vrijednosti,  $\delta$  je funkcija prijelaza stanja i  $\lambda$  je izlazna funkcija (Zeigler et al., 2000).

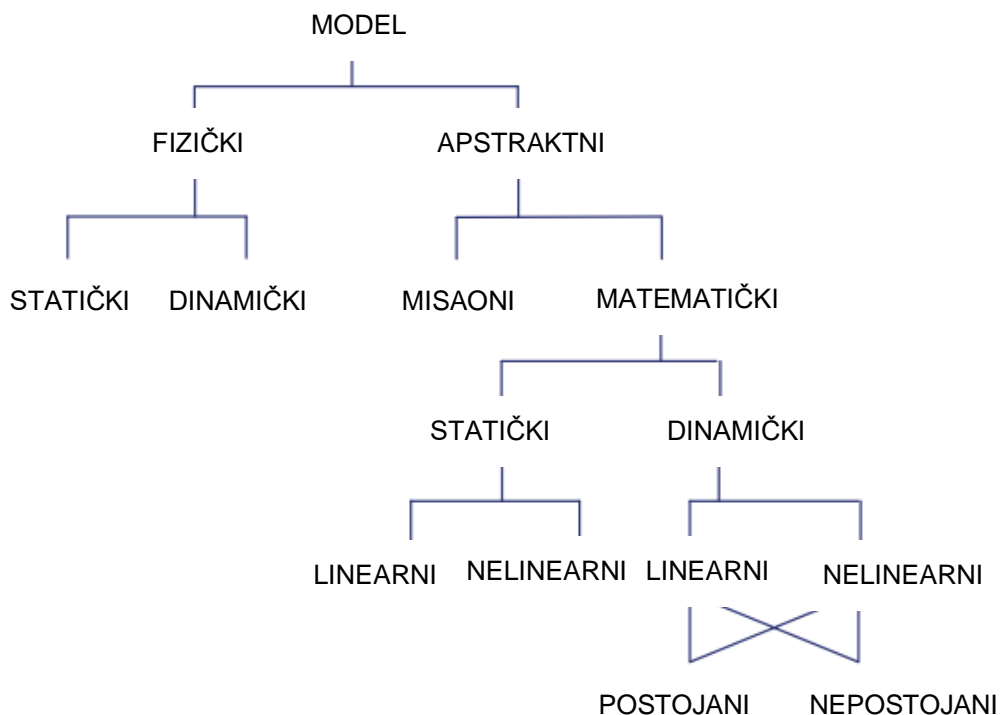
U nastavku poglavlja se najprije razmatraju i pobliže definiraju pojmovi *model*, *simulacija* i *simulacijsko modeliranje*. Neke od metoda simulacijskog modeliranja su prezentirane, kao i njihove razlike i sličnosti, s naglaskom na sustavsku dinamiku i modeliranje temeljeno na agentima. Prezentiraju se i dostupni alati za simulacijsko modeliranje.

## 2.1. Simulacijsko modeliranje

Model je svaka rekonstrukcija stvarnog svijeta koji nas okružuje. Konkretnija definicija modela Društva za sustavsku dinamiku glasi: „*Modeli su eksplicitni prikazi svijeta koji nam omogućuju analizu pretpostavki, odnosa i logike, stoga pružaju puno bolje sredstvo od naših mentalnih modela za razumijevanje svijeta*“ (System Dynamics Society, 2022).

Općenito modele možemo klasificirati u fizičke i apstraktne, a apstraktni mogu biti mentalni modeli ili matematički modeli. Svaki od navedenih može biti statički ili dinamički, ovisno o tome mijenja li svoje karakteristike s vremenom. Matematički modeli mogu dodatno biti linearni ili nelinearni, a s obzirom na vremensku dinamiku postojani ili nepostojani (Bala, 1999). Na Slici 1. je shematski prikaz klasifikacije modela.





Slika 1. Klasifikacija modela

Rješavanje dinamičkih modela analitičkim metodama je zahtjevno za kompleksne sustave, pa se rješavanje često svodi na numeričke metode. Proces numeričkog rješavanja u vremenskim koracima se naziva simulacija (Bala et al., 2017), a vremenski promjenjiv model je simulacijski model.

Prema Lawu i sur. (2007) matematički modeli mogu biti rješivi analitički ili numerički, a u potonjem slučaju se radi o simulacijskom modelu. S obzirom na vremensku promjenjivost simulacijski model također može biti statički ili dinamički, dok se promjena u dinamičkom modelu može odvijati kontinuirano ili u diskretnim koracima. Dodatno, simulacijski model može biti deterministički ili stohastički, ovisno o tome sadržava li varijable koje se opisuju pojmovima vjerojatnosti.

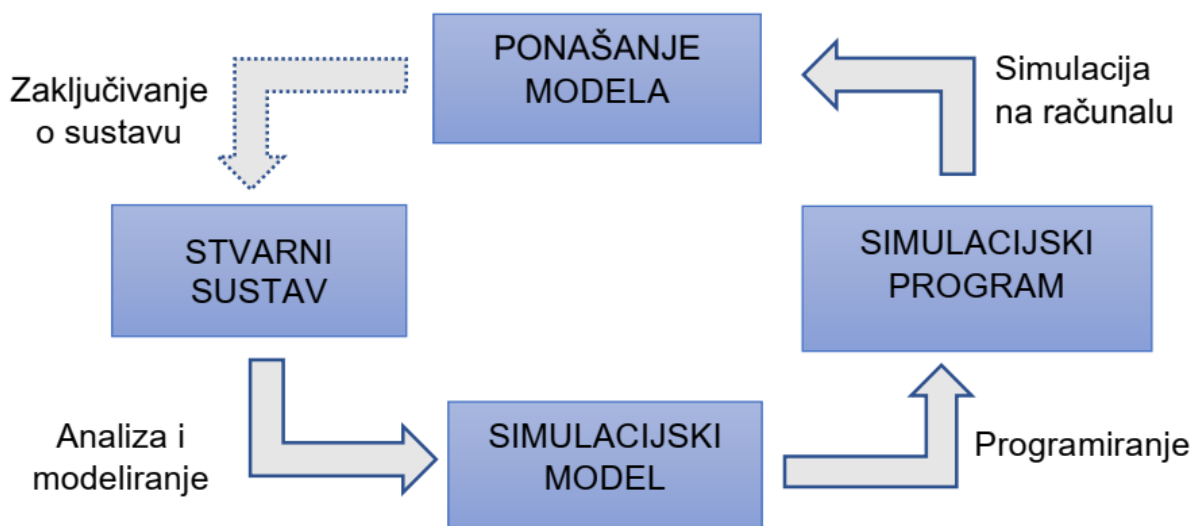
Simulacijsko modeliranje je preslikavanje kompleksnih sustava iz realnog svijeta u digitalne blizance (eng. *digital twins*) u svrhu učinkovitog upravljanja ili rješavanja određenih problema u kontroliranim uvjetima, bez rizika za realni sustav. Metoda je adekvatna u svim aspektima ljudske djelatnosti i upotrebom suvremenih računala je značajno porasla primjena simulacijskog modeliranja (Borshchev, 2013).

Neke od prednosti simulacijskog modeliranja su (Borshchev, 2013):

- radi se u okolišu lišenom rizika za stvarni svijet;
- virtualni eksperimenti simulacijskog modela manje koštaju i kraće traju nego eksperimenti sa stvarnim objektima;
- simulacijski modeli se mogu animirati u dvije ili tri dimenzije, omogućavajući da se lakše verificiraju koncepti i ideje;
- omogućen je uvid u dinamičko ponašanje sustava u vremenu;
- simulacijski model je u stanju obuhvatiti više detalja nego analitički model.

Prema Čeriću (1993) simulacijsko modeliranje podrazumijeva niz elemenata i operacija nad njima, prikazano na Slici 2. Početna analiza i modeliranje stvarnog sustava rezultira prikazom sustava u formalnom obliku (simulacijski model), zatim programiranjem prikazujemo model u računalu prihvatljivom obliku (simulacijski program). Simulacijama različitih uvjeta pomoću računalnog programa se oponaša ponašanje sustava u vremenu, a rezultati simulacija dovode do određenih zaključaka o svojstvima sustava. Postupak se pritom može ponavljati, ovisno o prihvatljivosti rezultata.

Porastom procesorske snage, performansi računala i primjenom objektno orijentiranih programskih jezika, simulacijsko modeliranje podržano računalima doživljava procvat te se primjenjuje u raznim područjima ljudskog djelovanja. Slika 3., prilagođena prema (Grigoryev, 2016), prikazuje područje ljudske djelatnosti s obzirom na razinu apstrakcije pri izgradnji simulacijskog modela. Na nižim razinama apstrakcije su modeli s jasnim detaljno opisanim objektima s fizikalnim svojstvima, primjerice modeliranje računalnih komponenti, prometni modeli, konkretni proizvodni procesi.



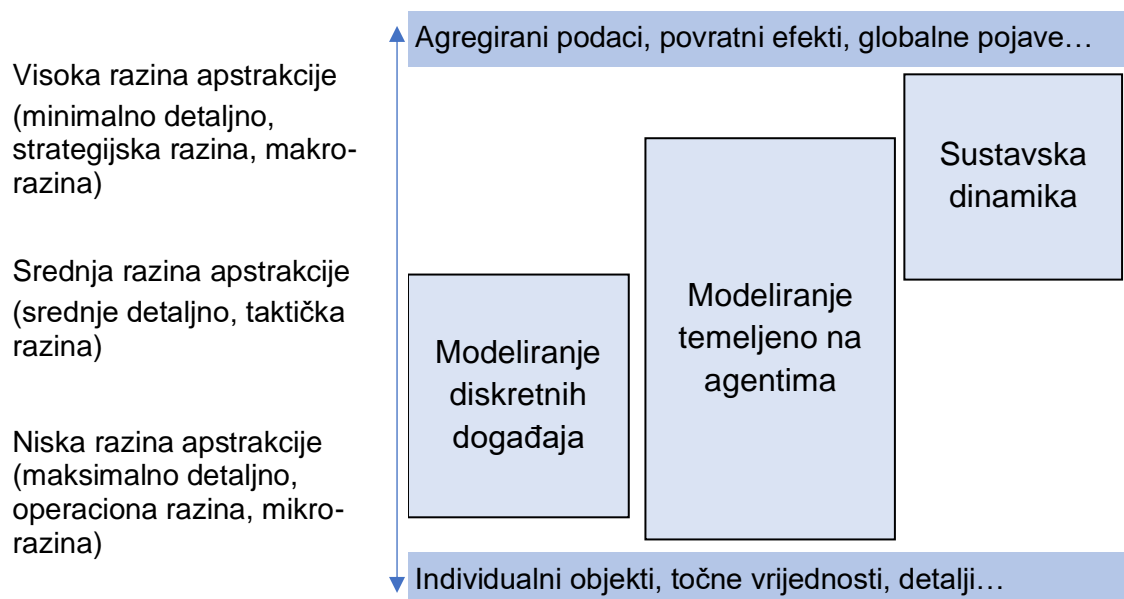
Slika 2. Ciklus simulacijskog modeliranja

Pritom su bitne konkretne fizikalne veličine kao što su brzina, udaljenosti, mjerne jedinice, vrijeme itd. Prvi modeli u začecima simulacijskog modeliranja su upravo bili na nižim razinama apstrakcije, takozvanim operacijskim razinama. Na srednjoj razini apstrakcije se smatraju modeli taktičke razine, primjerice modeli zdravstvenog sustava, poslovni procesi, opskrbni lanci itd. Najviša razina apstrakcije modela je na strategijskoj razini te podrazumijeva minimalno detaljne objekte, agregirane bez individualnih karakteristika. Primjeri su modeli u području društvenih sustava, ekonomije, ekosustava, ljudskih resursa, itd. Ovdje ne dolaze do izražaja fizikalne karakteristike pojedinog objekta nego statistička i druga svojstva grupe objekata ili populacije u cjelini.



Slika 3. Razina apstrakcije pojedinih područja (Grigoryev, 2016)

Ovisno o stupnju apstrakcije, kompleksni sustavi se mogu modelirati kroz tri moguća pristupa: modeliranje diskretnih događaja (eng. *Discrete Event Modeling*, DE) kao najmanje apstraktno, sustavska dinamika (eng. *System Dynamics*, SD) kao najviše apstraktno, te modeliranje temeljeno na agentima (eng. *Agent Based Modeling*, ABM) kao balans između prethodna dva pristupa (Borshchev, 2013). Na Slici 4. je prikazano područje primjene metoda modeliranja s obzirom na razinu apstrakcije, prilagođeno prema (Grigoryev, 2016).



Slika 4. Metoda simulacije obzirom na razinu apstrakcije (Grigoryev, 2016)

DE metoda je usmjerena na proces, operativnu razinu te je i najčešća metoda u području operacijskih istraživanja (Maidstone, 2012). ABM je usmjerena na individualne agente koji imaju svoje karakteristike i interakciju s drugim agentima, dok je SD usmjerena na svojstva sustava u cjelini, a ne pojedine agente sustava. Dodatna bitna razlika je što su DE i ABM stohastičke metode te će u različitim izvođenjem modela dati različite rezultate, dok je SD deterministička metoda i daje jednake rezultate pri svakom izvođenju (Van Dyke Parunak et al., 1998). ABM je novija metoda s većom mogućnošću opisa individualnog ponašanja pojedinih agenata koje DE ne prepoznaje, dok u SD individualno ponašanje i nije u fokusu. Prema Lawu (2013), ABM se može razmatrati kao specijalna vrsta DE modela, pri čemu entiteti DE modela imaju stanoviti međusobnu interakciju. Pritom je prednost ABM što je moguće implementirati objektno-orijentirano programiranje za razliku od DE.

S obzirom na smjer modeliranja DE i SD su metode modeliranja od gore prema dolje (eng. *top-down*) što znači da se prvo uočava glavni proces pa zatim pojedini detalji dijelovi sustava, dok je ABM primjer modeliranja od dolje prema gore (eng. *bottom-up*) gdje se modeliraju najprije individualni agenti i interakcije među njima a ponašanje sustava proizlazi iz pojedinih interakcija među agentima (Siebers et al., 2010). U području modela orijentiranih na procese dominiraju DE modeli (Salmon et al., 2018), dok za agregirane apstraktne sustave dominira SD. Zadnjih godina ABM nalazi primjenu u svim navedenim područjima te se posebno istražuju primjene hibridnog pristupa koji kombinira navedene paradigme.

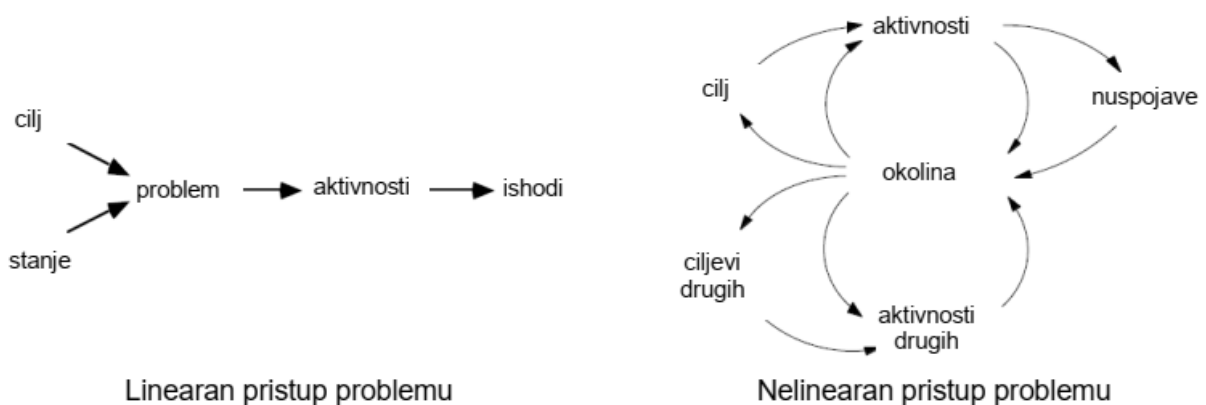
### **2.1.1. Sustavska dinamika (SD)**

Sustavska dinamika se zbog koncepta promatranja sustava kao cjeline svrstava u širu disciplinu, tzv. *sustavskog razmišljanja* (eng. *systems thinking*) koja se opisuje kao „sustav razmišljanja o sustavima“ (Arnold & Wade, 2015). Senge (1990) definira sustavsko razmišljanje kao „disciplinu za sagledavanje cjeline i međudnosa, a ne pojedinačnih stvari, za sagledavanje obrazaca promjena, a ne statičnih snimaka“.

Sustavska dinamika pretpostavlja visoku razinu apstrakcije i prvenstveno se koristi za probleme na strateškoj razini, primjerice zakonitosti tržišta ili proučavanje društvenih procesa. SD je u osnovi numerička metoda rješavanja sustava nelinearnih diferencijalnih jednadžbi čiji je začetnik J. Forrester 50-ih godina 20. stoljeća (Forrester, 1961). Glavne karakteristike su promatranje sustava kao cjeline s vremenskom dinamikom, uzročne petlje i povratne veze (Arnold & Wade, 2015). Prema Stermanu (2000) SD simulacijsko modeliranje je među prikladnijim i uspješnijim znanstvenim pristupima u razvoju kompleksnih, nelinearnih, prirodnih, tehničkih i organizacijskih sustava. Prednost SD u odnosu na druge metode su također istaknuli Kwon i sur. (2016). U istraživanju koje problematizira predviđanje cijena nafte autori su uspoređivali SD sa statističkom metodom, metodom ekspanencijalnog aproksimiranja i metodom umjetnih neuronskih mreža te zaključili da je SD prikladnija metoda za dugoročnije planiranje dok su ostale metode prikladnije za kratkoročno planiranje.

Odlika metodologije jest promatranje načina na koji jedna veličina utječe na drugu kroz protok fizičkih entiteta i informacija. Ako se promatrani tokovi vraćaju na izvornu veličinu uzrokuju povratnu petlju. Te povratne sprege upravljaju ponašanjem sustava u cjelini. Prva važna prednosti sustavsko dinamičkog pristupa je da se međusobni odnos različitih elemenata sustava može lako sagledati u smislu uzroka i posljedica i tako se može identificirati pravi uzrok ponašanja. Druga prednost je što je moguće istražiti koje parametre ili strukture treba promijeniti kako bi se poboljšalo ponašanje (Azar, 2012).

Na Slici 5. je prikazan koncept linearnog pristupa problemu u odnosu na nelinearni pristup, prilagođeno prema (Sterman, 2000). Linearni pristup podrazumijeva sukcesivan slijed od formuliranja problema do ostvarenja rezultata, dok je kod nelinearnog bitan koncept povratnih veza. Povratna veza podrazumijeva da određeni element sustava odražava stanje koje je direktna posljedica ostalih elemenata sustava, no posljedično stanje tog elementa utječe povratno na ostale elemente sustava. Na slici 5. „nelinearan pristup problemu“ jasno je vidljivo da cilj koji se želi ostvariti rješavanjem pojedinog problema utječe na aktivnosti koju provodimo, što dodatno utječe na nuspojave takvih aktivnosti te na okolinu. Okolina utječe na ciljeve i aktivnosti drugih (povezanih) čija reakcija potencijalno mijenja samu okolinu kao i aktivnosti vezane za originalni problem. Na koncu promjena u okolini može utjecati na promjenu početnog cilja.



Slika 5. Linearan i nelinearan pristup (Sterman, 2000)

Prema Bala i sur. (2017) razvoj SD modela se može razložiti na korake:

- identifikacija problema;
- formiranje hipoteze objašnjavajući uzrok problema;
- kreiranje osnovne strukture dijagrama uzročnih petlji (eng. *causal loop diagrams*);
- proširivanje dijagrama uzročnih petlji dodatnim informacijama;
- prebacivanje dijagrama uzročnih petlji u SD dijagram zaliha i protoka;
- prevođenje SD dijagrama u sustav jednadžbi primjenom računalnih programa i metoda.

U ovome radu su navedeni koraci obuhvaćeni u prve dvije od četiri faze u metodološkom okviru primijenjenom u poglavlju 4. Prve dvije točke se odnose na

formuliranje samog problema istraživanja, što je svojstveno bilo kojoj metodi modeliranja i daje smisao samom istraživanju te se može smatrati definicijom problema. Ostale točke su vezane za dizajn samog modela. Ovim istraživanjem se u razvoj modela dodaju još dvije faze, orijentirane na analizu, verifikaciju i validaciju modela.

Prema Zeigler i sur. (2000), na temelju općenitog izraza za sustav prikazanom izrazom (1), sustav temeljen na diferencijalnim jednadžbama se generalno može opisati kao osmorka:

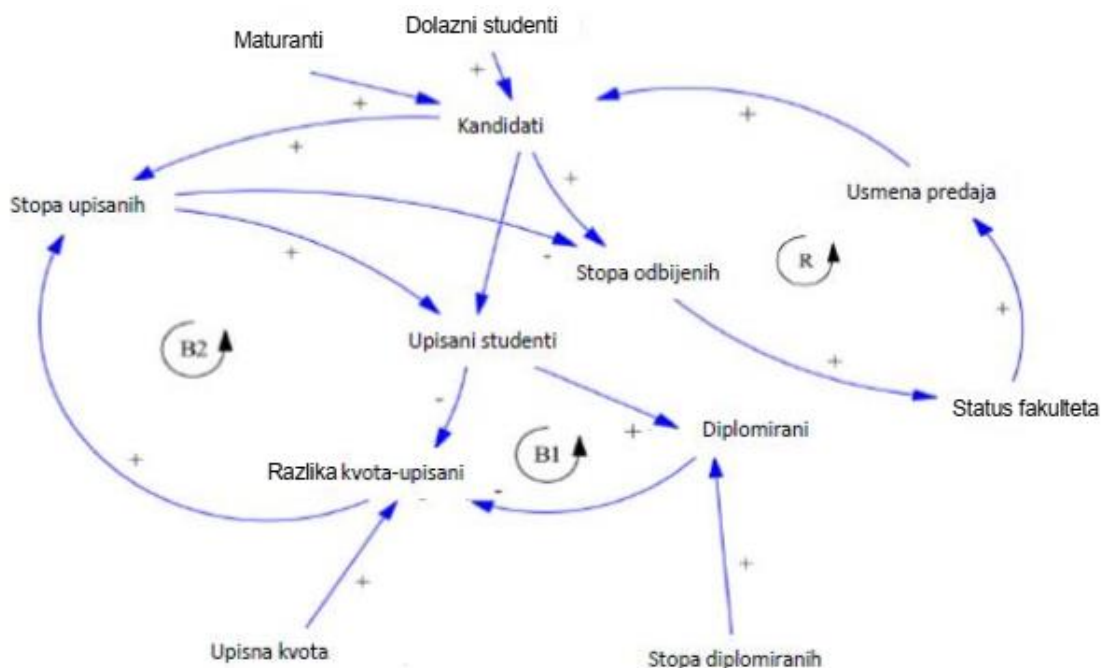
$$S = (t, X, \Omega, Q, q_0, Y, f, \lambda); f : Q \times X \rightarrow Q; \lambda : Q \rightarrow Y; \quad (2)$$

pri čemu je  $t$  vrijeme,  $X$  je skup ulaznih vrijednosti,  $Y$  je skup izlaznih vrijednosti,  $\Omega$  je interval ulaznih vrijednosti,  $Q$  je skup stanja sustava,  $q_0$  je skup početnih stanja,  $f$  je funkcija prijelaza stanja i  $\lambda$  je izlazna funkcija.

### 2.1.1.1. Dijagram uzročnih petlji

Dijagram uzročnih petlji (eng. *causal loop diagrams*, CLD) je također konceptualni korak, prvi korak u razlaganju problema u kojem se nastoje sagledati veličine koje utječu na sustav, njihov međusobni utjecaj, te se nastoje identificirati zatvorene petlje utjecaja (povratne veze). Pritom povratne veze mogu djelovati pojačavajuće ili balansirajuće (Sterman, 2000).

Na Slici 6. je prikazan dijagram uzročnih petlji jednog hipotetskog problema upisa studenata na fakultet. Strelice označavaju kako pojedini parametar utječe na druge parametre. Pritom oznaka „+“ označava da porast prvog parametra utječe na porast parametra na kojeg vodi strelica, odnosno označava pozitivan utjecaj, dok oznaka „-“ označava da porast prvog parametra utječe na smanjenje drugog odnosno označava negativan utjecaj.



Slika 6. Dijagram uzročnih petlji

CLD dijagram sa Slike 6. je adaptiran na temelju dijela CLD dijagrama vezanog za populaciju studenata koji su razvili Hallak i sur. (2019) modelirajući upis na privatnu visokoškolsku ustanovu. Radi se o pojednostavljenom prikazu hipotetskog problema koji ovdje služi kao ilustracija povezivanja među parametrima i tipova veza u prvom dijelu razvoja SD modela. Parametar *Kandidati* predstavlja broj pristupnika na fakultet među kojima su pristupnici koji su maturirali u Hrvatskoj (parametar *Maturanti*) te pristupnici iz drugih zemalja i oni koji su prešli s drugih studija (parametar *Dolazni studenti*). Ovisno o broju mjesta koja su na raspolaganju za upis (parametar *Upisna kvota*), dio kandidata ostvarit će pravo upisa (parametar *Upisani studenti*), dok dio neće (bit će odbijeni). Na temelju tih podataka izračunava se razlika između broja dostupnih i popunjenih mjesta (parametar *Razlika kvota-odbijeni*), stopa upisanih (parametar *Stopa upisanih*) te stopa odbijenih (parametar *Stopa odbijenih*) koja se smatra jednim od pokazatelja reputacije fakulteta kao poželjnog za upis (parametar *Status fakulteta*). Na temelju komunikacije u populaciji odnosno informacija o fakultetu i upisima kreiraju se stavovi o fakultetu (parametar *Usmena predaja*). Određeni broj studenata s vremenom diplomira na fakultetu (parametra *Diplomirani*) te se može izračunati udio studenata koji su završili studij od broja upisanih studenata (parametar *Stopa diplomiranih*).

CLD iz primjera se interpretira tako da na parametar *Kandidati* pozitivno utječe broj maturanata u populaciji te broj dolaznih studenata. U daljnjoj evaluaciji potrebnih parametara i dostupnih podataka mogu se u zasebne parametre razdvojiti pristupnici iz drugih zemalja, pristupnici koji su prešli na promatrani fakultet s drugih studija i maturanti koji se nisu uspjeli upisati proteklih godina pa pokušaju ponovo, ili se potpuno izostaviti navedeni parametri. Što je veći broj kandidata, to je veća stopa upisanih, broj upisanih studenata te stopa odbijenih na upisu pa je prema navedenim parametrima strelica s predznakom plus (Hallak i sur., 2019). Navedenim primjerom se modelira upis na privatnu visokoškolsku ustanovu, no u slučaju javnih ustanova može se uzeti u obzir da su kvote studenata manje fleksibilne nego u slučaju privatno financiranih ustanova. U detaljnijoj razradi modela za konkretni fakultet moguće je uzeti u obzir i strukturu prijavljenih kandidata odnosno uzeti u obzir koji je razlog odbijenih prijava za upis. Parametar *Stopa odbijenih* pozitivno utječe na parametar *Status fakulteta*, koji potom pozitivno utječe na reputaciju fakulteta kao poželjnog za upis preko parametra *Usmena predaja*. Može se obrazložiti time što je veća potražnja za fakultetom to će ostati veći broj neupisanih, ukoliko se kvote ne povećaju, te se povećava omjer prijavljenih i upisanih studenata. Time fakultet povećava svoju reputaciju poželjnog za upis, odnosno „*ranking*“, primjerice vidjeti (Agencija za znanost i visoko obrazovanje, 2022). Bolja reputacija fakulteta usmenom predaja pozitivno utječe na broj prijavljenih kandidata pa je na taj način zatvorena jedna petlja međusobnih utjecaja parametara. Ovim se usmena predaja smatra u pozitivnom smislu odnosno da se sa boljim statusom fakulteta povećava narativ o fakultetu kao poželjnim za studiranje. S druge strane parametar *Upisani studenti* pozitivno utječe na broj diplomiranih studenata, na koje pozitivno utječe i parametar *Stopa diplomiranih* (Hallak et al., 2019). U primjeru to znači da stopa uspješno diplomiranih studenata povećava brojku studenata koji su diplomirali a zatim broj diplomiranih smanjuje broj studenata koji „još“ nisu diplomirali.

Na parametar *Razlika kvota-upisani*, koja predstavlja odnos broja upisanih studenata i poželjan broj upisanih koje propisuje kvota za upis, pozitivno utječe parametar *Upisna kvota*, no smanjuje ju broj upisanih i diplomiranih studenata pa su te strelice označene predznakom minus, na temelju primjera Galbraith (1998). Razlika između kvote i broja upisanih utječe na parametar *Stopa upisanih*, koji povratno utječe na parametar *Upisani studenti* te čini drugu zatvorenu petlju. Još jednu zatvorenu petlju čine parametri *Upisani studenti*, *Diplomirani* i *Razlika kvota-upisani*. Zatvorena petlja utjecaja može rezultirati da primjerice porast jednog (prvog) parametra utječe na porast drugog parametra, drugi utječe ne porast trećeg itd., te zatim posljednji u nizu utječe opet na porast prvog. Takva povratna veza se zove pojačavajuća (eng. *reinforcement*), na Slici 6. je prikazana slovom „R“ uokvirenim strelicom. U navedenom primjeru sa slike veći broj kandidata za upis povećava i broj odbijenih studenata na upisu, čime se povećava reputacija fakulteta kao poželjnog. Zatim takva poželjnost povećava pozitivnu usmenu predaju o fakultetu što na kraju povećava interes i broj kandidata na upisu. Druga mogućnost zatvorene petlje jest da porast prvog parametra rezultira smanjenjem tog istog parametra, što se zove balansirajuća petlja (eng. *balancing*), na Slici 6. označena slovom „B“ uokvirenim strelicom. Primjerice što je veći broj upisanih studenata to će se posljedično povećati i broj diplomiranih studenata. S druge strane što je veći broj studenata koji su diplomirali to je manji ukupan broj studenata te i razlika između upisanih studenata i kvote za upis (Hallak i sur., 2019).

U daljnjoj razradi modela bi se neki parametri modela, primjerice *Stopa diplomiranih* i *Broj diplomiranih* mogli objediniti i povezati kao zavisne varijable ili drukčije prikazati, no ovdje se ilustrira proces nastanka koncepta CLD dijagrama i daje primjer povezan s drugim istraživanjima. CLD dijagram je koncept u procesu razvoja modela te podrazumijeva kvalitativne veze među elementima. Elementi koji su uključeni u dijagram na temelju analize zahtjeva korisnika ili komunikacije sa suradnicima, na koncu kroz proces prikupljanja podataka i evaluaciju utjecaja parametra mogu biti izostavljeni iz modela.

#### **2.1.1.2. Dijagram zaliha i protoka**

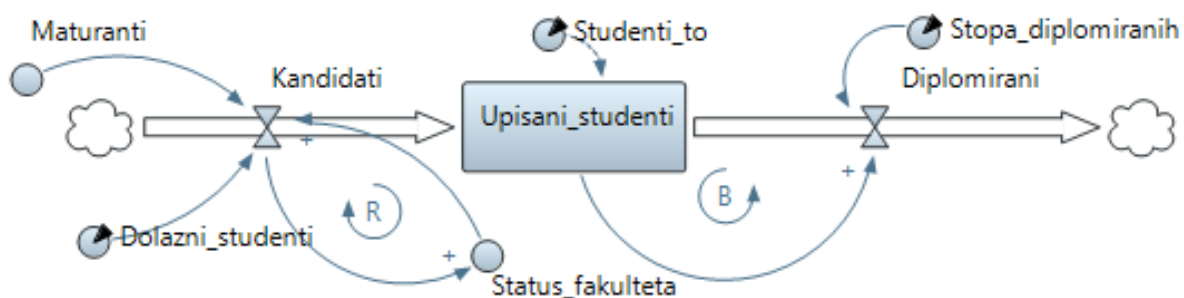
Dijagram uzročnih petlji je atraktivan način prezentacije mentalnih modela te se uspostavljanjem funkcionalnih odnosa među parametrima dijagram uzročnih petlji prevodi u dijagram *zaliha* i *protoka*, što su temeljni pojmovi SD modela (Sterman, 2000). Parametar *zaliha* je varijabla koja opisuje stanje u točno određenom vremenu. Obično su zalihe veličine čije akumuliranje promatramo s protokom vremena. *Protok* je varijabla koja je odgovorna za porast ili za smanjenje *zaliha*.

*Zalihe* su predstavljene pravokutnicima, *protoci* su dvostruki trokuti (ilustracija pješčanog sata) na širokim strelicama. Dinamičke varijable su kružići, a konstante su kružići s istaknutim tamnijim trokutom. Tankim strelicama su prikazane koje veličine su povezane funkcionalno.

Na Slici 7. je prikazan primjer dijagrama zaliha i protoka na temelji CLD dijagrama sa Slike 6. Dijagram na Slici 7. prikazuje zalihu *Upisani studenti* koju povećava protok *Kandidati*, a smanjuje protok *Diplomirani*. Primjer prikazuje i dvije



dinamičke varijable *Maturanti* i *Status\_fakulteta* te dvije konstante *Dolazni\_studenti* i *Stopa\_diplomiranih*, također vrste parametara u SD modelu. Pošto se povećanjem broja kandidata za upis na fakultet povećava i status fakulteta (privlačnost za upis), što povratno opet utječe na povećani broj kandidata za upis, ta povratna veza je pojačavajuća (na dijagramu označeno slovom R). S druge strane veći broj studenata utječe i na veći broj diplomiranih, što povratno smanjuje broj studenata, pa je takva povratna veza balansirajuća (na dijagramu označeno slovom B).



Slika 7. Dijagram zaliha i protoka

Prevođenjem SD dijagrama zaliha i protoka u sustav jednadžbi se parametri funkcionalno povezuju te se rješavanje svodi na sustav jednadžbi. Za definiranje jednadžbi se koriste podaci prikupljeni za konkretan model koji se razvija ili se primjenjuju već ustanovljene vrijednosti iz prethodnih istraživanja dostupne u literaturi. U primjeru sa Slike 7. vrijedi:

$$\left. \begin{aligned}
 \text{Kandidati} &= f(\text{Maturanti}) \cdot \text{Status\_fakulteta} + \text{Dolazni\_studenti} \\
 \text{Diplomirani} &= \text{Upisani\_studenti} \cdot \text{Stopa\_diplomiranih} \\
 t_0 &= \text{Studenti\_}t_0 \\
 \text{Upisani\_studenti}(t) &= \text{Studenti\_}t_0 + \int_{t_0}^t (\text{Kandidati}(t) - \text{Diplomirani}(t)) dt
 \end{aligned} \right\} (3)$$

Integralna jednadžba iz (3) se u diferencijalnom obliku svodi na oblik (4) odnosno (5) te se najčešće rješava nekom od numeričkih metoda za dobivanje rješenja  $y_{i+1}$ .

$$\frac{d(\text{Upisani\_studenti})}{dt} = \text{Kandidati}(t) - \text{Diplomirani}(t) \quad (4)$$

$$\frac{dy}{dt} = y' = f(t, y), \quad y(t_0) = y_0 \quad (5)$$

Neke od metoda rješavanja jednadžbe (5) su Eulerovom metodom, Runge-Kutta metodom drugog reda i Runge-Kutta metodom četvrtog reda (Bala et al., 2017).

$$y_{i+1} = y_i + (t_{i+1} - t_i) f_i \quad (6)$$

$$y_{i+1} = y_i + hf \left( t_i + \frac{h}{2}, y_i + \Delta' y_i \right); h = t_{i+1} - t_i \quad (7)$$

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{6}(\Delta' y_i + 4\Delta'' y_i + \Delta''' y_i) \quad (8)$$

Rješenja diferencijalne jednadžbe (5) su prikazana jednadžbama (6), (7) i (8), redom Eulerovom metodom (*Euler's Method*, 2022), Runge-Kutta metodom drugog reda i Runge-Kutta metodom četvrtog reda (*Runge-Kutta Methods*, 2022).

Nadogradnja SD modela se općenito može odvijati kroz dva pristupa. Prvi je način da se na temelju znanja iz neke domene, analize problema, literature ili zahtjeva korisnika definiraju pojedini parametri i njihove međusobne veze te se zatim vrednuje rezultat za određeni parametar u takvom dinamičkom modelu. Ovaj pristup je prikladan u situaciji kada imamo poznate sve čimbenike modela ili je model primijenjen i dobro verificiran u literaturi, te želimo istražiti rezultate primijene u drukčijim uvjetima.

Drugi je pristup optimizacija parametara (eng. *parameter optimization*) koji se još naziva i podešavanje parametara (eng. *parameter tuning*), metoda općenito primjenjiva u modeliranju, strojnom učenju, umjetnim neuronskim mrežama i sl. (Feurer & Hutter, 2019). Okvirno se postavlja model koji ima očekivani ishod „ponašanja“ te se potom dodaju parametri i uspostavljaju veze da bi model odražavao stvarno stanje. Drugim riječima parametar se optimizira na takve vrijednosti da model reproducira stvarne vrijednosti. Ovaj pristup je prikladan ako se tek istražuje koji bi se sve parametri mogli dodati u model. Također je ovaj pristup povoljan za dodatna istraživanja, kojima bi se model „rafinirao“. Dva navedena pristupa su uvelike slična pristupima u razvoju inteligentnih sustava: simbolički i konektivistički (Picton, 2001).

### 2.1.1.3. Statistika sustavsko dinamičkog modela

Po svojoj temeljnoj prirodi SD modeli se smatraju determinističkim na način da se ponašanje sustava kroz vremenski period opisuje sustavom jednadžbi (Law, 2013). U situaciji kada neki elementi modela koje uključujemo u model imaju karakteristike slučajne varijable, odnosno nemamo znanje o funkcionalnoj povezanosti među elementima nego se generiraju podaci po nekom vjerojatnosnom uzorku, govorimo o stohastičkoj prirodi ponašanja pojedinog elementa, što je prostor Monte Carlo simulacija. U toj situaciji je moguće integrirati Monte Carlo metode za reprezentaciju unutar SD modela, te se deterministička priroda SD modela može promatrati u širem kontekstu.

Prostor za statističku obradu podataka leži u obradi izlaznih podataka, odnosno u verifikaciji i validaciji modela (Bala et al., 2017). Također se statistička procjena vrijednosti numeričkih podataka za definiranje parametara može uzeti u obzir te mjerenje podudaranja izlaznih podataka modela u odnosu na realne pokazatelje i podatke (Serman, 2000).

Dodatni argument za ne-stohastičku prirodu SD modela leži u smislu postavljanja hipoteze i njene ocjene unutar statističke značajnosti. Prema Barlasu (1996) postoje problemi tehničke i filozofske prirode u testiranju statističke značajnosti SD modela. Pri testiranju se obično postavi nulta hipoteza ( $H_0$ ) da ne postoji statistička razlika među dva skupa podataka, te je uobičajen postupak da se pokaže unutar

postavljene granice pouzdanosti da je takva hipoteza kriva pa se prihvaća alternativna hipoteza da postoji značajna razlika. Takav postupak ima snagu argumenta ako se odbaci  $H_0$ . U slučaju SD modela, poželjna je situacija da se podaci dobiveni modelom ne razlikuju statistički značajno od stvarnih podataka, dakle poželjno je da se ne uspije odbaciti  $H_0$ . No po prirodi statističkog testiranja prihvaćanje  $H_0$  se smatra zaključkom slabe jakosti: prihvaćanjem hipoteze  $H_0$  ne slijedi zaključak da ne postoji statistički značajna alternativna hipoteza, samo po prezentiranim podacima se to ne može tvrditi (Barlas, 1996; Petz, 1997).

Navedeni argumenti protiv testiranja statističke značajnosti SD modela se ne odnose na poželjne primjene statističkih mjera, kao što su relativne pogreške, srednje kvadratne relativne pogreške, i sl. (Barlas, 1996; Sterman, 2002).

### **2.1.2. Modeliranje temeljeno na agentima**

Modeliranje temeljeno na agentima (eng. *agent based modeling*, ABM) se izvan akademske zajednice bitnije razvija porastom procesorske snage i drugih performansi računala krajem dvadesetog stoljeća (Brailsford, 2014). U metodi ne moramo znati strukturu i dinamiku sustava u cjelini, kao što je primjer u SD, nego se fokusira na svojstva i dinamiku pojedinačnih aktivnih objekata (agenta) unutar sustava. Elementi SD modela se povezuju jednadžbama te ponašanje sustava proizlazi iz tako povezanih elemenata u sustav jednadžbi. Agenti s druge strane nisu povezani funkcionalno s drugim agentima na način kao što su elementi sustavske dinamike. Agenti se identificiraju te definira ponašanje i dinamika u odnosu na druge agente i okolinu (Rahmandad i Sterman, 2008). Agenti mogu biti osobe, vozila, oprema, proizvodi ili projekti, što god je važno za sustav (Bonabeau, 2002). Primjerice nakon ispunjenja određenog uvjeta se kreira agent vozila, te se definira pod kojim uvjetima i na koji način će se kretati, stajati ili nestati iz modela. Navedeno se opisuje tablicom prijelaza stanja na način kao dijagram toka. Uspostavljaju se veze između agenata te globalna dinamika sustava tada proizlazi iz interakcija mnogih pojedinačnih agenata (C. Macal & North, 2009). Prema Helbing i Baliatti (2015), ABM modeliranje je primjereno za modeliranje društvenih i ekonomskih problema.

Svaki ABM model bi trebao imati sljedeća tri elementa (C. M. Macal & North, 2010):

1. skup agenata sa svojstvima i načinom ponašanja;
2. skup veza među agentima i načina međusobne interakcije;
3. okoline agenata i način interakcije agenta i okoline.

Modeliranje ABM metodom je u osnovi programiranje agenata na „oponašanje“ njihovih originala iz stvarnog svijeta (za razliku od SD modeliranja koje je u osnovi rješavanje diferencijalnih jednadžbi) (Van Dyke Parunak et al., 1998). Kreiraju se agenti koji su objekti važni za oponašanje realnog sustava, te se programiraju njihova svojstva i ponašanje, na temelju njihovih stvarnih svojstava. Stanje agenta u određenom vremenu je određeno skupom pravila koja definiraju njegovo postojanje i interakciju s drugim agentima. Pritom pravila koja definiraju agenta mogu biti deterministička ili stohastička (Laubenbacher et al., 2007).

Nekoliko je temeljnih odlika koje treba razmatrati pri modeliranju ABM metodologijom (Borshchev, 2013):

- objektno-orijentirana arhitektura: slično kao i odnos razreda i objekata u objektno-orijentiranom programiranju, u ABM modelu agenti (objekti) se kreiraju tek pri pokretanju programa;
- sinkrono ili asinkrono vrijeme modela: kod asinkronog modela pojedini agent u svakom trenutku može proizvesti neku akciju dok kod sinkronog modela vrijeme se mjeri u koracima i pritom svaki agent može ili ne mora izvršiti akciju u datom koraku, ali ne i mimo koraka;
- prostor i mobilnost: agenti mogu biti smješteni unutar diskretnog ili kontinuiranog prostora (dvodimenzionalnog ili trodimenzionalnog), s geografskim obilježjima,
- povezanost među agentima: jednosmjerne, dvosmjerne, hijerarhijske itd.;
- komunikacija među agentima i agenata s okolinom: agent može pozivati funkcije i mijenjati varijable i parametre drugih agenata;
- dinamičko kreiranje i nestajanje agenata: po potrebi se kreira ili uništi agent (objekt) u hijerarhijskoj strukturi;
- statističke značajke populacije agenata: može se pratiti statistika o populaciji agenata s određenim svojstvom, prikazivati distribucije pojedinih vrijednosti varijabli kroz populaciju agenata, itd.

U sustavima s velikim brojem kompleksnih agenata je i dalje tehnološki vrlo zahtjevno istovremeno modeliranje agenata. Linearno povećanje broja agenata u sustavu obično povlači nelinearno (čak i eksponencijalno) povećanje računalnih resursa (Laubenbacher et al., 2007).

Modeli temeljeni na agentima koriste se na svim razinama apstrakcije, od primjerice optimizacije opskrbnog lanca, epidemiologije, bioloških ekosustava, komunikacijskih i infrastrukturnih mreža, društvenih sustava itd. S obzirom na velike količine podataka u suvremenim skladištima podataka, razvoj strojnog učenja i umjetne inteligencije koji mogu procesuirati takve podatke, za očekivati je da će i u ABM simulacijskom modeliranju biti sve više zastupljene metode strojnog učenja u cilju postizanja realnijih modela i točnijih simulacija

Matematika u podlozi ABM-a obično uključuje koncepte iz diferencijalnog računa, linearne algebre, vjerojatnosti i statistike. Ovi se matematički alati koriste za modeliranje ponašanja agenata i njihovih interakcija, kao i za analizu ishoda simulacija. Dodatno, ABM često uključuje korištenje računalnih algoritama, primjerice genetski algoritmi i umjetne neuronske mreže, koje također uključuju matematičke koncepte i tehnike.

Stanje agenta  $i$ ,  $i \in \{1, \dots, n\}$ , u vremenu  $t$ , je opisano varijablom stanja  $x_{i,t} \in R^k$ . Evolucija varijable stanja agenta je opisano jednadžbom (Achachlouei & Hilty, 2015):

$$x_{i,t+1} = f_i(x_{i,t}, x_{-i,t}; \alpha_i) \quad (9)$$

gdje je  $x_{-i}$  stanje svih agenata osim agenta  $i$ , a  $\alpha_i$  je skup strukturnih parametara.

Prema Macalu i Northu (2009) četiri su važne prednosti ABM modeliranja u odnosu na tradicionalnije metode:

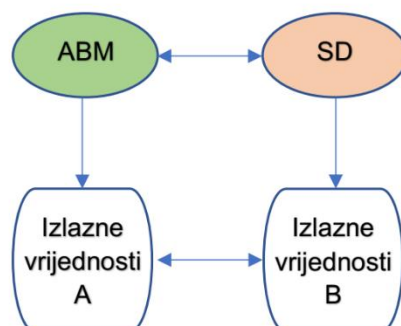
- sustavi koje želimo sve kompleksnije modelirati se bolje reprezentiraju s agentima koji imaju više osobnosti i različitih načina ponašanja;
- neki sustavi su prekompleksni za dosadašnje metode pa su prihvaćani kompromisi da bi se analitički i računalno uopće moglo pristupiti modeliranju;
- suvremene baze i skladišta podataka nude organizirane podatke korisne za individualan pristup u programiranju pojedinih agenata;
- snaga suvremenih računala rapidno raste što omogućava simulacije velikog broja mikro-agenata, što je donedavno bilo nemoguće.

### 2.1.3. Hibridno modeliranje

Kako bi se što bolje obuhvatile specifičnosti konkretnog kompleksnog problema moguće je primijeniti kombinaciju paradigmi modeliranja. Tada govorimo o hibridnim modelima. Mnoga prethodna istraživanja su pokazala da se sposobnost simulacije složenih sustava i prednosti pojedine specifične metode mogu poboljšati kroz hibridno modeliranje (Kunc, 2019). Pritom se ističe prednost zbog fleksibilnosti na način da se pri hibridnom modeliranju mogu po potrebi obuhvatiti mikroskopske karakteristike individualnih objekata i makroskopske promjene ponašanja sustava, ovisno o situaciji ili potrebi (Jo et al., 2015). Posebno se ističu prednosti kombiniranja SD i ABM paradigmi u modeliranju koje je sve više zastupljeno u primjeni i istraživanju od početka 21. stoljeća (Lättilä et al., 2010). Unatoč sve raširenijoj primjeni, nedostaju primjeri kojim se proučava pitanje ljudskih potencijala u sustavu odgoja i obrazovanja te se ovim istraživanjem nastoji napraviti pomak u tom smjeru.

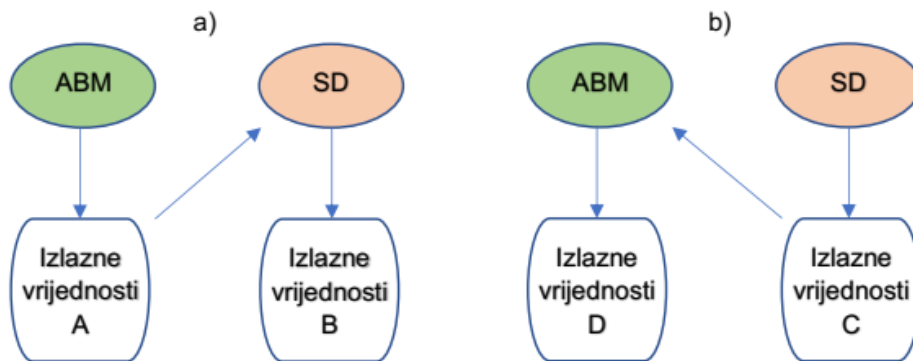
Prema Lewe i sur. (2014) hibridno modeliranje, koje kombinira SD i ABM paradigme, generalno se može podijeliti u dvije klase. Prva klasa obuhvaća kombiniranje dviju metoda dok druga obuhvaća spajanje metoda. Svaka od klasa se još dijeli u dvije osnovne metode: kombiniranje metoda se može izvesti na paralelan i sekvencijalan način, dok se spajanje metoda može realizirati ugrađivanjem ili koordiniranjem.

Kombiniranje metoda podrazumijeva paralelni razvoj dva zasebna modela te usporedbu rezultata dobivenih modelima SD i ABM. Osnovna shema paralelno kombiniranog hibridnog modela je prikazana na Slici 8.



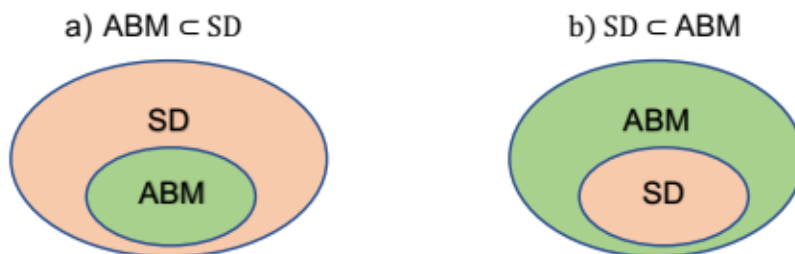
Slika 8. Paralelni razvoj kombiniranja modela

Druga opcija kombiniranja modela je sekvencijalno izvođenje jednog pa drugog tipa modela, shematski prikazano na Slici 9. Mogućnosti su da izlazne vrijednosti ABM modela služe kao ulazne za SD model (Slika 9.a) ili da su izlazne vrijednosti SD modela ujedno ulazne vrijednosti ABM modela (Slika 9.b).



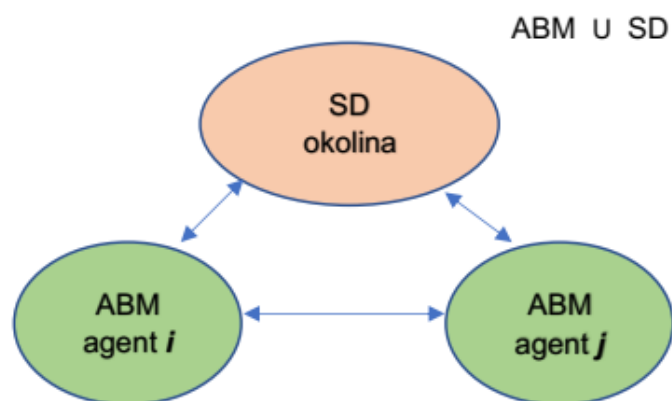
Slika 9. Mogućnosti sekvencijalnog razvoja kombiniranja modela

Klasa spajanje metoda na način ugrađivanja se odnosi na metodu u kojoj je jedan model ugrađen unutar drugog modela, shematski prikazano na Slici 10. Prva mogućnost je da je ABM model dio SD modela, njegov podskup (Slika 10.a) na način da je neka varijabla SD modela ujedno agent sa određenim definiranim ponašanjem. Druga mogućnost je da je SD model podskup ABM modela na način da se određenom agentu definira ponašanje kroz SD podmodel (Slika 10.b).



Slika 10. Ugrađeni razvoj spajanja modela

Koordiniranje je metoda unutar klase spajanja modela u kojoj i SD i ABM istovremeno modeliraju određeni dio sustava te koordinirano razmjenjuju podatke. Može se shematski prikazati kao unija dviju metoda, prikazano na Slici 11.



Slika 11. Koordinirani razvoj spajanja modela.

Navedene metode hibridnog modeliranja nude dovoljno fleksibilnosti te se s obzirom na zahtjeve korisnika modela i dostupnost podataka nude mnoge mogućnosti u pristupu problemu. Validacija i verifikacija hibridnih modela u recentnoj literaturi nije razvijena da bi se mogao formirati adekvatan teorijski okvir specifičan za hibridno modeliranje, već se primjenjuju metode karakteristične za neke od metoda uključene u sami hibridni model, primjerice SD, ABM ili DE (Brailsford et al., 2019). Pritom se metode verifikacije i validacije za SD modeliranje najčešće primjenjuju i za hibridno modeliranje. Razlog je dominantno što je SD najstarija prisutna metoda od tri navedene, za koju je provedeno najviše istraživanja i standardiziranja (Kunc, 2019).

#### 2.1.4. Primjeri simulacijskog modeliranja

Primjenjivost metoda SD i ABM će se ilustrirati kroz nekoliko odabranih primjera iz različitih aspekata i područja ljudskog djelovanja. Osim svestranosti metoda u različitim područjima istraživanja, primjerima se posredno ukazuje i na važnost upotrebe IKT i programskih alata kojima je bitno olakšana primjena simulacijskog modeliranja. Dodatno, u navedenim primjerima se može uočiti i važnost izrade različitih scenarije koji omogućavaju eksperimentiranje i analitičan uvid u sustav za potencijalne korisnike modela. Prvo će se izložiti nekoliko primjera SD modela, zatim ABM modela te na koncu nekoliko hibridnih modela, koji kombiniraju metode. Naveden je i po jedan primjer SD i ABM modeliranja u sustavu odgoja i obrazovanja, dok se više primjera modeliranja u sustavu odgoja i obrazovanja prezentira u poglavlju 3.2. u kojem se pobliže razmatra problematika upravljanja ljudskim potencijalima u sustavu odgoja i obrazovanja.

##### 2.1.4.1. Primjeri SD modela

Relić i Božikov (2020) su razvili SD model s ciljem predviđanja potreba za liječnicima specijalistima u Hrvatskoj, kao podrška zdravstvenim vlastima u planiranju upisnih kvota na medicinske fakultete i raspisivanja specijalizacija. Modelom su istraživani različiti scenariji za period do 2041. godine kojim je pokazano da ne bi trebalo doći do nedostatka liječnika specijalista ukoliko se zadrži postojeći broj upisa na medicinske fakultete te se zadrži broj od 550 raspisanih specijalizacija godišnje.

Skarin i sur. (2009) su SD modelom prikazali utjecaj politika na cikluse u aktivnostima kriminalnih udruženja u SAD-u. Na temelju modela autori su promatrali kako ekonomska i društvena struktura utječe na cikluse kriminalnih aktivnosti te zaključili da u svrhu rješavanja problema bandi treba podjednako promatrati ekonomski i društveni aspekt. Pritom najpozitivniji dugoročni utjecaj na društveno blagostanje imaju politike koje ciljaju na razvoj civilnog društva, za razliku od politike represije u smislu više policijskih službenika koje daju trenutno bolji rezultat, ali na duge staze se efekt smanjuje.

U radu Zovko i sur. (2006) na temelju SD modela je analizirana pogodnosti alata za ostvarenje potpore kod simuliranja financijskih problema i odgovarajućih modela rješenja. Razvijeni model je temeljno predstavio informacijske i analitičke dokaze o primjenjivosti programskih alata za ostvarenje potpore kod simuliranja financijskih problema i odgovarajućih modela rješenja.

Sandberg (2011.) je analizirao političke promjene i pojave demokracija na globalnoj razini u periodu 1800.g do 2000.g. Autor je primijenio Bassov model uvođenja inovacija (Bass, 1969) te SD modelom pokazao da je glavni pokretač širenja demokracije porast komunikacijskih kanala širom svijeta.

U radu Ogano (2017) je primijenjen SD pristup u upravljanju rizicima pri projektiranju električne mreže subsaharske Afrike. Pri tome je SD model uključio raznolike utjecaje kao što su politički rizici, tehnički rizici kao što su nedostaci stručnog inženjerskog osoblja, radne snage i sl.

U radu Kulkarni (2018) se predstavlja SD model evaluacije učinkovitosti obrazovanja. Razmatra se utjecaj nastavnih metoda profesora, kućnog okruženja, studijskih navika te izvođenje znanstvenih aktivnosti na učinkovitosti. Predstavljen je model koji objedinjuje 4 povratne veze uzrok-posljedica. Rezultati studije podupiru početnu hipotezu da postoje korelacija između učenikovog pozitivnog i motivirajućeg kućnog okruženja i njihovog uspjeha u školi, zatim povezanost uspjeha sa proaktivnim radnom disciplinom učenika, te naposljetku povezanost učenikovog uspjeha sa entuzijazmom nastavnika za podučavanjem.

#### **2.1.4.2. Primjeri ABM modela**

Charania i sur. (2006) koriste ABM simulaciju za modeliranje moguće budućnosti tržišta suborbitalnog svemirskog turizma. Svaki agent predstavlja element svemirske industrije, kao što su potrošači, proizvođači, vlasti itd., te se analizira mogućnosti razvoja svemirskih putničkih agencija, cijena svemirskih aranžmana i vrsta proizvoda.

Griffin i Stanish (2007) razvili su ABM model za bazen jezera Titicaca u Peruu i Boliviji koji pokriva razdoblje od 2500. pr.n.e. do 1000. g. Model je korišten za proučavanje hipoteza za varijable koje utječu na obrasce naseljavanja i političke konsolidacije. Geoprostorna struktura modela sastoji se od mreže od 50 000 km<sup>2</sup> sastavljene od ćelija od 1,5 km<sup>2</sup>. Svaka ćelija je agent koji modelira svoju geografiju, hidrologiju i poljoprivredni potencijal. Agenti se sastoje od naselja, naroda, političkih entiteta i vođa koji su u interakciji jedni s drugima i okolinom. Ponašanje agenta



modelirano je kao skup uvjetovanih pravila temeljenih na pretpostavljenim čimbenicima koji utječu na poljoprivrednu proizvodnju, migraciju, konkurenciju i trgovinu. Autori su kroz niz scenarija modela uočili pojavu obrazaca koji su odgovarali uočenim obrascima u arheološkim zapisima.

U radu Portillo-Villasana i sur. (2017) je analiziran problem suicida u prostorima podzemne željeznice Mexico Citya. Na temelju ABM modela je istražena korisnost fizičkih barijera za smanjenje stope suicida. Studija na temelju modela je pokazala da ugradnja fizičkih barijera u prostoru između platforme i tračnica metroa smanjuje stopu suicida za 76%.

Malleson i sur. (2013.) su modelirali urbano okruženje grada Leedsa, naseljeno virtualnim agentima provalnika za predviđanje učinaka urbane regeneracije na provale u lokalna kućanstva. Model simulira ponašanje pojedinačnih ljudi i objekata a ponašanje unutar modela je predstavljeno suvremenom kriminološkom teorijom i koristi podatke iz stvarnog svijeta. Autori su zaključili da model može doprinijeti inicijativama za smanjenje kriminala grada Leedsa.

Parker i Epstein (2011) su razvili ABM epidemiološki model propagacije zarazne bolesti sa 6,57 milijardi agenata. U radu se posebno naglašava memorijski zahtjevi modeliranja tako velikog broja agenata. Primjerice ako se po agentu utroši samo jedan bajt memorije „više“, to ukupno rezultira s 6GB trošene memorije više. Prezentira se nekoliko rješenja za programiranje u Javi s ciljem uštede memorijskog prostora. Rezultat je ušteda u memoriji od preko 90%, odnosno 49GB umjesto 5667GB po milijardi agenata.

Za razliku od navedenog teorijskog modela, primjena SD i ABM metoda u području epidemiologije i širenja virusa su posebno u fokusu tijekom Covid-19 pandemije, te se u mnogim radovima promatraju različiti utjecaji na širenje virusa, kao što su cijepljenje, novi zarazni sojevi, itd. (Bai et al., 2020; Chen et al., 2022; Jia et al., 2022; Kerr et al., 2021; Shattock et al., 2022).

Jedan primjer iz obrazovnog sustava je ABM model za analiziranje intervencija u obrazovnom sustavu. Model je razvijen na temelju izvannastavne aktivnosti *Inženjeri bez granica* (eng. *Engineers Without Borders*) a primijenjen je na primjeru intervencije u sklopu nastavnog plana i programa *Učenje znanosti: integriranje dizajna, inženjerstva i robotike* (eng. *Science Learning: Integrating Design, Engineering and Robotics*) (Mital, 2015).

#### **2.1.4.3. Primjeri hibridnih modela**

U radu Djanatlijev i German (2013) primijenjena je kombinacija DE, SD i ABM modeliranja za identificiranje propusta i slabosti u zdravstvenom sustavu te predviđanje posljedica pojedinih medicinske usluga. Unutar SD okoline medicinskog sustava je radni proces unutar bolnice modeliran DE metodom, s obzirom na orijentiranost prema procesima. Agenti su pacijenti koji dolaze na određenu medicinsku uslugu, te se generiraju iz određenog SD elementa.

U području strateškog planiranja Kunc (2019) je primijenio hibridni model za testiranje poslovnih strategija za poduzeće koje se bavi klađenjem i igrama na sreću. Model je sastavljen od šest dijelova – podmodela, od kojih su četiri SD dijela, jedan ABM podmodel i jedan DE podmodel. SD dijelovi su modelirali financijski, tehnološki, tržišni i operativni sektor poduzeća, zatim ABM metodom su modelirani korisnici, dok su DE metodom modelirani korisnici mrežne (eng. *online*) platforme. Model je pokazao slične izlazne podatke s podacima za usporedbu, čime je verificirana mogućnost hibridnog modela da dobro reprezentira kompleksni sustav iz realnog svijeta. Autor je dodatno kao problem istaknuo limitiranu dostupnost odgovarajućih mikropodataka kako bi se što bolje definiralo individualno ponašanje agenata.

U fokusu rada Flynn i sur. (2014) je istovremeno modeliranje strateške razine kreatora zdravstvene politike i individualnih stavova pojedinih zdravstvenih djelatnika i pacijenata. Autori su izradili hibridni SD i ABM model optometrista s njihovim individualnim odlukama o karijeri u kombinaciji s procjenama potražnje za optometristima u Australiji na razini populacije. Krajnja je svrha istraživanja mogu li se adekvatno predvidjeti trendovi i promjene u profesiji australske optometrije modeliranjem procesa izbora na individualnoj razini, te određivanje faktora koji dominiraju određenim odlukama koje optometristi donose.

U radu Wang i sur. (2014) je prezentiran hibridni model za procjenu održivosti upotrebe flaširanih napitaka i vode za piće te utjecaj na okoliš, s obzirom na različite scenarije navika konzumiranja. Razmatrano je 5 vrsta napitaka i pritom je cijeli životni ciklus flaširanih napitaka razmatran. Faza proizvodnje i pakiranja su modelirani DE metodom, transport i distribucija SD metodom, dok su dijelovi modela vezani za prodaju, upotrebu, recikliranje i otpad modelirani kombinacijom SD i ABM modeliranja. Dodatno, ABM i DE metodama je modelirano ponašanje svakog konzumenta. Zaključak studije jest da je po energetske utrošku najefikasnije korištenje vode iz slavine, a potom flaširane vode, što je još uvijek daleko efikasnije od korištenja vitaminskih napitaka ili sportskih napitaka. Nadalje, pokazano je da se kombinacijom više paradigmi modela može istovremeno obuhvatiti kompleksnost ljudskog ponašanja, zakonitosti tržišta i proizvodnog procesa.

## **2.2. Alati za simulacijsko modeliranje**

S obzirom da su SD i DE prisutni od polovine prošlog stoljeća, tako je i broj alata za simulacijsko modeliranje temeljeno na njihovim konceptima brojan, dok do početka 21. stoljeća nije postojao široko primjenjiv alat za ABM modeliranje (Borshchev & Filippov, 2004). Posljednjih 20-tak godina situacija se radikalno mijenja u korist ABM alata, što zbog logike same metode kojoj idu na ruku mogućnosti modernih računala i programskih jezika.

Popis alata za simulacijsko modeliranje s obzirom na paradigmu simulacijskog modeliranja prikazan je u Tablici 2., preuzeto iz ('Comparison of System Dynamics Software', 2022; 'List of Discrete Event Simulation Software', 2022). Svega nekoliko alata (iThink, Simulink, Stella i AnyLogic) pokrivaju sve tri paradigme, s time da je u slučaju alata iThink, Simulink i Stella ABM modeliranje pokriveno s dijelom

funkcionalnosti. AnyLogic alat pokriva sve tri paradigme te omogućava istovremeno kombiniranje paradigmi unutar istog modela, što je prednost u odnosu na druge alate. Pritom je ABM modeliranje glavna odlika alata. Kombiniranjem paradigmi unutar istog modela rezultira tzv. hibridnim modelom (Borshchev & Filippov, 2004). AnyLogic je programska podrška kompanije AnyLogic Company (*AnyLogic*, 2022) koja se bavi programskim rješenjima za simulacijsko modeliranje. AnyLogic je realiziran programskim jezikom Java, koji pripada u objektno orijentirane programske jezike. Osnovna logika objektno orijentiranog jezika je ujedno i logika modeliranja u AnyLogic alatu. Naime AnyLogic modeli su hijerarhijski organizirani, budući da agenti mogu enkapsulirati druge agente do bilo koje željene dubine, što omogućuje dekompoziciju modela na onoliko razina detalja koliko je potrebno, budući da svaki agent obično predstavlja logički odjeljak modela. Svaki AnyLogic model ima agenta najviše razine koji sadrži druge agente ili druge elemente i paradigme modeliranja. Detaljnije je o alatu AnyLogic u Pravitku 1.

Tablica 2. Alati za simulacijsko modeliranje

Alat	DE	SD	ABM
Adaptive Modeler	-	-	+
AgentScript	-	-	+
AMEsim	-	+	-
Analytica	-	+	-
AnyLogic	+	+	+
Arena (software)	+	+	-
ASCEND	-	+	-
Berkeley Madonna	-	+	-
Care pathway simulator	+	+	-
Cougaar	-	-	+
Enterprise Dynamics	+	+	-
ExtendSim	+	-	-
DELMIA	+	-	-
DYNAMO	-	+	-
FAME	-	-	+
FlexSim	+	-	-
Framsticks	-	-	+
GAMA Platform	-	-	+
GoldSim	+	+	-
GPSS	+	-	-

Alat	DE	SD	ABM
Insight Maker	-	+	+
iThink	+	+	+*
JADE	-	-	+
MapleSim	-	+	-
MASON	-	-	+
Micro Saint Sharp	+	-	-
MS4 Modeling Environment	+	+	-
NetLogo	-	+	+
OpenModelica	-	+	-
Plant Simulation	+	-	-
Repast	-	-	+
SARL	-	-	+
Simcad Pro	+	+	-
Simantics System Dynamics	-	+	-
SimEvents	+	-	-
Simile	-	+	-
Simulink	+	+	+*
SIMUL8	+	-	-
Soar	-	-	+
StarLogo	-	-	+
Stella	+	+	+*
Swarm	-	-	+
Vensim	+	+	-
VisSim	+	+	-
VisualSim	+	+	-
WITNESS	+	-	-
Wolfram SystemModeler	+	+	-

\* Samo neke ABM funkcionalnosti

Suvremeni alati za simulacijsko modeliranje nastoje uključiti više multimedijjskih elemenata radi prirodnijeg sučelja i atraktivnije prezentacije ciljanim korisnicima. Multimedija se definira kao prezentacija informacija kombiniranjem istovremeno više elemenata koji uključuju tekst, zvuk, fotografiju, video i animaciju (Nusir et al., 2012).

S obzirom na mogućnost kontrole sadržaja, multimedija se dijeli u dvije kategorije: linearna multimedija i interaktivna multimedija. Linearna multimedija je multimedija kojom korisnik ne može upravljati. Sadržaj se pritom prezentira sekvencijalno, primjerice TV i filmovi. Interaktivna multimedija je multimedija opremljena alatima za upravljanje kojima upravlja korisnik, pritom korisnik ima fleksibilnost u kontroli multimedije, npr. interaktivne igre (Wiana, 2018). Interaktivna multimedija u suvremenom digitalno doba najčešće podrazumijeva korištenje suvremene IKT za učinkovit dijalog između korisnika i sadržaja multimedijskog alata, kao i komunikaciju među korisnicima.

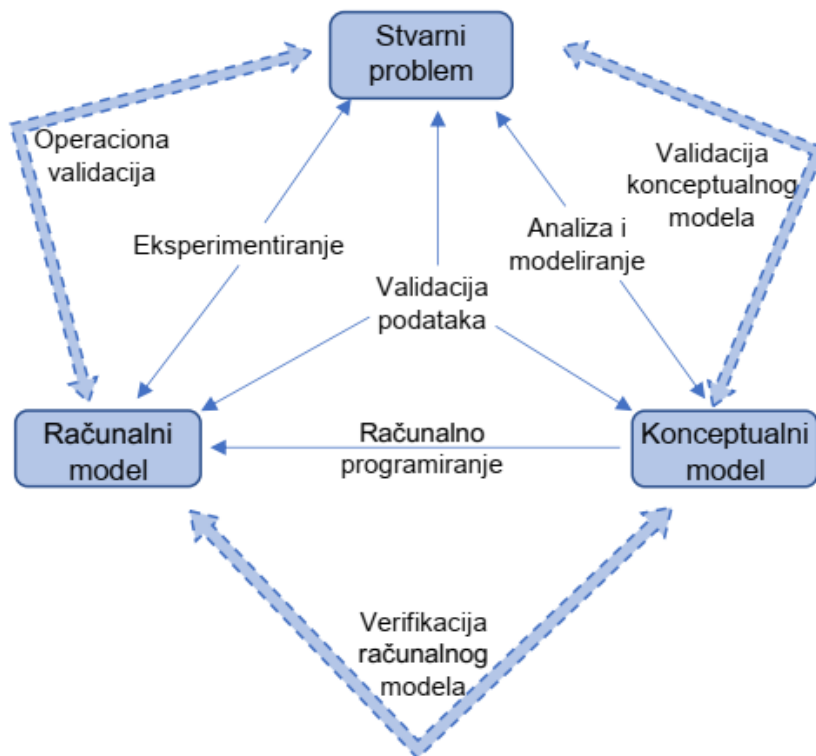
Medijski sadržaji, pogotovo interaktivni medijski sadržaji se ocjenjuju kao pozitivan efektivni čimbenik (Poindexter & Orr, 2001; Rachmadtullah et al., 2019) te su poželjni u primjeni u širokom spektru djelatnosti od obrazovnih sadržaja (Marković et al., 2014; Mishra & Sharma, 2005; Nusir et al., 2012) do marketinga itd. U tom pogledu niti područje simulacijskog modeliranja nije van trendova, te se uspješni alati za modeliranje nastoje dizajnirati tako da se postigne što veća interaktivnost i integracija multimedijских sadržaja. Cilj integracije multimedijских sadržaja je korisniku približiti sami model i njegovu primjenu učiniti atraktivnijom. Primjerice animacijom grafičkog prikaza se zorno može prikazati efekt promjene parametara modela tijekom simulacije. AnyLogic alat nudi mogućnost animacije grafičkih elemenata što je dodatna prednost za korištenje ovog alata.

### **2.3. Verifikacija i validacija modela**

Pojmove *verifikacija* i *validacija* neki autori smatraju sinonimima (Hekimoğlu & B-arlal, 2016; Pidd, 2004), odnosno samo upotrebljavaju pojam validacija (eng. *validation*), npr. Schwaninger & Groesser (2016).

Prema Robertu G. Sargentu (2011) verifikacija i validacija se razlikuju s obzirom na fazu razvoja modela u kojoj se provode. Na Slici 12. je pojednostavljena shema procesa razvoja modela, prilagođena iz (Sargent, 2011). Počevši od problema iz stvarnog svijeta koji želimo modelirati ponajprije se razvije konceptualni model te se u tom procesu validira konceptualni model. Proces podrazumijeva određivanje jesu li ispravne ideje i pretpostavke na kojima temeljimo koncept modela te odražavaju li svrhu modela. Računalni model koji se kreira na temelju konceptualnog modela prolazi proces verifikacije u kojem vodimo računa o točnosti programskog rješenja. Operativna validacija utvrđuje razinu točnosti izlaznih podataka u odnosu na namjeravanu svrhu modela. Pritom postoji i validacija podataka kojom se osigura da su podaci potrebni za izgradnju modela primjereni i točni.

U radu Lemke i sur. (2013) verifikacija se smatra zadaćom autora modela i odnosi se na tehnički dio modela kao što je računalni program i programski jezik, odnosno u kojoj mjeri je model „tehnički ispravan“, dok je validacija kompleksnije pitanje i odnosi se na procjenu u kojoj mjeri model predstavlja realno stanje.



Slika 12. Proces modeliranja prema Sargentu (2011)

Prema Carsonu (2002) ne postoji potpuna verifikacija i validacija jer je svaki model samo aproksimacija ponašanja stvarnog sustava, te su verifikacija i validacija procjena do koje mjere je ta aproksimacija zadovoljavajuća s obzirom na namjenu. Pritom verifikaciju smatra provjerom odgovara li model zadanim tehničkim specifikacijama, a validaciju ocjenu predstavlja li model stvarni sustav do dovoljne razine točnosti.

### 2.3.1. Testovi verificiranja modela

Bez obzira što se SD kao metoda simulacijskog modeliranja koristi već preko 70 godina, verifikacija SD modela još uvijek nije egzaktna u smislu da ne postoji jasno definirana procedura ili neophodan skup testova koji se trebaju primijeniti, već uvelike ovisi o karakteru modela, njegovoj namjeni i području primjene (Barlas, 1996). Primjerice, verifikacija modela kojim se problematizira neki tehnološki sustav zahtijeva u većoj mjeri kvantitativne (formalne) alate nego kvalitativne dok se u području društvenih pojava mora uzeti u obzir i neformalna, kvalitativna procjena korisnosti modela (Barlas, 1996). U literaturi postoji veliki broj različitih metoda verifikacije koje se mogu grupirati u tri zasebne skupine testiranja modela (Bala et al., 2017; Forrester & Senge, 1980). U nastavku su navedene i kratko opisane skupine koje se primjenjuju u ovom istraživanju:

1. testiranje strukture (eng. *structure*);
2. testiranje ponašanja (eng. *behaviour*);
3. testiranje implikacije na politike (eng. *policy implication*).

Testiranje strukture se odnosi na utvrđivanje jesu li odnosi korišteni u modelu adekvatan prikaz stvarnih odnosa. Testiranje ponašanja utvrđuje u kojoj mjeri je ponašanje modela dovoljno blizu ponašanju stvarnog sustava (Barlas & Kanar, 2000). Testiranje implikacija na politike se provode s ciljem povjerenja u rezultate modela koji bi utjecali na promjenu u donošenje odluka.

Testiranje strukture, ponašanja te implikacija na politike su ujedno i logički slijed testova za verifikaciju modela. Svaka faza može uključivati više testova (Bala et al., 2017; Barlas, 1996), primjerice testovi strukture su prikazani u Tablici 3.

Tablica 3. Verifikacija modela kroz testiranje strukture

testiranje strukture	opis
provjera strukture	struktura modela i jednadžbe koje povezuju elemente moraju odgovarati odnosima u stvarnosti ili temeljeno na relevantnoj literaturi
provjera parametara	svaki parametar (konstanta ili varijabla) moraju imati jasno značenje u stvarnom životu
ekstremni uvjeti	robusnost u ekstremnim uvjetima podrazumijeva da se pojedini parametri ponašaju jednako pri ekstremnim vrijednostima kao što očekujemo ili predviđamo u stvarnosti
granična adekvatnost	razmatra se uključuje li model sve relevantne strukture i je li prikladna agregacija modela odnosno model mora uključivati sve varijable i povratne veze sustava koji se proučava
konzistencija mjernih jedinica	mjerne jedinice obiju strana jednadžbi moraju odgovarati

Nakon uspješnog testiranja strukture model se može verificirati testovima ponašanja. U Tablici 4. su prikazani osnovni testovi ponašanja, pri čemu je test reprodukcije ponašanja ujedno i najrelevantniji od svih testova za verifikaciju modela (Bala et al., 2017; Forrester & Senge, 1980).

Tablica 4. Verifikacija modela kroz testiranje ponašanja

testiranje ponašanja	opis
reprodukcija ponašanja	uspoređuje se koliko se modelom generirano ponašanje podudara s ponašanjem stvarnog sustava
anomalija ponašanja	anomalije u ponašanju modela koje su u kontradikciji sa stvarnim sustavom

testiranje ponašanja	opis
osjetljivost ponašanja	utvrđivanje što se događa sa sustavom ako se promijene vrijednosti pojedinog parametra, te objašnjenje na koje je promjene parametara sustav osjetljiviji od drugih

Tablica 5. prikazuje dva najvažnija primjera testova verifikacije u zadnjoj fazi razvoja modela (Bala et al., 2017).

Tablica 5. Verifikacija modela kroz testiranje implikacija na politike

implikacije na politike	opis
predviđanje promjene ponašanja	procjena koliko dobro model predviđa ponašanje sustava u slučaju promjene politike
osjetljivost politika	procjena koji parametri su najvažniji za preporuku kreatoru politika u cilju poboljšanja realnog sustava

U društvenim, pedagoškim, ekonomskim znanostima raširena je primjena statističke značajnosti pri verifikaciji rezultata istraživanja. S obzirom da SD model nije stohastički već deterministički, testiranja statističke značajnosti u rezultatima sustavsko dinamičkog modela Barlas u svojim radovima argumentira neadekvatnim (Barlas, 1996; Hekimoğlu & Barlas, 2016), dok Sargent (2011) dozvoljava u određenim okolnostima statističko testiranje hipoteza.

Zaključno o pojmovima verifikacije i validacije, u ovom radu se razmatraju zasebno, po uzoru na (Sargent, 2011). Verifikacija se smatra „unutarnjom“ potvrdom ispravnosti tj. je li model dovoljno ispravan i valja li njegova interpretacija stvarnosti (je li dovoljno točna) te verifikaciju provodi autor modela. Validacija se smatra „vanjskom“ potvrdom kojom će se procijeniti je li model dovoljno poželjan za korištenje od strane ciljanih korisnika. Validacija predstavlja analizu od strane potencijalnih korisnika te nije usmjerena na testiranje samih funkcionalnosti modela već na primjenjivost u stvarnom okruženju. Jedna od adekvatnih metoda „vanjske“ potvrde je provođenje Delphi metode za validaciju korisnosti modela, koja se primjenjuje u ovom radu.

### 2.3.2. Delphi metoda

Delphi metoda je anketna metoda kojom stručnjaci za neko područje na temelju svoje ekspertize iznose mišljenje o temi ili iznose predikcije budućih trendova (Dalkey & Helmer, 1963). Obično se izvodi u nekoliko ciklusa anketnih upitnika ili intervjua, s povratnim informacijama između ciklusa, kako bi se došlo do pouzdanog konsenzusa u mišljenju ispitanika. Delphi metoda je kvalitativna metoda formiranja zaključaka u vezi teme oko koje postoji divergencija u stavovima. Oslanja se na stručnjake u nekom



području koji bi mogli predvidjeti ishod nekog budućeg scenarija, predvidjeti vjerojatnost određenog događaja ili približavanja stavova oko neke teme (Linstone & Turoff, 1975).

Definicija stručnjaka podrazumijeva osobe upućene u određeno područje, koje posjeduju određene vještine i znanja za argumentiranu raspravu (*The Cambridge Handbook of Expertise and Expert Performance*, 2006). Postavlja se pitanje identifikacije tko bi se mogao smatrati stručnjakom za određeno područje pogotovo u smislu predviđanja trendova ili kvalitativne analize potencijalnih pojavnosti u ispitivanom području. U radu S. Mauksch i sur. (2020) analizira se 9 metoda za identifikaciju stručnjaka, s obzirom na sociološki, bihevioristički i kognitivni pristup:

- sociološki pristup – stručnost se stavlja u kontekst izabranosti u predstavničko tijelo koje je u mogućnosti kreirati politiku i donositi odluke, pritom se naglašava da kvalifikacija stručnosti se ne temelji na boljim kognitivnim sposobnostima u odnosu na svoje kolege (Agnew et al., 1994);
- bihevioristički pristup – stručnost se vrednuje komparacijom prošlih učinaka te služi kao vodilja za procjenu točnosti budućih predviđanja te komparacijom samoprocjene i stvarnih učinaka stručnjaka (Einhorn, 1974);
- kognitivni pristup – stručnost se naglašava u kontekstu iskustvene prednosti iskusnog istraživača u odnosu na početnika, dakle stručnost je razvojna ili evoluirajuća kategorija jer se može naučiti i podučiti (Chi, 2006).

Postavlja se pitanje subjektivnosti i pristranosti stručnjaka pri formulaciji mišljenja, te se argumentirano tvrdi da u odnosu na laike, stručnjaci u svojim stručnim procjenama dugoročnih događaja iskazuju pristrane i optimistične stavove, te da je vrlo teško formirati grupu stručnjaka potpuno nepristranih vezano za temu (Hussler et al., 2011).

Prema Babiću (2011) rezultati pri donošenju odluka ili formiranja stavova u slučaju komplementarnog znanja među članovima grupe su bitno vrijedniji u odnosu na rezultate koje donosi grupa čiji članovi posjeduju konkurentna ili istovrsna znanja. Poželjno je dakle da su ispitanici Delphi metodom različito profilirani stručnjaci. Autor navodi pritom da je skupina stručnjaka s komplementarnim znanjima adekvatnija za uspješno rješavanje nestrukturiranih problema i za donošenje neprogramiranih odluka, što su karakteristike odlučivanja na najvišim razinama menadžmenta.

Delphi metoda je prisutna u širokom spektru djelatnosti. Primjeri raznolike primjene metode su:

- istražena je metodologija kibernetičke sigurnosti u provođenju izbora u SAD-u, dovedena u pitanje nakon sumnji na uplitanje Rusije u izborni proces na izborima 2016. u SAD-u (Hodgson et al., 2022);
- identifikacija najboljih strategija po pitanju mentalnog zdravlja odraslih osoba s invaliditetom u online modificiranom Delphi panelu sa sudjelovanjem 56 stručnjaka (Shearer et al., 2021);

- identificirani su i procijenjeni čimbenici ranjivosti urbanih cjelina na građanske ili terorističke nemire većih razmjera (Paul et al., 2008);
- mogućnosti primjene kvantne tehnologije i posebno kvantnih računala u području biologije i drugih područja znanosti o živim bićima kao što su imunologija, citologija, ekologija, virologija itd. (Gunashekar et al., 2022);
- 28 stručnjaka u području obrazovanja je procjenjivalo kako će se promijeniti potrebe za vještinama u sljedećih 5-10 godina u području zdravstva, znanosti i tehnologije, menadžmenta i obrtničkih zanimanja (Hofman et al., 2022).

Delphi metoda uobičajeno se provodi u nekoliko ciklusa anketa ili intervjua (najčešće tri), a točan broj ovisi o samom istraživačkom pitanju ili razini zadovoljstva dobivenim rezultatima. Okvirno su koraci u istraživanju navedeni u sljedećih pet točaka, s pojašnjenjima (Linstone & Turoff, 1975).

1. Definira se istraživačko pitanje odnosno koji problem se želi riješiti te koji cilj je zadovoljavajući. Pod zadovoljavajućim ciljem smatra se koja razina konsenzusa među stručnjacima je postignuta.
2. Odabere se grupa stručnjaka. Ovaj korak je ujedno i bit same metode.
3. Prvi ciklus upitnika: obično je u pisanoj formi s pitanjima otvorenog tipa da bi se prikupila što šira lepeza razmišljanja. Prikupljaju se i sintetiziraju odgovori (objedine slični odgovori i odbacuju irelevantni) te se obično stručnjacima povratno prezentiraju rezultati. U toj fazi su obično anonimni odgovori ispitanika prezentirani u povratnoj informaciji.
4. Drugi ciklus upitnika: upitnik se usmjerava prema konsenzusu u razmišljanjima stručnjaka. S obzirom na povratne informacije iz prvog kruga, nakon što su analizirali mišljenja ostalih stručnjaka, ispitanici mogu promijeniti mišljenje. I podaci drugog ciklusa se sažimaju u izvješće i povratno prezentiraju ispitanicima. Nakon ove faze stručnjaci imaju uvid u kojem smjeru i s kojim argumentima se mijenja mišljenje većine, odnosno u kojem smjeru ide konsenzus u stavovima. U ovoj fazi ispitanici ne moraju više ostati anonimni u svojim odgovorima. Nadalje, u ovoj fazi upitnik može biti i u obliku intervjua ili panel diskusije, ne nužno pisanog anketnog upitnika.
5. Treći ciklus upitnika: provodi se jednako kao i drugi ciklus, nakon sažetog izvještaja iz drugog ciklusa. Pitanja se formiraju na temelju analize odgovora iz drugog ciklusa. Također i ovdje ne mora nužno biti pisani anketni upitnik. Ako je procijenjeno da je postignut dovoljan stupanj konsenzusa među stručnjacima, ovdje se može stati s ispitivanjem, kao i nastaviti u sljedeće cikluse po potrebi.

Kao i u većini metoda u kojima se formira tim ispitanika, postavlja se pitanje što je „dobar“ uzorak ispitanika, u ovom slučaju stručnjaka. Potencijalni razlozi za neuspjeh istraživanja temeljenog na Delphi metodi mogu među ostalim biti (Linstone & Turoff, 1975):

- nametanje predrasuda i ograničenih perspektiva od strane moderatora istraživanja,

- loša tehnika strukturiranja prikupljenih odgovora i prezentiranja rezultata kroz povratne informacije,
- umjetno stvoreni konsenzus uslijed ignoriranja avangardnih mišljenja i neistraživanja nesuglasica u mišljenjima, itd.

Pri validaciji Delphi metodom treba uzeti u obzir promjene u stavovima između ciklusa anketiranja. Pokazalo se da se u slučaju prezentirane povratne informacije ispitanicima između ciklusa anketiranja, stavovi značajnije mijenjaju prema većem stupnju konsenzusa. Konkretnije, pokazalo se da u slučaju da se barem 75% ispitanika slaže s nekom tvrdnjom, tada će ispitanik prihvatiti takav stav bez obzira na prijašnje mišljenje. Isto tako u slučaju da je konsenzus unutar grupe zastupljen s manje od 75%, smanjuje se vjerojatnost da se ispitanik prikloni konsenzusu (Barrios et al., 2021).

S obzirom na prirodu Delphi metode kao informalne i kvalitativne, primjerena je za treću skupinu testiranja modela, odnosno testiranje *implikacija na politike*. U tu skupinu spadaju procjene ponašanja sustava u slučaju promjene politike i procjene kreatora politika u cilju poboljšanja realnog sustava, o čemu ne odlučuje autor modela (koji provodi testiranja *strukture* i *ponašanja*) nego korisnik modela te je odvojeno kao zasebna faza razvoja modela. S obzirom na primjere primijenjenost u području odgoja i obrazovanja (Hofman et al., 2022), smatra se adekvatnom metodom za procjenu korisnosti modela, odnosno metodom za validaciju modela u sustavu odgoja i obrazovanja.

### 3. Modeliranje ljudskih potencijala u sustavu odgoja i obrazovanja

Ljudski potencijali obuhvaćaju sve ljude povezane uz neku organizaciju: zaposlenike, upravu i volontere. Kao sinonim se još koristi pojam ljudski resursi (eng. *human resources*, HR), uobičajeniji u engleskom govornom području. Ljudski potencijali se smatraju osnovnim dijelom svake organizacije, njen najvažniji element. Uspješnost neke organizacije se procjenjuje uspješnim upravljanjem ljudskim potencijalima, te materijalnom i financijskom imovinom (Bahtijarević-Šiber, 2014).

S obzirom na važnost, upravljanje ljudskim potencijalima se prepoznaje i razvija kao zaseban dio upravljanja organizacijom, s posebnim odjelom i zaposlenicima specijaliziranim za upravljanje HR. Njihove aktivnosti obuhvaćaju sve radnje povezane sa zaposlenicima, i pritom se takve aktivnosti smatraju podržavajućim aktivnostima jer se bez njih ne bi mogle odvijati primarne aktivnosti organizacije (Valacich & Schneider, 2017). U malim organizacijama poslove vezane za upravljanje ljudskim potencijalima obično obavlja uprava ili se delegira na vanjskog partnera.

Upravljanje ljudskim potencijalima se definira kao znanstvena disciplina koja se bavi istraživanjem i organiziranjem znanja usmjerenog na razumijevanje, predviđanje, usmjeravanje, mijenjanje te razvoj ljudskog potencijala i njegova ponašanja (Bahtijarević-Šiber, 2014). Prema Mathisu i Jacksonu (2011) aktivnosti upravljanja ljudskim resursima mogu se grupirati u kategorije:

- strateško upravljanje;
- jednaka mogućnost zapošljavanja;
- zapošljavanje odgovarajućeg osoblja;
- upravljanje talentima;
- naknade i beneficije;
- zdravlje, sigurnost i zaštita;
- odnosi zaposlenika i uprave te radnička prava.

Pristup upravljanja ljudskim potencijalima se drastično mijenja razvojem ljudskih prava i etike na radnom mjestu. Prema Cooku i Crippsu (2009) tradicionalni način upravljanja HR podrazumijeva odgovornost menadžera isključivo prema vlasnicima, dioničarima, višim hijerarhijama uprave. Pritom se mora maksimizirati produktivnost i profit, a na radnika se gleda kao na resurs u cilju stvaranja profita.

Sami pojam ljudski „resursi“ odražavaju smisao tradicionalnog pristupa. Suvremeni pristup doživljava radnike kao konkurentsku prednost te je ulaganje u ljudske resurse isplativije nego ulaganje u bilo koje druge resurse. Pritom se vodi više računa o interesima radnika i njihovom razvoju potencijala i vještina. U tom smislu hrvatski izraz „ljudski potencijali“ više odražava suvremeni odnos prema ulozi zaposlenika u organizaciji.

### 3.1. Ljudski potencijali u odgoju i obrazovanju

Obrazovni sustav sastavni je dio strategije razvoja svake države. Sustav odgoja i obrazovanja odgovoran je za razvoj sljedećih generacija i direktno utječe na budućnost zemlje. Stoga je kvaliteta pruženog obrazovanja ključni faktor u određivanju razvoja zemlje i društva u cjelini.

Prema Staničiću (2006) postoje dvije skupine ljudskih potencijala u školskom sustavu, s obzirom na uključenost u odgojno-obrazovni rad. Prva skupina neposrednim pedagoškim radom ostvaruje ciljeve odgoja i obrazovanja i djeluje u okviru odgojno-obrazovnih ustanova: predškolske ustanove, osnovne i srednje škole, visokoškolske ustanove, učenički domovi, ustanove za polaznike s posebnim potrebama. Druga skupina je podrška prvoj skupini i njena je uloga osiguravanje pretpostavki za ostvarivanje ciljeva odgoja i obrazovanja. U tu skupinu pripadaju primjerice pedagog, knjižničar, tajnik itd. te se podrška očituje kao stručna, razvojna, financijska, zakonodavna, upravna itd. Ustanove koje pripadaju drugoj skupini su agencije za obrazovanje, instituti vezani uz školstvo, centri za vrednovanje itd., što su ustanove za razvoj i stručni nadzor te Ministarstvo znanosti i obrazovanja, lokalne uprave za odgoj i obrazovanje itd., što su ustanove za provođenje politike i nacionalnih standarda. Prema ekonomistu M. E. Porteru (1985.) u organizacijama postoje temeljni i podražavajući poslovni procesi (Cingula & Fabac, 2010) što se u sustavu odgoja i obrazovanja može klasificirati na djelatnosti i kadrove vezane za odgojno-obrazovni rad (primarne djelatnosti) te sekundarne djelatnosti. Ovim radom se razmatra prva skupina, ljudski potencijali koji su uključeni u odgojno-obrazovni rad te se takva djelatnost smatra nositeljem djelatnosti odgoja i obrazovanja.

U obrazovnom sustavu stručnjak za ljudske resurse obavlja različite dužnosti vezane uz zapošljavanje nastavnika, obrazovnih stručnjaka i pomoćnog osoblja te drugog osoblja iz administracije, održavanja, itd. U širem smislu u ljudske potencijale pripadaju i „korisnici“ sustava kao što su učenici i studenti (Rebore, 2001). S obzirom da je temeljna djelatnost obrazovnih institucija odgajanje djece u vrtićima, odgoj i obrazovanje učenika u školama te obrazovanje studenata na visokoškolskim ustanovama, fokus upravljanja ljudskim potencijalima u sustavu odgoja i obrazovanja je na zapošljavanju odgojitelja, učitelja, nastavnika i profesora.

Neke od specifičnosti HR u odgoju i obrazovanju su:

- visoka razina zakonske reguliranosti, brojni pravilnici koji definiraju uvjete rada, kadrovska pitanja i pedagoške standarde, kolektivni ugovori, standardi zanimanja itd.,
- broj odgojno-obrazovnog osoblja je direktno povezan s brojem upisane djece, učenika i studenata u ustanove,
- usko specijaliziranih radnici za odgovarajuća radna mjesta za koja trebaju točno određenu specifikaciju obrazovanja.

Pokazatelji ljudskih potencijala u sustavu odgoja i obrazovanja se mogu razdvojiti u kvantitativne i kvalitativne. Kvantitativni pokazatelji ogovaraju na pitanje brojnosti, odnosno koliko je zaposlenika u pojedinim ustanovama, koja je dobna

struktura, koliko je radno iskustvo, koje su razine obrazovanja i kvalifikacija zaposlenika. Takve podatke je moguće prikupiti u statističkim analizama Državnog zavoda za statistiku, javnim podacima pojedinih ustanova, itd. Kvalitativni podaci govore o kvaliteti znanja i vještina koje posjeduju zaposlenici, kreativnosti i motivaciji za rad, profesionalnom razvoju i željom za usavršavanjem, itd. Takvi podaci bi trebali odgovoriti na pitanje kvalitete ljudskih potencijala i mogućnost ostvarenja misije ustanova u sustavu odgoja i obrazovanja (Staničić, 2006).

Državni zavod za statistiku prikuplja i analizira kvantitativne podatke zaposlenih u sustavu odgoja i obrazovanja. U svojim periodičkim izvještajima iznosi razne statističke podatke, npr. vidjeti (Državni zavod za statistiku, 2019b). Nadalje, Vlada RH je donijela 2010. godine Uredbu o obavezi praćenja, analize i predviđanja potreba tržišta rada za pojedinim zvanjima te obavezi izrade i uzimanja u obzir preporuka za obrazovnu upisnu politiku, u cilju provedbe reforme sustava obrazovanja (NN 93/2010, 2010). Na temelju podataka o zaposlenima u sustavu odgoja i obrazovanja Hrvatski zavod za zapošljavanje provodi analizu i prognozu potreba tržišta rada za pojedinim zvanjima te izrađuje preporuke za obrazovnu upisnu politiku (Hrvatski zavod za zapošljavanje, 2020). Unatoč relativno dobrom uvidu u kvantitativno stanje, preporuke oko potreba tržišta rada i upisnih kvota se ne poštuju. Pritom ne postoje kompleksnije sustavne analize koje bi dale projekcije potreba za obrazovnim kadrovima u budućem periodu.

### **3.2. Pristupi modeliranju ljudskih potencijala u sustavu odgoja i obrazovanja**

Sustav odgoja i obrazovanja ima odlike kompleksnog sustava te je za potrebe modeliranja obrazovne politike važan dio analiza i modeliranja ljudskih potencijala. Različiti su pristup njegovoj analizi, s naglaskom na projekcije budućih trendova.

Primjerice neki od mogućih pristupa mogu biti modeliranje procesa (npr. evaluacija performansi zaposlenika, analiziranje procesa zapošljavanja itd.), modeliranje radne snage (npr. analiziranje demografske strukture zaposlenika), *cost-benefit* analiza (praćenje financijskog utjecaja na organizaciju), analiza podataka (sinteza svih prikupljenih podataka o zaposlenicima radi statističkih izvještaja i identifikacije mjesta za poboljšanje) i simulacijsko modeliranje. Posljednje od navedenog je u fokusu ovog rada i podrazumijeva računalni model za promatranje različitih scenarija i njihov utjecaj na sustav u cjelini.

Model temeljen na povijesnim podacima te njihova statistička analiza za predviđanje budućeg trenda potrebe za učiteljima je predstavljen u radu Reichardt i sur. (2020.). Metoda se sastoji od prikupljanja podataka o upisima učenika i zaduženjima učitelja kroz nekoliko zadnjih godina u saveznoj državi Missouri, u SAD-u. Na temelju statistički obrađenih podataka se predviđa upis studenata i predviđa radna snaga nastavnika, pod pretpostavkom da se trenutni trendovi nastavljaju. Pritom se za predviđanje koriste najnovije godine podataka, prosjeci podataka prethodnih dvije ili četiri godine i metode temeljene na regresiji. Autori ističu nekoliko važnih pretpostavki da bi model imao smisla: točnost prikupljenih podataka, pretpostavka da će se primijećeni uzorak nastaviti i u budućnosti te da modeliranje se odnosi na

kvalificiranje učitelje. Uspoređivani su uspjesi u predikciji na temelju zadnje godine, dvogodišnjeg prosjeka, četverogodišnjeg prosjeka te linearnog trenda. Pokazala se najuspješnija metoda na temelju četverogodišnjeg prosjeka, odnosno najtočnije je predviđala u usporedbi sa kontrolnim podacima. Zaključci studije naglašavaju da je razdoblje za buduće predviđanje na temelju statističke metode najviše četiri godine, s obzirom da pouzdanost opada s brojem godina koje se predviđaju (Reichardt et al., 2020).

Postoji veliki broj studija koje nemaju ambicije predviđati buduće trendove, nego samo prezentiraju statističke podatke koji bi mogli utjecati na neke politike u sustavu odgoja i obrazovanja. Primjerice Ingersoll i sur. (2014) prezentiraju sedam najvažnijih trendova u populaciji učitelja osnovnih i srednjih škola, na temelju velike baze podataka Nacionalnog centra za obrazovnu statistiku u SAD-u. U studiji temeljenoj na uzorku od 50000 upitnika prikazuju promjene u populaciji učitelja u periodu 1987. do 2012. godine. Studija predstavlja jasne promjene u promatranom periodu no tek postavlja pitanja o razlozima promjena i što će se događati u budućem periodu. Za potrebe planiranja u sustavu odgoja i obrazovanja studije na temelju statističkih podataka su limitirane u odnosu na simulacijske modele.

U radu Denton i sur. (1994) sustavom jednadžbi se povezo utjecaj stope prirodnog priraštaja stanovništva s brojem učitelja. Modelom se pokušalo predvidjeti na koji način pravovremeno reagirati na promjene u prirastu stanovništva da ne dođe do viška ili manjka učitelja. Zaključak studije jest da je ključna brza reakcija u obliku pritoka novih učitelja u sustav, što se može regulirati političkim odlukama u vidu radnih uvjeta, plaće i slično

U radu Pedamallu i sur. (2010) se razmatra utjecaj na upise i stopu odustajanja od nastavka školovanja učenika osnovnih škola zemalja u razvoju. Na temelju prethodnih istraživanja te ankete provedene u Gujaratu u Indiji razmatraju se čimbenici kao što su kvaliteta podučavanja, infrastrukture škole i prihod roditelja. Razvijen je SD model i provedene simulacije te su rezultati pokazali da poboljšanje u infrastrukturi škola bitno utječe na stope upisa u osnovne škole. Primjenjivost studije je ograničena u Hrvatskoj i drugim razvijenim zemljama iz više razloga. Osnovno obrazovanje, a u dosta zemalja i srednje, je obavezno već dugi niz godina te su iznimka slučajevi odustajanja od školovanja. Slabe financijske mogućnosti roditelja ne utječu na upis učenika jer u tom slučaju socijalni programi države omogućavaju školovanje. Nadalje, u školama razvijenih zemalja su uglavnom riješeni infrastrukturni problemi pa više nisu od interesa parametri kao što su dostupnost pitke vode u školi, sanitarni čvorovi i prekobrojnost učenika u razredima, što je predmet istraživanja u navedenoj studiji. Za očekivati je da bi slično istraživanje bilo više primjenjivo u visokoškolskom sustavu razvijenih zemalja u kojem bi se istraživala povezanost kvalitete nastave ili financijske mogućnosti studenata, s obzirom na neobavezno visoko školstvo. Studija je svakako pokazala primjenjivost SD na modeliranje infrastrukturnih i ljudskih potencijala u obrazovanju.

Još jedan je primjer pozitivne primjene SD u rješavanju pitanja pri zapošljavanju učitelja u javnim školama u Portugalu. Mendes i Aleluia (2019) su razvili model

nastavnika osnovnoškolskog obrazovanja (u Portugalu je to obaveznih 9 godina školovanja, tzv. K-9) te su razmatrali potencijalni višak učitelja uslijed depopulacije i krize u financiranju javnih škola. Modelom se pokazalo da neće biti viškova u populaciji učitelja te je na taj način otklonjen niz napetosti u društvu u vidu vala štrajkova i velike neizvjesnosti pri zapošljavanju.

Metoda SD se primjenjuje u mnogim aspektima u sustavu odgoja i obrazovanja. Posebno se odnosi na modeliranje odnosa financija i upisne politike. U radu Pavlov i Katsamakos (2020) se razmatra utjecaj demografskog smanjenja populacije na financijski opstanak visokoškolskih ustanova u SAD-u te se iznosi tvrdnja da bi se uskoro moglo zatvoriti pola od 4000 ustanova. Na primjeru hipotetskog fakulteta razmatraju se tri scenarija kako odgovoriti na smanjenje broja upisanih studenata: ne činiti ništa, smanjiti broj profesora ili poboljšati uvjete studiranja. Zaključak studije jest da niti jedan od tri scenarija ne rezultira dugoročno održivim rješenjem, nego treba tražiti druga rješenja ili potpuno redefinirati visokoškolsko obrazovanje.

Više je SD primjera o utjecaju financija na privlačenje većeg broja studenata. Primjerice studija sa privatnog sveučilišta u Siriji (Hallak et al., 2019), sveučilišta u Australiji (Galbraith, 1998), studija utjecaja ekonomskog rasta na porast visokoškolskih ustanova u Brazilu (Strauss & Borenstein, 2015), i dr.

U preglednom radu M. Kennedy (2011) predstavlja sedam područja u sustavu odgoja i obrazovanja u kojima je primijenjena SD metoda: pravna pitanja, upravljanje, planiranje resursa i financija, pitanje osoblja, kvaliteta podučavanja, upisna politika, te mikrosvjetovi. U radovima se autori fokusiraju na pojedini aspekt sustava odgoja i obrazovanja, često se promatra utjecaj financija na sustav ili proces poboljšanja kvalitete podučavanja. Metoda se pokazala vrijednom za istraživanje u kompleksnim sustavima pa tako i u sustavu odgoja i obrazovanja. Daljnja moguća primjena je na sagledavanje cjelokupnog sustava a ne samo nekih dijelova sustava.



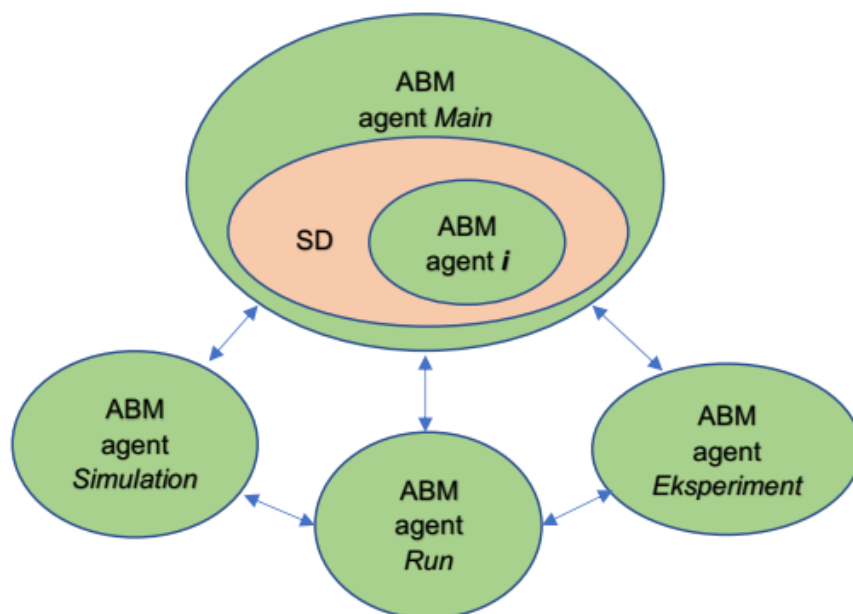
## 4. Metodološki okvir sustavske dinamike za planiranje ljudskih potencijala u sustavu odgoja i obrazovanja

U ovom poglavlju opisuje se primijenjeni metodološki okvir za modeliranje ljudskih potencijala u sustavu odgoja i obrazovanja primjenom simulacijskih metoda sustavske dinamike (SD) i modeliranje temeljeno na agentima (ABM). Kombiniranjem SD i ABM paradigmi simulacijskog modeliranja se razvijeni model može karakterizirati kao hibridni model (Borshchev, 2013).

Pod pojmom *metodološki okvir* podrazumijeva se pristup koji se predlaže za primjenu u razvoju modela za upravljanje ljudskim potencijalima u sustavu odgoja i obrazovanja. Obuhvaća skup postupaka, metoda i alata koji vode istraživački proces na sustavan i strukturiran način. Pritom se metodološki dio odnosi na skup metoda koje se koriste, a okvir na korake i postupke koje je potrebno provesti.

Glavni cilj ovoga rada je sustavsko dinamičkim modeliranjem ljudskih potencijala i resursa u sustavu odgoja i obrazovanja omogućiti podršku odlučivanju pri donošenju upisne politike te pritom pokazati primjenjivost metode SD uz pojedine elemente ABM na planiranje ljudskih potencijala i resursa u sustavu odgoja i obrazovanja. Time se ujedno pokazuje i primjenjivost metode za podršku odlučivanju pri donošenju politika u području odgoja i obrazovanja, s naglaskom na upisnu politiku. S obzirom na klasifikaciju hibridnih ABM i SD modela predstavljenu u poglavlju 2.1.3., primijenjene su metode ugrađivanja i koordiniranja kao adekvatne odnosno nude najveću fleksibilnost s obzirom na zahtjeve korisnika modela i dostupne podatke za razvoj modela. Na Slici 13. je općeniti shematski prikaz primijenjenog modela. SD okolina koja predstavlja cjelokupni sustav odgoja i obrazovanja je sadržana unutar agenta.

Unutar SD dijela modela se mogu nalaziti drugi agenti koji predstavljaju pojedine komponente sustava, primjerice zasebne ustanove kao što su fakulteti, škole, populaciju studenata, učenika, zaposlenika i slično. U najopćenitijoj i najdetaljnijoj razradi modela agenti unutar SD okoline mogu predstavljati pojedine ljude. O tome hoće li se pojedini dio sustava prikazati kao agent ovisi o dostupnim podacima na temelju kojih bi se individualno ponašanje opisalo. Nije realno da se može svaki pojedinac prikazati kao agent jer bi trebalo znati u detalje karakteristike svakog pojedinca, njegova precizna statistička obilježja na temelju kojih bi se moglo opisati ponašanje. Pokretanje modela, simulacije i izvođenje raznih eksperimenata su zasebni agenti koji se kreiraju po potrebi pri izvođenju. Eksperimenti uključuju eventualne optimizacije parametara, analize osjetljivosti i druge tipove eksperimenata koja ovise o programskim mogućnostima samog alata. Primjerice ako se želi izvesti optimizacija nekog parametra, program kreira agenta za provedbu takvog eksperimenta.

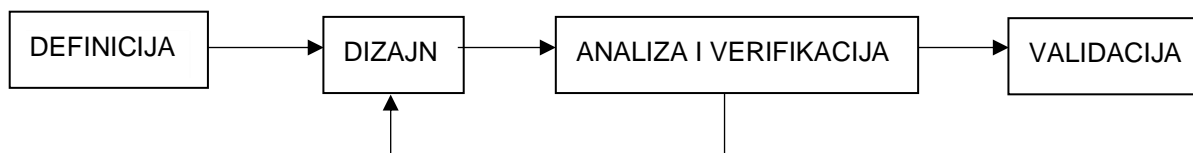


Slika 13. Shematski prikaz modela s obzirom na SD i ABM

Prednost navedene strukture u odnosu na isključivo SD modele je dvojaka: efikasnije se izvode potrebne simulacije, eksperimenti i analize modela, u skladu s prednostima objektno orijentiranog programiranja u odnosu na klasično programiranje. S druge strane se omogućava da se po potrebi određeni dio SD okoline modelira kao agent u skladu s dostupnosti detaljnih podataka (Borshchev & Filippov, 2004). Primjerice unutar sustava visokog obrazovanja mogu se pojedini fakulteti modelirati kao agenti, u slučaju dostupnih detaljnih podataka koji reprezentiraju točno pojedine fakultete. Na taj način se može promatrati interakcija pojedinih agenata unutar okoline, odnosno u kakvoj interakciji su pojedini fakulteti. S druge strane nedostatak preciznih podataka može rezultirati da se fakulteti promatraju zajedno, kao SD element. Time se dobiva na fleksibilnosti u modeliranju te se dizajnu modela može pristupiti neopterećeno o paradigmi modeliranja (Łatuszyńska, 2020).

#### 4.1. Faze razvoja modela

Razvoj modela se realizira kroz četiri faze: definicija, dizajn, analiza i verifikacija te validacija; prikazano shematski na Slici 14. Strelice označavaju slijed u razvoju modela, pa tako nakon faze definicije slijedi dizajn a potom faza analize i verifikacije. Po potrebi se razvoj iterativno vraća u fazu dizajna. Tek po zadovoljavajućoj razini verifikacije, prihvatljivoj s obzirom na postavljene kriterije i testove, slijedi faza validacije i konačne ocjene modela. Pritom je naglašena razdvojenost faza validacije od faze verifikacije, u skladu s konceptualnim pristupom procesa modeliranja (Sargent, 2011).



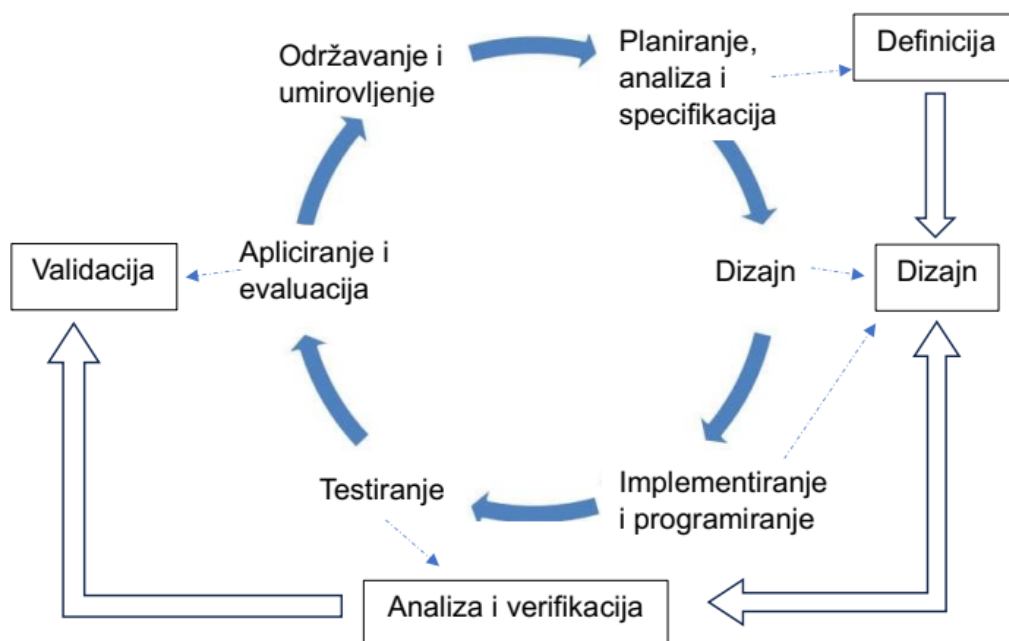
Slika 14. Faze razvoja modela

Metodološki okvir za razvoj modela sustavske dinamike za planiranje ljudskih potencijala u sustavu odgoja i obrazovanja se temelji na metodologiji sustavskog razmišljanja Bala i sur. (2017), istraživanja Mitala (2015) u kojem se istraživao okvir za evaluaciju intervencija u obrazovnom sustavu te okvira za hibridna modeliranja Brailsforda i sur. (2019). Bala i sur. (2017) razlikuju šest faza u metodologiji od identificiranja problema do implementiranja koncepta modela u program ili sustav jednadžbi i ne smatraju validaciju i verifikaciju dijelom metodološkog okvira. Ovim istraživanjem se razvoj modela jednostavnije rastavlja u manje faze te obuhvaća i proces evaluacije modela samim metodološkim okvirom. Mital (2015) naglašava nelinearnost u fazama definicije, analize, dizajna i validacije odnosno iz bilo koje faze se po potrebi može vratiti u bilo koju od proteklih faza. Brailsforda i sur. (2019) predlažu četiri faze razvoja modela od analize problema iz realnog svijeta, konceptualnog problema, računalnog programa do implementiranog rješenja. Pritom faze slijede u kružnom ciklusu te se u svakoj fazi provodi verifikacija ili validacija. Ovim istraživanjem se jasnije definira slijed u fazama te su u namjeni odvojene faze verifikacije i validacije s naglaskom razlikovanja tko provodi aktivnosti verifikacije u odnosu na validaciju. Također su jasnije razdvojene i uloge pojedinih faza u odnosu na metode simulacijskog modeliranja. Naime u isključivo SD ili ABM modelima se mogu opisati elementi unutar raznih faza, primjerice u slučaju isključivo SD modela već se u fazi definicije može specificirati koji element će biti zaliha, protok ili konstanta. U ovom radu, s obzirom na hibridnost u razvoju modela, faza definicije problema je neovisna od simulacijskih metoda, odnosno može se koncept modela postaviti neovisno o metodi modeliranja koja se primjenjuje. U fazi dizajna se određuje prikaz elemenata s obzirom na simulacijsku metodu.

Navedeni autori, kao i u drugim primjerima razvoja SD modela iz literature, razlikuju metodologiju razvoja simulacijskog modela od životnog ciklusa razvoja sustava (eng. *System development life cycle*, SDLC). SDLC ciklus razvoja informacijskog sustava obuhvaća niz sekvencionalnih ili iterativnih aktivnosti od postavljanja koncepta i analize specifikacija, preko razvoja, testiranja, implementiranja do održavanja, evolucije i gašenja. U najširem obliku faze razvoja informacijskog sustava su faze planiranja, analize, dizajna, konstrukcije i evolucije (Montgomery, 1994). Prema standardu organizacije IEEE (eng. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) faze su detaljnije razdvojene i specificirane ('IEEE Guide for Developing Software Life Cycle Processes', 1996), te se dodatno naglašava proces koji se ponavlja, prikazano na Slici 15. kao unutarnji krug s plavim strelicama (Ragunath et al., 2010). Valacich i Schneider (2017) sintetiziraju SDLC u faze planiranje, analizu, dizajn te implementaciju s iterativnim postupkom nadogradnje i ponavljanja navedene

četiri faze. Mnogi drugi pristupi dizajniranju i razvoju sustava uključuju alternative SDLC-a kao što su primjerice proces „prototipa“ koji se još naziva pristup pokušaja i pogrešaka, agilne metode kao što su ekstremno programiranje (eng. *extreme programming*, XP), metoda brzog razvoja aplikacija (eng. *rapid application development*, RAD) i slično (Valacich & Schneider, 2017).

Primjena SD uključuje izradu modela te je postala visoko raširena u praksi zbog velikih mogućnosti koju pruža IKT. Razvoj modela u sustavu odgoja i obrazovanja primjenom simulacijskog modeliranja ne korespondira postupku razvoja informacijskog sustava te SDLC nije primjeren u ovom slučaju jer modelu nedostaju sve temeljne karakteristike informacijskog sustava. Model predstavlja prikaz konteksta neke pojavnosti koja se modelira te ne nudi nikakvo konkretno rješenje za rješavanje određenih problema. Ideja modela općenito, a osobito modela SD jest razvoj podloge za podršku odlučivanju. Zaključno, informacijski sustav je alat za upravljanje i obradu podataka i informacija unutar organizacije, dok je model sustavske dinamike simulacijski pristup razumijevanju i analizi ponašanja složenih sustava tijekom vremena (Forrester, 1961).



Slika 15. Životni ciklus razvoja sustava u odnosu na faze razvoja modela

Na temelju promatranih istraživanja u području simulacijskog modeliranja, ovim istraživanjem se primjenjuje metodološki okvir pojednostavljen u fazama u odnosu na faze razvoja informacijskog sustava, prikazano na Slici 15. s bijelim strelicama oko unutarnjeg kruga. Pritom isprekidane strelice označavaju koje faze SDLC-a se odnose na faze razvoja modela SD u ovom radu. U odnosu na faze SDLC-a nije naglasak na razvoju gotovog sustava koji zadovoljava početne specifikacije i propisane standarde već je naglasak na modelu koji će dati uvid u ponašanje sustava i pomoći u donošenju

odluka za poboljšanje sustava. Održavanje i umirovljenje sustava se ne odnose na faze razvoja modela kao što je to primjereno za faze SLDC-a.

Prva faza je faza definicije modela u kojoj se artikulira problem i potreba za razvojem modela. Pritom se analizira koji elementi se trebaju uključiti u razvoj modela, koji podaci su potrebni za funkcionalno povezivanje elemenata modela, na koji način prikupiti podatke, koji vremenski period obuhvatiti itd. Svrha ove faze je izgradnja okruženja koje reprezentira problematiku na logičkoj razini.

Dizajnom se model realizira na fizičkoj razini u obliku računalnog programa. Prikupljeni podaci se podijele u dvije skupine: potrebne za funkcionalno povezivanje elemenata sustava i podatke potrebne za verifikaciju modela. Funkcionalne veze među elementima sustava se prevode u jednadžbe te programski kod. Postavljaju se vrijednosti konstanti i početne vrijednosti varijabli na temelju prikupljenih podataka.

Svrha faze analize i verifikacije jest točnost u sintaksi i semantici programskog koda s obzirom na odabrani programski okvir, te usporedba podataka dobivenih razvijenim modelom i stvarnih podataka. Pritom se primjenjuju testovi za usporedbu podudaranja skupova podataka, mjere za procjenu pogrešaka itd. U slučaju prevelikog odstupanja odnosno pogrešaka većih od prethodno utvrđenih kao zadovoljavajućih, vraća se na fazu dizajna te se po potrebi dodaju novi elementi sustava, rafiniraju funkcionalne veze među elementima itd. Konačna pozitivna ocjena verifikacije podrazumijeva da model dovoljno dobro odražava stvarno stanje sustava. U ovoj fazi analiza podrazumijeva analiziranje implementiranog modela, a ne analizu i specifikaciju zahtjeva korisnika i postavljenog problema što se odvija u fazi definicije, što je uobičajena faza u razvoju informacijskog sustava ili baze podataka.

Faza validacije ima svrhu da korisnici modela daju ocjenu je li model koristan te primjenjiv za problem postavljen u fazi definicije. Ova faza podrazumijeva izvođenje simulacija i eksperimentiranje modelom sa svrhom odgovora na „što-ako“ pitanja u vezi sustava koji se promatra. U nastavku poglavlja se detaljnije prezentiraju pojedine faze razvoja modela.

## **4.2. Faza definicije modela**

Prvi korak u definiciji je prepoznata potreba za kvalitetnijem planiranjem ljudskih potencijala u sustavu odgoja i obrazovanja s ciljem pružanja podrške odlučivanju. Model je namijenjen upravama resornih državnih tijela odgovornih za upravljanje sustavom odgoja i obrazovanja, upravama pojedinih institucija i strukovnim organizacijama za pojedine struke unutar sustava odgoja i obrazovanja. Modelom se pokušava smanjiti neizvjesnost u planiranju ljudskih potencijala i omogućava bolje planiranje u budućem razdoblju.

Potrebno je artikulirati koji aspekt sustava je u fokusu, primjerice upisna politika, kadrovska rješenja, financijski utjecaji na sustav, pitanje strateških planova i slično. U fazi definicije određuje se domena modela, odnosno koji dijelovi kompleksnog sustava se trebaju uvrstiti u model da bi dovoljno vjerno mogao reproducirati stvarno stanje

sustava. Model sadrži informacije o elementima sustava: konstantne veličine, veličine kojima se vrijednost mijenja u vremenu (varijable) te vremenski raspon.

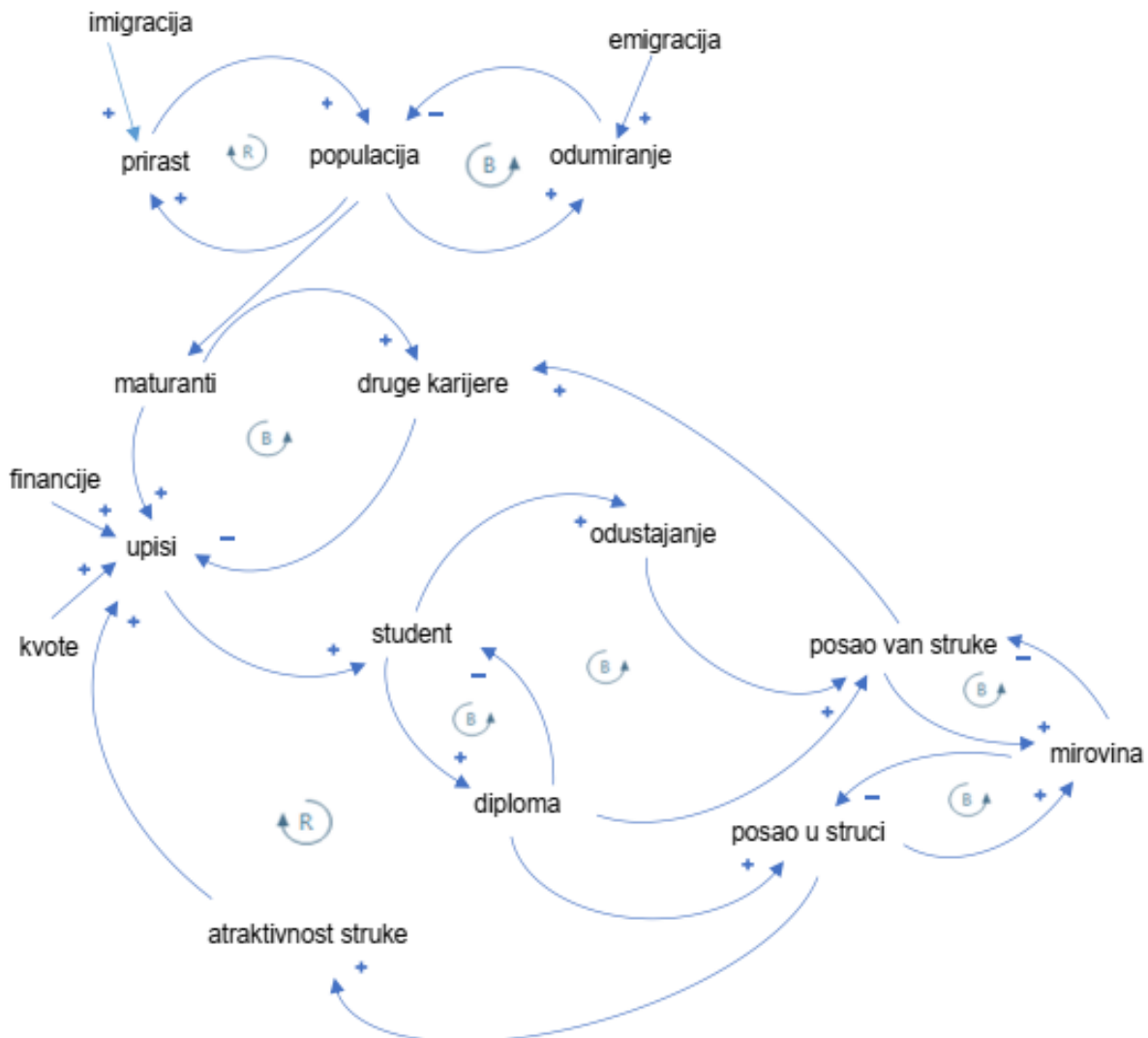
Ne postoje striktno definirani kriteriji kategorizacije parametara koji čine model, već se do potrebnih parametara dolazi procesom analize domene modela i zahtjeva potencijalnih korisnika, referiranjem na izvore iz literature, kroz suradnju s potencijalnim korisnicima modela u fazi validacije modela, intervjuje i opservacije (Serman, 2000). U zadnjoj fazi razvoja modela, fazi validacije, se kroz anketiranje stručnjaka za područje ljudskih potencijala potvrđuje valjanosti uključenih parametara te eventualno uključuju dodatni parametri na temelju ankete. U ovoj fazi se naglašava „znanje“ stručnjaka kao bitan faktor u razvoju modela, što se može realizirati kroz neformalne intervjuje, radionice, procjene stručnjaka, kao i nešto formalnije metode kao što su Delphi metoda za doprinos definiciji modela (Ford & Flynn, 2005).

Modelom se obuhvaća vremenski raspon razdijeljen u dva dijela: prvi dio potreban za izgradnju modela te drugi potreban za usporedbu podataka dobivenih modelom sa stvarnim podacima. Vremenski raspon postojećih istraživanja varira u velikoj mjeri i s obzirom na vrstu istraživanja. Primjerice od 64 tjedna u primjeru vezanom za predviđanja trenda u lancu opskrbe (Saeed, 2008), do 100 godina u primjeru modeliranja opskrbom vodom (Sahin et al., 2014). Prema Saraji i Sharifabadi (2017) primjereno je promatrati kraće vremenske periode u područjima u kojima se očekuje promjena trenda ili su očekivani kraći ciklusi u ponašanju promatranog sustava. Prema Perelmanu (1980) vremenske granice u SD modelima je subjektivna kategorija istraživača i vrste problema.

U sustavu odgoja i obrazovanja primjereno je vremenskim okvirom obuhvatiti period u skladu s vrstom istraživanja i obrazovnim ciklusima u sustavu. U istraživanju Faham i sur. (2017) promatra se obrazovanje o održivom razvoju na sveučilištima u Iranu te je promatran period od 20 proteklih godina jer je tema održivosti na sveučilištima u svijetu obuhvaćena unazad 20 godina. Period za buduće predviđanje su potom odredili također 20 godina. U radu Eliman (1991) modelom se nastoji predvidjeti upis na razne studije sveučilište u Kuvajtu te se na temelju vremenskog perioda od 8 godina predviđa upis za jednu godinu. U radu Mendes i Aleluia (2019) na temelju 12 godina za razvoj i verifikaciju modela predviđaju potrebu za nastavnicima kadrom u Portugalu. Potom na temelju modela predviđaju potrebe za nastavnicima 17 godina u budućem periodu kroz tri različita scenarija. S obzirom da su u navedenom radu odstupanja za neke elemente prelazila 11% u odnosu na stvarne podatke, ovim radom se primijenilo kraći period, odnosno četiri do pet godina za razvoj modela, kao i za verifikaciju modela, što je u skladu s istraživanjem (Reichardt et al., 2020) u kojem se argumentira da je period prognoze temeljem modela relevantan za period u kojem se ne očekuju značajne promjene u sustavu koje bi zahtijevale korekciju modela. S obzirom na prirodu sustava odgoja i obrazovanje te činjenice da se eventualne promjene obično implementiraju po završetku obrazovanja skupine koja je upisana temeljem starih pravila, smatra se da je adekvatan period od maksimalno 5 godina za predikciju. Slično istraživanje o potrebama broja učitelja temeljem statističkih podataka

analizira dostupne podatke u vremenskom rasponu 5 godina te potom analizira projekcije potreba u sljedeće 4 godine (Berg-Jacobson & Levin, 2015).

Faza definicije modela se realizira konceptualnim prikazom koji sadržava koncepte, kvalitativne vrijednosti i odnose među elementima sustava odnosno CLD dijagramom, opisanim u poglavlju 2.1.1.1. Na Slici 16. je prikazan CLD dijagram modela sustava odgoja i obrazovanja u najopćenitijoj formi. Prilikom primjene na konkretni problem, odnosno dio sustava odgoja i obrazovanja od interesa korisnika, model je potrebno prilagoditi i rafinira dodatnim parametrima.



Slika 16. CLD dijagram modela u sustavu odgoja i obrazovanja

CLD dijagramom se prikazuje pojednostavljeni prirodan slijed u životu. Uzima se u obzir prirast stanovništva i odumiranje stanovništva. Nadalje se prikazuje školovanje s time da je u ovom prikazu naglašen dio visokoškolskog obrazovanja a izostavljen dio s predškolskim, primarnim i sekundarnim obrazovanjem. Istaknut je dio od studiranja do zaposlenja sa stručnom kvalifikacijom te proces umirovljenja i izlaska iz sustava. Varijable uključene u sustav su odabrane na temelju literature i neformalnim

intervjuima sa sudionicima sustava odgoja i obrazovanja. Nekoliko je tematski zasebnih dijelova CLD dijagrama:

- dio koji prikazuje opću populaciju od rođenja do smrti;
- dio koji prikazuje populaciju maturanata i studenata;
- dio koji prikazuje radni vijek zaposlenika.

Dio CLD dijagrama vezan uz opću populaciju je izrađen po uzoru na populacijske modele široko prisutne u literaturi (Borshchev, 2013; Forrester, 1961; Senge, 1990). Parametar *prirast* utječe pozitivno na parametar *populacija*, jer što je veći prirast stanovništva to je veći broj stanovnika u populaciji. U CLD prikazu je takva veza označena strelicom s predznakom plus. Istovremeno veća populacija ima za ishod i veći prirast populacije pa je i ta strelica označena predznakom plus. Time je ostvarena pozitivna povratna veza, odnosno povratna petlja je pojačavajuća (označeno slovom „R“ od eng. *reinforcement*). Na prirast stanovništva još pozitivno utječe imigracija stanovništva, pa je i parametar *imigracija* uključen u dijagram. Veličina populacije pozitivno utječe na parametar *odumiranje* jer što više ima stanovnika, to je i veći broj umrlih stanovnika (apsolutna veličina). Ta veza je u CLD dijagramu također označena predznakom plus. Stopa odumiranja populacije s druge strane negativno utječe na brojnost populacije pa je ta veza označena predznakom minus. Ta povratna veza je balansirajuća (označena slovom „B“ od eng. *balancing*). Dodan je i parametar *emigracija* koji pozitivno utječe na smanjenje stanovništva, te se u CLD dijagramu parametar *odumiranje* ne smatra doslovnim značenjem te riječi nego općenito smanjenjem stanovništva.

Dio CLD dijagrama koji prikazuje populaciju maturanata i studenata je povezan s populacijskim dijelom preko parametra *maturanti*, koji je pozitivno povezan s parametrom *populacija*. Populacija maturanata se ili upisuje na promatrani fakultet ili se usmjerava u druge karijere. Broj maturanata je pozitivno povezan s brojem upisa na promatranu ustanovu, no istovremeno veći broj maturanata povećava i broj upisa na ostale ustanove (Relić, 2021) što je u modelu prikazano pozitivnom vezom parametra *maturanti* s parametrom *druge karijere*. *Druge karijere* negativno utječu na odabir promatrane ustanove, jer što više maturanata odabere druge karijere to je manje kandidata za upis na promatrani fakultet, pa je takva zatvorena petlja balansirajuća. Na upis utječu i dva parametra: upisne *kvote* i *financije* (Strauss & Borenstein, 2015). Parametar *kvote* pozitivno utječe na broj upisanih studenata no istovremeno predstavlja i važan ograničavajući faktor s uvjetom da parametar *upisi* mora biti manji ili jednak parametru *kvote*. Ovim općenitim modelom nije se detaljno razmatrao pitanje financija, što zahtjeva dublju analizu i rafiniranje modela u konkretnoj situaciji. Parametri vezani za financije se također mogu pripisati i drugim dijelovima modela, npr. vezano za studente, posao ili atraktivnost struke (Hallak et al., 2019). Konačnu ulogu parametara vezanih uz financije daju korisnici modela u procesu validacije modela, te je pitanje financija vezano za primjenu općenitog modela.

Parametri *student* i *diploma* čine zatvorenu balansirajuću petlju jer veći broj studenata povlači i veći broj diplomanata, dok se povećanjem broja diplomiranih studenata smanjuje ukupna brojka studenata. Broj studenata utječe pozitivno i na



parametar *odustajanje* (Merkulov et al., 2015) jer što je veći broj studenata to je veći i apsolutni broj studenata koji odustaju od studija.

Dio CLD dijagrama koji prati radni vijek se odnosi na stručnjake nakon diplome. Parametar *posao u struci* je u direktnoj pozitivnoj vezi s brojem diplomiranih. Istovremeno je i *posao izvan struke* u pozitivnoj vezi sa brojem diplomiranih, jer što je veći broj diplomiranih, to ih je više na tržištu rada te ih se više zapošljava. Hoće li se zaposliti u struci ili izvan struke ovisi o drugim parametrima koji su specifični za područje stručnosti, potražnju na tržištu, i druge parametre koji se postavljaju na temelju podataka prikupljenih u fazi dizajna modela. Primjerice, dodatno se može po potrebi uvrstiti veza između različitih diploma i posla u struci, odnosno kakva je razlika ako je riječ o prijediplomskoj diplomi, diplomskoj diplomi, diplomi stručnih studija ili dodatnih edukacija i prekvalifikacija. *Posao van struke* je još u pozitivnoj vezi sa parametrom *odustajanje* od studija jer što je više studenata koji su odustali od studija, to će ih se više zaposliti u drugim strukama.

*Posao u struci* i *posao van struke* su u balansirajućoj povratnoj vezi s parametrom *mirovina* jer veća zaposlenost rezultira i većom bazom za odlazak u mirovinu dok što više ljudi izlazi iz sustava rada to je manji broj zaposlenih. Parametar *mirovina* je u općenitom modelu skupni pojam za izlazak iz sustava te se u konkretnom primijenjenom modelu može rafinirati tako da postoje razlike odlaska iz sustava zbog smrti, umirovljenja ili promjene karijere (Larson & Gomez Diaz, 2012).

Parametar *posao u struci* je u pozitivnoj vezi sa atraktivnošću struke, što pozitivno utječe na parametar *upis* (Pavlov & Katsamakos, 2020). Time je ostvarena još jedna pojačavajuća zatvorena petlja.

Dodatno je razmatrana mogućnost uključivanja parametara vezanih za utjecaj konkurencije međusobno srodnih programa studija, ili međusobni utjecaj istovrsnih studija u zemlji i inozemstvu. Navedeno nije ovim modelom uzeto u obzir zbog kompleksnosti veza odnosno potrebno je opsežno dodatno statističko istraživanje koje bi kauzalno objasnilo eventualnu korelaciju upisa jednog fakulteta s upisima na drugi fakultet.

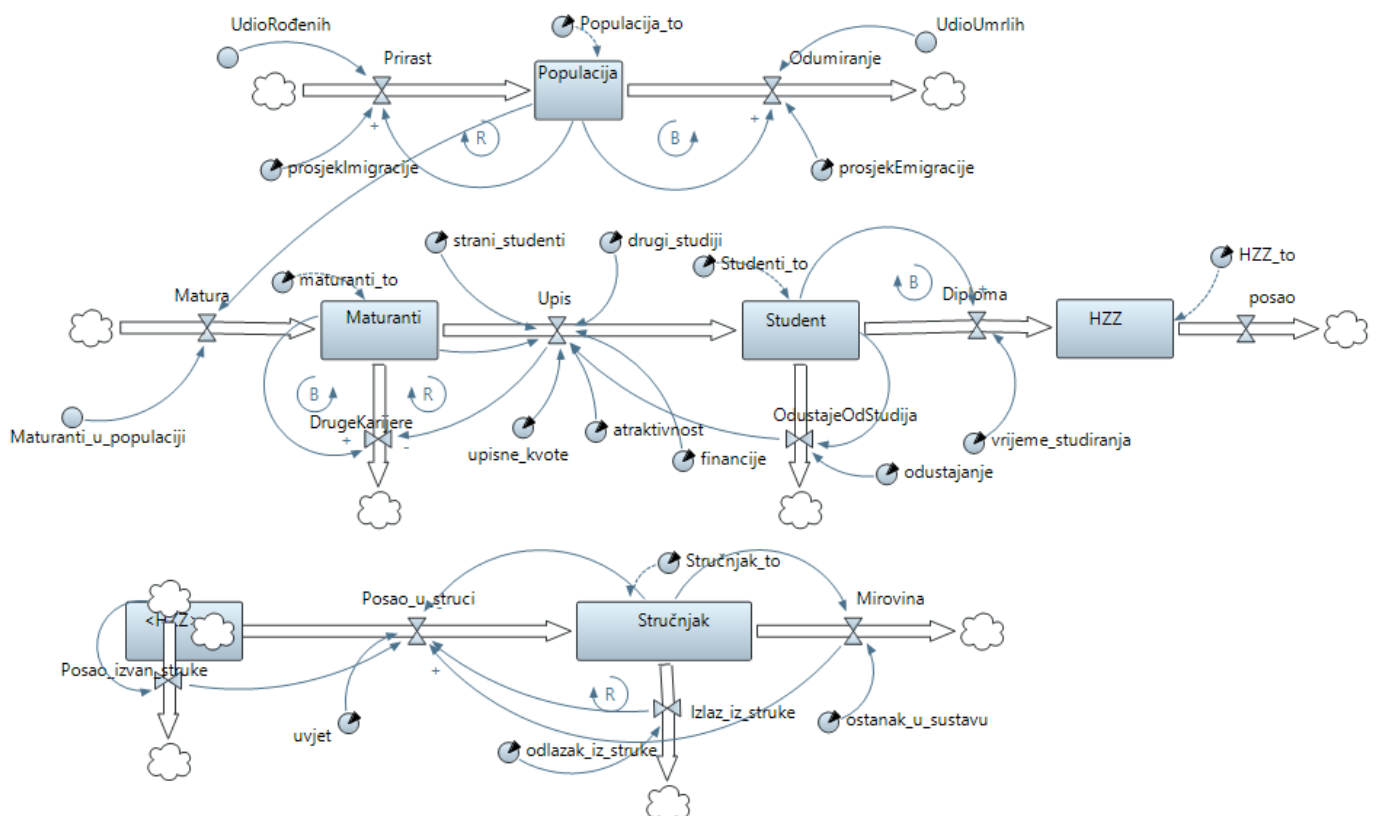
### 4.3. Faza dizajna modela

U fazi dizajna je potrebno prikupiti podatke za vremenski raspon određen u fazi definicije. Inicijalne vrijednosti svih elemenata modela su podaci iz prve godine odabranog perioda. S obzirom na elemente modela određuju se relevantni izvori za prikupljanje podataka. Izvori variraju za različite zemlje s obzirom na institucije i organizacije koje se bave sustavom. Relevantni izvori obuhvaćaju:

- nacionalna (ili regionalna) ministarstva obrazovanja koja upravljaju sustavom odgoja i obrazovanja svake zemlje odnosno planovi za promjene i reforme,
- državne agencije, centri i uredi koje se bave pojedinim aspektom sustava odgoja i obrazovanja,

- nadnacionalne organizacije vezane za odgoj i obrazovanje kao što su TALIS, Eurydice Network, itd.,
- nacionalni i nadnacionalni zavodi koji prate statističke podatke pojedinih zemalja, primjerice Eurostat,
- nacionalni zavodi za zapošljavanje i organizacije koje prate tržište rada te njihove publikacije i preporuke o stanju ljudskih potencijala,
- pojedine odgojne i obrazovne ustanove,
- stručna društva, sindikati i udruge od interesa,
- posebno dizajnirana istraživanja za prikupljanje potrebnih podataka,
- drugi izvori od interesa za konkretnu primjenu modela.

Konceptualni CLD dijagram se prevodi u dijagram *zaliha i protoka*. Određuje se koji element predstavlja varijablu *zaliha*, koji varijablu *protoka*, koji dinamičke varijable a koji konstantne veličine. Na Slici 17. je dijagram zaliha i protoka s osnovnim zalihama i protocima te općenitim dinamičkim varijablama i konstantama, nastao na temelju općenitog CLD dijagrama sustava odgoja i obrazovanja.



Slika 17. Dijagram zaliha i protoka modela sustava odgoja i obrazovanja

Varijable *zaliha* su redom: *Populacija*, *Maturanti*, *Studenti*, *HZZ* i *Stručnjak*. Model se pritom svodi na sustav diferencijalnih jednadžbi:

$$\begin{aligned}
\frac{d(\text{Populacija})}{dt} &= \text{Prirast}(t) - \text{Odumiranje}(t) \\
\frac{d(\text{Maturanti})}{dt} &= \text{Matura}(t) - \text{Upis}(t) - \text{DrugeKarijere}(t) \\
\frac{d(\text{Student})}{dt} &= \text{Upis}(t) - \text{Diploma}(t) - \text{OdustajeOdStudija}(t) \\
\frac{d(\text{HZZ})}{dt} &= \text{Diploma}(t) - \text{Posao\_u\_struci}(t) - \text{Posao\_izvan\_struke}(t) \\
\frac{d(\text{Stručnjak})}{dt} &= \text{Posao\_u\_struci}(t) - \text{Izlaz\_iz\_struke}(t) - \text{Mirovina}(t)
\end{aligned}
\tag{10}$$

Svaka diferencijalna jednadžba izražava stanje pojedine zalihe kao linearnu kombinaciju pripadnih varijabli protoka u vremenu  $t$  (model promatra period od 0 godina do uključno 20 godina, s korakom od jedne godine kao osnovnom jedinicom), prikazano dijagramom zaliha i protoka na Slici 17. Na dijagramu je zorno prikazano širokim strelicama koje veličine su ulazne za pojedinu zalihu a koje su izlazne. Tako je stanje varijable *Populacija* razlika pritoka *Prirast* i *Odumiranje*, koje redom povećavaju ili smanjuju vrijednost varijable *Populacija*.

Vrijednost varijable *Maturanti* odražava broj maturanata u populaciji, odnosno populaciju koja je potencijal za nastavak obrazovanja na visokoškolskim ustanovama. Povećava se varijablom protoka *Matura*, a smanjuje varijablama protoka *Upis* i *Druge Karijere*. Točnije, u zalihu *Matura* dolazi populacija koja je u godini  $t_i$  položila maturu i stekla uvjete za nastavak školovanja, a izlazi populacija koja se upisala na ustanovu koju se promatra ili nastavlja karijeru u nekom drugom smjeru.

Varijabla *Student* se povećava varijablom *Upis*, a smanjuje varijablama *Diploma* i *OdustajanjeOdStudija*. Odražava brojnost studenata na instituciji koju se modelom analizira. Populacija studenata se može povećati upisom novih studenata, a smanjiti odustajanjem od studija ili završetkom studija tj. diplomiranjem.

Varijabla HZZ računa o stanju populacije nakon diplome a prije zaposlenja. Povećava se brojem diplomiranih, odnosno protokom *Diploma*, a smanjuje se protocima *Posao\_u\_struci* i *Posao\_izvan\_struke*.

Zaliha *Stručnjak* odražava brojnost diplomiranih koji su se ujedno zaposlili u struci za koju su studirali, te time postali stručnjaci. Varijabla se povećava pritokom *Posao\_u\_struci* a smanjuje protocima *Mirovina* i *Izlaz\_iz\_struke*.

Početne vrijednosti svake zalihe u promatranom periodu su označene oznakom  $t_0$ . Za protoke općenito vrijedi funkcionalna zavisnost u vremenu  $t_i$  o pojedinim konstantama, dinamičkim varijablama ili zalihama u vremenu  $t_{i-1}$ , prikazano jednadžbom:

$$\text{Protok}(t_i) = f(\text{varijabla}(t_{i-1}), \text{konstanta}, \text{Zaliha}(t_{i-1})) \tag{11}$$

Dinamičke varijable *Udio Rođenih* i *Udio Umrlih* su funkcije bliske linearnoj funkciji promjene u broju stanovnika te se mogu izraziti na temelju statističkih podataka o broju rođenih i umrlih u populaciji. Konstante *prosjek emigracije* i *prosjek imigracije* su aritmetičke sredine broj stanovnika koji su emigrirali ili imigrirali u promatranom vremenskom periodu, što je podatak dostupan u statističkim analizama. Dinamička varijabla *Maturanti u populaciji* je funkcija udjela maturanata u ukupnoj populaciji u godini  $t_i$ , također bliska linearnoj funkciji. Na varijablu protoka *Upis* utječu konstanta *upisne kvote*, parametar *atraktivnost* koji je potrebno definirati s obzirom na konkretan primjer, broj stranih studenata koji su ciljano došli studirati, broj studenata koji su se prebacili s nekog drugog studija, te parametar financije. Protok *Diploma* uključuje konstantu prosječnog vremena studiranja, a protok *OdustajeOdStudija* parametar koji predstavlja prosječni godišnji broj studenata koji prestanu studirati. Postoji veza od varijable *OdustajeOdStudija* do protoka *Upisi* koja vodi računa o povratnicima odnosno studentima koji su odustali od studija ali su u nekom trenutku nastavili studij. *Posao u struci* i *Posao izvan struke* također uključuju dodatne parametre i uvjete koji je potrebno definirati za konkretnu primjenu modela.

Na protok *Mirovina* utječe parametar *Ostanak\_u\_sustavu* koji vodi računa o broju stručnjaka koji su se vratili raditi nakon umirovljenja. Protokom *Izlaz\_iz\_struke* se obuhvaćaju svi prijevremeni odlasci stručnog kadra, a postoji i veza prema ponovnom zaposlenju u struci.

Sljedeći korak podrazumijeva specifikaciju za koji dio sustava odgoja i obrazovanja se razvija model te se prikupljaju adekvatni podaci. Temeljem podataka uočavaju su trendovi, kvantificiraju linearne i druge ovisnosti, statističke vrijednosti te se funkcionalno povezuju elementi modela jednadžbama.

Na temelju podataka o kretanjima pojedinog parametra, za izgradnju modela u odabranom vremenskom periodu određuje se adekvatna aproksimacija. U slučaju da linearna aproksimacija dovoljno dobro opisuje skup podataka, određuje se jednadžba pravca linearne regresije te koeficijent determinacije  $R^2$  (Guilford, 1973). Pravac regresije se izračunava metodom najmanjih kvadrata, prikazanom sljedećim izrazom, pri čemu su  $\bar{x}$  i  $\bar{y}$  aritmetičke sredine pripadnih varijabli  $x$  i  $y$ :

$$y = a + b \cdot x; \quad b = \frac{N\Sigma xy - \Sigma x \cdot \Sigma y}{N\Sigma x^2 - (\Sigma x)^2}, \quad a = \bar{y} - b \cdot \bar{x} \quad (12)$$

Koeficijent determinacije  $R^2$  je mjera kojom se opisuje koliko dobro linearni model opisuje podatke.  $R^2$  je kvadrat Pearsonovog koeficijenta korelacije  $R$ , zadan izrazom:

$$R = \frac{N\Sigma xy - \Sigma x \cdot \Sigma y}{\sqrt{(N\Sigma x^2 - (\Sigma x)^2)(N\Sigma y^2 - (\Sigma y)^2)}} \quad (13)$$

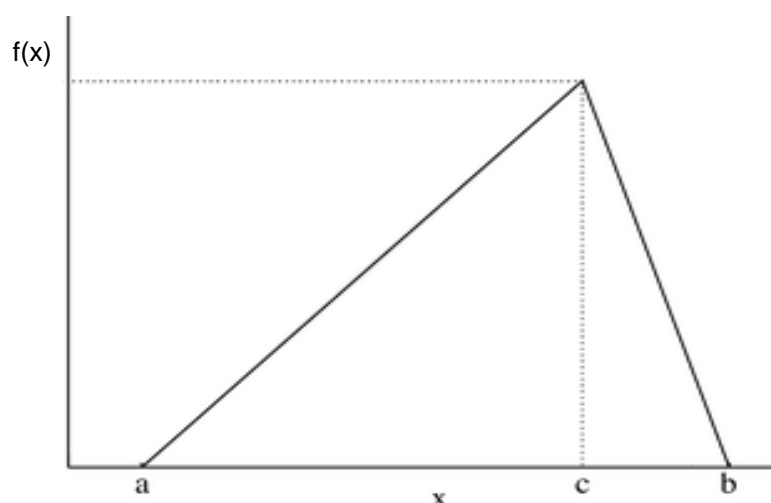
U Tablici 6. je prikazano značenje iznos Pearsonovog koeficijenta determinacije s obzirom na Chaddockovu ljestvicu te ljestvicu B. Petza koja je nešto blaža po uvjetima za jakost povezanosti (Petz, 1997).

Tablica 6. Ljestvica koeficijenta determinacije

$R^2$	značenje po Chaddocku	značenje po Petzu
0	odsutnost veze	odsutnost veze
0 – 0,04	slaba veza	
0,04 – 0,016		slaba veza
0,16 – 0,25		dobra veza
0,025 – 0,49	čvrsta veza	
0,49 – 0,64		srednje jaka veza
0,64 – 1		
1	potpuna veza	potpuna veza

Za parametre za koje nema adekvatnih podataka da bi se bi se mogla izraziti funkcionalna aproksimacija, prikladno je koristiti trokutastu funkciju (Borshchev, 2013). Trokutasta funkcija generira kontinuirane vrijednosti s distribucijom između zadane minimalne i maksimalne, s eventualnom zadanom modalnom (najčešćom) vrijednosti. Na Slici 18. je distribucija trokutaste funkcije (Weisstein, 2022), pri čemu je  $a$  minimum,  $b$  maksimum,  $c$  najčešća vrijednost (mod). Matematički izraz trokutaste funkcije je:

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{2(x-a)}{(b-a)(c-a)}, & a \leq x \leq c \\ \frac{2(b-x)}{(b-a)(b-c)}, & c \leq x \leq b \\ 0, & x > b \end{cases} \quad (14)$$



Slika 18. Distribucija trokutaste funkcije (14)

Model se zatim prevodi u računalni program za numeričko rješavanje navedenog sustava jednadžbi. Definira se agent koji će u sebi sadržavati SD model

promatranog dijela sustava odgoja i obrazovanja te općenito agenti za izvođenje simulacija, eventualnih optimizacija parametara, eksperimenata, itd. Na taj način je razvijeni model hibrid SD i ABM paradigmi modeliranja, no kako je promatrani dio sustava odgoja i obrazovanja realiziran kao SD okolina unutar agenta, možemo općenito govoriti o razvijenom sustavsko dinamičkom modelu.

#### 4.4. Faza analize i verifikacije modela

Faza analize i verifikacije se provodi višestruko tijekom razvoja modela. Po potrebi se vraća u fazu dizajna. Analiza se provodi nakon svakog dodanog elementa SD (zalihe, protoci, varijable, parametri), veze među elementima, promjene vrijednosti pojedinog parametra, promjene funkcionalne povezanosti među elementima. Analiza podrazumijeva provjeru logike svakog ugrađenog elementa te provjere semantike i sintakse samog programa. Logička provjera se odnosi na smisao ugrađenog elementa u odnosu na druge elemente, odnosno je li dobar zaključak o prirodi utjecaja pojedinog parametra na druge parametre i što sve relevantno utječe na navedeni parametar (Sargent, 2011). U tom smislu je i provjera jednadžbe koja opisuje povezanost među parametrima, odnosno je li jednadžba dovoljno dobra reprezentacija korelacije među parametrima te aproksimira li dobro stvarne kvantitativne vrijednosti. Semantička provjera se odnosi na smisao povezanosti na razini programskog koda odnosno smisao određene izjave u programskom jeziku. Provjera sintakse se odnosi na valjanost u programskom kodu s obzirom na pravila i zakonitosti programskog jezika. U slučaju utvrđivanja logičke pogreške potrebno se vratiti u fazu dizajna i redefinirati odnose među elementima modela, uvesti nove elemente u model i dr. Analiza provedena u ovoj fazi se ne odnosi na analizu zahtjeva potencijalnog korisnika modela koja je uobičajena kao zasebna faza pri razvoju informacijskih sustava. U tom smislu se analiza potencijalne primjene modela i zahtjeva korisnika provodi u fazi definicije modela, s obzirom da SD model ne predstavlja informacijski sustav kao takav. Verifikacija modela se odvojeno razmatra s obzirom na *strukturu* modela, *ponašanje* modela te *implikacije na politike* (Bala et al., 2017; Forrester & Senge, 1980). U ovoj, 3. fazi razvoja modela se provode verifikacija strukture modela i verifikacija ponašanja, s time da se paralelno odvijaju analiza i testiranje modela. Verifikacija *implikacija na politike* se ovim istraživanjem smatra *validacijom* modela te se provodi u 4. fazi razvoja modela.

Verifikacija strukture se odnosi na analiziranje i testiranje elemenata modela s obzirom na provjeru strukture, parametara, ekstremne uvjete, graničnu adekvatnost i konzistentnost mjernih jedinica. U provjeru strukture pripada pritom svaki oblik provjere vezan uz programski okvir i logiku programskog jezika.

Verifikacija ponašanja modela je ocjena pouzdanosti modela u usporedbi s realnim podacima prikupljenim u relevantnim izvorima. Među uobičajenim mjerama verifikacije modela su relativna pogreška i srednja kvadratna relativna pogreška (Serman, 2002). Izračunavaju se relativna pogreška ( $e$ ) i srednja kvadratna relativna pogreška (eng. *mean squared error*, MSE) prema izrazima:

$$e = \frac{|(y'_t - y_t)|}{y_t} \quad (15)$$

$$MSE = \sqrt{\frac{\sum_1^n e_t^2}{n}} \quad (16)$$

Pritom je  $y_t$  historijska vrijednost u vremenu  $t$ ,  $y'_t$  predstavlja simuliranu vrijednost u godini  $t$ ,  $e$  je relativna pogreška i MSE je srednja kvadratna relativna pogreška.

Promatrano odstupanje modela se smatra prihvatljivim ukoliko je odstupanje, odnosno MSE manje od 10% (Eliman, 1991; Ishikawa et al., 2013; Relić, 2021). Pritom Mendes i Aleluia (2019) i odstupanje od 11% (za pojedine elemente) smatraju prihvatljivima za verifikaciju modela. Verifikacija ponašanja modela je konačna ocjena za ukupnu verifikaciju modela.

U ovoj fazi razvoja modela se razmatra i analiza osjetljivosti, odnosno utjecaj promjene pojedinih nezavisnih parametara uključenih u model, što se očituje kroz jakost promjene izlaznih vrijednosti određene zavisne varijable. Analiza osjetljivosti SD modela je pritom važan element pouzdanosti rezultata simulacije (Hekimoğlu & Barlas, 2016) jer se potvrđuje vrijednost utjecaja pojedinih parametara na ponašanje modela a samim time i povjerenje u pouzdanost modela. Parametri koji imaju veliki utjecaj na izlazne vrijednosti moraju biti dovoljno istraženi i kvantificirani dok se parametri koji značajno ne utječu na izlazne vrijednosti modela mogu izostaviti iz modela. Različite metode analize osjetljivosti mogu prikazati bitne razlike u utjecaju i važnosti parametara (Mohantyl, 2002). Ovim istraživanjem se analiza osjetljivosti provodi za svaki parametar posebno tako da se promatrani parametar varira u rasponu vrijednosti te se promatra raspon vrijednosti varijable na koju utječe promatrani parametar. Radi ujednačenog pristupa rangiranju utjecaja, svaki parametar se varira u istom postotku svoje vrijednosti (Moizer et al., 2001). Potom se promatra postotni iznos promjene izlaznih vrijednosti varijable (Iqbal et al., 2020).

#### 4.5. Faza validacije modela

Validacija modela se odnosi na primjenjivost modela, odnosno kvalifikaciju modela kao korisnog. Pritom se validacija modela smatra verifikacijom implikacija na politike prema Bala i sur. (2017), prikazano detaljnije u teorijskom pregledu u poglavlju 2.3.1.

Validacija se smatra *vanjskom* potvrdom kojom će se procijeniti je li model dovoljno poželjan za korištenje od strane ciljanih korisnika. Orijentiranost prema korisniku modela se omogućava kroz interaktivnu promjenu parametara modela, ovisno o prohtjevima ciljanog korisnika i specifičnostima organizacije.

Adekvatna metoda za vanjsku potvrdu korisnosti modela je Delphi metoda, detaljno opisana u poglavlju 2.3.2. Delphi metoda pretpostavlja jedan ili više krugova ankete kroz koje se mogu prikupiti dodatne informacije te se model može razvijati u više iteracija. Dodatni krug anketiranja se provodi naročito ako se u prethodnom krugu

kroz anketu ustanovi potreba dodavanja elemenata u model pa se model mora adaptirati i ponovo predstaviti. Iako se u fazi definicije analiziraju zahtjevi korisnika i prolazi proces izgradnje koncepta modela te se u tom dijelu mogu uključiti stručna znanja kroz neformalne i formalne postupke prikupljanja informacija (Forrester, 1961), ovim istraživanjem se u fazi validacije daje konačna, vanjska formalna potvrda korisnosti modela, prema uzoru na Lemke i sur. (2013) koji razlikuju verifikaciju i validaciju. Također se naglašava razlika između verifikacije kao zadaće autora modela i validacije kao ocjene korisnika modela.

Za potrebe provođenja ispitivanja stavova o korisnosti modela potrebno je omogućiti ispitanicima samostalnu upotrebu modela. Prikladna metoda približavanja modela korisnicima za upotrebu je grafičko sučelje koje će omogućiti korištenje modela bez poznavanja SD, ABM ili programskog jezika kojim je realiziran model. Takvo grafičko korisničko sučelje može primjerice biti realizirano kao *web* aplikacija te treba omogućiti efikasnu primjenu od strane korisnika. Uz opis samog modela, njegovih funkcionalnosti i mogućnosti izvođenja simulacija važna je mogućnost interaktivnog mijenjanja vrijednosti parametara te na taj način izvođenje simulacija.

S obzirom na karakterizaciju validacije kao *vanjske* potvrde korisnosti modela, nužan je iskorak prema korisnički orijentiranom modelu. U tu svrhu je prikladna klasifikacija parametara od interesa u zasebne cjeline i na taj način formiranje scenarija za tematsko upravljanje modelom od strane potencijalnog korisnika. Unutar pojedinog scenarija je omogućeno interaktivno mijenjanje određenog skupa parametara koji se odnose na točno određeni aspekt sustava te se potom promatraju promjene u vrijednostima ostalih elemenata od interesa. Primjerice scenarij kojim se mogu mijenjati parametri vezani za određeni fakultet kao što su upisne kvote, vrijeme studiranja, postotak odustajanja od studija i slično.

Za istovremeno mijenjanje svih parametara modela može biti relevantno pitanje računalnih resursa kojima korisnici raspolažu. Iako neki autori ističu problem dostupnih računalnih resursa u pokretanju modela i izvođenju simulacija (Ouyang, 2014; Parker & Epstein, 2011; Tang & Jia, 2014), očekuje se da će s napretkom tehnologije problem računarskih resursa postati zanemariv. Naglasak ovog rada jest da se kroz različite scenarije model približi različitim korisnicima s obzirom na područja od interesa unutar sustava. Zato se unutar pojedinog scenarija izdvaja određeni broj parametara koje korisnik može mijenjati tijekom izvođenja modela te promatrati promjene na istaknutim grafikonima. Za ostale se parametre koriste fiksne vrijednosti pa korisnik neće imati problema s izvođenjem modela na standardnim osobnim računalima.

Dodatno, klasifikacijom parametara u skupine se eksperimentiranje na temelju različitih scenarija tematski raščlanjuje te tako na temelju istog modela omogućuje izvođenje simulacija različitim korisnicima. Primjerice, pojedini odjeli u Ministarstvu znanosti i obrazovanja kroz pojedini scenarij mogu promatrati utjecaj upisnih kvota, vremena studiranja i postotka odustajanja od studija te donijeti zaključke vezane za pojedine studijske programe. Drugi primjer je scenarij namijenjen upravi fakulteta koja može promatrati kako se mijenja ukupan broj studenata ako se mijenjaju parametri vezani za prosječno vrijeme studiranja i postotak odustajanja od studija. Različiti



scenariji su pokazatelj orijentiranosti modela prema različitim korisnicima i njihovim različitim potrebama te ujedno omogućavaju i ocjenu korisnosti modela za samostalnu upotrebu od strane korisnika.

## 5. Razvoj modela za planiranje ljudskih potencijala u primarnom obrazovanju RH

Teorijski podloga iz poglavlja 2. i 3. te metodološki okvir iz poglavlja 4. su u ovom radu primijenjeni na sustav primarnog obrazovanja Republike Hrvatske, kao dio sustava odgoja i obrazovanja. Namjera je na konkretnom primjeru pokazati valjanost metodološkog okvira te time i primjenjivost za planiranje ljudskih potencijala i upisne politike u drugim područjima sustava odgoja i obrazovanja. Primijenjena je metoda sustavske dinamike uz elemente modeliranja temeljenog na agentima, uz mogućnosti suvremene IKT te adekvatnog programskog alata. Validacijom modela za primarno obrazovanje se ujedno validira i primijenjeni okvir za razvoj modela sustavske dinamike u sustavu odgoja i obrazovanja, prezentiran u 4. poglavlju.

### 5.1. Definicija modela primarnog obrazovanja RH

Ovim primjerom se problematizira pitanje ljudskih potencijala u primarnom obrazovanju Republike Hrvatske. Razvijen je model ograničen na primarno obrazovanje, odnosno populaciju učitelja razredne nastave, kao dio sustava odgoja i obrazovanja. Pritom se i populacija studenata učiteljskih fakulteta smatra dijelom sustava primarnog obrazovanja te su obuhvaćeni podaci učiteljskih fakulteta RH. Model je nazvan *Učitelj*, dok je njegov dio vezan za studente učiteljskih fakulteta proširen i realiziran kao zasebni podmodel *Učiteljski Fakultet*. Dodatni argument u razdvajanju modela i podmodela su različiti korisnici kojima bi pojedini model bio u fokusu interesa.

Vremenski okvir za prikupljanje relevantnih podataka je ograničen na razdoblje od 2010. godine do 2020. g. Podaci iz razdoblja 2010. g. do 2015. g. korišteni su za izgradnju modela u smislu uočavanja trendova, izračuna pravaca linearne regresije, računanje aritmetičkih sredina pojedinih parametara i slično, dok je period 2016. g. do 2020. g. korišten za verifikaciju modela. U skladu s istraživanjem Reichardt i sur., (2020) u području odgoja i obrazovanja, ovim istraživanjem je ograničen period prikupljanja povijesnih podataka na 4-6 godina te se isto toliko predlaže i za predviđanje budućih trendova temeljem modela. U europskim zemljama trajanje primarnog, nižeg sekundarnog, višeg sekundarnog te tercijarnog obrazovanja dominantno traje kraće od 6 godina te se ovim istraživanjem nastoji predviđanjem obuhvatiti prosječni obrazovni ciklus (European Education and Culture Executive Agency, 2022). Uspoređeni su rezultati alternativnog grupiranja podataka za razvoj modela i predviđanje na način da se dostupni podaci 2010. g. do 2019. godine koriste za razvoj modela a predviđanje provodi za jednu godinu, 2020. Na taj način se pokušala dobiti veća točnost na račun dužeg perioda predviđanja, što bi moglo biti od koristi primjerice upravama fakulteta pri planiranju upisne politike za sljedeću godinu.

Model *Učitelj* je općenitiji model koji uključuje podatke o kretanju cjelokupne populacije u RH, podatke o broju maturanata srednjih škola, studente učiteljskih fakulteta od upisa do svršetka studija, uključuje dio o zaposlenju diplomiranih učitelja

u sustavu primarnog obrazovanja i izvan njega, te dio o izlasku iz sustava uslijed umirovljenja. Model je namijenjen makrorazini menadžmenta prosvjetnih vlasti, odgovornima za kreiranje upisne politike u vidu upisnih kvota na fakultete za buduće učitelje razredne nastave, osnivanje i organizaciju mreža osnovnih škola, odobravanje broja i veličinu razrednih odjela, kreiranje pedagoških standarda i propisa koji direktno utječu na rad u razredima. Mogući korisnici modela su primjerice odgovarajući odjeli u Ministarstvu odgoja i obrazovanja, Agenciji za znanost i visoko obrazovanje, odgovarajući Uredi za odgoj i obrazovanje lokalnih zajednica itd.

Podmodel *Učiteljski Fakultet* je isključivo vezan za populaciju studenata učiteljskih fakulteta RH. Model je primjenjiv mikrorazini odnosno upravama učiteljskih fakulteta za analizu i kreiranje upisne politike.

## 5.2. Dizajn modela primarnog obrazovanja RH

Pri izradi modela su korišteni dostupni statistički podaci iz relevantnih izvora:

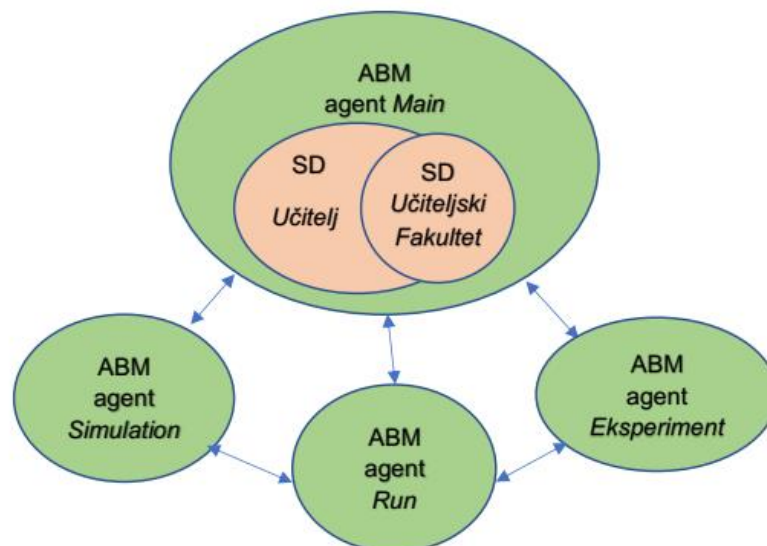
- Državni zavod za statistiku - demografski podaci,
- Hrvatski zavod za zapošljavanje – podaci o zaposlenim/nezaposlenim po županijama, struktura po godinama staža, preporuke o upisnim kvotama,
- Ministarstvo znanosti i obrazovanja – planovi i promjene u sustavu obrazovanja fakulteti u Republici Hrvatskoj - broj upisanih/diplomiranih; upisna politika
- stručna društva i sindikati učitelja razredne nastave – kolektivni ugovori, radno zakonodavstvo,
- Eurostat podaci i publikacije,
- TALIS – Međunarodno istraživanje učenja i poučavanja,
- Eurydice Network (Europska komisija) – obrazovni sustavi europskih zemalja,
- Agencija za znanost i visoko obrazovanje – podaci o upisima na fakultete,
- Školski e-Rudnik – podaci o školama,
- rezultati istraživanja o stavovima prema učiteljima i učiteljskim fakultetima na temelju usmene predaje.

Model je dizajniran programskim alatom AnyLogic (*AnyLogic*, 2022), verzija 8.7.12. PLE (eng. *Personal Learning Edition*) opisanom u poglavlju 2.2.1. Model *Učitelj* i podmodel *Učiteljski Fakultet* su ABM modeli no dizajn konkretnog dijela sustava primarnog obrazovanja je realiziran kao SD model unutar agenta. Na taj način je realizirana *ugrađena* metoda spajanja modela, prema klasifikaciji hibridnih modela opisanoj u poglavlju 2.1.3. Agent „*Main*“ je glavni agent unutar kojega se nalazi SD okolina kojom se modelira sustav razredne nastave, odnosno unutar agenta *Main* se nalaze modeli *Učitelj* i podmodel *Učiteljski Fakultet*. Agent „*Run*“ služe za pokretanje simulacija modela, definiranje ulaznih i izlaznih specifikacija. Agent „*Simulation*“ služi za prezentaciju izvođenja modela i sučelja, prikaz grafikona i multimedijских elemenata u sklopu različitih scenarija, u skladu s programskim rješenjima AnyLogic softvera. Agenti „*Eksperiment*“ služe za izvođenje eksperimenata kao što su optimizacija, analiza osjetljivosti, varijacija parametara i slično. Na taj način je realiziran hibridni model u kojem je SD model sadržan unutar jednog agenta ABM modela. Shematski je

model prikazan na Slici 19. U odnosu na shematski prikaz modela prezentiran u poglavlju 4. primjećuje se da se niti jedan dio sustava primarnog obrazovanja ne realizira kao agent, što je moguće ukoliko postoje dovoljno detaljni podaci za modeliranje dijela sustava kao agent. Ovim istraživanjem je sustav primarnog obrazovanja realiziran kao SD okolina s obzirom na dostupne baze podataka u Hrvatskom sustavu primarnog obrazovanja. Hibridnim pristupom odnosno korištenjem agenata na razini programske podrške, izvođenja simulacija i eksperimenata je omogućeno bolje izvođenje simulacija i eksperimenata u odnosu na isključivo SD model. S obzirom na objektno-orijentiranu strukturu ABM model, agenti se jednostavno kreiraju, modificiraju i uklanjaju te je jednostavnije upravljati simulacijama i eksperimentima (Borshchev, 2013).

Primjerice za provođenje analize osjetljivosti parametara se kreira agent za svaki eksperiment odnosno za svaki parametar koji je ispitivan. Prednost ABM dijela modela se očituje pogotovo u kreiranju scenarija s mogućnošću upravljanja različitim setom parametara od strane korisnika, što je istaknuto u ovom radu kao važan element korisnički orijentiranog modela. Na taj način se svaki scenarij kreira kao zaseban agent u dijelu modela *Simulacija*. Pri korištenju modela, unutar web sučelja se poziva pojedini scenarij, odnosno pokreće se agent koji definira izgled i način mijenjanja pojedinih parametara. O web sučelju i scenarijima se detaljnije prezentira u poglavlju 5.4.2. i 5.4.3.

Korisnik modela *Učitelj* i *Učiteljski Fakultet* može upravljati vrijednostima elemenata SD modela, što je hijerarhijski dio agenta *Main*. Promjene u strukturi, eventualni zahtjevi korisnika, nadogradnja modela se odvijaju u SD okolini i logici, dok se u ABM logici odvijaju promjene u strukturi programskog koda, izvođenje simulacija (agent *Run*), prezentacija modela (agent *Simulation*) i izvođenje eksperimenata kao što su optimizacije, analize osjetljivosti, scenariji (agent *Eksperiment*).



Slika 19. Shematski prikaz modela razredne nastave

U poglavlju 5.2.1. detaljno je opisan model i podaci za model *Učitelj*, a u poglavlju 5.2.2. model i podaci za podmodel *Učiteljski Fakultet*. Scenariji modela *Učitelj*

i *Učiteljski Fakultet* su postavljeni na *AnyLogic Cloud* platformu te ugrađeni u web aplikaciju namijenjenu korisnicima i korištenu u fazi validacije modela.

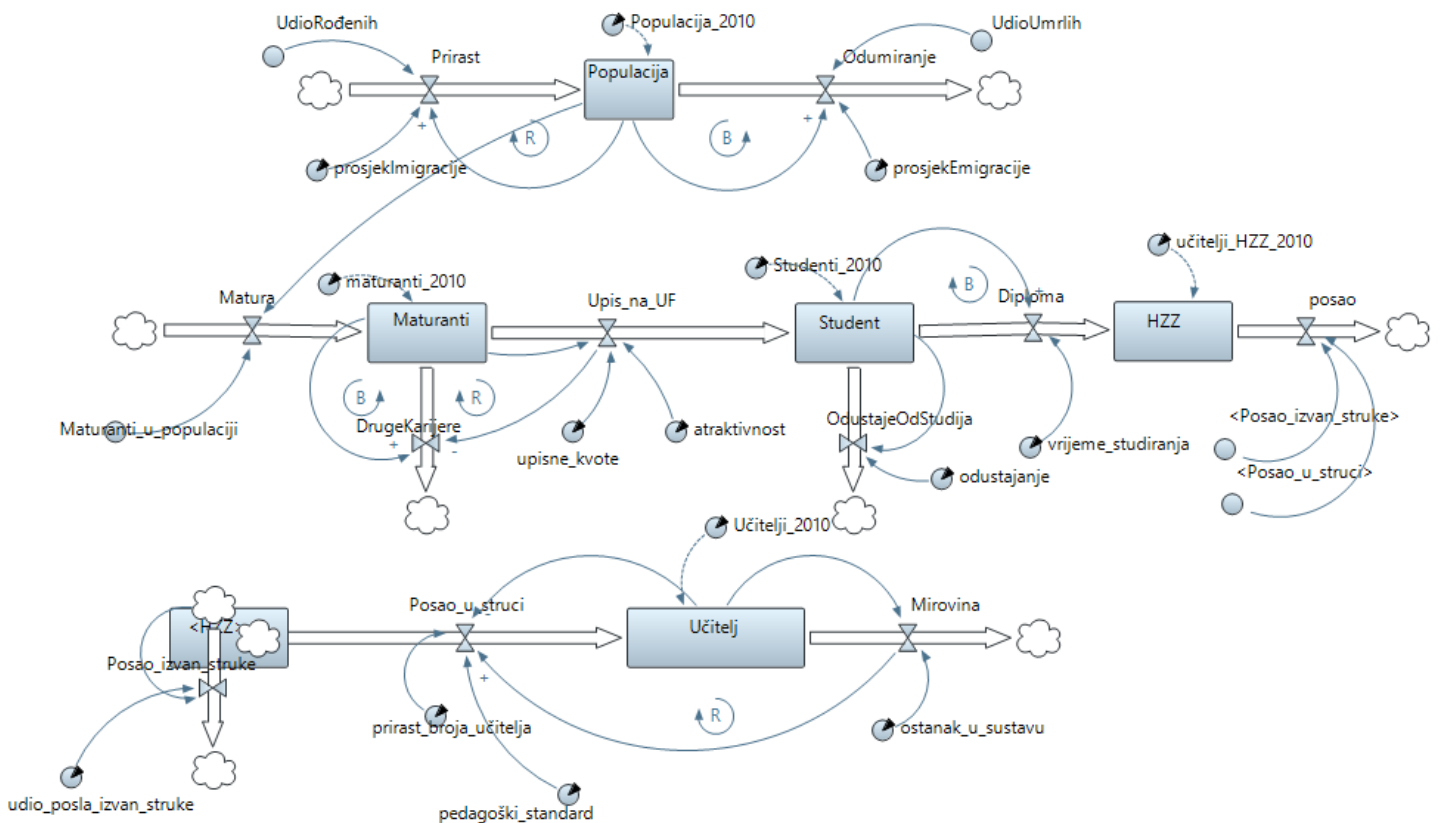
### 5.2.1. Model Učitelj

Model *Učitelj* je primijenjeni model na populaciju učitelja primarnog obrazovanja u Republici Hrvatskoj. Realiziran je kao SD okolina unutar ABM agenta. Na Slici 20. je SD prikaz modela.

Model *Učitelj* sadrži tri tematski različite podcjeline: dio koji razmatra broj ukupnog stanovništva Hrvatske (poglavlje 5.2.1.1.), dio koji razmatra populaciju maturanata i studenata učiteljskih fakulteta (poglavlje 5.2.1.2.), te dio koji razmatra populaciju diplomiranih učitelja razredne nastave (poglavlje 5.2.1.3.). Model prati dinamičke promjene u vremenu svih elemenata sustava, s jednom godinom kao temeljnom vremenskom jedinicom.

Odabir vremenske jedinice od jedne godine je odabran s obzirom da se kretanje svih relevantnih statističkih podataka prikuplja i objavljuje jednom godišnje za pojedinu godinu. Upisi na fakultete se održavaju jednom godišnje (u dva upisna kruga), upisne kvote se definiraju za pojedinu akademsku godinu itd. Trajanje studija je prosječno pet godina odnosno pet vremenskih jedinica.

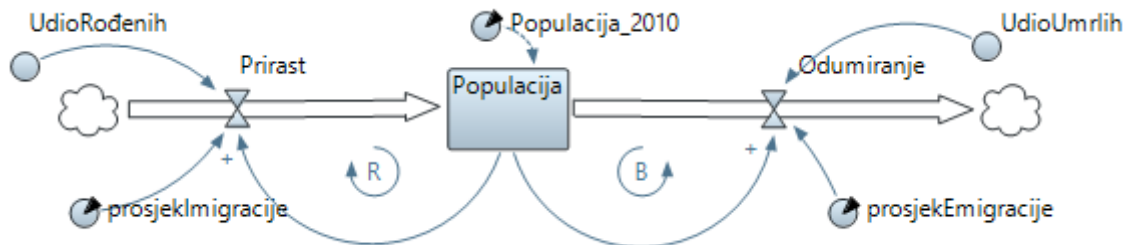
Neka izvješća se objavljuju nekoliko puta godišnje, primjerice mjesečno ili kvartalno, no u ovom istraživanju su uzeta u obzir isključivo godišnja izvješća i analize nadležnih institucija. Statistički i drugi podaci prikupljeni i primijenjeni u modelu *Učitelj* su objedinjeni i prikazani tablicama u Priritku 2.



Slika 20. Model *Učitelj*

### 5.2.1.1. Ukupno stanovništvo Republike Hrvatske

Prvi dio modela prati ukupni broj stanovnika RH, od rođenja ili imigracije do smrti ili emigracije. Dijagram zaliha i protoka sadrži jednu centralnu varijablu zaliha *Populacija* te protoke *Prirast* i *Odumiranje*, prikazano na Slici 21. *Populacija* se povećava prirastom na koji utječu stopa novorođenih i imigracijsko stanovništvo, dok se smanjuje odumiranjem na koje utječe stopa smrtnosti i emigracije.

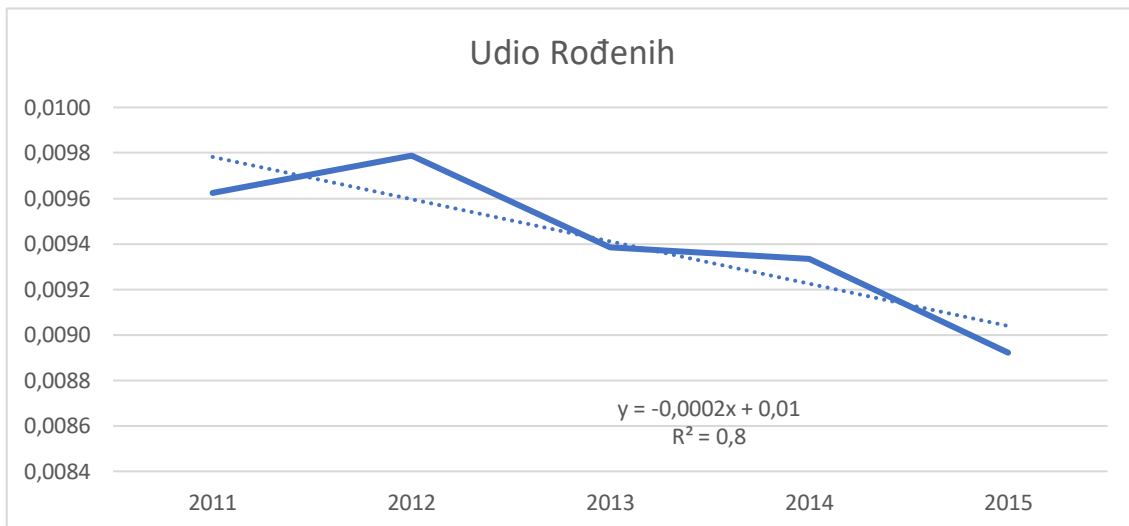


Slika 21. Dijagram zaliha i protoka 1. dijela modela *Učitelj*

Dinamička varijabla *Udio\_Rođenih* temelji se na podacima Hrvatskog zavoda za statistiku o omjeru novorođenih i ukupnog broj stanovnika u periodu 2010. do 2015. godine. S obzirom na Chaddockovu ljestvicu, prikazanu u Tablici 6., zaključeno je da postoji čvrsta veza determinacije te je pravac linearne regresije primijenjen na dinamičku varijablu (Seber & Lee, 2012). Petz (1997) argumentira da su dovoljni su i blaži kriteriji za ocjenu jakosti veze, pa je odabrana Chaddockova ljestvica kao stroži uvjet. Na isti način je i dinamička varijabla *Udio\_Umrlih* aproksimirana pravcem linearne regresije na temelju omjera umrlih i ukupnog stanovništva za pojedinu godinu.

Konstante *Prosjeck\_Imigracije* i *Prosjeck\_Emigracije* su aritmetičke sredine broja imigriranog ili emigriranog stanovništva (Državni zavod za statistiku, 2022a). Konstanta *Populacija\_2010* je broj stanovnika Hrvatske u 2010. godini, što je inicijalna vrijednost varijable *Populacija* (Državni zavod za statistiku, 2022b).

U Tablici 7. su navedeni svi elementi za prvi dio SD modela *Učitelj*, s opisima vrste elementa, vrijednostima izraza kako je implementirano u Java kodu AnyLogic aplikacije te eventualnim napomenama. Slika 22. prikazuje grafički prikaz kretanja udjela rođenih u populaciji, s pripadnom jednadžbom linearne regresije ( $R^2=0,8$ ; čvrsta veza), za dinamičku varijablu *Udio\_Rođenih*.



Slika 22. Grafički prikaz dinamičke varijable *Udio\_Rođenih*

Tablica 7. Elementi prvog dijela modela *Učitelj*

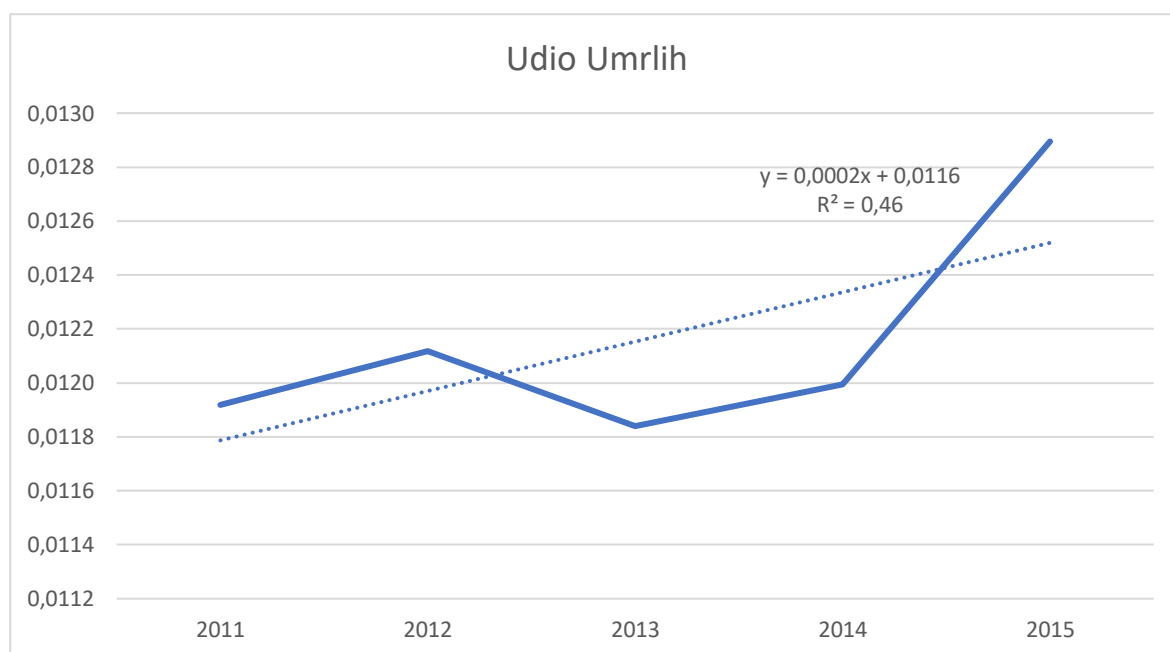
Element	Vrsta elementa	Vrijednost / jednažba	Napomena
<i>Udio_Rođenih</i>	dinamička varijabla	$0.009965 - 0.000185 \cdot \text{time}()$	pravac linearne regresije, $R^2=0,80$ , čvrsta veza <sup>#</sup>
<i>Prosjek_Imigracije</i>	konstanta	23069	godišnji prosjek broja imigriranog stanovništva
<i>Prirast</i>	protok	$\text{Prirast} = \text{Populacija} \cdot \text{Udio\_Rođenih} + \text{Prosjek\_Imigracije}$	
<i>Populacija</i>	zaliha	$d(\text{Populacija})/dt = \text{Prirast} - \text{Odumiranje}$	
<i>Populacija_2010</i>	konstanta	4295427	Broj stanovnika RH 2010. g.
<i>Odumiranje</i>	protok	$\text{Odumiranje} = \text{Populacija} \cdot \text{Udio\_Umrlih} + \text{Prosjek\_Emigracije}$	
<i>Udio_Umrlih</i>	dinamička varijabla	$0.011609 + 0.000181 \cdot \text{time}()$	pravac linearne regresije, $R^2=0,46$ , srednje jaka veza*

Element	Vrsta elementa	Vrijednost / jednađba	Napomena
<i>Prosjek_Emigracije</i>	konstanta	37858	godišnji prosjek broja emigriranog stanovništva

# Chaddockova ljestvica

Podaci za protok *Prirast*: podaci o broju stanovnika, broj rođenih, broj stanovnika koji je imigrirao te udio rođenih u odnosu na ukupan broj stanovnika su u tablici T.1. Priloga 1. Podaci su preuzeti sa web stranice Državnog zavoda za statistiku (Državni zavod za statistiku, 2022a), (Državni zavod za statistiku, 2022b).

Slika 23. prikazuje grafički prikaz kretanja udjela umrlih u populaciji, s pripadnom jednađbom linearne regresije ( $R^2=0,46$ ; srednje jaka veza), za dinamičku varijablu *Udio\_Umrlih*.



Slika 23. Grafički prikaz dinamičke varijable *Udio\_Umrlih*

Za period 2010. g. do 2021. godine tablica T.2. iz Privitka 2. sadrži podatke potrebne za protok *Odumiranje*: broj stanovnika, broj umrlih, broj emigriranih stanovnika te udio umrlih u ukupnom broju stanovnika za pojedinu godinu.

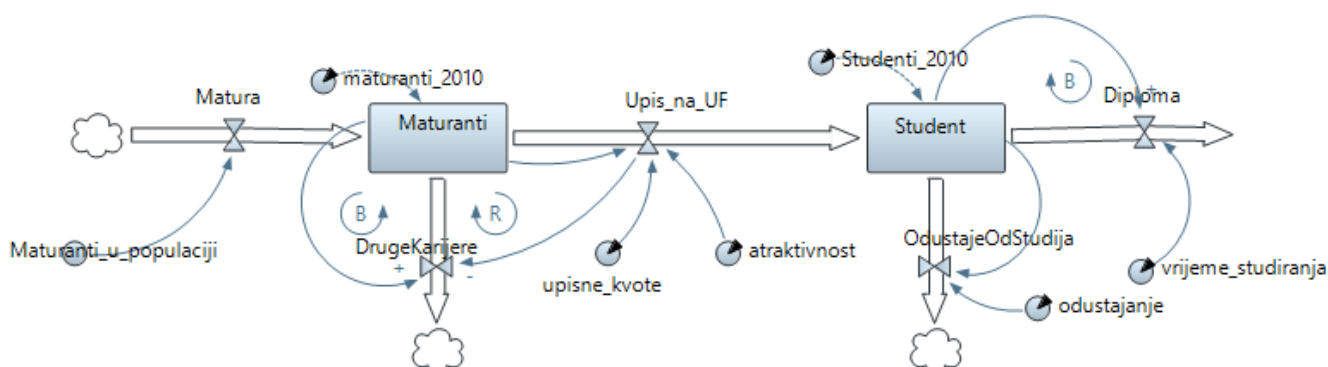
### 5.2.1.2. Maturanti i studenti primarnog obrazovanja u R. Hrvatskoj

Drugi dio modela *Učitelj* se odnosi na populaciju maturanata, zatim preko upisa na učiteljske fakultete populaciju studenata, do završetka studija čime postaju učitelji razredne nastave. Dijagram zaliha i protoka za ovaj dio modela je prikazan na Slici 24.



Dinamička varijabla *Maturanti\_u\_populaciji* je linearna aproksimacija omjera broja maturanata i ukupne populacije RH u periodu 2010. do 2015. godine. Broj maturanata je ukupan broj pristupnika državnoj maturi u ljetnom i jesenskom roku pojedine godine, zbroj redovnih pristupnika (koji su završili srednjoškolsko obrazovanje te godine) i ponavljača.

Tablica T.3. u Prilogu 2. sadrži podatke o broju pristupnika državnoj maturi, po godinama od 2010. do 2020. godine. Pritom su objedinjene brojke ljetnog i jesenskog roka, redovni pristupnici kao i ponavljači. Podaci su prikupljeni sa stranica Nacionalnog centra za vanjsko vrednovanje (Nacionalni centar za vanjsko vrednovanje, 2020). Pritom je vrijednost konstante *maturanti\_2010* inicijalna vrijednost varijable *Maturanti*.



Slika 24. Dijagram zaliha i protoka 2.dijela modela *Učitelj*

Tablice T.4. – T.11. u Prilogu 2. sadrže podatke o upisima na studijske programe za učitelje primarnog obrazovanja na sve fakultete u Republici Hrvatskoj, točnije ukupni broj upisanih studenata u dva upisna roka od 2010. do 2021. godine, broj prijava tijekom razredbenog postupka te broj maturanata kojima je prijava na učiteljski smjer prvi izbor studija. Dinamička varijabla *Upis\_na\_UF* i pripadajući protok *Upisi\_na\_UF* se temelje na podacima o upisnim kvotama, te broju upisanih studenata na svim fakultetima u Hrvatskoj (Agencija za znanost i visoko obrazovanje, 2022). U Tablici 8. su navedeni svi fakulteti koji obrazuju učitelje primarnog obrazovanja u Hrvatskoj. Ukupno ima 7 fakulteta koji djeluju na 10 lokacija.

Tablica 8. Fakulteti u R. Hrvatskoj s programima za učitelje razredne nastave

Sveučilište	Fakultet
Sveučilište u Zagrebu	Učiteljski fakultet
	Učiteljski fakultet – odsjek u Čakovcu
	Učiteljski fakultet – odsjek u Petrinji
Sveučilište u Rijeci	Učiteljski fakultet
Sveučilište u Splitu	Filozofski fakultet
Sveučilište u Osijeku	Fakultet za odgojne i obrazovne znanosti

Sveučilište	Fakultet
Sveučilište u Slavonskom Brodu	Odjel društveno-humanističkih znanosti
Sveučilište u Zadru	Odjel za izobrazbu učitelja i odgojitelja
	Odjel za nastavničke studije u Gospiću
Sveučilište u Puli	Fakultet za odgojne i obrazovne znanosti

Protok *Druge\_Karijere* prikazuje broj svih ostalih maturanata, koji nisu upisali programe za učitelja razredne nastave. Pritom nije uziman u obzir broj maturanata koji nisu uspjeli upisati navedene programe ali su pokušali ponovo sljedeće godine (ili nakon toga) jer je taj broj djelomično pokriven brojem ponovnih pristupnika maturi a nema točnih podataka o kojem broju maturanata se radi.

Varijabla zalihe *Student* prikazuje ukupan broj studenata svih učiteljskih fakulteta. Pritom je konstanta *Studenti\_2010* inicijalna vrijednost tj. broj svih studenata 2010. godine. Protok *Diploma* prikazuje smanjenje broja studenata uslijed diplomiranja odnosno završetka studija, dok protok *Odustajanje\_Od\_Studija* prikazuje broj studenata koji odustaju od daljnjeg studiranja. Pritom su konstante *Vrijeme\_Studiranja* prosječno vrijeme studiranja izraženo u godinama, te konstanta *odustajanje* je prosječni postotak studenata koji su upisali studij te zatim odustali od studiranja.

Konstante *Studenti\_2010*, *Vrijeme\_Studiranja* i *odustajanje* su dobivene temeljem podataka prikupljenih u studentskoj referadi Učiteljskog Fakulteta Sveučilišta u Zagrebu (2022) te izračunatih aritmetičkih sredina. Obzirom da Učiteljski Fakultet Sveučilišta u Zagrebu sa svojim odsjecima u Čakovcu i Petrinji obuhvaća više od 40% svih studenata primarnog obrazovanja u Hrvatskoj, podaci su poopćeni te uzeti kao relevantni za cijelu Hrvatsku. Tako je za vrijeme studiranja izračunata vrijednost 5,663 godina, dok je za postotak odustajanja od studija izračunata vrijednost 7,92%.

U Tablici 9. su navedeni elementi za drugi dio SD modela *Učitelj*, s opisima vrste elementa, vrijednostima izraza kako je implementirano u Java kodu AnyLogic aplikacije te eventualnim napomenama. Pritom nisu obuhvaćeni elementi modela koji se nalaze na slici modela no služe za izradu scenarija te validaciju.

Tablica 9. Elementi drugog dijela modela *Učitelj*

Element	Vrsta elementa	Vrijednost / jednadžba	Napomena
<i>Maturanti_u_populaciji</i>	dinamička varijabla	$-0.0001 \cdot \text{time}() + 0.0089$	pravac linearne regresije, $R^2=0,59$ , srednje čvrsta veza <sup>#</sup>
<i>Matura</i>	protok	$Matura = \text{Populacija} \cdot \text{Maturanti\_u\_populaciji}$	

Element	Vrsta elementa	Vrijednost / jednadžba	Napomena
<i>Maturanti_2010</i>	konstanta	36177	Broj maturanata 2010. g.
<i>Maturanti</i>	zaliha	$d(\text{Maturanti}) / dt = \text{Matura} - \text{Upis\_na\_UF} - \text{Druge\_Karijere}$	
<i>Druge_Karijere</i>	protok	$\text{Druge\_Karijere} = \text{Maturanti} - \text{Upis\_na\_UF}$	
<i>Upis_na_UF</i>	protok	$\text{Maturanti} * 0.0154 * (100 + \text{upisne\_kvote}) * (100 + \text{atraktivnost}) / 10000$	
<i>Studenti_2010</i>	konstanta	3171	Broj studenata svih UF 2010. g.
<i>Student</i>	zaliha	$d(\text{Student}) / dt = \text{Upis\_na\_UF} - \text{Diploma} - \text{Odustaje\_Od\_Studija}$	
<i>Odustaje_Od_Studija</i>	protok	$\text{Odustaje\_Od\_Studija} = (\text{Student} \cdot \text{Odustajanje}) / (100 \cdot 5.663)$	
<i>Odustajanje</i>	konstanta	7,92	prosjeak studenata koji odustanu od studija je 7,92%
<i>Diploma</i>	protok	$\text{Diploma} = \text{Student} / \text{Vrijeme\_Studiranja}$	
<i>Vrijeme_Studiranja</i>	konstanta	5,7	prosječan broj godina studiranja

# Chaddockova ljestvica

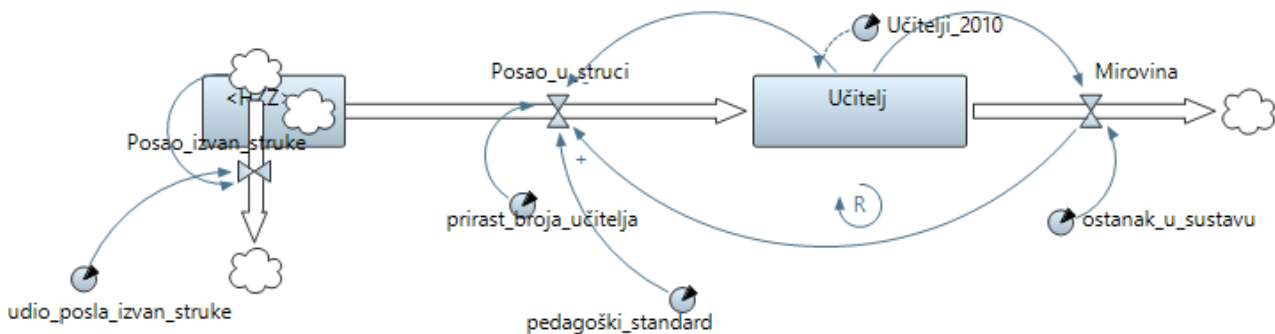
U odnosu na opći model u sustavu odgoja i obrazovanja iz poglavlja 4., ovim modelom nisu obuhvaćeni parametri o stranim studentima i studentima koji su upisali učiteljski studij prelaskom s drugog studija, s obzirom da je broj takvih studenata zanemariv prema podacima iz studentske službe Učiteljskog Fakulteta u Zagrebu. Taj podatak je poopćen kao relevantan za sve učiteljske studije u RH pa bi se dodatnim istraživanjima mogle uzeti u obzir eventualne razlike na drugim sveučilištima. Također nije uzet u obzir parametar financije s obzirom da su svi učiteljski studiji u RH javni i nisu presudne financije za izvođenje studija. Dodatno bi se trebao istražiti utjecaj financija na mogućnosti studenata i njihov izbor studija.

### 5.2.1.3. Učitelji razredne nastave u Republici Hrvatskoj

Treći dio modela *Učitelj* se odnosi na diplomirane učitelje primarnog obrazovanja. Dio populacije se zaposli u struci za koju su se obrazovali te postaju dio

populacije varijable *Učitelj*, a dio izvan struke. Nakon određenog vremena učitelji izlaze iz sustava zbog umirovljenja ili drugih razloga. Dijagram zaliha i protoka za ovaj dio modela je prikazan na Slici 25.

Konstanta *Učitelji\_HZZ\_2010* je početno stanje broja nezaposlenih učitelja, prijavljenih na Hrvatskom zavodu za zapošljavanje (HZZ) 2010. godine (Hrvatski zavod za zapošljavanje, 2022b). Nezaposleni učitelji se ili zapošljavaju u struci (razredna nastava osnovnih škola) ili izvan struke (svi drugi poslovi). Posao izvan struke se ovim smatraju svi drugi razlozi odjave sa HZZ-a, što po metodologiji Zavoda za zapošljavanje može biti: izlaz iz radne snage (mirovina, bolest itd.), odjava s evidencije i nejavljanje, nepridržavanje zakonskih odredbi te ostali razlozi (Hrvatski zavod za zapošljavanje, 2022a).



Slika 25. Dijagram zaliha i protoka 3. dijela modela *Učitelj*

Podaci za posao izvan struke su nekonzistentni i variraju obzirom na vrstu upita u baze podataka HZZ-a (podaci o ulazu u evidenciju, izlazu iz evidencije, registriranoj nezaposlenosti) (Hrvatski zavod za zapošljavanje, 2022b, 2022a, 2022c) ili vrstu izvora (HZZ, DZS i sl.) po kojima je broj učitelja koji se zaposle izvan struke godišnje od 5% do 15%. S obzirom na nedostatak točnijih podataka, za vrijednost parametra je određena trokutasta funkcija s minimalnom vrijednošću 0.05 i maksimalnom vrijednošću 0.15 (Borshchev, 2013).

Konstanta *Prirast\_Broja\_Učitelja* je prosječan porast broja učitelja primarne nastave na temelju podataka Državnog zavoda za statistiku (Državni zavod za statistiku, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019a, 2020, 2021). Protok *Posao\_u\_Struci* se povećava s oslobađanjem radnih mjesta učitelja, tj. odljevom učitelja protokom *Mirovina* uvećan za prosječan porast broja učitelja. *Učitelji\_2010* predstavlja broj učitelja razredne nastave 2010. godine (Državni zavod za statistiku, 2011), što je inicijalna vrijednost varijable zaliha *Učitelj*. Za radni vijek učitelja do mirovine je uračunato okvirno 40 godina (od 25. godine do 65. godine života). Tablica T.12. u Privitku 2. prikazuje broj učitelja razredne nastave u svim osnovnim školama u Hrvatskoj, na temelju godišnjih izvještaja DZS.

Konstante *pedagoški\_standard*, *ostanak\_u\_sustavu* i *udio\_posla\_izvan\_struke* su uključene u model kao neutralni elementi u smislu verifikacije modela odnosno reproducira li model realno stanje. Namjena tih parametara je da se

eksperimentiranjem s njihovim promjenama promatra rezultat takve promjene na druge parametre. Time se procjenjuje korisnost samog modela, njegova validacija, što je obrađeno u poglavlju 5.4.

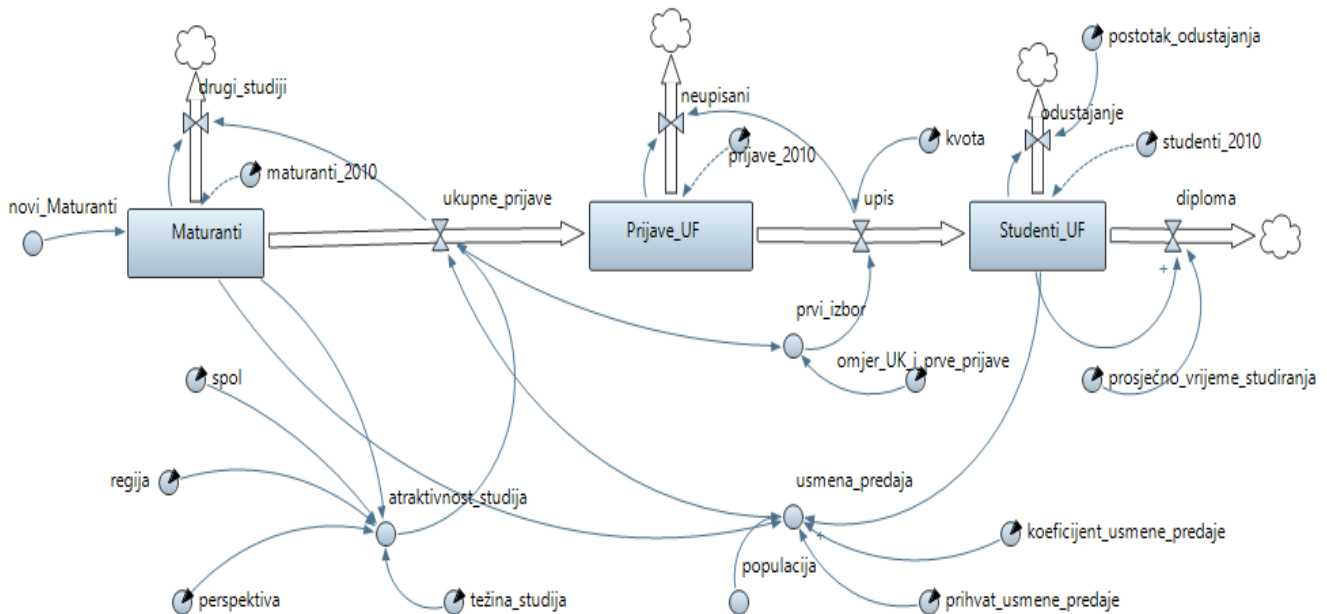
U Tablici 10. su navedeni elementi za treći dio SD modela *Učitelj*, s opisima vrste elementa, vrijednostima izraza kako je implementirano u Java kodu AnyLogic aplikacije te eventualnim napomenama. Pritom nisu obuhvaćeni elementi modela koji se nalaze na slici modela no služe za izradu scenarija te validaciju opisanu u 5. poglavlju. U odnosu na opći model iz poglavlja 4., modelom razredne nastave RH je varijablom *Mirovina* obuhvaćen svaki izlazak iz sustava s obzirom da se ne vode precizniji podaci o razlozima odlazaka učitelja iz sustava te strukturom prema godinama staža kada odlaze iz sustava.

Tablica 10. Elementi trećeg dijela model *Učitelj*

Element	Vrsta elementa	Vrijednost / jednadžba	Napomena
<i>Učitelji_HZZ_2010</i>	konstanta	950	prijavljeni na burzi 2010. g.
<i>HZZ</i>	zaliha	$d(HZZ) / dt = \text{Diploma} - \text{posao}$	
<i>Posao_izvan_Struke</i>	protok	$\text{Posao\_izvan\_Struke} = HZZ \cdot \text{triangular}(0.05, 0.15) \cdot (100 + \text{udio\_posla\_izvan\_struke}) / 100$	
<i>Posao_u_Struci</i>	protok	$(Učitelj \cdot \text{prirast\_broja\_učitelja} + \text{Mirovina}) \cdot (100 + \text{pedagoški\_standard}) / 100$	
<i>prirast_broja_učitelja</i>	konstanta	0,0114	prosječno godišnje povećanje 1,14%
<i>Učitelji_2010</i>	konstanta	11454	broj učitelja RN u 2010. g.
<i>Učitelj</i>	zaliha	$d(Učitelj) / dt = \text{Posao\_u\_struci} - \text{Mirovina}$	
<i>Mirovina</i>	protok	$\text{Mirovina} = Učitelj \cdot 0.025 \cdot (100 - \text{ostanak\_u\_sustavu}) / 100$	

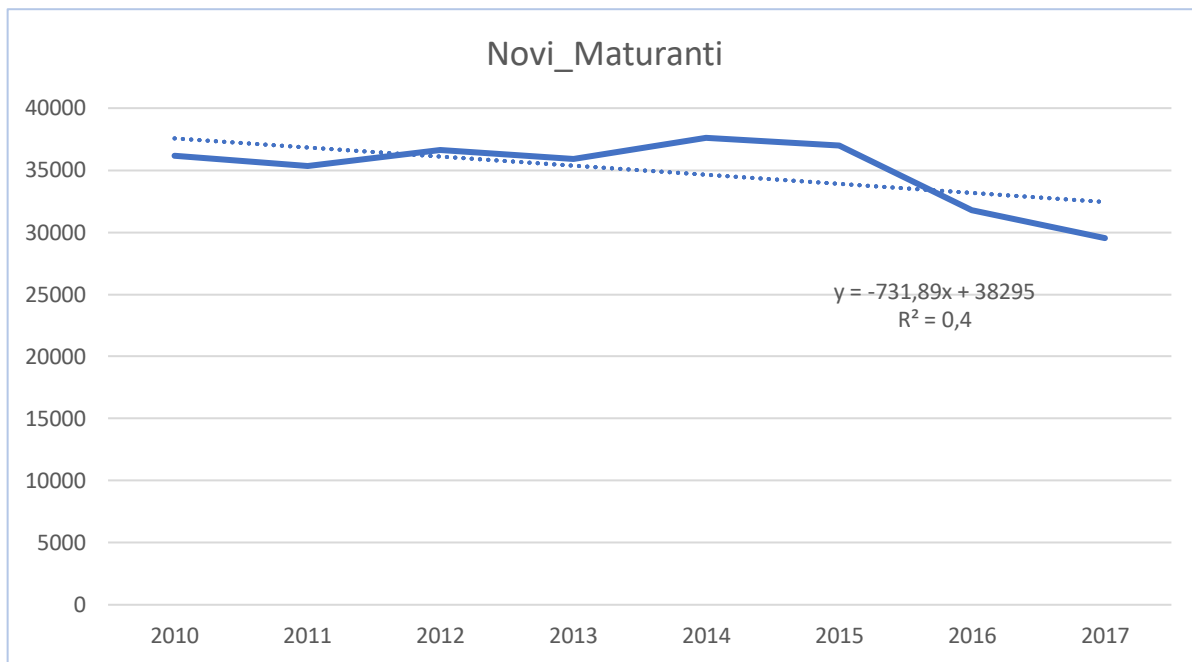
## 5.2.2. Model Učiteljski Fakultet

Model *Učiteljski Fakultet* je dodatno razrađeni dio modela *Učitelj*. Modelu su dodani parametri koji imaju drukčije vrijednosti za pojedine učiteljske fakultete u R. Hrvatskoj, što nije od važnosti za općenitiji model *Učitelj*. Promatra se populacija od mature nakon srednje škole, preko upisa na učiteljske fakultete do diplome na fakultetu. Model je namijenjen upravama pojedinih učiteljskih fakulteta za analizu upisne politike, trendova i parametara koji utječu na upise i studiranje na fakultetu. SD realizacija modela je prikazana na Slici 26.



Slika 26. Model *Učiteljski Fakultet*

Prvi dio modela se odnosi na broj maturanata RH što je naslijeđeno iz modela *Učitelj*. Dinamička varijabla *Novi\_Maturanti* je prikazana pravcem linearne regresije broja pristupnika državnoj maturi (Nacionalni centar za vanjsko vrednovanje, 2020). Konstanta *Maturanti\_2010* je broj maturanata 2010. godine, što je inicijalna vrijednost za varijablu zaliha *Maturanti*. Na Slici 27. je grafički prikaz broja maturanata te pripadna jednadžba linearne regresije ( $R^2=0,4$ ; srednje jaka veza), za dinamičku varijablu *Novi\_Maturanti*. Promatrani su i drugi modeli prikaza jednadžbama, pa primjerice ako se podaci 2010. do 2015. godine prikažu polinomom 3 reda podudaranje daje  $R^2$  od 0,9 no takva funkcionalna povezanost primijenjena u modelu pokazuje dobro podudaranje na skupu na temelju kojeg je izračunata, no za predviđanje do 2020. g. bitno lošije odudara od stvarnih podataka, u skladu s kubnom funkcijom. Zaključak je da je na duži period bolja aproksimacija linearnom jednadžbom za promatrani parametar, odnosno ukupno gledano daje bolje rezultate predviđanja. Općenito gledano, pokazalo se da bolja aproksimacija na danom skupu podataka (u ovoj situaciji na temelju 5 godina) ne znači nužno i bolju moć predikcije budućeg trenda.

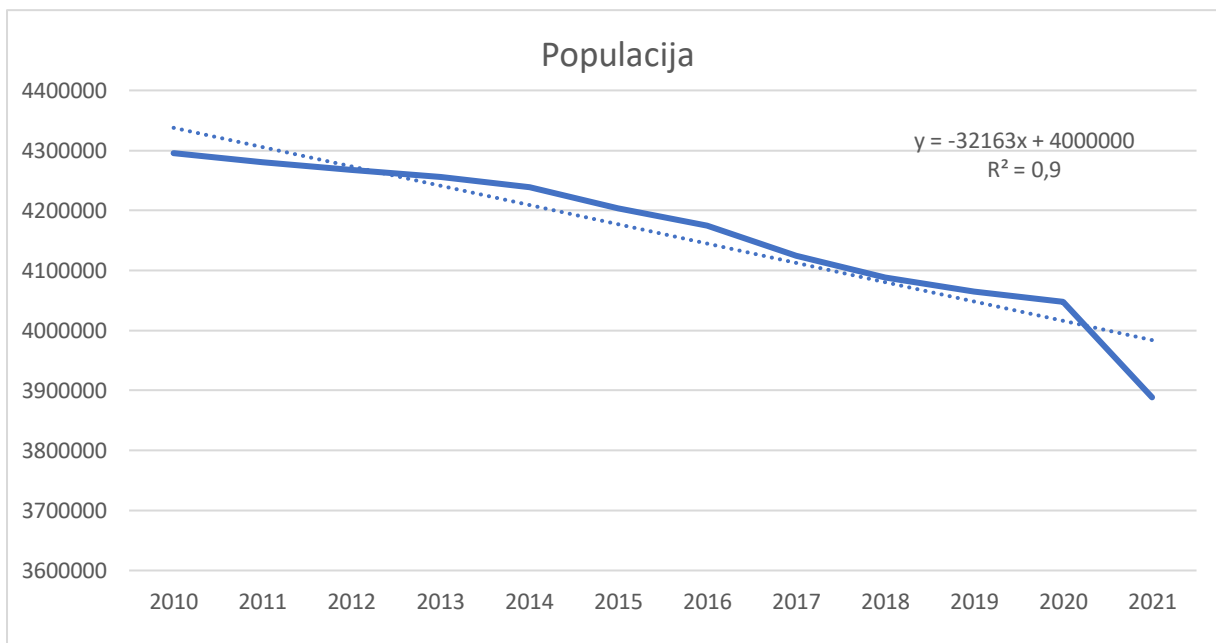


Slika 27. Grafički prikaz varijable *Novi\_Maturanti*

Za primjenu modela je odabran Učiteljski Fakultet Sveučilišta u Zagrebu (UFZG), sa svojim specifičnim vrijednostima parametara. *Prijave\_UF* je varijabla zaliha o ukupnim prijavama na UFZG s inicijalnom vrijednosti iz 2010. godine koju predstavlja konstanta *Prijave\_2010*.

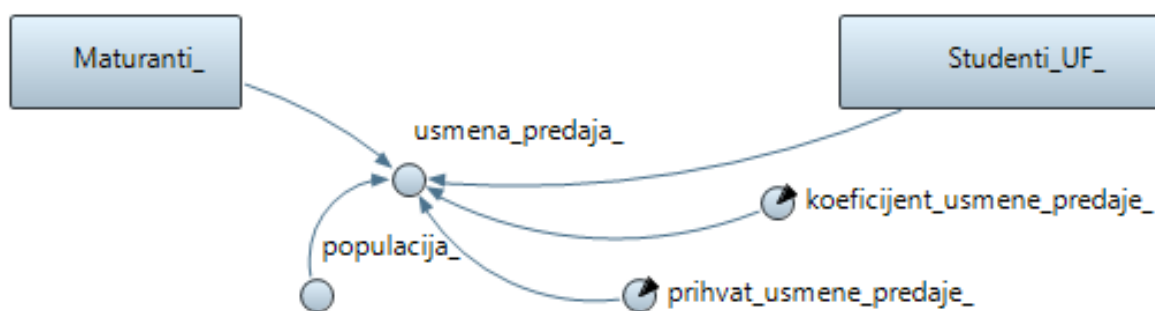
Konstanta *Kvota* predstavlja sveukupnu upisnu kvotu na sve tri lokacije UFZG (Zagreb, Čakovec, Petrinja). *Studenti\_2010* je ukupan broj studenata na UFZG 2010. godine (Agencija za znanost i visoko obrazovanje, 2022), *Postotak\_Odustajanja* i *Prosječno\_Vrijeme\_Studiranja* su specifične vrijednosti za UFZG, dobivene na temelju uvida u baze podataka studentske referade. Na Slici 28. je grafički prikaz broja ukupne populacije RH te pripadna jednadžba linearne regresije ( $R^2=0,9$ ; čvrsta veza), za dinamičku varijablu *Populacija*.

Po uzoru na rad Franka Bassa iz 1969. godine (Bass, 1969) parametar interesa za upis na fakultet se podijelio u dvije varijable, u ovom radu su nazvani *atraktivnost studija* i *usmena predaja*. Ideja takve podjele je da se razdvoje vanjski-objektivni od unutarnjeg-subjektivnog motiva. Rad F. Bassa je utjecajan i primijenjen u raznim istraživanjima primjenom SD (Bauckhage & Kersting, 2014; Borshchev, 2013; Ostojic, 2010) i ABM modeliranja (Borshchev, 2013), (Holanda et al., 2003).



Slika 28. Grafički prikaz dinamičke varijable *populacija*

Usmena predaja predstavlja „unutarnji“ utjecaj na motivaciju maturanata za upis na učiteljski studij. To je subjektivna kategorija koja obuhvaća široki spektar razloga zašto netko smatra da želi biti učitelj razredne nastave. To i dalje ne znači da se potom i odluči u tom smjeru karijere odnosno da je upisao navedeni studij. Razlozi koji pripadaju pod usmena predaja mogu biti: pozitivan utjecaj učitelja iz vlastitog školovanja, utjecaj roditelja, rodbine i prijatelja koji jesu ili su bili učitelji, pozitivan utjecaj vršnjaka ili društvenih medija itd. Na Slici 29. je prikazan dio modela vezan uz dinamičku varijablu *Usmena\_Predaja*.



Slika 29. Dio modela uz dinamičku varijablu *Usmena\_Predaja*

Na temelju (Bass, 1969) su definirana ključna dva parametra vezano uz varijablu *Usmena\_Predaja*. To su *Koeficijent\_Usmene\_Predaje* koji se odnosi na veličinu kontakata (eng. *contact rate*) koji pojedinac ostvari s drugim pojedincima koji bi mogli utjecati na odluku te *Prihvat\_Usmene\_Predaje* (eng. *adoption rate*) koja se odnosi na donošenje pozitivne odluke na temelju kontakta usmenom predajom, odnosno vjerojatnost prihvaćanja utjecaja ostvarenog usmenom predajom.



Za potrebe ovog rada je provedeno istraživanje stavova o učiteljskom pozivu, studiju primarnog obrazovanja kao opcije studiranja te utjecaju usmene predaje na percepciju učitelja u društvu i percepciju studija primarnog obrazovanja. Istraživanje je realizirano pomoću ankete na Učiteljskom Fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Anketa je provedena na uzorku 650 ispitanika svih dobnih skupina na području cijele RH. Anketa se dijelila među ispitanicima tako da su anketu podijelili međusobno studenti među svojim kolegama, prijateljima, rodbinom te među kontaktima unutar društvenih mreža. Komunikacija preko društvenih medija se smatra suvremenim oblikom usmene predaje (tzv. e-usmena predaja) (Lee & Youn, 2009), sve utjecajnijim oblikom komunikacije do te mjere da se zbog svoje neformalne prirode, trend komercijalnog oglašavanja sve više okreće e-usmenoj predaji umjesto klasičnim oblicima oglašavanja (Haramija, 2007). Pritom je ustanovljeno da se pozitivni stavovi prema predmetu ispitivanja bolje usvajaju i prenose dalje uslijed pozitivne usmene predaje, u odnosu na neutralnu ili negativnu usmenu predaju ili nedostatak iste (Edwards et al., 2007).

Implementiran je dio ankete o utjecaju na formiranje stava o studiju za učitelja razredne nastave i učiteljskoj profesiji te su rezultati prikazani u Tablici 11. U tablici su prikazani rezultati ankete koji prezentiraju je li ispitanik razmatrao opcije studiranja za učitelja razredne nastave (s podkategorijama da jest upisao, da nije uspio upisati iako je namjeravao te da je htio upisati ali je ipak upisao nešto drugo) ili nije uopće razmatrao (stupac „ne“ u tablici). U prvom stupcu su odabrani načini na temelju kojih su ispitanici formirali stav pa se prvi redak odnosi na usmenu predaju koja je uključena u ovaj model.

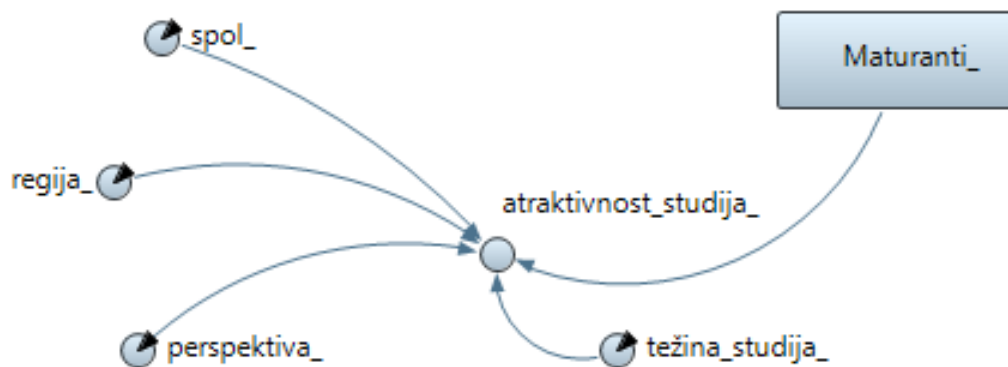
Tablica 11. Stav o studiju za učitelja razredne nastave

Stav o studiju za učitelja razredne nastave formiram na temelju	Opcija studiranja za učitelja razredne nastave				
	da; upisao/la sam	da; nisam uspio/la upisati	da; upisao/la sam nešto drugo	ne	suma redaka
usmena predaja	21	2	11	157	191
službeni izvori, literatura, web stranica	6	1	0	16	23
sam/sama formiram stav, drugo	37	4	15	296	352
nemam stav	19	0	4	61	84
suma stupaca	83	7	30	530	650

Na temelju dobivenih rezultata ankete u model je uključen podatak o pozitivnom stavu prema studiju na temelju usmene predaje ( $191/650=29,38\%$ ) te podatak o postotku prihvata usmene predaje odnosno udio koji su na temelju usmene predaje

upisali studij ili su to htjeli ali nisu uspjeli ili su ipak upisali nešto drugo (34/650=5,23%). Pritom od ispitanika koji su formirali stav na temelju usmene predaje nema statistički značajne razlike među onima koji su upisali studij ili su to htjeli, u odnosu na one koji nisu upisali niti im je to bila opcija ( $\chi^2(1, N=650)=0,08$   $p=0,78>0,05$ ).

*Atraktivnost studija* predstavlja „vanjski“ utjecaj na motivaciju maturanata, objektivni pokazatelji koji utječu na odabir konkretnog fakulteta i studijskog programa. Tako parametar *spol* daje stvarno stanja razlike u interesu za studij među muškim i ženskim maturantima. Statistički podatak navodi da su u populaciji pristupnika državnoj maturi žene zastupljene s 56% (Nacionalni centar za vanjsko vrednovanje, 2020). Za parametre *spol* i *regija* su upotrijebljeni podaci studentske referade o udjelu muške i ženske populacije među studentima, te geografskom porijeklu studenata UFZG, te je dobiven udio 36% područja RH kao dominantan „izvor“ studenata i pritom studentice čine 95% svih studenata UFZG-a. Na Slici 30. je prikazan dio modela vezan uz dinamičku varijablu *Atraktivnost\_Studija*.



Slika 30. Dio modela uz dinamičku varijablu *Atraktivnost\_Studija*

Realni podaci (Agencija za znanost i visoko obrazovanje, 2022) za varijablu *Ukupne\_Prijave* su pokazatelj ukupnih vrijednosti varijabli *Atraktivnost\_Studija* i *Usmena\_Predaja*. Pritom se samo dio njihovih iznosa može objasniti utjecajem poznatih parametara i njihovih vrijednosti, pa je potrebno uvesti nove parametre koji „preuzimaju“ preostali utjecaj. Provedena je optimizacija na temelju stvarnih podataka broja ukupnih prijava na UFZG, te zahtjeva da razlika zbroja varijabli *Atraktivnost\_Studija* i *Usmena\_Predaja* bude minimalna u odnosu na varijablu *Ukupne\_Prijave*. Optimizacija se temelji na matematičkoj metodi diskretne optimizacije, jedna od mogućnosti alata AnyLogic. Na taj način su uvedeni parametri *Perspektiva* i *Težina\_Studija* pri čemu su nazivi okvirno definirani, kao i njihov broj. Prostor za daljnje istraživanje se nameće kroz empirijska istraživanja kojima bi se kvantificirala točnije vrijednost parametara, kao i njihova daljnja grananja, uvođenje novih parametara itd.

Tablica 12. sadrži elemente modela *Učiteljski Fakultet* s opisima vrste elementa, vrijednostima izraza kako je implementirano u Java kodu AnyLogic aplikacije te

eventualnim napomenama. Pritom nisu obuhvaćeni elementi modela koji se nalaze na slici modela no služe za izradu scenarija te validaciju opisanu u poglavlju 2.

Tablica 12. Elementi modela *Učiteljski Fakultet*

Element	Vrsta elementa	Vrijednost / jednadžba	Napomena
<i>Maturanti_2010</i>	konstanta	36177	broj maturanata 2010. g.
<i>Novi_Maturanti</i>	dinamička varijabla	$38295-732 \cdot \text{time}()$	pravac linearne regresije, $R^2=0,4$ , srednje jaka veza <sup>#</sup>
<i>Maturanti</i>	zaliha	$\text{Maturanti} = \text{Novi\_Maturanti} - \text{Ukupne\_Prijave} - \text{Drugi\_Studiji}$	
<i>Drugi_Studiji</i>	protok	$\text{Drugi\_Studiji} = \text{Maturanti} - \text{Ukupne\_Prijave}$	
<i>Ukupne_Prijave</i>	protok	$\text{Ukupne\_Prijave} = \text{time}() < 13 ? (-248 \cdot \text{time}() + 3641) : (\text{Atraktivnost\_Studija} + \text{Usmena\_Predaja})$	
<i>Prijave_UF</i>	zaliha	$d(\text{Prijave\_UF})/dz = \text{Ukupne\_Prijave} - \text{Upis} - \text{Neupisani}$	
<i>Prijave_2010</i>	konstanta	3631	ukupne prijave na UFZG u 2010.g.
<i>Upis</i>	protok	$\text{Upis} = \min(\text{Kvota}, \text{Prvi\_Izbor} \cdot (0.02 \cdot \text{time}() + 0.48))$	
<i>Kvota</i>	konstanta	275	upisna kvota na UFZG
<i>Neupisani</i>	protok	$\text{Neupisani} = \text{Prijave\_UF} - \text{upis}$	
<i>Studenti_UF</i>	zaliha	$d(\text{Studenti\_UF})/dt = \text{Upis} - \text{Odustajanje} - \text{Diploma}$	
<i>Studenti_2010</i>	konstanta	1359	godišnji prosjek broja svih

Element	Vrsta elementa	Vrijednost / jednadžba	Napomena
			studentata na UFZG
<i>Odustajanje</i>	protok	$\text{Odustajanje} = \frac{\text{Studenti\_UF} \cdot \text{Postotak\_Odustajanja}}{5.663}$	
<i>Postotak\_Odustajanja</i>	konstanta	0,0792	postotak odustajanja od studija na UFZG je 7,92%
<i>Prosječno\_Vrijeme\_Studiranja</i>	konstanta	5,7	prosječno vrijeme studiranja na UFZG je 5.7 godina
<i>Atraktivnost\_Studija</i>	dinamička varijabla	$\text{Atraktivnost\_Studija} = \frac{(\text{Maturanti} \cdot \text{Spol} \cdot \text{Regija} / 10000) \cdot \text{Perspektiva} \cdot 100}{(100 \cdot \text{Težina\_Studija})}$	
<i>Spol</i>	konstanta	59	postotak muško/ženski udio studentata na UFZG
<i>Regija</i>	konstanta	36	postotak teritorija RH koji privlači studente na UFZG
<i>Usmena\_Predaja</i>	dinamička varijabla	$\text{Usmena\_Predaja} = \frac{(\text{Maturanti} \cdot \text{Studenti\_UF}) \cdot \text{Koeficijent\_Usmene\_Predaje} \cdot \text{Prihvat\_Usmene\_Predaje}}{\text{Populacija}}$	
<i>Populacija</i>	dinamička varijabla	$-32163 \cdot \text{time}() + 4000000$	pravac linearne regresije, $R^2=0,9$ , čvrsta veza <sup>#</sup>
<i>Koeficijent\_Usmene\_Predaje</i>	konstanta	29	rezultat iz ankete <sup>Δ</sup>
<i>Prihvat\_Usmene\_Predaje</i>	konstanta	5	rezultat iz ankete <sup>Δ</sup>

<sup>#</sup> Chaddockova ljestvica

<sup>Δ</sup>anketa provedena na UFZG

### 5.3. Analiza i verifikacija modela primarnog obrazovanja RH

Model *Učitelj* i njegov podmodel *Učiteljski Fakultet* su razvijeni prema metodologiji prezentiranoj u poglavlju 4. Rezultati simulacijskog modela prikazuju niz numeričkih vrijednosti za svaki pojedini element modela. U ovom poglavlju razmatraju se izlazne vrijednosti za pojedine parametre koji su najvažniji pokazatelji za potencijalne korisnike modela, kao što su podaci o kretanju broja studenata učiteljskih fakulteta, broj prijava za upis na fakultete, broj učitelja u populaciji i slično.

Verifikacija modela se prema teorijskoj podlozi iz poglavlja 2.3.1. odvija u fazama: verifikacija *strukture*, verifikacija *ponašanja* te verifikacija *implikacija na politike* koja se ovim istraživanjem smatra validacijom modela.

Verifikacija *strukture* modela se provodila usporedno s analizom, pri izgradnji modela. Odnosi se na analiziranje i testiranje elemenata modela s obzirom na provjeru strukture, parametara, ekstremne uvjete, graničnu adekvatnosti i konzistentnost mjernih jedinica, prema (Bala et al., 2017; Forrester & Senge, 1980).

Obzirom na navedene testove strukture modela, izvedeni su zaključci nabrojani u nastavku.

- Provjerom strukture pri svakom dodano elementu modela se osiguralo da veza među elementima odgovara odnosima u stvarnosti. Dinamičke varijable koje su prikazane pravcem linearne regresije su temeljene na stvarnim podacima pomoću kojih je izračunata jednadžba linearne regresije. Konstante uključene u model su preuzete iz relevantne literature. Pri dodavanju svakog sljedećeg elementa se provjeravala sintaksa i struktura te se model pokretao. Eventualna pogreška se uklonila prije dodavanja sljedećeg elementa. Prednost AnyLogic alata je što vodi računa o sintaksi u smislu javljanja pogrešnih mjesta u programskom kodu, kao i logici u smislu javljanja pogreške ukoliko postoji neslaganje među elementima u prikazu na grafičkom sučelju i povezanosti programskim kodom i jednadžbama.
- Provjerom parametara je osigurano njihovo jasno značenje i smisao u stvarnosti.
- Ekstremni uvjeti su provjereni kroz postavljanje ekstremnih vrijednost pojedinog parametra. Promatra se vrijednost varijabli koje funkcionalno ovise o promijenjenom parametru. Ako vrijednosti odgovaraju očekivanim s obzirom na logičku interpretaciju, zaključujemo da je model pouzdan s obzirom na ekstremne uvjete. U protivnom je potrebna daljnja analiza i korekcija modela.
- Granična adekvatnost je dvojbena zbog kompleksnosti modela i dostupnih podataka. Neki dijelovi modela nisu detaljnije razrađeni zbog nedostatka preciznih podataka te bi se dodatnim istraživanjima model mogao u nekim dijelovima rafinirati. S obzirom na ostale ključne metode verifikacije strukture i ponašanja, model se i dalje može smatrati pouzdan.
- Konzistencija mjernih jedinica je ispunjena zbog prirode modela. Većina elemenata su bezdimenzionalni kao što su postoci, omjeri ili su prirodni brojevi koji predstavljaju brojnost populacije.

Verifikacija ponašanja modela je najvažniji element ocjene modela pa se detaljno promatraju modelirane i stvarne vrijednosti određenih parametara, posebno

za model *Učitelj* u poglavlju 5.3.1. te za podmodel *Učiteljski Fakultet* u poglavlju 5.3.2. Verifikacija ponašanja modela je ocjena pouzdanosti modela u usporedbi s realnim podacima prikupljenim u relevantnim izvorima. Podaci dobiveni modelom su uspoređeni s realnim, historijskim podacima za vremenski period 2016. g. do 2020. godine. U slučaju da su bili dostupni podaci i za 2021. godinu, i oni su se uvrstili u postupak usporedbe. Na temelju rezultata usporedbe podataka, u poglavlju 6. je izveden zaključak o verifikaciji modela i time se validira hipoteza H1 ovog istraživanja da *razvijeni sustavsko dinamički model dobro reprezentira stanje ljudskih potencijala u sustavu odgoja i obrazovanja*.

Provedena je analiza osjetljivosti parametara uključenih u model *Učitelj*. Za sedam parametara je varirana njihova vrijednost od smanjenja za 50% do povećanja za 50% u odnosu na njihovu osnovnu vrijednost u modelu (Moizer et al., 2001). To uključuje i parametre koji su početno postavljeni na 0% iznosa dobivenog drugom dinamičkom varijablom te se varira njihova vrijednost od -50% do +50%. Parametar *vrijeme studiranja* se varira od početne vrijednosti (5,7 godina) do povećanja od 100% početne vrijednosti (11,4 godina) jer smanjenje za 50% vrijednosti (2,85 godina) nema smisla, s obzirom da je 5 godina trajanje studija za učitelja razredne nastave u RH (Agencija za znanost i visoko obrazovanje, 2020). Isto tako parametar *ostanak u sustavu* učitelja koji su stekli uvjete za mirovinu je variran od 0% do 100% broja učitelja za mirovinu. U Tablici 13. su navedeni parametri koji su varirani, njihove osnovne vrijednosti iz modela, intervali unutar kojih su varirani, te postotak promjene izlaznih varijabli *Populacija*, *Student* ili *Učitelj*. Iz tablice je vidljivo da su najmanji utjecaj na izlaznu varijablu zaokruženi na 3%, odnosno broj imigracije vrlo malo utječe na populaciju kao što i broj učitelja koji bi ostao u sustavu primarne nastave i nakon stjecanja uvjet za mirovinu ne utječe bitno na ukupni broj učitelja.

Postotna vrijednost promjene izlazne varijable se procjenjuje kvalitativno ovisno o vrsti istraživanja. Koja je granična vrijednost postotnog utjecaja parametra na izlaznu varijablu da bi se uključio ili izostavio iz modela ovisi o procjeni istraživača i rezultatima testiranja ponašanja modela (u kojoj mjeri se rezultati modela podudaraju sa stvarnim podacima) (Razavi et al., 2021). Značajnost parametra na izlaznu varijablu može se interpretirati prema procjeni stručnjaka i vrsti istraživanja, primjerice u istraživanju Mitala (2015) su obuhvaćeni parametri koji utječu na vrijednosti izlazne varijable više od 10%. S obzirom da se za uobičajenu mjeru prihvatljive statističke pogreške uzima vrijednost 5% (u strožem slučaju 1%) (Guilford, 1973; Petz, 1997) po analogiji s prihvatljivom statističkom pogreškom prihvaćeni su parametri čiji je utjecaj na izlaznu varijablu barem 5%. Iznimka su dva parametra čija je vrijednost utjecaja 3%. Prvi parametar je *prosjeck imigracije* koji je obuhvaćen zbog činjenice da je uz udio rođenih jedini parametar koji utječe na prirast stanovništva, a s obzirom na mali udio imigracije u populaciji Hrvatske taj parametar nema veći utjecaj na brojnost populacije (Državni zavod za statistiku, 2022a). Razvijeni model je primjenjiv na različita područja odgoja i obrazovanja i nije ograničen na Hrvatsku već i na zemlje s dinamičnijom imigracijskom populacijom te je stoga uzet u obzir parametar imigracije. Parametar *ostanak u sustavu* se odnosi na ostatak učitelja u sustavu odgoj i obrazovanja i nakon stjecanja prava na

mirovinu. U Hrvatskoj nema dostupnih podataka oko ostanka u sustavu kao niti strukturi i razlozima izlaska iz struke prije mirovine, no s obzirom na nedostatak pojedinih nastavničkih struka te najave nadležnih prosvjetnih vlasti o promjeni zakonskih propisa, za očekivati je da će se bolje evidentirati takva populacija i da će u budućem periodu biti interesa za istraživanja u tom smjeru.

Parametri koji utječu u manjem postotku od 3% nisu uključeni u model, kao niti parametri koji u općem modelu sustava odgoja i obrazovanja imaju utjecaja no nisu presudni te nisu istraživani u ovom modelu primarnog obrazovanja. Na primjer utjecaj financija na model nije uključen u model jer su svi fakulteti koji obrazuju buduće učitelje razredne nastave javni pa troškovi studiranja nisu presudni za upise. Financije bi se eventualno mogle uključiti nakon istraživanja utjecaja financijskih mogućnosti studenata na odabir studija, što je izvan dosega ovog istraživanja. Drugi primjer je utjecaj dolaznih studenata iz drugih zemalja i broj studenata koji su promijenili studij. Na temelju podataka iz referade Učiteljskog Fakulteta u Zagrebu zaključeno je da je broj takvih studenata zanemariv te je zaključak primijenjen na sve studije primarnog obrazovanja RH, stoga nije uključen u model.

Tablica 13. Analiza osjetljivosti modela *Učitelj*

Parametar	vrijednost u modelu	interval vrijednosti variranja	utjecaj na izlaznu varijablu* (%)
prosjeck imigracije	23069	11535 - 34606	3% <sup>1</sup>
prosjeck emigracije	37858	18929 - 56787	5% <sup>1</sup>
upisne kvote	0	(-50) – (+50)	57% <sup>2</sup>
atraktivnost	0	(-50) – (+50)	56% <sup>2</sup>
vrijeme studiranja	5,7	5,7 - 11,4	36% <sup>2</sup>
odustajanje	7,92	3,95 - 11,85	5% <sup>2</sup>
prirast broja učitelja	0,0114	0,0057 - 0,0171	5% <sup>3</sup>
pedagoški standard	0	(-50) – (+50)	18% <sup>3</sup>
ostanak u sustavu	0	0 - 100	3% <sup>3</sup>

\* izlazna varijabla: <sup>1</sup> *Populacija*, <sup>2</sup> *Student*, <sup>3</sup> *Učitelj*

Zatim je provedena analiza osjetljivosti parametara modela *Učiteljski Fakultet*. Sedam parametara koji su konstante je redom mijenjano u rasponu od smanjenja za 50% svoje vrijednosti do povećanja za 50% svoje osnovne vrijednosti iz modela te je promatran raspon izlaznih vrijednosti varijable *Student*. Za parametre *spol* i *prosječno vrijeme studiranja* nema smisla navedeni raspon jer bi odražavali logički nemoguće vrijednosti. Parametar *spol* odražava sastav studenata s obzirom na spol. Pritom vrijednost 50% znači da su isključivo jednog spola studenti (ženski studenti u realnosti)

ako je pola maturanata ženskog spola, dok 100% znači da je podjednak odnos muških i ženskih studenata odnosno da se 100% maturanata dolazi u obzir za upis na učiteljski studij. *Vrijeme studiranja* je nužno broj veći od 5 godina s obzirom da toliko traje učiteljski studij. Parametar *prosječno vrijeme studiranja* je mijenjan u rasponu od 0% do povećanja za 100% od osnovne vrijednosti, a parametar *spol* za 0% do povećanja za 50% svoje vrijednosti. U Tablici 14. su navedeni parametri koji su varirani, njihove osnovne vrijednosti iz modela, intervali unutar kojih su varirani, te postotak promjene izlazne varijable *Student*. U tablici je vidljivo da navedeni parametri direktno utječu na izlaznu varijablu u postocima većim od 5% te se može zaključiti da je model osjetljiv na navedene parametre. Parametri koji utječu manje od 3% nisu uključeni u model jer je njihov utjecaj na razini pogreške zbog nepreciznih ulaznih podataka koji čine model. Na primjer broj stranih studenata na Učiteljskom Fakultetu u Zagrebu je od 0% do 3% (varira od godine do godine prema podacima referade) te u prosjeku ne utječe na vrijednosti modela. Podaci su prikupljeni na primjeru Učiteljskog Fakulteta u Zagrebu koji obuhvaća 40% svih studenata primarnog obrazovanja u RH te je primijenjen za sve Učiteljske Fakultete u RH, što ipak može odudarati od stvarnih podataka u bitnoj mjeri.

Tablica 14. Analiza osjetljivosti modela *Učiteljski Fakultet*

Parametar	vrijednost u modelu	interval vrijednosti variranja	utjecaj na izlaznu varijablu <i>Student</i> (%)
kvota	275	138-415	36%
regija	36	18-54	10%
spol	59	59 - 89	6%
koeficijent usmene predaje	29	14,5 - 43,5	91%
prihvata usmene predaje	5	2,5 - 7,5	91%
prosječno vrijeme studiranja	5,79	5,79 - 11,58	31%
postotak odustajanja	7,92%	3,95% - 11,85%	7%
perspektiva	6	3 - 9	10%
težina studija	190	95 - 285	10%

Na razini modela i programskog alata, analize osjetljivosti parametara se izvode u dijelu modela *Eksperimenti*, na način da se za svaki parametar za koji se izvodi analiza osjetljivosti kreira agent koji definira izvođenja eksperimenta te prikazivanje rezultata. Agent pokreće eksperiment i prikazuje rezultate u odabranom korisničkom sučelju, dok se sami model pokreće kao SD okolina.



### 5.3.1. Rezultati i verifikacija modela *Učitelj*

Tablica 15. prikazuje stvarne i podatke dobivene simulacijskim modelom za broj stanovnika Republike Hrvatske u periodu 2016. g do 2021. godine. Prikazane su numeričke vrijednosti, s relativnim pogreškama i MSE  $0,009 < 0,1$  što se smatra prihvatljivom pogreškom modela.

Tablica 15. Usporedba vrijednosti varijable *Populacija RH*

Godina	Stvarni podaci	Podaci dobiveni modelom	e*	MSE#
2016	4174349	4172000	0,001	0,009
2017	4124531	4140000	0,004	
2018	4087843	4108000	0,005	
2019	4065253	4077000	0,003	
2020	4047680	4046000	0,000	
2021	3888529	3967000	0,020	

\* relativna pogreška, određena izrazom (15)

# srednja kvadratna pogreška, određena izrazom (16); prihvatljivo odstupanje za MSE  $< 0,1$

Tablica 16. prikazuje stvarne i podatke dobivene simulacijskim modelom za broj maturanata, odnosno pristupnika ispitu državne mature u periodu 2016. g do 2020. godine. Prikazane su numeričke vrijednosti, s relativnim pogreškama i MSE  $0,058 < 0,1$  što se smatra prihvatljivom pogreškom modela.

Tablica 16. Usporedba vrijednosti varijable *Maturanti*

Godina	Stvarni podaci	Podaci dobiveni modelom	e*	MSE#
2016	34883	34996	0,003	0,058
2017	33296	34335	0,031	
2018	31793	33666	0,059	
2019	31093	32991	0,061	
2020	29532	32312	0,094	

\* relativna pogreška, određena izrazom (15)

# srednja kvadratna pogreška, određena izrazom (16); prihvatljivo odstupanje za MSE  $< 0,1$

Tablica 17. prikazuje stvarne i podatke dobivene simulacijskim modelom za broj upisanih studenata na prvu godinu svih učiteljskih studija u RH, u periodu 2016. g. do 2020. godine. Prikazane su numeričke vrijednosti, s relativnim pogreškama i MSE  $0,082 < 0,1$  što se smatra prihvatljivom pogreškom modela.

Tablica 17. Usporedba vrijednosti varijable *Upisi na učiteljske fakultete*

Godina	Stvarni podaci	podaci dobiveni modelom	e*	MSE#
2016	615	574	0,067	0,082
2017	590	556	0,058	
2018	538	546	0,014	
2019	490	532	0,086	
2020	462	525	0,136	

\* relativna pogreška, određena izrazom (15)

# srednja kvadratna pogreška, određena izrazom (16); prihvatljivo odstupanje za MSE < 0,1

Tablica 18. prikazuje stvarne i podatke dobivene simulacijskim modelom za ukupan broj studenata na svim godinama svih učiteljskih studija u RH, u periodu 2016. g. do 2020. godine. Prikazane su numeričke vrijednosti, s relativnim pogreškama i MSE 0,081 < 0,1 što se smatra prihvatljivom pogreškom modela.

Tablica 18. Usporedba vrijednosti varijable *Studenti učiteljskih fakulteta*

Godina	Stvarni podaci	Podaci dobiveni modelom	e*	MSE#
2016	3483	3141	0,098	0,081
2017	3341	3107	0,070	
2018	3047	3069	0,007	
2019	2775	3029	0,091	
2020	2616	2986	0,099	

\* relativna pogreška, određena izrazom (15)

# srednja kvadratna pogreška, određena izrazom (16); prihvatljivo odstupanje za MSE < 0,1

Tablica 19. prikazuje stvarne i podatke dobivene simulacijskim modelom za ukupan učitelja razredne nastave u RH, u periodu 2016. g. do 2020. godine. Prikazane su numeričke vrijednosti, s relativnim pogreškama i MSE 0,01 < 0,1 što se smatra prihvatljivom pogreškom modela.

Tablica 19. Usporedba vrijednosti varijable *Učitelj* razredne nastave

Godina	Stvarni podaci	Podaci dobiveni modelom	e*	MSE#
2016	12183	12265	0,007	0,01
2017	12204	12405	0,016	
2018	12533	12548	0,001	
2019	12506	12692	0,015	
2020	12824	12837	0,001	

\* relativna pogreška, određena izrazom (15)

# srednja kvadratna pogreška, određena izrazom (16); prihvatljivo odstupanje za MSE < 0,1

Ukupni rezultati pokazuju vrijednosti unutar prihvatljivog odstupanja čime se pokazuje da model dobro opisuje trend, no primjećuje se veće odstupanje za pojedine godine, a kod pojedinih varijabli odstupanje raste s protokom vremena.

U fazi dizajna modela su analizirane alternativne opcije u podjeli podataka za razvoj i evaluaciju modela. U Tablici 20. su prikazani rezultati i relativna pogreška za podjelu podataka na način da su podaci za 2010. g. do 2019. g. korišteni za funkcionalno povezivanje parametara te je promatrano predviđanje za samo jednu godinu, 2020. g.

Tablica 20. Pogreška pri odabiru podataka za razvoj modela 2010.- 2019. g.

Parametar	Stvarni podaci	Podaci dobiveni modelom	e*
Populacija	4047680	4027000	0,005
Maturanti	29532	32458	0,099
Upisi na UF	462	440	0,048
Studenti UF	2616	2647	0,012
Učitelji	12824	12837	0,001

\* relativna pogreška, određena izrazom (15)

Rezultati ne pokazuju bitno bolje rezultate u odnosu na odabir podataka na ranije opisani način ako se gleda svaka pojedinačna godina, a za varijablu *Maturanti* je odstupanje i veće. S obzirom na ulogu modela za planiranje ljudskih potencijala, model bi bio korisniji ako može predviđati unutar prihvatljive pogreške duži period od jedne godine, odnosno barem za trajanja jednog obrazovnog ciklusa. Takve predikcije sugeriraju inicijalni zahtjevi korisnika, istraživani kroz neformalna prikupljanja informacija u fazi definicije modela.

Predviđanje za jednu godinu se može opravdati kratkoročnim planiranjem odnosno za eventualne obrazovne programe koji traju jednu godinu. U tom slučaju model pokazuje bolje rezultate odnosno manja odstupanja od stvarnih podataka no ograničava se korisnička orijentiranost modela na način da je i sužen izbor scenarija koji se mogu ponuditi korisnicima, što je jedan od prednosti hibridnog modela i doprinos ovog istraživanja.

Dodatno su isprobavane i druge opcije, po uzoru na Reichardt et al.(2020) pa se primjerice pokušaj prognoze na temelju dvije prethodne godine pokazao kao najlošiji izbor za prognoze nekih varijabli na način da su predviđanja pokazivala trendove drukčije nego što su stvarni podaci (primjerice za varijablu *Maturanti* model je u tom slučaju previđao rast broja maturanata). Primijenjeni način podjele da se predviđa na temelju 5 godina te prognozira sljedećih 5 godina je pokazao trendove u skladu sa stvarnim podacima, no i veću primjenu za korisnike u odnosu na prognozu od jedne godine.

### 5.3.2. Rezultati i verifikacija modela *Učiteljski Fakultet*

Tablica 21. prikazuje stvarne i podatke dobivene simulacijskim modelom za ukupan prijava na studij učitelja razredne nastave na UFZG, u periodu 2016. g. do 2020. godine. Prikazane su numeričke vrijednosti, s relativnim pogreškama i MSE  $0,070 < 0,1$  što se smatra prihvatljivom pogreškom modela.

Tablica 21. Usporedba vrijednosti varijable *Ukupne prijave* na UFZG

Godina	Stvarni podaci	Podaci dobiveni modelom	e*	MSE#
2016	2160	2153	0,003	0,070
2017	2120	1905	0,101	
2018	1709	1657	0,030	
2019	1523	1409	0,075	
2020	1255	1161	0,075	

\* relativna pogreška, određena izrazom (15)

# srednja kvadratna pogreška, određena izrazom (16); prihvatljivo odstupanje za  $MSE < 0,1$

Tablica 22. prikazuje stvarne i podatke dobivene simulacijskim modelom za ukupan prijava na studij učitelja razredne nastave na UFZG, u periodu 2016. g. do 2020. godine. Prikazane su numeričke vrijednosti, s relativnim pogreškama i MSE  $0,063 < 0,1$  što se smatra prihvatljivom pogreškom modela.

Tablica 22. Usporedba vrijednosti varijable *Broj studenata* na UFZG

Godina	Stvarni podaci	Podaci dobiveni modelom	e*	MSE#
2016	1495	1412	0,056	0,063
2017	1467	1350	0,080	
2018	1325	1295	0,023	
2019	1273	1225	0,038	
2020	1255	1141	0,091	

\* relativna pogreška, određena izrazom (15)

# srednja kvadratna pogreška, određena izrazom (16); prihvatljivo odstupanje za MSE < 0,1

Dodatno su istraživana alternativna grupiranja podataka za razvoj modela i predikciju, no rezultati pokazuju najbolje podatke za primijenjeni vremenski raspored, s obzirom na zahtjev korisnika za predikcijom jednog obrazovnog ciklusa. Prikazani rezultati pokazuju veća odstupanja protekom vremena te je smanjeno inicijalno predviđanje ovog podmodela sa 6 na 5 godina.

#### 5.4. Validacija modela primarnog obrazovanja RH

Model se validira stavovima ciljanih korisnika modela. Stoga je u fazi validacije ciljanim korisnicima prezentiran model i mogućnost njegova korištenja putem razvijenog grafičkog korisničkog sučelja. Grafičko korisničko sučelje je realizirano kao web aplikacija te omogućuje korisnicima samostalnu primjenu modela, bez potrebe poznavanja alata AnyLogic, programskog jezika Java ili principe SD i ABM. Sučelju korisnici pristupaju putem web sjedišta Planiranje ljudskih potencijala u sustavu odgoja i obrazovanja (*Planiranje ljudskih potencijala u sustavu odgoja i obrazovanja Republike Hrvatske*, 2022). U okviru grafičkog sučelja, korisnicima je dostupno izvođenje simulacija pomoću izrađenih scenarija koji omogućuju interaktivno mijenjanje vrijednosti niza parametara.

Individualne prezentacije modela i grafičkog korisničkog sučelja su održane uživo ili u virtualnom okruženju, a nakon toga je provedena anketa kojom su se ispitali stavovi oko korisnosti modela i sučelja za podršku odlučivanju. Anketa je provedena alatom Google obrasci (*Google obrasci*, 2022) u studenom i prosincu 2022. godine.

Na temelju rezultata ankete, u poglavlju 6. je izveden zaključak o validaciji sustavsko dinamičkog modela kao korisnog alata za upravljanje ljudskim potencijalima u sustavu odgoja i obrazovanja. Time se validira hipoteza H2 ovog istraživanja da *razvijeni model daje podršku odlučivanju pri donošenju upisne politike visokoškolskih ustanova*.

#### 5.4.1. Sudionici i metode istraživanja

Validacija je realizirana na temelju prilagođene Delphi metode. Ispitanici su članovi uprava učiteljskih fakulteta i sveučilišnih odjela u Hrvatskoj koji se bave pitanjem ljudskih potencijala i upisne politike na svojim institucijama te su potencijalni korisnici modela. Ispitivanje mišljenja se odvijalo u jednom ciklusu, bez povratnih informacija u procesu anketiranja. Jednim ciklusom ispitivanja mišljenja su se izbjegle negativne strane Delphi metode, pojašnjene u poglavlju 2.3.2., a postiglo se da cilj anketiranja nije postizanje konsenzusa stručnjaka već prikupljanje stavova o modelu, što će rezultirati prihvaćanjem ili odbacivanjem hipoteze. S druge strane primijenjene su pozitivne strane Delphi metode u smislu anketiranja stručnjaka, a ne slučajnog statističkog uzorka, što daje težinu izrečenim stavovima u anketi.

Profil stručnjaka na učiteljskim fakultetima je heterogen više nego na drugim fakultetima s obzirom na raznolikost znanstvenih polja i područja zastupljenih u edukaciji budućih učitelja razredne nastave. Time je i sastav nastavnog kadra na učiteljskim fakultetima heterogen odnosno s komplementarnim znanjima. Zaključno, članovi uprava učiteljskih fakulteta mogu se smatrati stručnjacima za područje ovog istraživanja s obzirom na sociološki, bihevioristički i kognitivni pristup.

#### 5.4.2. Scenariji

Pojam scenarija u modeliranju je evoluirao od 1960-ih godina kada se definirao kao *hipotetski niz događaja konstruiran u svrhu usmjeravanja pozornosti na uzročne procese i točke odlučivanja* (Herman & Wiener, 1967) pa do suvremenih verzija u kojima se scenarij definira kao *dio strateškog planiranja koji se odnosi na alate i tehnologije za upravljanje neizvjesnostima budućnosti* (Ringland, 2014). Među uobičajenim metodama modeliranja scenarija su Monte Carlo simulacije, analize osjetljivosti, stabla odlučivanja i Bayesove mreže (*Scenario Modeling*, 2023).

U ovom istraživanju scenariji se definiraju kao *načini evaluacije alternativnih političkih i upravljačkih opcija*, prema metodologiji *scenarij intervencija* (IPBES, 2020). Prema navedenoj metodologiji intervencije putem scenarija se mogu realizirati na način traženja cilja (eng. *target seeking*) ili procjena politika (eng. *policy screening*). Na taj način se ostvaruje podrška odlučivanju, što je glavna zadaća razvijenog modela prezentiranog ovim radom.

Više je metoda za provođenje analize scenarija, a prema Batrouni i sur. (2018) analiza scenarija je skup metodologija i tehnika s ciljem generiranja strateškog uvida za donositelje odluka i politike. Analiza scenarija se u određenom pogledu može smatrati vrstom analize osjetljivosti, no analiza osjetljivosti po definiciji izolira pojedini događaj te promatra njegov utjecaj dok scenariji podrazumijevaju više različitih ishoda u širem kontekstu (*Scenario Modeling*, 2023).

Ovim radom se bitno razlikuje analiza osjetljivosti od analize scenarija. Analiza osjetljivosti se provodi u sklopu verifikacije modela, što je zadaća autora modela. S druge strane analiza scenarija je prepuštena interesima korisnika i ne provodi ju

istraživač odnosno autor modela, kao što ne provodi niti eksperimente već korisnicima omogućava provođenje eksperimenata pomoću scenarija.

Prema samoj izvedbi scenarij je predefrirani načini za izvođenje simulacije vezano za određeni skup parametara odnosno eksperimenti koje provode korisnici modela. Nakon verifikacije modela kojom se potvrđuje da model dobro reprezentira stvarni sustav može se istraživati predikcija temeljem modela odnosno projekcija ponašanja pojedinih varijabli u budućem razdoblju. U tu svrhu se mijenjaju vrijednosti pojedinih parametara na način da simuliraju upravljačke odluke. Primjerice poveća se parametar (konstanta) upisna kvota fakulteta za 50% od svoje stvarne vrijednosti u skladu s odlukom uprave fakulteta. Potom se promatra vrijednost varijable od interesa (primjerice broj diplomiranih studenata) u definiranom budućem vremenskom periodu te se uspoređuje s vrijednostima koje bi varijabla imala bez intervencije, odnosno u situaciji kada su parametri postavljeni na početne vrijednosti. Takav oblik eksperimenta se naziva scenarij i služi za evaluaciju upravljačkih odluka korisnika modela te je temeljna vrijednost razvijenog modela. Primjerice u istraživanju Saihn i sur. (2014) temeljenom na isključivo SD predefrirano je pet scenarija u kojima su postavljene različite vrijednosti za tri konstante. Model je potom pokrenut i promatrane su vrijednosti jedne varijable nakon vremenskog perioda od sto godina. Rezultati svakog scenarija su potom prikazani i prezentirani korisniku na evaluaciju. U radu Relić i Božikov (2020) analiziraju se dva scenarija u edukaciji budućih liječnika specijalista u Hrvatskoj. U radu Mendes i Aleluia (2019) uspoređuju se rezultati tri scenarija u potrebama za nastavničkim kadrom u Portugalu.

Tako dizajniranim scenarijima se unutar modela moraju točno definirati vrijednosti parametara te se potom uspoređuju izlazne vrijednosti. Sama analiza i usporedba vrijednosti se potom može vršiti nekom od metoda analiza scenarija (Brauers & Weber, 1988; Hsia i sur., 1994; Kosow & Gaßner, 2008) koja se ovim radom detaljno ne razmatra s obzirom na hibridnu prirodu modela i korisničku prirodu scenarija pojašnjeno u nastavku.

U odnosu na navedene primjere SD modela gdje su unaprijed točno definirane vrijednosti parametara pri čemu korisnik dobiva krajnje vrijednosti na analizu bez utjecaja na promjenu vrijednosti parametara, razlika ostvarena u ovom radu se očituje u tome da pojedine parametre korisnik može interaktivno mijenjati unutar predefriranog raspona.

Unutar svakog scenarija su istaknuti pojedini parametri te je u sklopu sučelja omogućena njihova interaktivna promjena. Istovremeno su prezentirani i grafički prikazi koji su tematski vezani za istaknute parametre. Pokretanjem modela unutar pojedinog scenarija i mijenjanjem vrijednosti parametara u tijeku izvođenja simulacije na grafikonima se trenutno uočava promjena uzrokovana promjenom vrijednosti parametra.

Svaki scenarij je u izvedbi realiziran kao zaseban agent u dijelu modela *Simulacija*, prema dizajnu programskog alata. Unutar agenta se definira sučelje koje će se izvoditi odnosno koji multimedijski elementi će se prikazati. Primjerice interaktivne kontrole za promjenu parametara, prikaz na grafikonima vrijednosti

odabranih varijabli, kao i animirani prikaz izvođenja samog SD modela. Pritom se agent kreira ukoliko se pokrene pojedini scenarij, odnosno gasi po zatvaranju scenarija.

Modeliranjem scenarija kao eksperimenta predstavljenog pojedinim agentom se postiglo da se ne mora unaprijed definirati vrijednost parametara, kao što bi bilo potrebno u isključivo SD modelu, bez primjene agenata. Hibridnim pristupom u ovom istraživanjem korisnik preko agenata može sam postaviti vrijednost parametara unutar pojedinog scenarija, odmah analizirati izlazne rezultate i po potrebi promijeniti vrijednost parametara.

Uloga scenarija je omogućiti korisniku jednostavnije upravljanje modelom. Nije za očekivati da je korisnik upoznat s modelom u jednakoj mjeri kao što je to kreator modela odnosno da ima uvid u sve parametre i mogućnosti modela. Nije cilj da se istovremeno mijenjaju svi parametri modela jer se na taj način ne može kvalitetno ocijeniti utjecaj pojedinog parametra. Preko scenarija korisnik može ciljano proučavati određeni aspekt sustava, vezan za korisnikov specifični interes. Na taj način se model prilagođava korisniku odnosno olakšava upotreba modela.

Parametri modela su identificirani u prethodnim fazama i grupirani tematski prema dijelu modela na koji se odnose, na primjer vezano za vrijeme studiranja i odustajanje od studija, ili zaposlenje u struci ili izvan struke, i sl. Svaki scenarij omogućava mijenjanje vrijednosti skupine parametara modela s ciljem promatranja promjena na ostale komponente sustava.

Za model *Učitelj* i podmodel *Učiteljski Fakultet* su predstavljena po četiri scenarija s time da je taj broj proizvoljno određen jer nije cilj da scenariji obuhvate sve kombinacije parametara već da ispitanicima zorno približe korisnost tematske specijalizacije parametara. Također se poticalo ispitanike na iznošenje sugestija za dodavanjem eventualnih dodatnih scenarija.

U Tablici 23. su navedeni detalji pojedinog scenarija modela *Učitelj*, odnosno parametri koji se mogu mijenjati te koji grafički prikazi se nude u pojedinom scenariju. Odabrani su rasponi za promjene parametara na temelju procjene da obuhvate moguće promjene u sustavu ili da obuhvaćaju vrijednosti opažene u procesu prikupljanja stvarnih podataka.

Primjerice za parametar *vrijeme studiranja* je odabran raspon 5 do 10 godina jer je iz prikupljenih podataka utvrđeno da je prosjek studiranja 5,667 godina i da je zadanim rasponom obuhvaćen najveći dio populacije odnosno da je stvarni prosjek blizak aritmetičkoj sredini intervala. Za neke parametre je određen raspon procjenom na temelju najava donosioca politika, primjerice za parametar *pedagoški standard* se očekuje da se potencijalno povisi postojeća vrijednosti. Za pojedine parametre kao što je *atraktivnost studija* dodatna istraživanja trebaju specificirati što može utjecati na vrijednost parametra i tada korigirati intervale za interaktivne promjene parametara.



Tablica 23. Detalji Scenarija 1.-4. modela *Učitelj*

	mogućnost promjene parametara	grafički prikazi varijabli
Scenarij 1.	upisne kvote: od -50% do +100% postojeće vrijednosti	Broj učitelja u RH
		Broj studenata Učiteljskih fakulteta
	pedagoški standard: od -25% do +100% postojeće vrijednosti	Upisi na Učiteljske fakultete
		Posao u struci i izvan struke
Scenarij 2.	upisne kvote: od -50% do +100% postojeće vrijednosti	Broj učitelja u RH
		Broj studenata Učiteljskih fakulteta
	atraktivnost studija: povećanje za 0% do 100%	Upisi na Učiteljske fakultete
		Posao u struci i izvan struke
Scenarij 3.	vrijeme studiranja: od 5 do 10 godina	Broj učitelja u RH
		Broj studenata Učiteljskih fakulteta
	odustajanje od studija: od 0% do 15%	Upisi na Učiteljske fakultete
		Posao u struci i izvan struke
Scenarij 4.	pedagoški standard: od -25% do +100% postojeće vrijednosti	Broj učitelja u RH
	posao izvan struke: od -100% do +100% postojeće vrijednosti	Broj studenata Učiteljskih fakulteta
	ostanak u sustavu: od -50% do +50% postojeće vrijednosti	Upisi na Učiteljske fakultete
Posao u struci i izvan struke		

U Tablici 24. su navedeni detalji pojedinog scenarija za podmodel *Učiteljski Fakultet*. Tablica navodi parametre koji se mogu mijenjati unutar pojedinog scenarija te koji grafički prikazi se nude u pojedinom scenariju.

Procjene o rasponu parametara su potvrđene u procesu predstavljanja modela ispitanicima te nije bilo potrebe za korekcijom ponuđenih raspona.

Tablica 24. Detalji Scenarija 1.-4. modela *Učiteljski Fakultet*

	mogućnost promjene parametara	grafički prikazi varijabli
Scenarij 1.	spol: od 50% do +100% vrijednosti spolne strukture studenata	Prvi izbor i Upis
		Prijave na UF i Studenti UF
	regija: od 0% do +100% teritorija RH	Atraktivnost studija i Usmena predaja
Scenarij 2.	vrijeme studiranja: od 5 do 10 godina prosječno vrijeme studiranja	Prvi izbor i Upis
		Prijave na UF i Studenti UF
	odustajanje od studija: od 0% do 15% studenata koji odustaju od studija	Diploma i Odustajanje
Scenarij 3.	perspektiva studija: od 0% do 100% godina	Prvi izbor i Upis
		Prijave na UF i Studenti UF
	težina studija: od 0 do 400	Atraktivnost studija
Scenarij 4.	koeficijent usmene predaje: od 0% do +100%	Prvi izbor i Upis
		Prijave na UF i Studenti UF
	prihvata usmene predaje: od 0% do 10%	Usmena predaja

### 5.4.3. Grafičko korisničko sučelje

Razvijeno je grafičko korisničko sučelje (GUI) za pristup modelu (*Planiranje ljudskih potencijala u sustavu odgoja i obrazovanja Republike Hrvatske, 2022*). Web sučelje je razvijeno u programskom okviru *Django* za razvoj dinamičkih web aplikacija, verzija 4.1.2. te korištenjem biblioteke HTMX (*Django, 2022*). *Django* je programski okvir otvorenog koda (eng. *open source*), baziran na programskom jeziku Python i arhitekturi Model-Pogled-Upravljač (eng. *Model-View-Controller*) za obradu podataka i komunikaciju između klijenta i servera. Web sučelje je dizajnirano kao responzivno te se može koristiti na računalu i mobilnim uređajima (Kaurinović, 2022).

Web sjedište *Planiranje ljudskih potencijala u sustavu odgoja i obrazovanja Republike Hrvatske*, kao prezentacijski sloj web aplikacije je realizirano u 3 tematska dijela, a dizajn sučelja je detaljnije prikazan u Pravitku 3

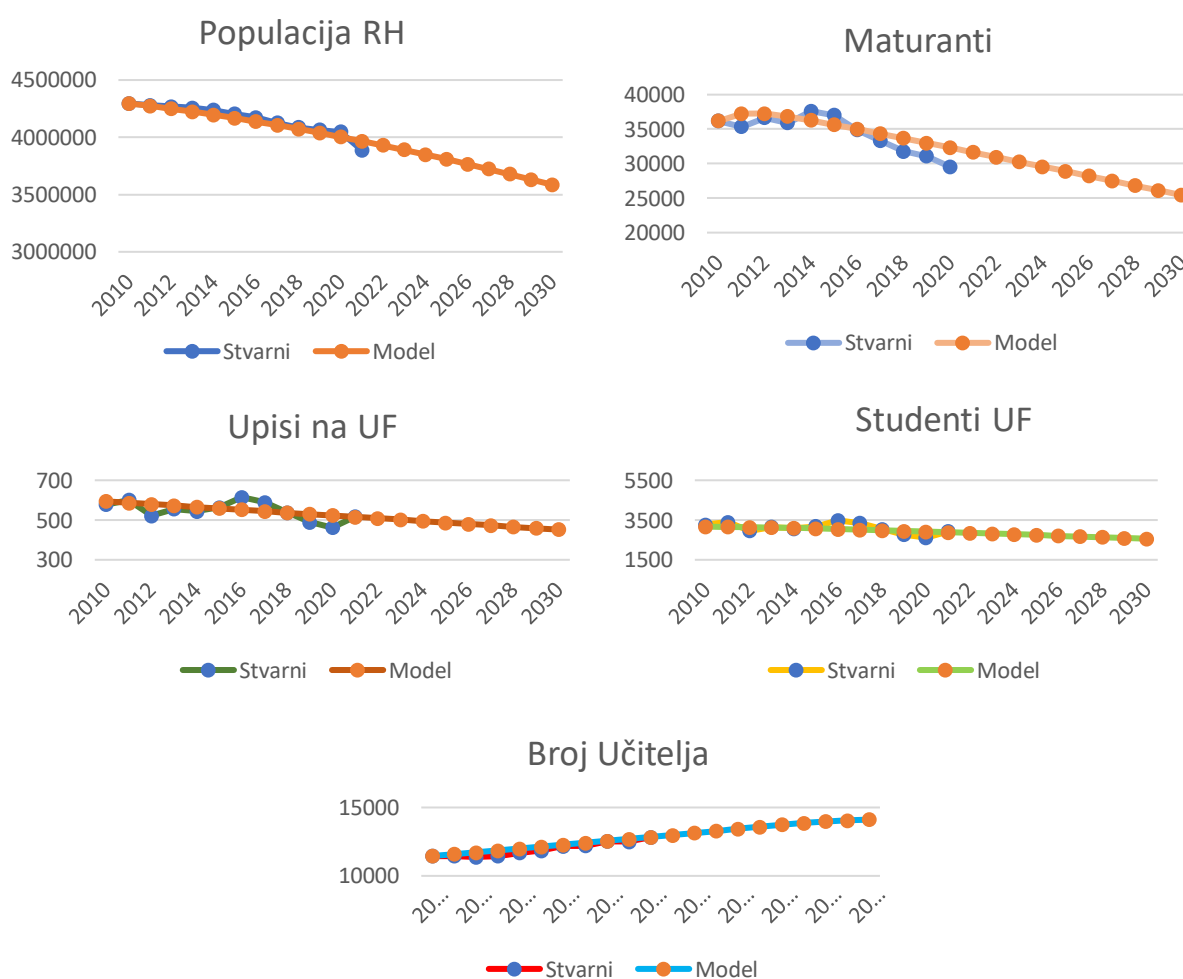
Radi jednostavnosti i preglednosti u dizajnu, nije postavljen na stranici iscrpan opis modela i primijenjene SD metode već je predviđeno da se u procesu prezentacije modela korisnicima detaljno pojasni svrha i način korištenja modela. Dodatni razlog za

usmeno izlaganje jest interaktivna komunikacija i poticanje korisnika da komentarima potencijalno doprinesu novoj perspektivi oko funkcionalnosti modela. U nastavku se detaljnije prezentira svaki od tri glavna dijela web sučelja.

### 5.4.3.1. Naslovnica

Na naslovnici je kratak opis modela i kome su namijenjeni, uputa da je model realiziran u dva dijela te da je svaki realiziran na zasebnoj stranici na koju se može pristupiti izbornikom u zaglavlju. Prikazane su i slike modela *Učitelj* i podmodela *Učiteljski Fakultet*, te pojašnjenje da su prikupljeni podaci od 2010. do 2015. godine korišteni za izgradnju modela, a podaci od 2016. do 2020. godine za usporedbu s modeliranim podacima u cilju verifikacije modela.

Prezentirani su grafički prikazi vrijednosti pet različitih varijabli u periodu 2010. g. do 2030. godine, i to realni podaci (do 2021. g.) i simulirani podaci, za vizualni dojam koliko simulirani podaci odstupaju od realnih i kakva je projekcija u budućem periodu u slučaju izostanka ikakve intervencije u sustavu. Na Slici 31. je prikaz navedenog dijela stranice s grafovima, uz napomenu da su prezentirani rezultati potaknuli dosta komentara korisnika, o čemu se opširnije prezentira u rezultatima ankete (u poglavlju 5.4.5.) te raspravi (u poglavlju 6.).

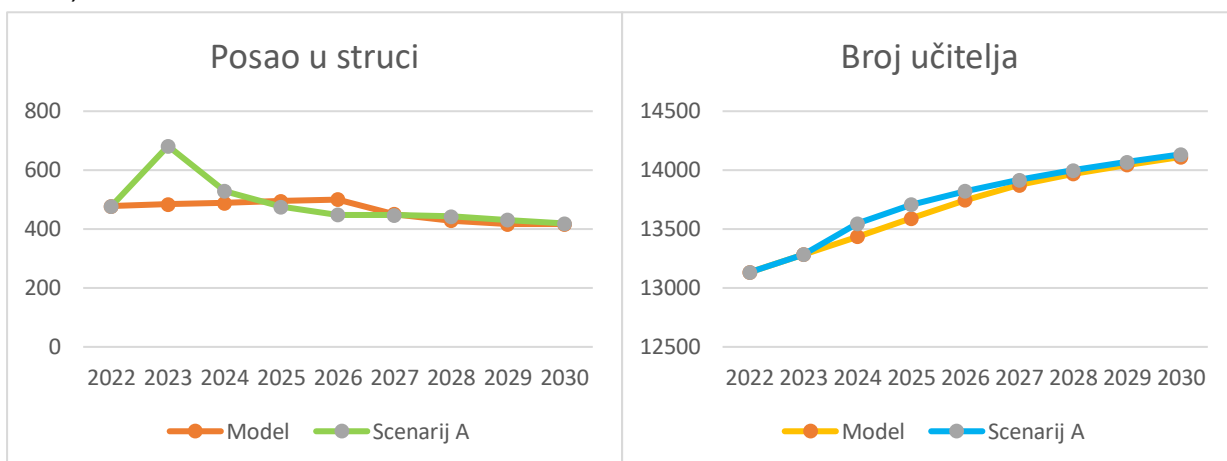


Slika 31. Grafikoni na stranici *Naslovnica*

### 5.4.3.2. Model UČITELJ

Na ovoj stranici se ponovo prezentira slika modela *Učitelj* te su prezentirana dva primjera scenarija, A i B.

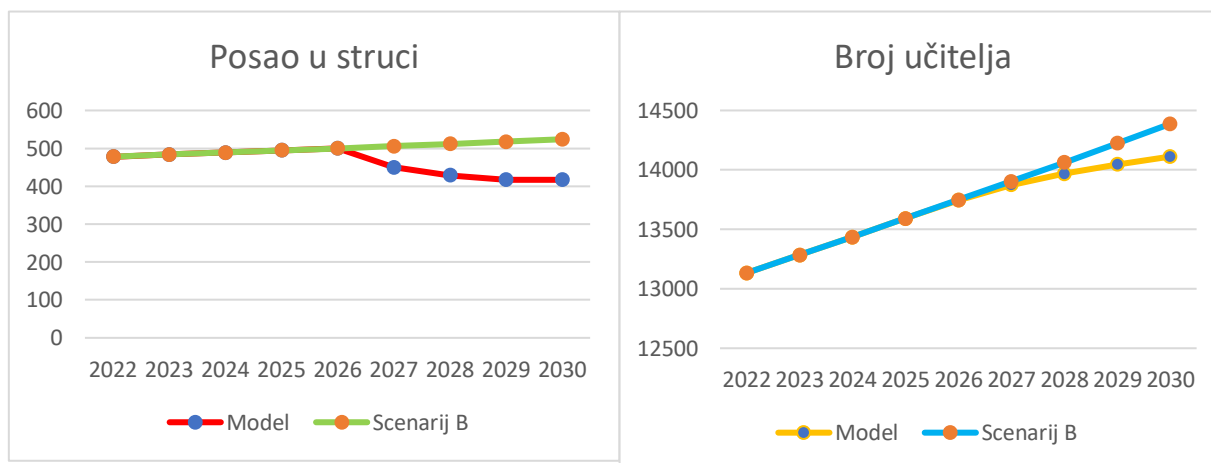
Scenarija A je primjer u kojem je parametar *pedagoški\_standard* povećan za 50%, što se može dogoditi primjerice uvođenjem cjelodnevnog nastave. Prezentirani su grafički prikazi varijabli *Posao\_u\_struci* i *Broj\_učitelja* u periodu 2022. g. do 2030. g. te se na istom grafikonu uspoređuju rezultati modela sa i bez takve intervencije (Slika 32.).



Slika 32. Grafički prikazi Scenarija A.

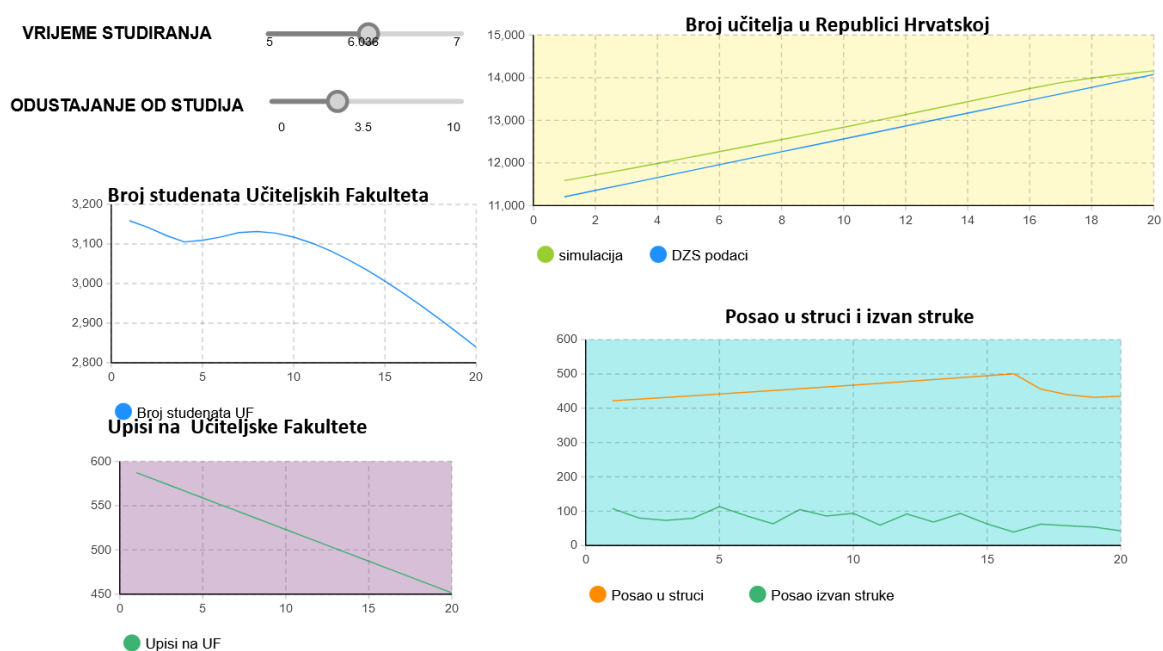
Scenarij B je primjer u kojem je povećan parametar *upisne\_kvote* na fakultete za 50%. Grafikonima *Posao\_u\_struci* i *Broj\_učitelja* prikazana je uspoređena razlika za navedene varijable sa i bez takve intervencije do 2030. godine (Slika 33.).

Navedena dva scenarija su prikazi mogućnosti modela pomoću kojih se korisnicima ilustrira kako se promjenom vrijednosti nekih parametara može odmah vidjeti razlika u ponašanju sustava i pojedinih varijabli, odnosno ilustrira se „što-ako“ eksperiment.



Slika 33. Grafički prikaz Scenarija B

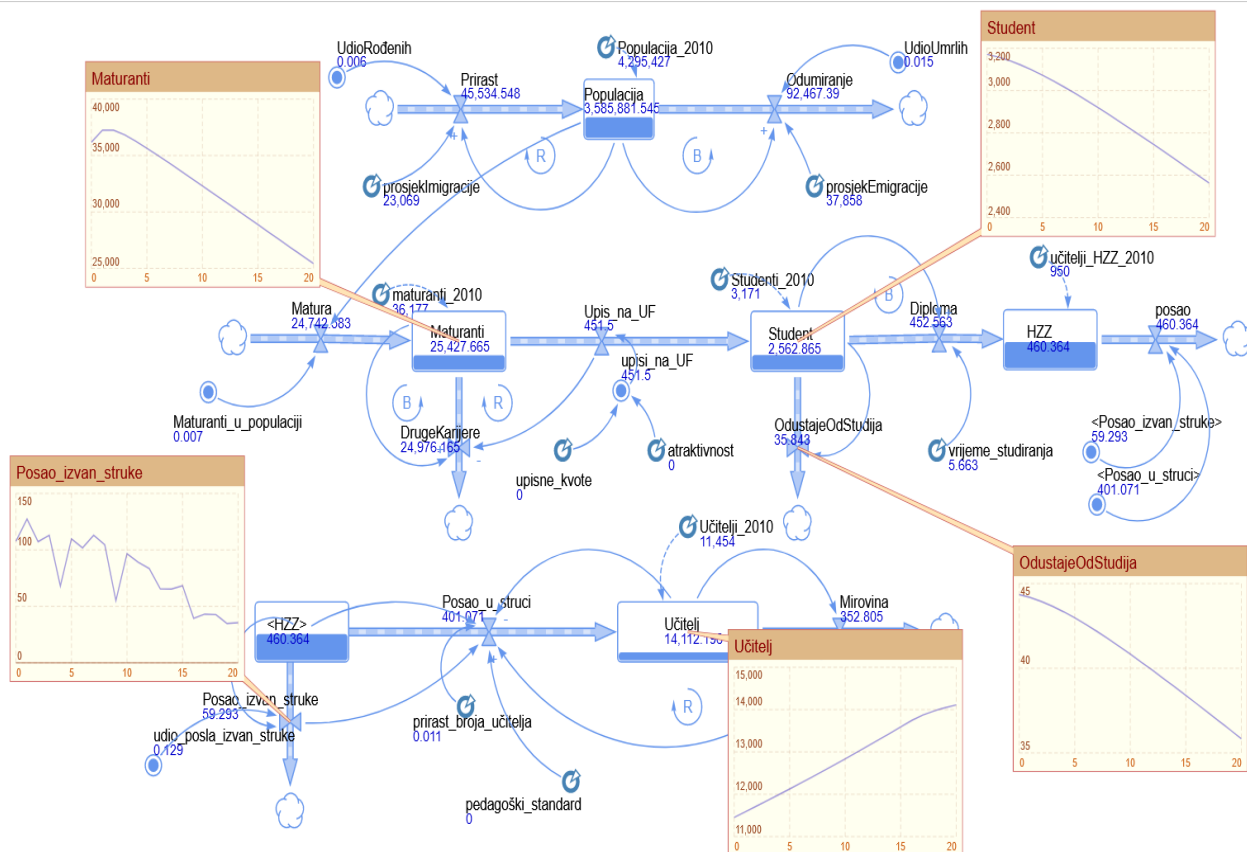
Nakon prezentacije primjera scenarija A i B s predefiniranim parametrima, prezentiraju se četiri scenarija s mogućnošću interaktivnog mijenjanja vrijednosti pojedinih parametara. Na lijevoj strani prozora je padajuća lista sa scenarijima 1.-4. Odabirom pojedinog scenarija se otvara model u zasebnom prozoru putem hiperveze na model pohranjen u oblaku. Svaki scenarij podrazumijeva mogućnost izmjene dva ili tri parametra te se grafički prikazuju vrijednosti pojedinih varijabli uslijed intervencije u vrijednosti parametara. Pritom je omogućeno preuzimanje numeričkih vrijednosti svih elemenata za eventualnu daljnju statističku ili drugu analizu. Na Slici 34. je primjer sučelja Scenarija 3. modela *Učitelj*. Vidljive su kontrole za promjenu vrijednosti dva parametra: vrijeme studiranja i odustajanje od studija. Na grafikonima se mogu promatrati promjene vrijednosti uslijed promjena zadana dva parametra.



Slika 34. Prezentacija Scenarija 3. modela *Učitelj*

U Pravitku 3. je prikazano sučelje koje se nudi korisniku za promjenu parametara, te grafički prikazi u pojedinim scenarijima. Parametri se mogu interaktivno mijenjati preko klizača, dok grafički prikaz odmah prihvaća promjenu vrijednosti parametara i prikazuje utjecaj novih vrijednosti u razdoblju do 2030. godine.

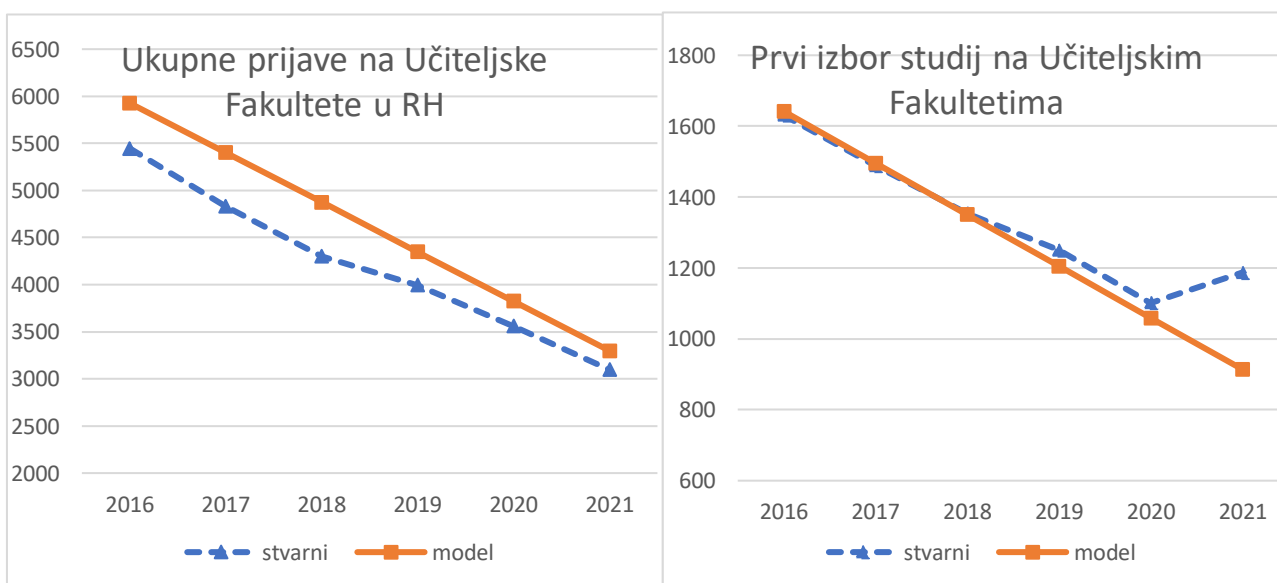
U istom prozoru u kojem se otvori sučelje za promjenu parametara i pregled grafova, je i prikaz modela i dinamičko mijenjanje vrijednosti svih elemenata u vremenu. Odabirom pojedinog parametra ili varijable otvara se zaseban prozor s grafičkim prikazom vrijednosti, s kojega je moguće i kopirati numeričke vrijednosti te prenijeti u zasebni dokument za daljnju obradu. Na Slici 35. je vidljiv taj dio prikaza modela, koji korisniku vizualno predočava dinamiku mijenjanja vrijednosti elemenata modela te služi za preuzimanje numeričkih vrijednosti.



Slika 35. Prikaz interaktivnog mijenjanja elemenata modela u vremenu

### 5.4.3.3. Model UČITELJSKI FAKULTET

Na ovoj stranici se ponovo prezentira slika modela *Učiteljski Fakultet* te dva grafikona kojima se zorno prikazuje kako model dovoljno dobro reproducira stvarne podatke: Grafikon *Ukupne prijave na Učiteljske Fakultete u RH* i grafikon *Prvi izbor studij na Učiteljskim Fakultetima*, prikazani na Slici 36.



Slika 36. Usporedba realnih i podataka dobivenih modelom *Učiteljski Fakultet*

Na lijevoj strani prozora je padajuća lista sa scenarijima 1.-4., kao i za model *Učitelj*, te se odabirom pojedinog scenarija se otvara model u zasebnom prozoru putem hiperveze na model pohranjen u oblaku. Detaljni pregled sučelja se nalazi u Privitku 3.

S obzirom na namjenu modela Učiteljski Fakultet upravama pojedinih fakulteta, na sučelju pojedinih scenarija se mogu unijeti i početne vrijednosti nekih parametara karakteristične za pojedini fakultet, kao što su broj prijava 2010.godine, upisna kvota, broj studenata 2010.godine te omjer ukupne prijave i prvog izbora.

#### 5.4.4. Anketa o korisnosti modela i sučelja za podršku odlučivanju

Anketnim upitnikom su se ispitali stavovi oko korisnosti metode SD, korisnosti razvijenog modela *Učitelj* i *Učiteljski fakultet*, korisnost scenarija za izvođenje simulacija te korisnost grafičkog korisničkog sučelja (web aplikacije) kao alata za samostalno korištenje modela.

Anketni upitnik se sastoji od 3 dijela. U prvom dijelu su podaci o ispitanicima, njihovoj ulozi u upravama učiteljskih fakulteta, struci itd. Ispitanici se predstavljaju punim imenom i prezimenom, no zbog usklađenosti s Etičkim kodeksom Sveučilišta u Rijeci i Opće uredbe o zaštiti podataka (GDPR) u ovome radu nigdje se ne navode osobni podaci ispitanika. U Tablici 25. su navedena pitanja prvog dijela anketnog upitnika.

Tablica 25. Anketna pitanja prvog dijela ankete

Redni broj pitanja	Tekst pitanja	Tip pitanja
1.	Ime i Prezime	Otvoreno
2.	e-mail adresa	Otvoreno
3.	Ustanova	Padajući izbornik
4.	Koja je Vaša funkcija u upravi?	Otvoreno
5.	Koje je područje Vašeg znanstvenog djelovanja?	Otvoreno
6.	Radno iskustvo (u godinama)	Otvoreno
7.	S kojim načinom modeliranja ljudskih potencijala ste upoznati?	Otvoreno
8.	S kojim načinom kreiranja upisne politike ste upoznati (ili se koristi u Vašoj ustanovi)?	Otvoreno
9.	Jeste li čuli za <i>Sustavsku dinamiku</i> prije ove prezentacije modela? Ako da, u kojem kontekstu/području?	Otvoreno

Radi zastupljenosti stavova iz svih dijelova RH zastupljeni su svih 7 Učiteljskih fakulteta/odjela koji obrazuju buduće učitelje razredne nastave. Posebno se anketirala struka i radni staž ispitanika, u skladu sa poželjnom heterogenošću ispitanika, pojašnjeno u poglavlju 2.3.2. U dijelu sa osobnim karakteristikama ispitanika su i pitanja o načinu modeliranja ljudskih potencijala odnosno upisne politike s kojim su do sada upoznati ili provodi njihova ustanova. Zadnje pitanje se odnosi jesu li ispitanici čuli za metodu sustavske dinamike.

Drugi dio ankete je ujedno i glavni za ocjenu validnosti prezentiranog modela. Ispituju se tematski tri različita dijela Likertovom skalom vrijednosti od 1 do 5, gdje pritom vrijednosti imaju značenje:

- 1 - nimalo se ne slažem,
- 2 - donekle se ne slažem,
- 3 - niti se slažem niti se ne slažem,
- 4 - donekle se slažem
- 5 - potpuno se slažem

Likertove skale su korištene jer se žele kvantificirati stavovi ciljane publike prema objektu, ideji ili pojavi. Kvantificiranje povratnih informacija može biti korisno jer se mogu usporediti s određenim ishodom (de Winter & Dodou, 2019). Pouzdanost Likertove skale je procijenjena koeficijentom Cronbach  $\alpha$  (Fraenkel et al., 2012). Pritom se koeficijent  $0,6 < \alpha < 0,8$  smatra prihvatljivim za ocjenu pouzdanosti, za  $\alpha > 0,8$  dobra pouzdanost, a za  $\alpha > 0,9$  iznimna pouzdanost (Moran, 2018; Shi et al., 2012). Kako su se ispitivala tematski različita svojstva, pitanja su razdijeljena u tri zasebne skupine te je ispitivana pouzdanost svake skupine.

Nakon kratkog izlaganja o sustavskoj dinamici i primjeni na konkretan model, ispitanici su ocjenjivali sustavsku dinamiku kao metodu za modeliranje ljudskih potencijala i upisne politike u sustavu odgoja i obrazovanja, te prednosti u odnosu na druge metode. U Tablici 26. su navedena pitanja vezana za sustavsku dinamiku.

Tablica 26. Dio ankete vezan za sustavsku dinamiku

Redni broj pitanja	Tekst pitanja	Tip pitanja
10.	<i>Sustavska dinamika</i> je korisna metoda u modeliranju ljudskih potencijala u odgoju i obrazovanju.	Likertova skala
11.	<i>Sustavska dinamika</i> je korisna metoda u modeliranju upisne politike fakulteta.	Likertova skala
12.	<i>Sustavsku dinamiku</i> bih željela/želio primijeniti u svom radu.	Likertova skala
13.	<i>Sustavska dinamika</i> je efikasnija metoda za odlučivanje u odnosu na metode temeljene na statističkim podacima	Likertova skala



Nakon toga slijede pitanja vezana za korisnost modela *Učitelj* i *Učiteljski Fakultet*, te korisnosti scenarija za izvođenje simulacija koji su prezentirani putem grafičkog korisničkog sučelja. Tablica 27. prikazuje taj dio upitnika. Posebno se ispitala ocjena korisnosti u modeliranju ljudskih potencijala, za podršku odlučivanju te scenarija, i to posebno za model *Učitelj* i za model *Učiteljski Fakultet*. Na kraju je ukupna ocjena daje li model podršku odlučivanju pri donošenju upisne politike visokoškolskih ustanova, što je ujedno formulacija druge istraživačke hipoteze ovog rada.

Tablica 27. Dio ankete vezan za modele i scenarije

Redni broj pitanja	Tekst pitanja	Tip pitanja
14.	Model <i>Učitelj</i> je koristan u <b>modeliranju</b> ljudskih potencijala u odgoju i obrazovanju.	Likertova skala
15.	Model <i>Učitelj</i> je koristan za <b>podršku odlučivanju</b> pri donošenju upisne politike.	Likertova skala
16.	Model <i>Učitelj</i> želim koristiti pri donošenju odluka u svojoj ustanovi.	Likertova skala
17.	Scenariji modela <i>Učitelj</i> pojednostavljuju istraživanje utjecaja pojedinih parametara.	Likertova skala
18.	Model <i>Učiteljski Fakultet</i> je koristan u <b>modeliranju</b> upisne politike fakulteta.	Likertova skala
19.	Model <i>Učiteljski Fakultet</i> je koristan za <b>podršku odlučivanju</b> pri donošenju upisne politike fakulteta.	Likertova skala
20.	Model <i>Učiteljski Fakultet</i> želim koristiti pri donošenju odluka u svojoj ustanovi.	Likertova skala
21.	Scenariji modela <i>Učiteljski Fakultet</i> pojednostavljuju istraživanje utjecaja pojedinih parametara.	Likertova skala
22.	Razvijeni model daje podršku odlučivanju pri donošenju upisne politike visokoškolskih ustanova.	Likertova skala

Zatim slijede pitanja vezana za korisnost web aplikacije za samostalno istraživanje temeljem modela, prikazano u Tablici 28. S obzirom da je namjena modela da ga korisnik može koristiti bez znanja AnyLogic alata ili sustavske dinamike, željelo se ispitati korisnike je li web aplikacija koja omogućuje pokretanje modela dobar način upotrebe i prezentacije interaktivnih mogućnosti. Nadalje ispitalo se jednostavnost i informativnost sučelja te korisnost za daljnje istraživanje i upotrebu podataka. Glavni cilj ovog dijela ankete je utvrditi je li korisničko iskustvo u skladu s potrebama korisnika odnosno vide li ispitanici prezentirano sučelje kao jednostavno i poželjno za korištenje.

Zadnji dio ankete je vezan za dodatna istraživanja, prijedloge za nadogradnju modela, sugestije za izradu drugih scenarija itd. Pitanja su otvorenog tipa i u prezentaciji modela koja je prethodila anketi su motivirani ispitanici da slobodno daju komentare i prijedloge. U Tablici 29. su navedena pitanja zadnjeg dijela ankete.

Tablica 28. Dio ankete vezan za web aplikaciju

Redni broj pitanja	Tekst pitanja	Tip pitanja
23.	Web aplikacija je dobar način za upotrebu modela od strane korisnika.	Likertova skala
24.	Web aplikacija je dobar način za prezentaciju interaktivnosti modela.	Likertova skala
25.	Sučelje je jednostavno za korištenje.	Likertova skala
26.	Pokretanje scenarija i prikaz grafikonima je informativno.	Likertova skala
27.	Aplikacija omogućuje da se numeričke vrijednosti dobivene modelom iskoriste za daljnju obradu i istraživanja.	Likertova skala
28.	Web aplikacijom mogu jednostavno koristiti funkcionalnosti modela	Likertova skala

Tablica 29. Dio ankete vezan uz dodatna istraživanja

Redni broj pitanja	Tekst pitanja	Tip pitanja
29.	Prijedlozi za nadogradnju prezentiranog modela, dodavanje scenarija od interesa i slično.	Otvoreno
30.	Prijedlozi za daljnje istraživanje temeljem modela ili modeliranja <i>Sustavskom dinamikom</i> .	Otvoreno
31.	Prijedlozi za dodavanje funkcionalnosti web aplikaciji	Otvoreno
32.	Ostali prijedlozi i komentari.	Otvoreno

#### 5.4.5. Rezultati ankete o korisnosti modela i sučelja za podršku odlučivanju

Anketom prezentiranom u poglavlju 5.4.3. prikupljeno je 12 anketnih odgovora, sa svih 7 sveučilišta u Hrvatskoj koji obrazuju buduće učitelje razredne nastave. Pritom su veća sveučilišta zastupljena sa više ispitanika. U Tablici 30. je prikazan broj ispitanika po sveučilištu. Po ulozi u upravi fakulteta struktura ispitanika je: 6 prodekana (3 za nastavu i studente, 2 za poslovanje i financije, 1 za znanost), 5 pročelnika odjela/odsjeka i 1 dekan. Područja znanstvenog djelovanja ispitanika su: prirodne znanosti, informatika i matematika (4 ispitanika), pedagogija (3), kineziologija (3), umjetničko i humanističko područje (2). Prosječno radno iskustvo ispitanika je 23 godine, sa standardnom devijacijom 5 g. Prethodno prezentaciji modela, samo je jedan ispitanik čuo za metodu SD, no nije ju koristio.

Tablica 30. Broj ispitanika po sveučilištu

Sveučilište	Broj ispitanika
Sveučilište u Zagrebu	3
Sveučilište u Rijeci	2
Sveučilište u Splitu	2
Sveučilište u Osijeku	1
Sveučilište u Slavonskom Brodu	1
Sveučilište u Zadru	2
Sveučilište u Puli	1
ukupno ispitanika	12

Rezultati ankete su analizirani alatima Statistica, verzija 13.5.0.17. (*TIBCO Statistica*®, 2022) i Excel, verzija Office 365 (*Microsoft Excel*, 2022).

U Tablicama 31., 32. i 33. su odgovori ispitanika podijeljeni u tri skupine pitanja. Tablica 31. prikazuje odgovore oko korisnosti metode sustavske dinamike, tablica 32. oko korisnosti modela *Učitelj, Učiteljski Fakultet* i ponuđenih scenarija, te Tablica 33. oko korisnosti web aplikacije. Prikazana je deskriptivna statistika, s postotkom pojedinog odgovora Likertove skale, s aritmetičkom sredinom i standardnom devijacijom, te koeficijentom Cronbach  $\alpha$  za svaku skupinu pitanja.

Tablica 31. Analiza odgovora na dio ankete vezan za SD (N=12,  $\alpha=0,68$ )

Tekst pitanja	1 (%)	2 (%)	3 (%)	4 (%)	5 (%)	X <sup>1</sup>	SD <sup>2</sup>
<i>Sustavska dinamika</i> je korisna metoda u modeliranju ljudskih potencijala u odgoju i obrazovanju.	0	0	0	41,7	58,3	4,58	0,51
<i>Sustavska dinamika</i> je korisna metoda u modeliranju upisne politike fakulteta.	0	8,3	8,3	41,7	41,7	4,17	0,94
<i>Sustavsku dinamiku</i> bih željela/želio primijeniti u svom radu.	0	0	16,7	16,7	66,7	4,5	0,8
<i>Sustavska dinamika</i> je efikasnija metoda za odlučivanje u odnosu na metode temeljene na statističkim podacima	0	0	0	41,7	58,3	4,58	0,51

<sup>1</sup>aritmetička sredina, <sup>2</sup> standardna devijacija

U tri od četiri pitanja vezana za korisnost SD je aritmetička sredina  $> 4,3$  što je daje ukupnu ocjenu „u potpunosti se slažem s tvrdnjom“. Korisnu metodu SD u modeliranju upisne politike fakulteta smatra 83,4% ispitanika. Na to pitanje je

aritmetička sredina najniža (4,17) od skupine pitanja no i dalje je ukupna ocjena „djelomično se slažem“ s tvrdnjom.

Sumarna ocjena skupine pitanja rezultira da 91,7% ispitanika smatra SD korisnom i efikasnom metodom, sa 6,3% neutralnih stavova. Svega 2% ispitanika se djelomično ne slaže s korisnošću SD, i to zbog pitanja u anketi vezan za modeliranje upisne politike fakulteta.

Tablica 32. Analiza odgovora na dio ankete vezan za modele i scenarije (N=12,  $\alpha=0,89$ )

Tekst pitanja	1 (%)	2 (%)	3 (%)	4 (%)	5 (%)	X <sup>1</sup>	SD <sup>2</sup>
Model <i>Učitelj</i> je koristan u <b>modeliranju</b> ljudskih potencijala u odgoju i obrazovanju.	0	0	0	58,3	41,7	4,42	0,51
Model <i>Učitelj</i> je koristan za <b>podršku odlučivanju</b> pri donošenju upisne politike.	0	0	0	41,7	58,3	4,58	0,51
Model <i>Učitelj</i> želim koristiti pri donošenju odluka u svojoj ustanovi.	0	0	0	33,3	66,7	4,67	0,49
Scenariji modela <i>Učitelj</i> pojednostavljaju istraživanje utjecaja pojedinih parametara.	0	0	0	33,3	66,7	4,67	0,49
Model <i>Učiteljski Fakultet</i> je koristan u <b>modeliranju</b> upisne politike fakulteta.	0	0	16,7	33,3	50	4,33	0,78
Model <i>Učiteljski Fakultet</i> je koristan za <b>podršku odlučivanju</b> pri donošenju upisne politike fakulteta.	0	0	0	41,7	58,3	4,58	0,51
Model <i>Učiteljski Fakultet</i> želim koristiti pri donošenju odluka u svojoj ustanovi.	0	0	0	41,7	58,3	4,58	0,51
Scenariji modela <i>Učiteljski Fakultet</i> pojednostavljaju istraživanje utjecaja pojedinih parametara.	0	0	0	50	50	4,50	0,52
Razvijeni model daje podršku odlučivanju pri donošenju upisne politike visokoškolskih ustanova.	0	0	16,7	25	58,3	4,42	0,79

<sup>1</sup>aritmetička sredina, <sup>2</sup> standardna devijacija

U svih 9 pitanja vezana za korisnost modela je aritmetička sredina > 4,3 što je daje ukupnu ocjenu „u potpunosti se slažem s tvrdnjom“. Pritom je prosječna ocjena za model *Učitelj* i njegove scenarije 4,59, dok je za model *Učiteljski Fakultet* i njegove scenarije je 4,5. Ocjena da razvijeni model daje podršku odlučivanju pri donošenju upisne politike visokoškolskih ustanova iznosi 4,42, što daje ukupnu ocjenu „u potpunosti se slažem s tvrdnjom“.

Tablica 33. Analiza odgovora na dio ankete vezan za sučelje (N=12,  $\alpha = 0,85$ )

Tekst pitanja	1 (%)	2 (%)	3 (%)	4 (%)	5 (%)	X <sup>1</sup>	SD <sup>2</sup>
Web aplikacija je dobar način za upotrebu modela od strane korisnika.	0	0	0	25	75	4,75	0,45
Web aplikacija je dobar način za prezentaciju interaktivnosti modela.	0	0	0	16,7	83,3	4,83	0,39
Sučelje je jednostavno za korištenje.	0	0	0	16,7	83,3	4,83	0,39
Pokretanje scenarija i prikaz grafikonima je informativno.	0	0	0	8,3	91,7	4,92	0,29
Aplikacija omogućuje da se numeričke vrijednosti dobivene modelom iskoriste za daljnju obradu i istraživanja.	0	0	0	16,7	83,3	4,83	0,39
Web aplikacijom mogu jednostavno koristiti funkcionalnosti modela	0	0	0	16,7	83,3	4,83	0,39

<sup>1</sup>aritmetička sredina, <sup>2</sup> standardna devijacija

Sumarna ocjena skupine pitanja rezultira da 96,3% ispitanika smatra razvijene modele i scenarije korisnim za upravljanje ljudskim potencijalima, sa 3,7% neutralnih stavova. U ovom dijelu ankete nitko od ispitanika (0%) se djelomično ili potpuno ne slaže s korisnošću modela.

Dio ankete vezan za web aplikaciju rezultira najvišim ocjenama od tri skupine pitanja. U svih 6 pitanja vezana za korisnost web aplikacije je aritmetička sredina >4,3 što je daje ukupnu ocjenu „u potpunosti se slažem s tvrdnjom“. Pritom niti jedna ocjena nije niža od 4,75. Sumarna ocjena skupine pitanja rezultira da 100% ispitanika smatra web aplikaciju dobrim načinom za prezentaciju i korištenje modela.

Tablica 34. Odgovori na anketno pitanje 7.

<b>Pitanje: S kojim načinom modeliranja ljudskih potencijala ste upoznati?</b>
Projekcijski modeli za jednu godinu
Nisam sa specifičnim modelima. Analiza statističkih anal (Hrvatski zavod za statistiku; MZO - e-rudnik)
Statističkim modelom.
S tradicionalnim načinom.
Istraživanje tržišta rada.
Plan zapošljavanja i napredovanja s obzirom na potrebe studija.
Upravljački model ljudskih potencijala.

Kroz pitanja otvorenog tipa, komentare i prijedloge se dodatno pojašnjavaju ocjene ispitanika u zadacima s Likertovom skalom vrijednosti. Odgovori ispitanika na

pitanja s kojim načinom modeliranja ljudskih potencijala i upisne politike su upoznati ili se koriste su prikazani u Tablici 34. i 35. Ispitanici su upoznati uglavnom sa statističkim podacima na temelju kojih su rađene procjene.

Tablica 35. Odgovori na anketno pitanje 8.

<b>Pitanje:</b> S kojim načinom kreiranja upisne politike ste upoznati (ili se koristi u Vašoj ustanovi)?
Planiranje na osnovu prirodnog odljeva kadrova i planiranja kadrovskog unapređenja na osnovu novih studijskih programa.
Zadovoljavanje potreba tržišta rada, interes polaznika i kadrovsko opterećenje.
Kreiranje upisne politike na mojoj instituciji je praćenje trendova u zadnjih 5 godina
Upisna politika se do sada kreirala kroz analizu interesa prema studiju i zapošljivosti u struci prema podacima dobivenim kroz anketne upitnike i HZZ te prijedlozima studenata i nastavnika.
U skladu s interesima studenata i kadrovskim mogućnostima.
Praćenje broja maturanata i broja studenata.
Atraktivnost studija, analize upisanih studenata, godišnje preporuke HZZa, pratimo analize nezaposlenosti.
Prema napatku Ministarstva.
Po odobrenju Sveučilišta i Ministarstva.
Upisna politika se kreira prema materijalnim i kadrovskim resursima fakulteta i usklađuje sa politikama Uprave sveučilišta.
Potrebe Sveučilišta i potrebe Ministarstva znanosti i obrazovanja za formiranjem upisnih kvota.

Većina ispitanika je imala prijedloge kako unaprijediti model odnosno koje parametre dodati ili dodatno rafinirati. U Tablici 36. i 37. su prikazani odgovori oko poželjnog unaprjeđenja modela i dodatnih istraživanja temeljem modela koja su zanimljiva ispitanicima. Primjerice povezivanje modela s dostupnim bazama podataka otvara prostor dodatnim istraživanjima i nadogradnjom modela.

Tablica 36. Odgovori na anketno pitanje 29.

<b>Pitanje:</b> Prijedlozi za nadogradnju prezentiranog modela, dodavanje scenarija od interesa i slično
Dodavanje novih scenarija korištenjem <i>big data</i> podataka dostupnih kroz baze sveučilišta i fakulteta
Scenarij dodatno teorijski potkrijepiti profesionalnim razvojem učitelja (ostanak ili odlazak iz profesije), utjecaj zadovoljstva uvjetima rada na ostanak u profesiji. Prekarijat.

**Pitanje:** Prijedlozi za nadogradnju prezentiranog modela, dodavanje scenarija od interesa i slično

Regionalna zastupljenost i jezik studiranja.

Pratiti specifičnosti pojedine sredine za koju se model primjenjuje.

Što se tiče studija, moglo bi se nadograditi model Učiteljski fakultet za praćenje prolaznosti po godinama da se utvrde postoci odustajanja prema godinama studija.

Kod atraktivnosti studija uzeti u obzir mogućnost definiranja reguliranih upisnih kvota na temelju procjene odlazaka učitelja u mirovinu i budućih realnih pedagoških standarda

Bilo bi dobro provjeriti koji postotak učitelja nastavlja svoje formalno obrazovanje na poslijediplomskom studiju

Svakako je korisno scenarije nadograđivati temeljem nalaza većeg broja znanstvenih istraživanja

Ispitanici također predlažu brojna poboljšanja u pojedinim varijablama temeljem dodatnih istraživanja. Tako za populaciju učitelja predlažu detaljnije istražiti evidenciju daljnjeg profesionalnog razvoja učitelja, analizirati rad na zamjeni, regionalne specifičnosti itd. Za populaciju studenata ispitanici predlažu istražiti i uvrstiti u model diferencijaciju studenata prema njihovim karakteristikama, utjecaj starijih studenata na maturante i buduće studente, povezivanje sa službenim bazama podataka i slično.

Na pitanje 31., u kojem se predlaže dodavanje funkcionalnosti web aplikaciji, samo je jedan ispitanik imao za prijedlog povezivanje s alatima na nacionalnoj razini (postani student, e-rudnik, HZS) za razvoj politika obrazovanja.

Tablica 37. Odgovori na anketno pitanje 30.

**Pitanje:** Prijedlozi za daljnje istraživanje temeljem modela ili modeliranja Sustavskom dinamikom

Povezivanje s bazama podataka i stvaranje daljnjih scenarija

Atraktivnost studija s obzirom na modul/smjer, odsjek (UFZG), socioekonomski status studenta, utjecaj regije, lokalne zajednice na atraktivnost studija

Izrada modela za ostale studijske programe npr. Rani i predškolski odgoj i obrazovanje.

U kolikoj mjeri diplomirani studenti utječu na prijave i upis maturanata na učiteljski studij

Uključiti sve relevantne dionike (MZO, HZZ, Sveučilište, Škole, Alumni) u svrhu dobivanja što preciznijih podataka.

Završno pitanje 32. otvara prostor za ostale prijedloge i komentare te su ispitanici (koji su odgovorili) izrazili pohvalu i interes za prezentirani model i prezentirani istraživački rad u cjelini. Ispitanici bi rado koristili model za kreiranje upisne politike i općenito upisne politike fakulteta i sveučilišta. S druge strane, nevezano za prezentirani model, stavovi ispitanika su da uprave fakulteta imaju malo prostora za samostalno kreiranje upisne politike jer ovise o odlukama Ministarstva i kadrovskom strukturom na fakultetu. Odgovori na 32. anketno pitanje su prikazani u Tablici 38.

Validacija razvijenog modela se provela prilagođenom Delphi metodom anketnim upitnikom provedenim nad stručnjacima u području upravljanja ljudskim potencijalima i upisnom politikom. Skupine pitanja su pokazala da 91,7% (metoda SD), 96,3% (modeli i scenariji) te 100% (web sučelje) ispitanika prezentirani model smatra korisnim za upravljanje ljudskim potencijalima. Po teorijskoj podlozi iz poglavlja 2.3. može se zaključiti da je razvijeni model time validan.

U fazi prezentacije modela stručnjacima Učiteljskih fakulteta u RH prikazane su projekcije vrijednosti ključnih varijabli modela *Učitelj* do 2025. godine. Ispitanici su smatrali očekivanim, iako poražavajućim, prikazani trend za varijable *Populacija RH*, *Maturanti*, *Upisi na učiteljske fakultete* i *Studenti učiteljskih fakulteta*, jer slične vrijednosti primjećuju u svojim institucijama.

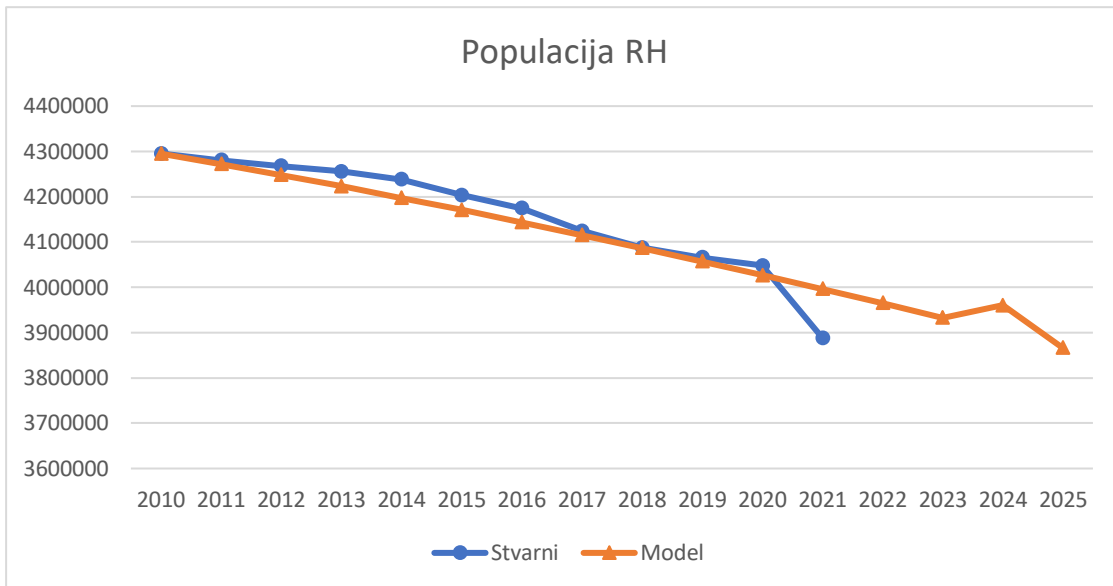
Tablica 38. Odgovori na anketno pitanje 32.

<b>Pitanje:</b> Ostali prijedlozi i komentari
Vrlo jednostavan i dostupan sustav podataka koji može uvelike pomoći u stvaranju politike fakulteta i sveučilišta.
Potencijal za pojašnjavanje demografske strukture u RH, broju kandidata i analizi upisnih kvota na razini institucije i Sveučilišta.
Jako zanimljiv model.
Odlična i relevantna istraživačka tema sa prognozama i modelima koji pokazuju dobro definiranje sustava.
Pohvaljujem odlično odrađen posao koji bi mogao biti od pomoći pri kreiranju upisne politike.

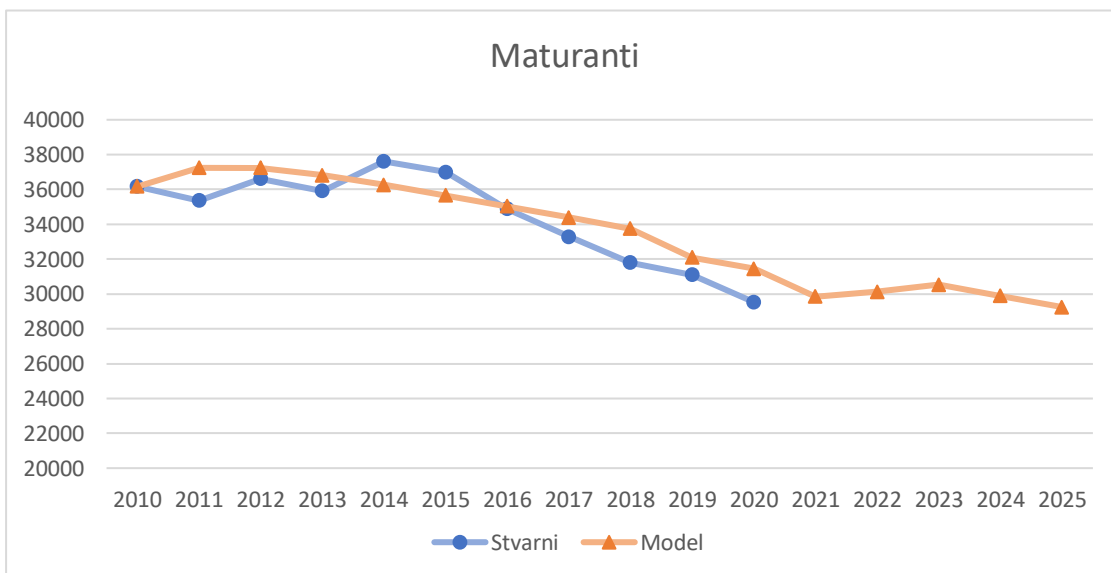
Na Slikama 37. - 41. su grafički prikazi projekcija do 2025. godine. Prikazane projekcije pretpostavljaju da nema radikalnih promjena u sustavu, odnosno vanjske intervencije koja bi utjecala na trendove. Ispitanicima je naglašeno da je ovim grafikonima prikazano predviđanje za 10 godina unaprijed te da je prikazana predikcija ilustrativna za proučavanje trendova koje prikazuje model i da u realnosti nema smisla duži vremenski interval za predviđanje.



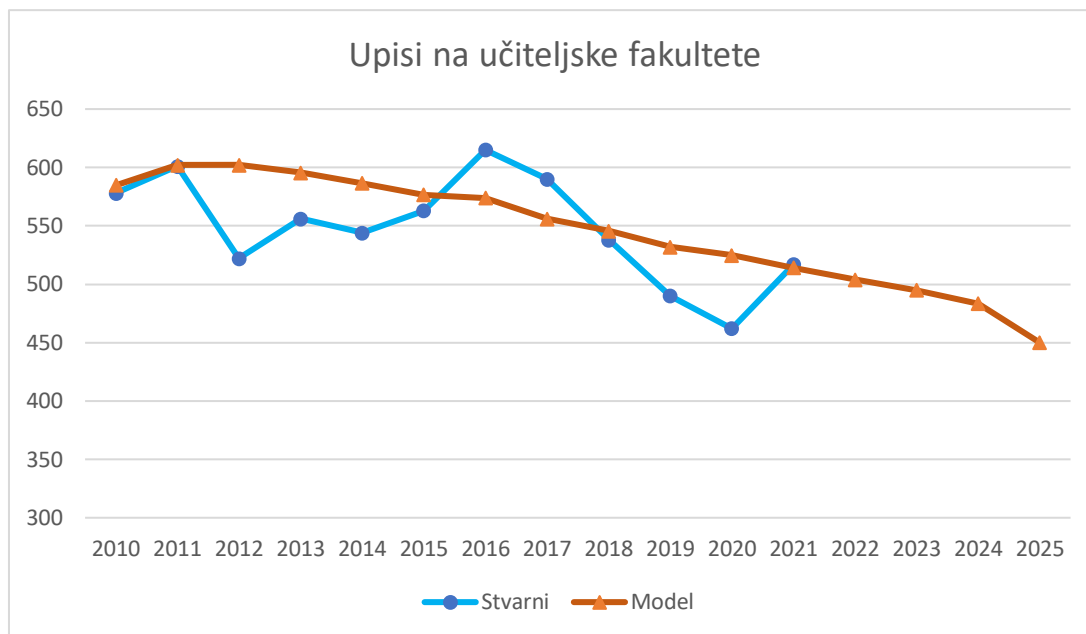
Trendovi navedenih varijabli prikazuju pad, usporediv s linearnom aproksimacijom sa značajnošću većom od 0,6 (kvadratni r;  $r^2 > 0,6$ ). Parametre i njihove trendove je nužno korigirati u kraćim vremenskim intervalima, tj. predviđanja modela daju smislene rezultate za kraći budući period. To je u skladu s istraživanjem Reichardt i sur. (2020) u kojoj je argumentirano da ima smisla raditi projekcije za 4-5 godina unaprijed.



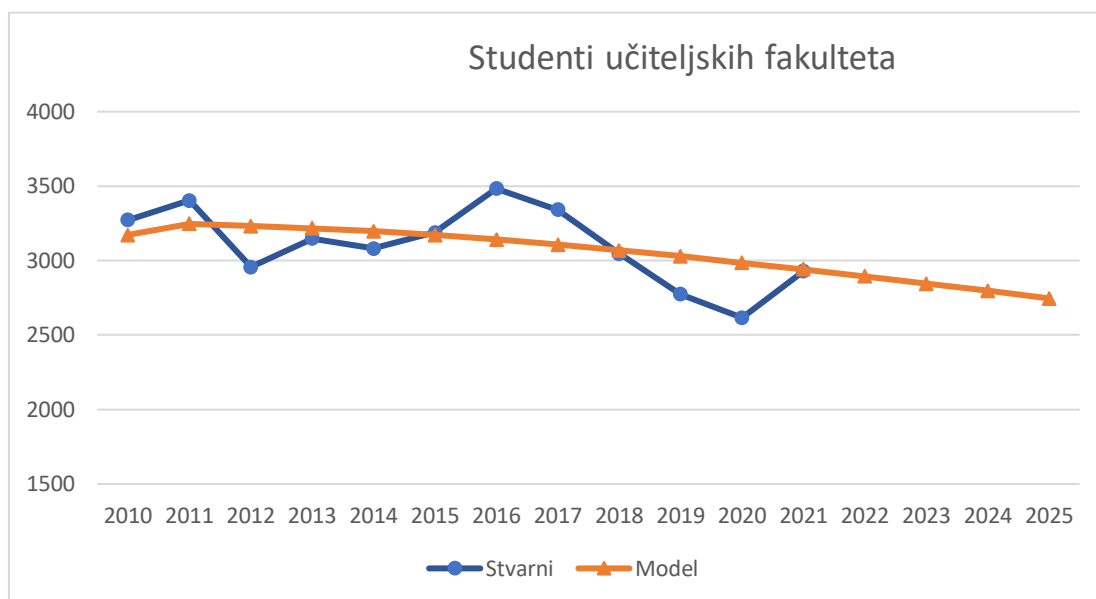
Slika 37. Projekcija varijable *Populacija RH* do 2025.g.



Slika 38. Projekcija varijable *Maturanti* do 2025.g.



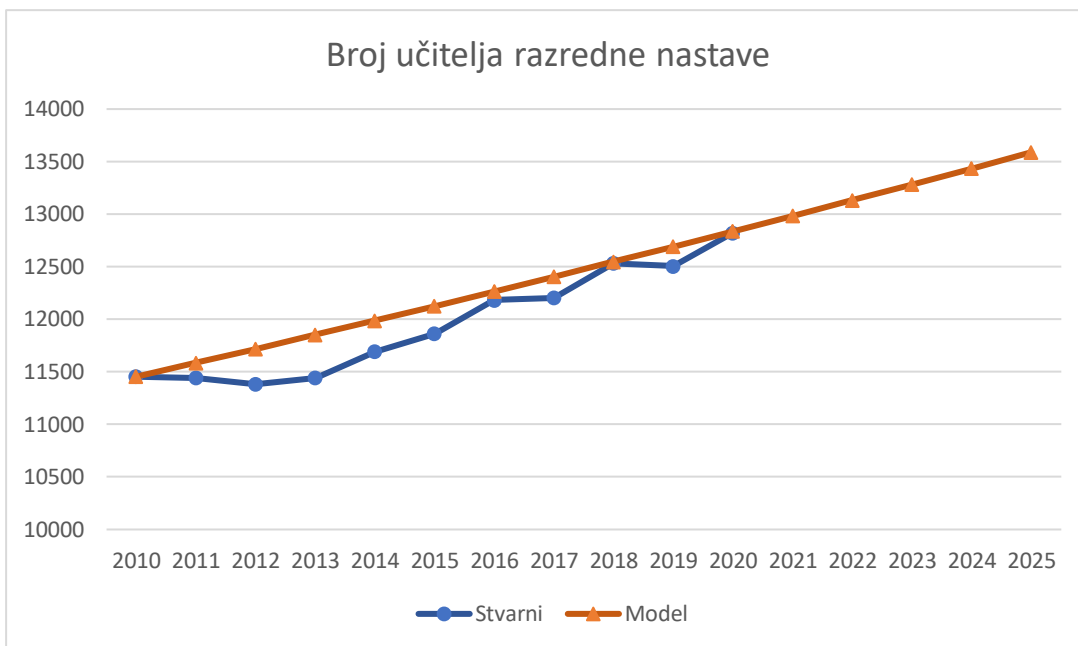
Slika 39. Projekcija varijable *Upisi na učiteljske fakultete* do 2025.g.



Slika 40. Projekcija varijable *Studenti učiteljskih fakulteta* do 2025.g.

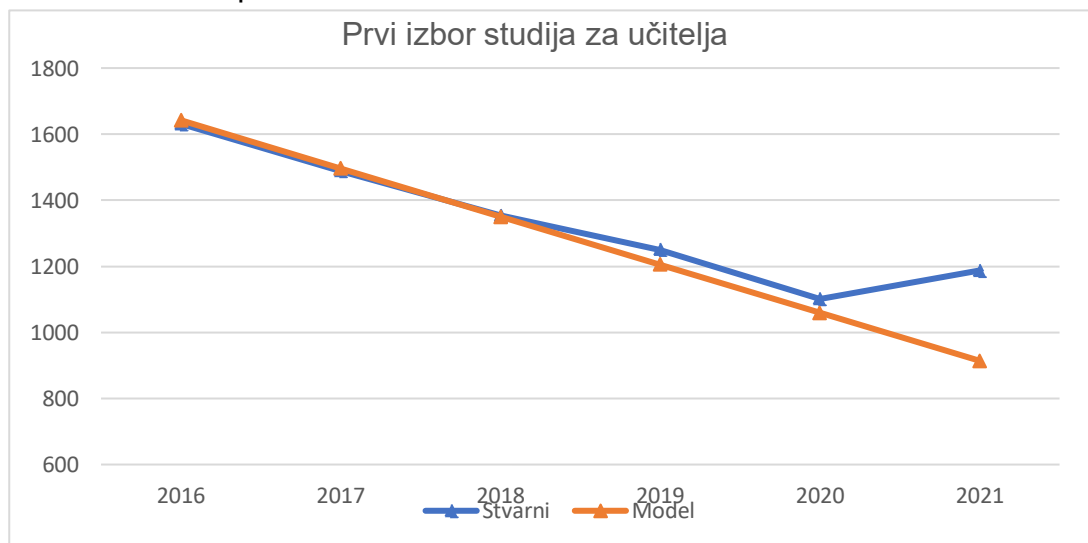
Varijabla *Broj učitelja razredne nastave* koja jedina pokazuje rast vrijednosti, prikazano na Slici 41., potaknula je debatu oko razloga takvog rasta. Ispitanici su ponudili moguće objašnjenje time da se povećava pedagoški standard u vidu smanjenja broja učenika u razredima i bitnim povećanjem odjela produženog boravka.

S druge strane, tek predstoji i očekuje se radikalnija promjena primarnog obrazovanja u RH u vidu cjelodnevne nastave, mogućeg povećanja osnovnoškolskog obrazovanja na 9 godina (odnosno primarnog obrazovanja na 5 godina), itd. U tom slučaju se daljnji rast broja učitelja razredne nastave očekuje, bez obzira na smanjenje populacije i školske djece.



Slika 41. Projekcija varijable *Broj učitelja razredne nastave* do 2025.g.

Model *Učitelj* bolje reprezentira stvarno stanje zbog agregiranih podataka na nivou cijele RH. Model *Učiteljski Fakultet* omogućava konkretne vrijednosti za pojedini fakultet, u svrhu modeliranje upisne politike. Za manje fakultete, s manjim upisnim kvotama, brojem studenata itd., model pokazuje veća odstupanja od poželjnih. Razlog tome je u nepredvidivost u ponašanju na malim brojevima, odnosno mala promjena apsolutnih vrijednosti pojedinog parametra bitno utječe na ostale vrijednosti. Nepredvidljivost u promjenama kod parametara s malim apsolutnim vrijednostima se može ilustrirati primjerom na broju studenata kojima je prvi izbor bio upis na studij. Na Slici 42. je prikazano značajno odstupanje u stvarnim i modeliranim podacima za 2021. godinu. Dodatnim istraživanjima bi se trebalo utvrditi što je uzrok tako nagle promjene trenda u stvarnim podacima, što je izvan okvira ovog istraživanja te ilustrira nepredvidivost i kompleksnost društvenih fenomena.



Slika 42. Nepredvidivost uzroka odstupanju stvarnih i modeliranih podataka

## 6. Rasprava

U uvodnom poglavlju je istaknut podatak iz publikacije Eurydice mreže kako je Hrvatska među tri europske zemlje koje ne provode sistematske analize tržišta rada u svrhu predikcije potreba za učiteljima. Navedena publikacija je objavljena 2015. g. na temelju podataka prikupljenih iz 2013. g. (Eurydice, 2015). Poražavajuće je što publikacija Eurydice mreže iz 2020. g. u kojoj se prate promjene u obrazovnim sustavima nakon 2013. g. navodi da Hrvatska niti dalje ne provodi sistematsko i redovito predviđanja tržišta rada (tablica na stranici 24), u kontekstu zapošljivosti nakon završenog višeg obrazovanja svih struka a ne samo učitelja (Eurydice, 2020a). Primjena simulacijskog modeliranja u području upravljanja ljudskim potencijalima prezentirana u ovom radu predstavlja doprinos u smjeru promjene za kvalitetniju analizu i planiranje.

Ovim istraživanjem je predloženi i primijenjeni metodološki okvir za razvoj simulacijskog modela, koji je potom implementiran kroz hibridni model temeljen na metodama sustavske dinamike i modeliranja na temelju agenata. Metode SD i ABM korištene u ovom radu su primjerene za modeliranje sustava odgoja i obrazovanja na način kojim se postiže fleksibilnost u ovisnosti o dostupnim podacima za pojedine elemente sustava. U sustavima odgoja i obrazovanja je čest slučaj nedostatka podataka, a korištenjem samo jednog od dva pristupa se ne bi mogla jednako kvalitetno obuhvatiti svojstva promatranog sustava. Kao što je gore navedeno, problem nedostatka podataka je posebno izražen u Hrvatskoj što ukazuje na potrebu za razvojem hibridnog pristupa s ciljem podrške upravljanja ljudskim potencijalima i upisne politike. Fleksibilnost hibridnog pristupa se u slučaju da su dostupni vrlo detaljni podaci i detaljni načini ponašanja ogleđa u tome što je tada moguće modelirati dijelove sustava kao agente te konkretizirati interakciju među agentima. Na primjeru visokoškolskog sustava, pojedini fakulteti se mogu modelirati kao agenti, što je inicijalno zamišljeno ovim istraživanjem sustava primarnog obrazovanja no u procesu prikupljanja dostupnih podataka se takav pristup pokazao kao manjkav, odnosno nisu dostupni detaljni podaci za sve fakultete pa se fakultet modelirao kao element sustavske dinamike. U slučaju da su podaci više općeniti, ili agregirani na razini populacija, adekvatnije je primjena sustavske dinamike, odnosno povezivanje među elementima sustava na nivou sustava jednadžbi koje opisuju njihovu interakciju. To je u skladu sa navodima J. Stermana (2000.), B. K. Bala i sur. (2017.), Macala i Northa (2009) i drugih koji razmatraju primjenu SD i ABM u vrlo širokom rasponu kompleksnih sustava.

Implementirani model na primjeru primarnog obrazovanja u RH je realiziran kao SD okolina unutar agenta. Pokretanje modela, izvođenje eksperimenata kao što su optimizacija parametara, analiza osjetljivosti parametara te simulacije kroz definirane scenarije su realizirani kroz ABM paradigmu modeliranja kao agenti koji se po potrebi kreiraju i izvršavaju. Na taj način je omogućeno interaktivno eksperimentiranje sa scenarijima modela odnosno omogućila se korisnička orijentiranost modela koja se ne bi mogla ostvariti primjenom samo jedne metode simulacija. Isključivo SD izvedba modela zahtijeva predefiniranje sustava diferencijalnih jednadžbi te korisnik ne može

samostalno eksperimentirati s modelom na način kao što može preko kreiranja agenata. U slučaju isključivo SD modela mora se uvesti „međufaza“ koja će povezati rezultate modela s uvjetima koje je postavio korisnik. Primjerice korisnik autoru modela uputi zahtjev za promjenu parametara unutar SD modela te se potom rezultati modela prebacuju u neko dodatno sučelje ili aplikaciju za prikaz podataka. U daljnjem radu i detaljnijem prikupljanju potrebnih podataka primijenjeni model se može unaprijediti na način da se po potrebi i dijelovi SD modela realiziraju kao agenti, čime bi se ostvario detaljniji uvid u ponašanje sustava.

ABM modeliranje je sve više u primjeni poboljšanjem performansi računala i sve većim količinama podataka dostupnih u suvremenim skladištima i bazama podataka. Za sada su relevantna ograničenja isključivo ABM modela pri modeliranju sustava s velikim brojem agenata, što je primjerice kod kompleksnih društvenih problema, modeliranja epidemija, molekularnih struktura i slično, gdje broj agenata može biti od nekoliko tisuća (Malleon et al., 2013) do nekoliko milijardi (Kerr et al., 2021). Zbog ubrzanog razvoja IKT, dostupnosti sve veće količine podataka te brojnih istraživanja u primjeni ABM, za očekivati je da će ABM modeliranje u bliskoj budućnosti nadići ograničenja koja za sada postoje (Helbing & Balmelli, 2015). Ovim istraživanjem se iskoristila prednost hibridnog modeliranja na način da se po potrebi ograničenje jedne metode može nadići upotrebom druge metode. Zbog nedostatka dovoljno detaljnih podataka za modeliranje pojedinih fakulteta kao agenata, sustav primarnog obrazovanja se realizirao kao SD okolina. Istovremeno radi efikasnijeg izvođenja eksperimenata od strane korisnika se kreiraju agenti za simulacije scenarija.

Metodološki okvir za razvoj modela sustavske dinamike za planiranje ljudskih potencijala u sustavu odgoja i obrazovanja primijenjen u ovom radu se temelji na nekoliko različitih pristupa dostupnih u literaturi. Primjerice, na metodologiji sustavskog razmišljanja Bala i sur. (2017), istraživanja Mitala (2015) u kojem se istraživao okvir za evaluaciju intervencija u obrazovnom sustavu te okvira za hibridna modeliranja Brailsforda i sur. (2019). U ovom istraživanju je primijenjen metodološki okvir kroz četiri faze: definicija, dizajn, analiza i verifikacija te validacija. U prve tri faze su obuhvaćeni svi koraci iz metodologije Bala i sur. (2017) u kojem su razmatrane faze razvoja modela te je na taj način smanjen broj faza što je doprinijelo jednostavnijem prikazu. Dodatno je ovim istraživanjem u sklopu metodološkog okvira obuhvaćena verifikacija i validacija, koja nije obuhvaćena metodološkim okvirom Bala i sur. Metodologijom primijenjenom ovim istraživanjem se postupak ocjene zadovoljstva modelom razdvaja u dvije faze te je uz ocjenu razine pouzdanosti modela uvedena kao posebna faza i ocjena valjanosti modela od strane korisnika modela. Time se metodološki razvoj modela usmjerava prema korisnicima modela što je važno zbog povjerenja u model i njegov prikaz kompleksnog sustava koji predstavlja. Na taj način je napravljena razlika u odnosu na druga istraživanja u kojima se ne razlikuju u toj mjeri verifikacija i validacija. Hibridni pristup u razvoju modela je omogućio da se dizajniraju eksperimenti (u ovom istraživanju nazvani scenariji) pomoću kojih korisnik ima kvalitetniju mogućnost izvođenja simulacija te na taj način aktivno sudjeluje u procesu validacije modela. Posljedično i sami model opravdava svoju ulogu u podršci upravljanju ljudskim

potencijalima i kreiranju upisne politike. Mogućnost izvođenja scenarija je važan doprinos ovog rada koji ne bi bio moguć bez hibridnog pristupa, s obzirom na realizaciju scenarija kao agenata u SD okruženju modela. To otvara put značajnijoj interakciji korisnika modela i istraživača.

Interakcija s korisnikom modela je nužna od početne faze, faze definicije u kojoj se postavlja koncept dijagrama uzročnih petlji, s obzirom da korisnik ima bolji uvid u postojeće stanje sustava. U općenitom modelu prezentiranom u poglavlju 4., u fazi definicije je prezentiran koncept modela (CLD dijagram). S obzirom da koncept sadrži dio koji se odnosi na populaciju općenito te dio koji se odnosi na zaposlenje i radni vijek do izlaska iz sustava rada, navedeni dijelovi modela se mogu primijeniti na bilo koju populaciju i struku izvan sustava odgoja i obrazovanja, odnosno na bilo koje područje u kojemu je potrebna visokoškolska stručna sprema. Dodatno, model bez dijela vezanog za studiranje se može primijeniti za modeliranje ljudskih potencijala za koje nije potrebna studentska razina kvalifikacija, no to zahtijeva fazu definicije modela koja je izvan fokusa ovog rada a koja se realizira u interakciji s potencijalnim korisnikom.

Bez obzira na adekvatnost SD metode na dugoročnije projekcije u raznim tehnološko-tehničkim područjima (Forrester, 1961), zbog prirode sustava odgoja i obrazovanja, primjereno je temeljem modela promatrati projekcije u kraćem budućem razdoblju, odnosno korigirati model u skladu sa eventualnim promjenama unutar sustava uslijed promjene politike ili reformi. Posebno što se u društveno-ekonomskim sustavima valja uzeti u obzir da bi reakcija ljudi na informacije o sustavu promijenila valjanost prognoze, odnosno dostupne informacije o prognozi nekog sustava mogu promijeniti uvjete temeljem kojih se napravila prognoza (Helbing & Balietti, 2015). U brojnim područjima istraživanja u kojima je primijenjena metoda SD ili ABM je vremenski period za razvoj modela varirao od nekoliko tjedana do sto godina (Saraji & Sharifabadi, 2017). U području odgoja i obrazovanja, prema istraživanju Reichard i sur. (2020) te Berg-Jacobson i Levin (2015), protekli period za obuhvat podataka ne treba biti duži od 4 - 5 godina da bi se dobili adekvatni statistički trendovi. U slučaju manjeg broja godina podaci mogu dati nevjerodostojnu sliku, dok je veći broj godina nepotreban i ne povećava značajnost. Primjerice u radu Mendes i Aleluia (2019) autori primjenjuju podatke za razvoj i verifikaciju SD modela u rasponu 12 godina i pritom prihvaćaju odstupanje u odnosu na stvarne podatke do 11%. Za predviđanje budućih trendova temeljem statističkog modela, Reichard i sur. (2020) također preporučuju kraći period odnosno 4-5 godina, a Berg-Jacobson i Levin (2015) predviđaju 4 godine, jer je u slučaju duljeg razdoblja preveliko odstupanje. Kako ne postoji striktno određen vremenski raspon za razvoj i verifikaciju modela kao i za predviđanje budućeg trenda već se prepušta subjektivnoj procjeni istraživača kao i području istraživanja, smatra se primjerenim da se vremenski raspon ograniči na period u kojem se ne očekuje promjena u sustavu uslijed promjene politike koje bi zahtijevale intervencije u model (Saraji i Sharifabadi, 2017).

S obzirom na navedeno, u sustavu odgoja i obrazovanja je primjereno modelom obuhvatiti vremenski raspon od jednog obrazovnog ciklusa za razvoj modela te isti

period za predviđanje temeljem modela. U primjeru modela primarnog obrazovanja uzeta je 2010. godina za inicijalne vrijednosti, 2010. g. do 2015. g. za razvoj modela te 2016. g. do 2020. g. za predviđanje. Razmatrane su i drukčije vremenske podjele, na primjer da se na temelju svih prikupljenih podataka promatra predikcija za jednu godinu unaprijed u skladu s mogućim interesima korisnika. U sljedećoj godini bi se i protekla godina iskoristila za razvoj te predviđanjem opet obuhvatila jedna predstojeća godina. Rezultati su pokazali bolje predviđanje za jednu godinu nego za pet godina unaprijed, no obzirom na primjenjivost modela različitim korisnicima kojima je od interesa dugoročnije planiranje i predviđanje trendova, predviđanje budućeg perioda od pet godina je prihvaćeno kao relevantnije za potencijalne korisnike kojima je model namijenjen. Kao buduće istraživanje se može dodati funkcionalnost modelu tako da se unutar sučelja omogući korisniku odabir budućeg vremenskog perioda od interesa, te bi u toj situaciji model trebao imati opcije za grupiranje dostupnih podataka.

Kako je cilj istraživanja razvoj hibridnog modela i implementacija metodologije na problematiku upravljanja ljudskim potencijalima i upisne politike u bilo kojem području sustava odgoja i obrazovanja, metodologija je primijenjena na odabranom primjeru odnosno sustavu primarnog obrazovanja Republike Hrvatske kao dijelu sustava odgoja i obrazovanja te je na taj način ostvaren doprinos u odnosu na dosadašnje metode upravljanja ljudskim potencijalima. Razvijeni model je ostvario postavljeni cilj istraživanja u obliku pružanja podrške strateškom odlučivanju.

Pri razvoju modela primijenjenog na primarno obrazovanje su korišteni dostupni statistički podaci iz relevantnih izvora i baza podataka kao što su Državni zavod za statistiku, Hrvatski zavod za zapošljavanje, Ministarstvo znanosti i obrazovanja, Agencija za znanost i visoko obrazovanje itd. Podaci su često manjkavi ili nedovoljno precizni za bolju reprezentaciju pojedinih parametara, odnosno modeliranja nekih dijelova sustava kao agenti, što se također pokazalo problematično pri hibridnom modeliranju u istraživanju M. Kunca (2019). Primjerice, u modelu nisu korišteni podaci DZS-a o školama jer nema pregleda o učiteljima razredne nastave s obzirom na dobnu strukturu, kvalifikacije i vrste zaposlenja. Također, HZZ vodi isključivo evidenciju o „ulasku u evidenciju“ i „izlasku iz evidencije“ te ne vodi računa jesu li se učitelji zaposlili u školi ili izvan struke. Dodatno, podaci iz Školskog e-rudnika (*ŠeR - Školski e-Rudnik*, 2022) Ministarstva znanosti i obrazovanja ima ponekad drukčije vrijednosti za iste podatke u odnosu na *Studij.hr (Središnji Prijavni Ured | Studij.Hr, 2022)* Agencije za znanost i visoko obrazovanje. SD metoda je prikladna za takve nedorečene podatke koje se može prikazati jednadžbama koje više ili manje točno aproksimiraju stvarno stanje. ABM zahtijeva točnije definiranje vrijednosti agenata te se u slučaju preciznije vođenih podataka model u cijelosti ili određeni njegovi dijelovi mogu reprezentirati agentima. Za očekivati je da će se to moći realizirati u budućem periodu, uslijed sve detaljnijih i povezanih sustava u navedenim institucijama, pa će se primjerice pojedini fakulteti moći realizirati kao agenti unutar SD okoline. Time će ovo istraživanje dobiti nove mogućnosti, što su izrazili kao poželjno i ispitanici ankete.

Problem se pokazao već u fazi definicije i dostupnih podataka, jer hrvatske institucije ne vode dovoljno precizne individualne podatke o strukturi nastavnog i

drugog osoblja, što je razlog ograničene upotrebe metoda koje se oslanjaju na obradu velikih količina prikupljenih povijesnih podataka, odnosno neadekvatnost metoda strojnog učenja. Dodatno, model ne smije biti „crna kutija“ koja prikazuje rezultate bez razumijevanja strukture i logike modela te nije dovoljno „trenirati“ model na povijesnim podacima već je cilj modela dublje razumijevanje sustava. Nedostatak individualnih podataka je argument i za neadekvatnost primjene isključivo statističkih modela kao što je primjer u studiji Reichardt i sur. (2020.). Navedeno su argumenti za primjenu metode SD kojom se razvije matematički model na temelju dostupnih podataka, te nije potrebna velika količina podataka kojima bi se „učio“ model. U primjeru primarnog obrazovanja na temelju perioda 2010. g. do 2015. g. nije adekvatna metoda strojnog učenja s obzirom na mali skup podataka te je SD adekvatna metoda za razvoj modela. S druge strane, ograničenja metode SD su se nadišla primjenom ABM te je takvim hibridnim pristupom ostvaren maksimalan učinak s obzirom na dostupne podatke za razvoj modela.

U skladu sa metodom SD parametri modela su prikazani matematičkim jednadžbama te se model svodi na sustav jednadžbi. S obzirom na promatrani period, jednadžbom se aproksimira pet točaka u dvodimenzionalnom prostoru (primjerice broj maturanata za pet uzastopnih godina). Pokazalo se ponekad da bolja aproksimacija na danom skupu podataka ne znači nužno i bolju moć predikcije budućeg trenda.

U fazi definicije razvoja modela, pregledom literature i neformalnim inicijalnim konzultacijama sa relevantnim poznavateljima sustava odgoja i obrazovanja su identificirani parametri koji su uključeni u model. Fazom dizajna, prikupljanjem podataka i analizom osjetljivosti su parametri modela ocijenjeni dovoljno značajnim za ponašanje samog modela te opravdali uvrštenje u model. Neki parametri su izostavljeni iz modela kao nedovoljno značajni za primjer primarnog obrazovanja, primjerice broj stranih studenata. U fazi validacije su potvrđene vrijednosti parametara modela odnosno nisu identificirani dodatni parametri neophodni za uvrštenje u model. S druge strane uvrštena su dva parametra bez obzira na njihovu značajnost od 3%. Razlog za uvrštenje parametar *Imigracija* leži u primjenjivosti modela izvan R. Hrvatske gdje se očekuje veći utjecaj brojnosti imigracije na ukupnu populaciju. Drugi parametar je *Ostanak\_u\_sustavu* za koji se očekuje promjena utjecaja u skorijem budućem razdoblju uslijed promjene zakonodavstva i nedostatka obrazovnih kadrova.

Analizom osjetljivosti modela *Učitelj* je parametar *Kvote* identificiran kao najutjecajniji na ponašanje modela, što je u skladu s mišljenjem ispitanika u anketi koji su identificirali propisane upisne kvote kao element koji najviše utječe na brojnost studenata upisanih na učiteljske fakultete u R. Hrvatskoj. S druge strane, u modelu *Učiteljski Fakultet* se parametar *Usmena\_predaja* pokazao kao najutjecajniji na brojnost prijave za upise na učiteljske fakultete. I oko ovog parametra se ispitanici slažu odnosno mišljenja su da je stav o studiju koji je prisutan u javnosti više relevantan za studij primarnog obrazovanja nego primjerice težina samog studija. Za buduće istraživanje otvara se prostor statističkim metodama za definiranje parametara pa time i statističkim metodama (Monte Carlo i slično) za verifikaciju i analizu osjetljivosti parametara čime bi se dobio dodatni mehanizam ocjene pouzdanosti modela.



Verifikacija i validacija primijenjenog modela je ujedno ocjena verifikacije i validacije samog metodološkog okvira. Rezultati verifikacije ponašanja razvijenog modela *Učitelj* i podmodela *Učiteljski Fakultet* pokazuju odstupanja simuliranih podataka od stvarnih za manje od 10%, što se na temelju sličnih istraživanja u drugim područjima smatra dovoljno prihvatljivim (Ishikawa et al., 2013; Relić & Božikov, 2020) čime je verificiran metodološki okvir na temelju kojeg je razvijen model.

Dobiveni rezultati za varijable modela *Učitelj* su: *Populacija* (MSE=0,009), *Maturanti* (MSE=0,058), *Upis* na učiteljske fakultete (MSE=0,082), *Studenti* (MSE=0,081), *Učitelj* (MSE=0,01), čime se pokazalo da model bolje reprezentira ukupnu populaciju, broj učitelja i broj maturanata u Hrvatskoj a slabije rezultate pokazuje za broj upisanih u pojedinoj godini i ukupni broj studenata učiteljskih fakulteta. Za varijable modela *Učiteljski Fakultet* rezultati varijabli *Prijave UFZG* (MSE=0,070) i *Studenti UFZG* (MSE=0,063) pokazuju prihvatljive vrijednosti odstupanja od stvarnih vrijednosti. U slučaju primjene podmodela *Učiteljski Fakultet* na manje brojne populacije studenata, odnosno primjene na fakultete sa manjim brojem studenata, odstupanja su prelazila granicu prihvatljivosti određenu u ovom radu. U toj situaciji je potrebno daljnje istraživanje i specijalizacija razvijenog modela da obuhvati specifičnosti pojedinog fakulteta.

Gledano za pojedinačne godine primjećuje se značajno odstupanje dobivenih i stvarnih podataka, primjerice vidljivo na grafikonu *Upisi na Učiteljske fakultete* (za godine 2012., 2016. i 2020.), na Slici 39. Ono se obrazlaže nemogućnošću točnijeg matematičkog prikaza za društvene pojave reprezentirane malim uzorcima (nekoliko stotina na nivou cijele RH). Dodatni primjer je pojedinačno odstupanje od trenda prikazano na grafikonu *Prvi izbor studij na Učiteljskom fakultetu*, na Slici 36., koje se ne može predvidjeti na razini opisa jednadžbom. Na Slici 42. se ističe odstupanje stvarnih i modeliranih podataka za varijablu *Prvi izbor studija za učitelja*, za 2021. godinu. Stvarni podaci prikazuju skok u interesu za studij u odnosu na protekle godine u kojima se primjećuje stalni silazni trend. Ovim istraživanjem se nije uspjelo obrazložiti odstupanje stvarnih podataka za navedenu godinu. Moguće obrazloženje jest da se zbog nekih aktivnosti u javnom diskursu, primjerice najave promjene politike u sustavu primarne nastave, navedene godine odlučilo znatno više studenata za studij primarnog obrazovanja.

U cilju boljeg predviđanja razmotrene su alternativne vremenske podjele podataka za razvoj modela, no s obzirom na distribuciju podataka koje bi se trebalo formalno izraziti matematičkim jednadžbama, rezultati su bili podjednako precizni. Društveni fenomeni u području odgoja i obrazovanja ne pokazuju pravilnost u distribuciji vrijednosti te je zahtjevno takve pojave prikazati sustavom jednadžbi. S druge strane nedostatak podataka (jer se predviđanje temelji na svega nekoliko godina) onemogućavaju upotrebu drugih metoda za koje je potrebna velika količina podataka. Zaključak je da metoda SD predstavlja najbolji izbor u danim okolnostima. Dodatno, ABM nadopunjava SD te takav hibridni pristup modeliranju omogućava razvoj prikladnog modela obzirom na dostupne podatke.

Na temelju modela *Učitelj* i podmodela *Učiteljski Fakultet* su napravljene projekcije određenih parametara do 2025. g., što je prikazano grafikonima u poglavlju 5.4. Prikazane projekcije pretpostavljaju da nema radikalnih promjena u sustavu, no zbog same prirode uzročno-povratnih petlji u sustavu odgoja i obrazovanja za očekivati je da će se promjena u vrijednostima parametara sustava dogoditi, ili da će do izražaja doći potpuno novi parametri. Naime za očekivati je da se u sustavu promjene uvjeti i da vanjski faktori utječu na sustav. Hipotetski primjer je da se problem nedostatka učitelja kroz medijsku kampanju osvijesti kao problem, što rezultira intervencijom vlasti lokalne uprave da stipendijama potiče maturante da studiraju za učitelja. Navedeno je u skladu sa tvrdnjom Helbing i Balietti (2015) da je u području društvenih istraživanja nezanemariv utjecaj informacija o modelu na povratnu vezu na sami model. Primjerice informacija u javnosti da je modelom dobivena predikcija o nedostatku učitelja u budućem razdoblju bi mogla utjecati da se privuče više studenata u učiteljski struku te se na taj način rezultati modela pokažu pogrešni.

Validacija metodološkog okvira se provodila temeljem prilagođene Delphi metode kroz validaciju razvijenog modela *Učitelj* i podmodela *Učiteljski Fakultet*. Ispitanici i korisnici modela su članovi uprava fakulteta i odjela u Hrvatskoj koji educiraju buduće učitelje primarnog obrazovanja. S obzirom na primjenu prezentiranog modela na sustav odgoja i obrazovanja, točnije na njegov segment razredne nastave, učitelje razredne nastave i fakultete koji obrazuju buduće učitelje razredne nastave, ovim istraživanjem se članovi uprava učiteljskih fakulteta smatraju stručnjacima u području upravljanja ljudskim potencijalima i upisnom politikom. Navedeno se argumentira time što se u uprave fakulteta biraju kadrovi prvenstveno zainteresirani za upravljanje fakultetom, nastavnim procesom, ljudskim i financijskim resursima. Nadalje, upravu najčešće čine kadrovi koji su upoznati sa strukturom, dobrim i lošim stranama ustanove, poznaju kriterije temeljem kojih donose odluke, imaju postignuća u znanstvenom i nastavnom djelovanju te imaju viziju i plan za budući napredak ustanove. Moguća dodatna opcija za provođenje validacije bila bi u anketu uključiti i kreatore politike odnosno stručnjake na drugim razinama sustava odgoja i obrazovanja. Ograničenje pri odabiru stručnjaka na ovaj način leži u činjenici da uprave fakulteta uvijek čini znanstveno-nastavno osoblje fakulteta, a ne stručnjaci educirani u području upravljanja. Takvu upravljačku strukturu određuje zakon o visokom školstvu i znanstvenoj djelatnosti, koji ne predviđa nikakve preduvjete za kvalifikacijama u području upravljanja (NN 119/2022, 2022).

Prije same prezentacije modela samo je jedan ispitanik čuo za metodu SD, no nije ju koristio. S obzirom da korisnicima nisu bliske metode simulacijskog modeliranja, važno je omogućiti odgovarajuće sučelje putem kojeg će korisnici bez poznavanja metoda SD, ABM ili programskih jezika moći upravljati modelom. Integriranje modela u web sučelje odnosno *online* dostupnost modela korisnicima se nudi kao efikasno rješenje na pitanje dostupnosti.

S ciljem približavanja modela zahtjevima korisnika i lakšem korištenju formirani su različiti scenariji. Mogućnost istovremenog mijenjanja svih parametara modela može korisniku model učiniti prekompleksnim i nepreglednim jer korisnik modela nije

upoznat sa svim funkcionalnostima i elementima modela kao netko tko je kreirao modela pa dobro poznaje njegove karakteristike. Također nije za očekivati da će svaki korisnik imati interes u proučavanje svih dijelova sustava već može imati fokus na određenom dijelu sustava. Uloga scenarija je naglašena kao način tematskog odijeljivanja skupina parametara pa tako postoje scenarij u kojemu su grupirani parametri za upis i studiranje na fakultetu, ili zaposlenje unutar ili izvan struke i slično. Postavilo se pitanje broja scenarija odnosno je li potrebno unaprijed kreirati bitno veći broj scenarija da bi se pokrile sve mogućnosti i kombinacije parametara. Prezentirano je osam scenarija za ovo istraživanje i primijenjeni model kojim se želi validirati metodološki okvir. Dodatni argument je što bi u situaciji da se model razvija za konkretnog korisnika trebalo definirati brojnost i karakteristike scenarija u interakciji s korisnikom i njegovim potrebama. Simulacijama na ponuđenim scenarijima, mijenjanjem vrijednosti pojedinih parametara u prvom krugu Delphi metode se diskutiralo o vrijednostima i ulozima parametara modela. Ispitanici nisu istaknuli dodatne parametre koji bi se eventualno uključili u model da značajno mijenjaju sliku modela pa nije bilo potrebe za provođenjem drugog kruga anketiranja, niti korekcije modela. Također se broj scenarija pokazao dovoljan za validaciju modela.

Time se potvrdio važan aspekt ovog istraživanja u hibridnom pristupu modeliranju. Bez uloge agenata koji se realiziraju u obliku scenarija za izvođenje simulacija validacija se ne bi mogla provesti na temelju ocjene korisnika. Ovim pristupom je omogućena podrška pri upravljanju ljudskim potencijalima i upisnom politikom, što je temeljni cilj ovog istraživanja.

Korisnici su istaknuli parametar *Upisne kvote* kao najograničavajući element na upravljanje sustavom odnosno proces odlučivanja oko upisne politike. Naime na taj parametar uprave fakulteta imaju mali utjecaj jer se mora odobriti od Ministarstva znanosti, a ograničavajući je i zbog kadrovske strukture zaposlenika na fakultetu. Parametar *Atraktivnost studija* je s druge strane imao najveći pozitivni utjecaj na povećanje upisa na fakultet, bez obzira na parametar *Težina studija*, što se dovelo do zaključka da sama težina studija ne igra značajnu ulogu na brojnost upis na fakultet već je bitan utjecaj perspektivnost struke.

Prijedlozi su uglavnom išli u smjeru rafiniranja dijelova modela temeljem dodatnih istraživanja ili boljom integracijom sa službenim bazama podataka. Primjerice ispitanici su predložili daljnje istraživanje u području cjeloživotnog obrazovanja, zapošljivosti bivših studenata učiteljskih fakulteta, struktura zaposlenih učitelje prema stažu, dodatnoj naobrazbi itd. Veliki dio nabrojanih prijedloga za poboljšanje iziskuje dodatna istraživanja koja su izvan domene ovog rada ili postojanja adekvatnih službenih podataka koji se trenutno ne vode.

Rezultati dijela ankete s Likertovom skalom stavova su u sva tri područja ispitivanja pokazala iznimno visoke rezultate u ocjeni korisnosti modela za upravljanje ljudskim potencijalima. Zanimljivo je da najnižu ocjenu ispitanici daju upravo za primjenjivost modela za provođenje upisne politike, iako su i dalje ocjene visokih 4,17 (primjenjivost SD), 4,33 (primjenjivost modela *Učitelj*) i 4,42 (primjenjivost modela *Učiteljski Fakultet*). Takve rezultate su ispitanici obrazložili nemogućnošću utjecaja na

upisnu politiku i upisne kvote, koje ili propisuje Ministarstvo znanosti i obrazovanja ili se odlučuje na Vijeće fakulteta. Visoke ocjene iz svih područja ispitivanja nameću zaključak da je ostvaren osnovni cilj ovog istraživanja odnosno razvijeni model omogućava podršku upravljanju ljudskim potencijalima i upisnoj politici u sustavu odgoja i obrazovanja.

### **6.1. Znanstveni doprinosi i potvrda hipoteza H1 i H2**

Na temelju metodološkog okvira definiranim u ovoj disertaciji za razvoj modela u sustavu odgoja i obrazovanja razvijen je model sustava odgoja i obrazovanja. Metodološki okvir je adaptiran u odnosu na postojeća istraživanja te je realiziran kroz četiri faze s novom definicijom i ulogom faza u odnosu na dosadašnja istraživanja.

Model je realiziran primjenom metoda sustavske dinamike i modeliranja temeljnog na agentima. Na taj način je realiziran hibridni model pri čemu su se iskoristile komparativne prednosti obiju metoda te je razvojem modela postignut prvi znanstveni doprinos istaknut planom ovog istraživanja. Metode su implementirane na razvoj modela za planiranje ljudskih resursa i upisnih kvota čime je ostvaren doprinos u odnosu na dosadašnja slična istraživanja. Hibridnim pristupom se postigla fleksibilnost u modeliranju u odnosu na dostupne podatke jer se primjenom samo jedne metode se ne bi mogle kvalitetno obuhvatiti karakteristike sustava. Na taj način primijenjena metodologija omogućuje istraživaču fokusiranje na dostupne podatke za razvoj modela, a ne na ograničenja pojedine metode.

Hibridnim pristupom razvoju modela se ostvarila i korisnička pristupačnost. U svrhu ostvarenja podrške odlučivanju, ispitanicima je omogućena samostalnost u korištenju modela kroz izvođenje eksperimenata na ponuđenim scenarijima putem web sučelja. Scenariji se realiziraju kao predefimirani agenti koji se po potrebi kreiraju i pokreću s ciljem istraživanja utjecaja eventualnih odluka na upisnu politiku. Izvođenjem simulacija scenarija je omogućena podrška odlučivanju vezana za upisnu politiku u sustavu odgoja i obrazovanja te je ostvaren drugi znanstveni doprinos predložen ovim radom. Samo primjenom metode SD ne bi bila moguća realizacija scenarija na opisani način odnosno napravljen je doprinos u smjeru korisnički orijentiranog razvoja modela.

Razvijeni model za planiranje upisnih kvota i ljudskih potencijala u odgoju i obrazovanju je implementiran na primjeru primarnog obrazovanja u Republici Hrvatskoj. U sustavu odgoja i obrazovanja R. Hrvatske do sada nisu primjenjivane metode simulacijskog modeliranja čime je ostvarena razlika u odnosu na postojeće metode planiranja te je ostvaren treći doprinos ovog istraživanja. Ujedno je ostvarena i osnovna zadaća razvijenog modela odnosno modelom je ostvarena podrška strateškom odlučivanju u području upravljanja ljudskim potencijalima i upisne politike.

U poglavlju 5. je prikazan razvoj modela i prezentirani su rezultati modela *Učitelj* i njegovog podmodela *Učiteljski Fakultet*. Za razvoj i verifikaciju modela su prikupljeni podaci vezani za sustav primarnog obrazovanja od 2010. g. do 2020. godine. Pritom su podaci za 2010. g. do 2015. g. korišteni za razvoj modela, a podaci za 2016. g. do 2020. g. za verifikaciju. Rezultati faze verifikacije modela su pokazali da podaci

dobiveni modelom odstupaju od realnih podataka prikupljenih za period 2016. do 2020. godine unutar granica prihvatljivosti preuzetih iz relevantne literature (razlika manja od 10%). Verifikacijom modela iz primjera se ujedno verificira metodologija primjenjiva u sustavu odgoja i obrazovanja. Može se zaključiti da vrijedi tvrdnja iz prve znanstvene hipoteze ove disertacije (H1):

*Razvijeni sustavsko dinamički model dobro reprezentira stanje ljudskih potencijala u sustavu odgoja i obrazovanja.*

Poglavlje 5.4. predstavlja validaciju primijenjenog modela i rezultate provedene ankete. Anketa je uslijedila nakon prezentiranja modela stručnjacima iz područja istraživanja, u skladu s prilagođenom Delphi metodom. Rezultati ankete su pokazali da ispitanici smatraju model korisnim za upravljanje ljudskim potencijalima i upisnom politikom u sustavu odgoja i obrazovanja. Sve tri skupine pitanja o korisnosti modela su ocijenili visokim postocima: 91,7%, 96,3% i 100%. Validacijom modela na primjeru primarnog obrazovanja se validira i razvijeni metodološki okvir primjenjiv na cijeli sustav odgoja i obrazovanja. Time se može zaključiti da vrijedi tvrdnja iz druge znanstvene hipoteze ove disertacije (H2):

*Razvijeni model daje podršku odlučivanju pri donošenju upisne politike visokoškolskih ustanova.*

Potvrdom istraživačkih hipoteza i realizacijom doprinosa je ujedno ostvaren opći cilj ovog istraživanja: sustavsko dinamičkim modeliranjem ljudskih potencijala i resursa u sustavu odgoja i obrazovanja je omogućena podrška odlučivanju pri donošenju upisne politike pri čemu je ostvaren znanstveni doprinos u odnosu na dosadašnja istraživanja.

## 7. Zaključak

Ovim radom su primijenjene metode sustavske dinamike i modeliranja temeljenog na agentima na planiranje ljudskih potencijala u sustavu odgoja i obrazovanja. Sustavska dinamika je numerička metoda rješavanja sustava nelinearnih diferencijalnih jednadžbi s vremenskom dinamikom, primjenjiva u nizu različitih problema u zadnjih više od 50 godina. Primjerena je za apstraktnije probleme s agregiranim vrijednostima, odnosno u situaciji općenitijih podataka te u situacijama u kojima nemamo znanja o ponašanju pojedinog elementa. Modeliranje temeljeno na agentima se primjenjuje u zadnjih oko 20 godina, a temelji se na primjeni objektno orijentiranog programiranja na definiranje ponašanja elemenata sustava koji se nazivaju agentima. Pritom su performanse suvremenih računala neophodan resurs za omogućavanje zahtjevnijeg modeliranja većeg broja agenata. Potrebno je posjedovati znanje o ponašanju svakog agenta, odnosno elementa sustava.

U ovom istraživanju su se iskoristile prednosti metoda SD i ABM te je razvijen i implementiran hibridni model. Na taj način se postigla fleksibilnost u primjeni dostupnih podataka te se s obzirom na adekvatnost podataka primijenila mikro razina ABM modeliranja s makro razinom SD modeliranja.

Osnovni cilj ove disertacije jest pokazati da se primjenom simulacijskog modeliranja može kvalitetnije upravljati ljudskim potencijalima te planirati upisna politika u sustavu odgoja i obrazovanja. Razvojem hibridnog modela, temeljenog na SD i ABM, se omogućilo simuliranje u svrhu evaluacije ispravnosti donesenih odluka. Na taj način se omogućila podrška odlučivanju pri kreiranju politika u sustavu odgoja i obrazovanja, s naglaskom na upisnu politiku. Postignut je znanstveni doprinos u pogledu primjene hibridnog modela za upravljanje ljudskim potencijalima i upisnom politikom u sustavu odgoja i obrazovanja.

Ovim istraživanjem je primijenjen metodološki okvir za razvoj modela sustavske dinamike kojim su jasnije definirane faze i orijentiranost modela prema ciljanim korisnicima za samostalno upotrebu. Faze i koraci opisani u drugim metodologijama su objedinjeni, jasnije se definira slijed u fazama te su u namjeni odvojene faze verifikacije i validacije s naglaskom razlikovanja tko provodi aktivnosti verifikacije u odnosu na validaciju. Verifikacija se metodološki provodi kao unutarnja potvrda s obzirom na strukturu modela, točnost dobivenih mjerenja i slično, a validacija kao vanjska potvrda od strane korisnika modela. Implementiranjem hibridnog pristupa razvoju modela se omogućila bolja orijentiranost prema korisniku modela. Kroz različite scenarije korisnik može samostalno izvoditi eksperimente što se realizira kreiranjem agenta za eventualno izvođenje simulacije scenarija. Na taj način je ostvaren doprinos strateškom odlučivanju vezano za upisnu politiku u sustavu odgoja i obrazovanja.

Na temelju metodološkog okvira u ovoj disertaciji su definirane četiri faze u razvoju modela. Četiri faze su: definicija, dizajn, analiza i verifikacija te validacija. Kroz različite faze razvoja modela su realizirani različiti specifični ciljevi ovog istraživanja, prezentirani u uvodnom poglavlju:

- u fazi definicije su formirani idejni koncept te identificirani parametri koji su uključeni u model;
- u fazi dizajna je realiziran model u obliku računalnog programa odnosno njegova fizička realizacija;
- kroz fazu analize i verifikacije je razmatrana funkcionalnost modela te reprezentira li model dovoljno dobro realno stanje;
- kroz fazu validacije su definirani i izrađeni scenariji za izvođenje simulacija s razvijenim modelom, kako bi potencijalni korisnici modela mogli samostalno upravljati modelom i na temelju rezultata donositi odluke.

Metodološki okvir se implementirao na primjeru primarnog obrazovanja u Hrvatskoj, konkretnije na razrednu nastavu i populaciju učitelja razredne nastave. S obzirom da nisu do sada primjenjivane metode simulacijskog modeliranja u hrvatskom sustavu odgoja i obrazovanja, uz znanstveni doprinos je ostvaren i cilj razvijenog modela u vidu podrške odlučivanju. Koncept modela je najprije kreiran kao CLD dijagram s elementima koji su identificirani kao potrebni za opis sustava primarnog obrazovanja u RH te kvalitativnim odnosima među elementima. Prikupljeni su dostupni podaci za navedene elemente u periodu od 2010. g. do 2020. godine. Kvalitativne veze identificirane u CLD dijagramu su kvantificirane i uspostavljene su funkcionalne veze među elementima. U ovoj fazi, fazi dizajna je ocijenjeno da se s obzirom na dostupnost podataka model realizira kao SD okolina unutar agenta dok se izvođenje i prezentacija modela, eksperimenti kao što su optimizacija i analiza osjetljivosti parametara izvodi eventualnim kreiranjem zasebnih agenata u interakciji sa glavnim agentom koji sadrži SD model. Definirane su varijable *Populacija*, *Maturanti*, *Studenti* i *Učitelj* kao ključne varijable SD modela koje se realiziraju kao varijable zaliha, te varijabla *Upisi* koja se realizira kao varijabla protoka. Definirane su i ostale dinamične varijable te konstante. Pojedine varijable i konstante iz općenitog modela sustava odgoja i obrazovanja su u ovoj fazi izostavljene iz modela jer nisu bitne za promatrani sustav primarnog obrazovanja.

Model je realiziran u programu AnyLogic koji se temelji na programskom jeziku Java. Razvijen je model *Učitelj* koji promatra promjene u ukupnoj populaciji RH, populaciju studenata svih fakulteta koji obrazuju buduće učitelje razredne nastave te populaciju učitelja od zaposlenja u struci do izlaska iz sustava. Kako bi model bio primjenjiv i razinama odlučivanja na učiteljskim fakultetima, razvijen je posebno i model *Učiteljski Fakultet* kao razrada dijela modela *Učitelj*. Za razvoj modela su korišteni prikupljeni podaci od 2010. g. do 2015. godine. Funkcionalnosti modela, pokretanje eksperimenata i simulacija su realizirani kao modeliranje temeljeno na agentima, dok je model *Učitelj* i podmodel *Učiteljski Fakultet* realiziran kao sustavsko dinamička okolina unutar agenta. Hibridnim pristupom je ostvaren napredak u razvoju modela jer istraživač pri razvoju modela nije ograničen nedostacima pojedine metode te je provođenje simulacija i eksperimenata realizirano preko agenata koji se po potrebi kreiraju.

Ovim istraživanjem je pokazana fleksibilnost hibridnog pristupa u modeliranju s obzirom na ograničenost dostupnih podataka. Pokazalo se da na primjeru sustava odgoja i obrazovanja u Hrvatskoj dostupni podaci onemogućuju upotrebu metoda za koje je potrebna velika količina podataka za učenje modela te je zato SD dobar odabir metode. U kombinaciji sa ABM mogu se dovoljno dobro obuhvatiti individualna svojstva pojedinog elementa sustava kao i agregirani podaci na razini populacija.

Pokretanjem modela su prikupljeni izlazni podaci za varijable sustava koje su istaknute kao ključne za promatranje. Podaci prikupljeni za period od 2016. do 2020. godine su uspoređeni s podacima dobivenima modelom *Učitelj* i *Učiteljski Fakultet* u sklopu verifikacije ponašanja modela. S obzirom na zahtjeve i raznoliki sastav korisnika zaključeno je da je najbolji period za predikciju pet godina. Izračunata je srednja kvadratna pogreška odstupanja (MSE). Dio modela *Učitelj* koji prikazuje populacije maturanata i ukupnu populaciju Hrvatske pokazuje bolju podudarnost sa realnim podacima u odnosu na populaciju studenata učiteljskih fakulteta i broj pristupnika na upisu. Podmodel *Učiteljski Fakultet* adekvatno reprezentira realne podatke primijenjen na broj studenata i broj prijava na Učiteljski Fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Za sve promatrane parametre je razlika vrijednosti dobivenih simulacijom i stvarnih podataka manja od 10% te se model smatra verificiranim. Zaključak je da model dobro opisuje stvarno stanje i trend ponašanja sustava. Time je verificiran metodološki okvir razvoja modela te je ujedno i potvrđena prva istraživačka hipoteza (H1) da *razvijeni sustavsko dinamički model dobro reprezentira stanje ljudskih potencijala u sustavu odgoja i obrazovanja*.

Validacija modela se odnosi na primjenjivost modela, odnosno kvalifikaciju modela kao korisnog od strane ciljanog korisnika. U sklopu validacije su ovim istraživanjem razvijeni scenariji kojim se upravljanje modelom klasificira tematski s obzirom na parametre. Scenarij omogućava promjenu vrijednosti skupine parametara te na taj način izvođenje simulacije „što-ako“ čime se postiže bolji uvid u zakonitosti unutar sustava te omogućava bolje planiranje, u odnosu na uobičajene metode planiranja. Ponuđeno je 8 različitih scenarija za interaktivno mijenjanje određenih parametara od interesa, identificiranih kao ključnih za promatranje efekata u strateškom odlučivanju. Izvođenje simulacije pojedinog scenarija se realizira kroz kreiranje agenta u skladu sa hibridnom izvedbom strukture modela i primjenom programskog alata čime je omogućeno provođenje eksperimenata od strane korisnika. Na taj način razvijeni model ispunjava svoju glavnu zadaću podrške odlučivanju pri kreiranju upisne politike i upravljanja ljudskim potencijalima.

Validacija modela se provela prilagođenom Delphi metodom odnosno ispitivanjem stavova stručnjaka u području upravljanja ljudskim potencijalima i upisnom politikom. Provedena je anketa među 12 članova uprava svih učiteljskih fakulteta i sveučilišnih odjela u Hrvatskoj o korisnosti razvijenog modela.

Za potrebe prezentacije i korištenje modela izrađeno je web sučelje kojom se model prezentirao ispitanicima kao krajnjim korisnicima modela. Sučelje je realizirano kao grafičko korisničko sučelje sa poveznicom na model smješten u oblaku te se poziva preko hiperveze. Preko GUI-ja se interaktivno upravlja funkcionalnostima



modela te se mogu dobiveni podaci prenijeti za daljnju upotrebu. Pozitivna strana web sučelja, s obzirom na dostupnost IKT tehnologije i umreženosti, je dostupnost modela korisnicima.

Anketom su se ispitali stavovi o tri tematska dijela: korisnost metode sustavske dinamike i njene prednosti u odnosu na druge metode poznate ispitanicima, korisnost samog razvijenog modela i izrađenih scenarija te korisnost web aplikacije kao sučelja za korištenje modela od strane korisnika. Rezultati ankete su pokazali da ispitanici u velikom postotku (91,7% za korisnost metode sustavske dinamike, 96,3% za korisnost modela i scenarija te 100% za korisnost web aplikacije) smatraju metodu, model i sučelje korisnim za upravljanje ljudskim potencijalima i upisnom politikom u sustavu odgoja i obrazovanja. Na taj način je validiran i metodološki okvir te je potvrđena druga istraživačka hipoteza (H2) da *razvijeni model daje podršku odlučivanju pri donošenju upisne politike visokoškolskih ustanova*.

Potvrdom metodološkog okvira na primjeru primarnog obrazovanja je potvrđena i primjenjivost okvira vezano za upravljanje ljudskim potencijalima s naglaskom na upisnu politiku u drugim područjima sustava odgoja i obrazovanja. Zaključak je da razvijeni metodološki okvir omogućava podršku odlučivanju pri planiranju ljudskih potencijala u sustavu odgoja i obrazovanja.

Za buduće istraživanje i razvoj modela je moguće dodatno istražiti i kvantificirati utjecaje na parametre sustava. Tu se otvara prostor za dodatna, ciljano fokusirana istraživanja. Primjerice za potrebe disertacije su se ispitali stavovi o učiteljskoj profesiji i studiju primarnog obrazovanja. Dio istraživanja vezan za utjecaj usmene predaje na stavove se uvrstio u model. Prijedlog za sljedeći rad je istražiti strukturu i razloge prijevremenog izlaska iz sustava te ostanak u sustavu nakon stjecanja uvjeta za mirovinu. Dostupni podaci u tom području su manjkavi a ispitanici u anketi su izrazili interes za rezultate takvog istraživanja. Na taj način bi se model dodatno rafinirao i poboljšala odstupanja od stvarnih podataka. Također bi se omogućilo definiranje mnogih elemenata sustava kao agenti s točnije definiranim ponašanjem, što se zbog prirode i pouzdanosti prikupljenih podataka iz relevantnih službenih baza podataka pri razvoju modela pokazalo problematično. Unatoč nedostatku poželjne razine detaljnih podataka ovim istraživanjem se pokazala mogućnost implementiranja agenata u kombinaciji sa sustavskom dinamikom, pogotovo s obzirom na orijentiranost prema korisniku.

Dodatno, potencijal za budući smjer istraživanje nude i sugestije ispitanika ankete. Razvoj modela je nužno povezati s većom interakcijom s potencijalnim korisnicima i specifikacijom zahtjeva korisnika. Primjerice u slučaju modeliranja privatnih obrazovnih institucija veći naglasak je na pitanju financiranja nego u javnim (državnim) ustanovama. Ovim općenitim modelom nije detaljno razmatrao pitanje financija, što zahtjeva dublju analizu i razradu modela u konkretnoj situaciji.

Izgradnja većeg broja scenarija je jedan od mogućih načina diverzifikacije korisnosti istog modela na više korisnika jer bi se time primjerice isti model mogao koristiti u upravi, na nižim razinama menadžmenta, kao i raznim službama (kadrovska,

financijska), čime bi se dodatno istaknuo doprinos modela u području podrške odlučivanju, što je osnovni cilj razvijenog modela i motivacija za ovo istraživanje.

Za povećanje korisnosti modela preporučljiva je integracija modela s drugim aplikacijama koje se koriste unutar sustava. Za očekivati je da će se daljnjom digitalizacijom i funkcionalnijim bazama podataka državnih institucija moći primijeniti neke od metoda strojnog učenja ili umjetnih neuronskih mreža na razvoj prikazanog modela. U SD modeliranju je važna funkcionalna povezanost među parametrima te je primjena strojnog učenja ograničena, no pritom se otvaraju mogućnosti primjene hibridnim modelima, odnosno primjenom različitih paradigmi u izgradnji modela. Potreba za efikasnijim planiranjem i modeliranjem ljudskih potencijala u sustavu odgoja i obrazovanja nameće potrebu daljnjeg rada u tom smjeru.

## Literatura

- [1.] Achachlouei, M. A., & Hilty, L. M. (2015). *System Dynamics vs. Agent-based modeling—Comparing models and approaches: A literature review and a transformation procedure*. 28.
- [2.] Agencija za znanost i visoko obrazovanje. (2020). *Postani student*. <https://www.postani-student.hr/Ucilista/Nositelji.aspx> (15.11.2020.)
- [3.] Agencija za znanost i visoko obrazovanje. (2022). *Broj prijava*. <https://www.studij.hr/statistika> (20.1.2022.)
- [4.] Agnew, N. M., Ford, K. M., & Hayes, P. J. (1994). *10 Expertise In Context: Personally Constructed, Socially Selected and Reality-Relevant?* 23.
- [5.] *AnyLogic*. (2022). AnyLogic: Simulation Modeling Software Tools & Solutions for Business. <https://www.anylogic.com/> (21.9.2022.)
- [6.] Arnold, R. D., & Wade, J. P. (2015). A Definition of Systems Thinking: A Systems Approach. *Procedia Computer Science*, 44, 669–678. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.03.050>
- [7.] Azar, A. (2012). System dynamics as a useful technique for complex systems. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 10, 377–410. <https://doi.org/10.1504/IJISE.2012.046298>
- [8.] Babić, Z. (2011). *Modeli i metode poslovnog odlučivanja*. Ekonomski Fakultet. <https://www.bib.irb.hr/575526>
- [9.] Bahtijarević-Šiber, F. (2014). *Strateški menadžment ljudskih potencijala* (Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu = Manualia Universitatis studiorum Zagrabiensis). Školska knjiga.
- [10.] Bai, R.-H., Dong, W.-Y., Shi, Y., Feng, A.-Z., Xu, A.-D., & Lyu, J. (2020). *Simulation of epidemic trends for a new coronavirus under effective control measures*. 8.
- [11.] Bala, B. K. (1999). Principles of system dynamics: With agricultural, aquacultural, environmental and socio-economic applications. *Principles of System Dynamics: With Agricultural, Aquacultural, Environmental and Socio-Economic Applications*. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19991801070>

- [12.] Bala, B. K., Arshad, F. M., & Noh, K. M. (2017). *System dynamics: Modelling and simulation*. <http://ezproxy.st-andrews.ac.uk/login?url=http://link.springer.com/10.1007/978-981-10-2045-2>
- [13.] Barlas, Y. (1996). Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. *System Dynamics Review*, 12(3), 183–210. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1727\(199623\)12:3<183::AID-SDR103>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1727(199623)12:3<183::AID-SDR103>3.0.CO;2-4)
- [14.] Barlas, Y., & Kanar, K. (2000). Structure-oriented Behavior Tests in Model Validation. *18th International Conference of the System Dynamics Society*, 19.
- [15.] Barrios, M., Guilera, G., Nuño, L., & Gómez-Benito, J. (2021). Consensus in the delphi method: What makes a decision change? *Technological Forecasting and Social Change*, 163, 120484. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120484>
- [16.] Barros, F. J. (1997). Modeling formalisms for dynamic structure systems. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, 7(4), 501–515. <https://doi.org/10.1145/268403.268423>
- [17.] Bass, F. (1969). A New Product Growth for Model Consumer Durables. *Management Science*, 15(5), 215–227.
- [18.] Batrouni, M., Bertaux, A., & Nicolle, C. (2018). Scenario analysis, from BigData to black swan. *Computer Science Review*, 28, 131–139. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2018.02.001>
- [19.] Bauckhage, C., & Kersting, K. (2014). Strong Regularities in Growth and Decline of Popularity of Social Media Services. *ArXiv:1406.6529 [Physics]*. <http://arxiv.org/abs/1406.6529>
- [20.] Berg-Jacobson, A., & Levin, J. (2015). Oklahoma Study of Educator Supply and Demand: Trends and Projections. In *American Institutes for Research*. American Institutes for Research. <https://eric.ed.gov/?id=ED578797>
- [21.] Bonabeau, E. (2002). Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(suppl 3), 7280–7287. <https://doi.org/10.1073/pnas.082080899>
- [22.] Borshchev, A. (2013). *The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with Anylogic 6* (Edition Unstated). AnyLogic North America.

- [23.] Borshchev, A., & Filippov, A. (2004). *From System Dynamics and Discrete Event to Practical Agent Based Modeling: Reasons, Techniques, Tools*. 23.
- [24.] Brailsford, S. C. (2014). Modeling human behavior—An (id)entity crisis? *Proceedings of the Winter Simulation Conference 2014*, 1539–1548.  
<https://doi.org/10.1109/WSC.2014.7020006>
- [25.] Brailsford, S. C., Eldabi, T., Kunc, M., Mustafee, N., & Osorio, A. F. (2019). Hybrid simulation modelling in operational research: A state-of-the-art review. *European Journal of Operational Research*, 278(3), 721–737.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.10.025>
- [26.] Brauers, J., & Weber, M. (1988). A new method of scenario analysis for strategic planning. *Journal of Forecasting*, 7(1), 31–47.  
<https://doi.org/10.1002/for.3980070104>
- [27.] Carson, J. S. (2002). Model verification and validation. *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*, 7.
- [28.] Čerić, V. (1993). *Simulacijsko modeliranje* (Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu = Manualia Universitatis studiorum Zagrabienensis). Školska knjiga.
- [29.] Charania, A. C., Olds, J. R., & DePasquale, D. (2006). Sub-Orbital Space Tourism: Predictions of the Future Marketplace Using Agent-Based Modeling. *57th International Astronautical Congress*. 57th International Astronautical Congress, Valencia, Spain. <https://doi.org/10.2514/6.IAC-06-E3.4.01>
- [30.] Chen, J., Chou, S.-Y., Yu, T. H.-K., Rizqi, Z. U., & Hang, D. T. (2022). System dynamics analysis on the effectiveness of vaccination and social mobilization policies for COVID-19 in the United States. *PLOS ONE*, 17(8), e0268443.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0268443>
- [31.] Chi, M. T. H. (2006). Two Approaches to the Study of Experts' Characteristics. In *The Cambridge handbook of expertise and expert performance* (pp. 21–30). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511816796.002>
- [32.] Cingula, M., & Fabac, R. (2010). Poslovni sustavi i poslovni procesima-modeliranje i reinženjering. *Varaždin: Fakultet Organizacije i Informatike*, [Http://Www. Foi. Hr/CMS\\_library/Studiji/Dodiplomski/IS/Kolegiji/Opr/11\\_Poslovni\\_sustavi\\_i\\_poslovni\\_procesi\\_modeliranje\\_i\\_reinzenjering\\_11. Ppt .](http://www.foi.hr/CMS_library/Studiji/Dodiplomski/IS/Kolegiji/Opr/11_Poslovni_sustavi_i_poslovni_procesi_modeliranje_i_reinzenjering_11.Ppt)

- [33.] Comparison of system dynamics software. (2022). In *Wikipedia*.  
[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Comparison\\_of\\_system\\_dynamics\\_software&oldid=1110939019](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Comparison_of_system_dynamics_software&oldid=1110939019) (18.9.2022.)
- [34.] Cook, M., & Cripps, B. (2009). *Psihološko procenjivanje na radnome mjestu*. Školska knjiga.
- [35.] Dalkey, N., & Helmer, O. (1963). An Experimental Application of the DELPHI Method to the Use of Experts. *Management Science*, 9(3), 458–467.  
<https://doi.org/10.1287/mnsc.9.3.458>
- [36.] de Winter, J. F. C., & Dodou, D. (2019). Five-Point Likert Items: T test versus Mann-Whitney-Wilcoxon (*Addendum added October 2012*). *Practical Assessment, Research, and Evaluation*, 15(1). <https://doi.org/10.7275/bj1p-ts64>
- [37.] Denton, F. T., Feaver, C. H., & Spencer, B. G. (1994). Teachers and the birth rate. *Journal of Population Economics*, 7(3), 307–329.  
<https://doi.org/10.1007/BF00517302>
- [38.] Djanatliev, A., & German, R. (2013). Prospective healthcare decision-making by combined system dynamics, discrete-event and agent-based simulation. *2013 Winter Simulations Conference (WSC)*, 270–281.  
<https://doi.org/10.1109/WSC.2013.6721426>
- [39.] *Django*. (2022). <https://www.djangoproject.com/> (24.10.2022.)
- [40.] Državni zavod za statistiku. (2011). *Osnovne škole kraj šk. G. 2009./2010. I početak šk. G. 2010./2011*. Croatian Bureau of Statistics.  
[https://web.dzs.hr/Hrv\\_Eng/publication/2011/08-01-02\\_01\\_2011.htm](https://web.dzs.hr/Hrv_Eng/publication/2011/08-01-02_01_2011.htm)  
(21.1.2022.)
- [41.] Državni zavod za statistiku. (2012). *Osnovne škole kraj šk. G. 2010./2011. I početak šk. G. 2011./2012*. Croatian Bureau of Statistics.  
[https://web.dzs.hr/Hrv\\_Eng/publication/2012/08-01-02\\_01\\_2012.htm](https://web.dzs.hr/Hrv_Eng/publication/2012/08-01-02_01_2012.htm)  
(21.1.2022.)
- [42.] Državni zavod za statistiku. (2013). *Osnovne škole kraj šk. G. 2011./2012. I početak šk. G. 2012./2013*. [https://web.dzs.hr/Hrv\\_Eng/publication/2013/08-01-02\\_01\\_2013.htm](https://web.dzs.hr/Hrv_Eng/publication/2013/08-01-02_01_2013.htm) (21.1.2022.)

- [43.] Državni zavod za statistiku. (2014). *Osnovne škole kraj šk. G. 2012./2013. I početak šk. G. 2013./2014.* [https://web.dzs.hr/Hrv\\_Eng/publication/2014/08-01-02\\_01\\_2014.htm](https://web.dzs.hr/Hrv_Eng/publication/2014/08-01-02_01_2014.htm) (21.1.2022.)
- [44.] Državni zavod za statistiku. (2015). *Osnovne škole kraj šk. G. 2013./2014. I početak šk. G. 2014./2015.* [https://web.dzs.hr/Hrv\\_Eng/publication/2015/08-01-02\\_01\\_2015.htm](https://web.dzs.hr/Hrv_Eng/publication/2015/08-01-02_01_2015.htm) (21.1.2022.)
- [45.] Državni zavod za statistiku. (2016). *Osnovne škole kraj šk. G. 2014./2015. I početak šk. G. 2015./2016.* [https://web.dzs.hr/Hrv\\_Eng/publication/2016/08-01-02\\_01\\_2016.htm](https://web.dzs.hr/Hrv_Eng/publication/2016/08-01-02_01_2016.htm) (21.1.2022.)
- [46.] Državni zavod za statistiku. (2017). *Osnovne škole kraj šk. G. 2015./2016. I početak šk. G. 2016./2017.* [https://web.dzs.hr/Hrv\\_Eng/publication/2017/08-01-02\\_01\\_2017.htm](https://web.dzs.hr/Hrv_Eng/publication/2017/08-01-02_01_2017.htm) (21.1.2022.)
- [47.] Državni zavod za statistiku. (2018). *Osnovne škole kraj šk. G. 2016./2017. I početak šk. G. 2017./2018.* [https://web.dzs.hr/Hrv\\_Eng/publication/2018/08-01-02\\_01\\_2018.htm](https://web.dzs.hr/Hrv_Eng/publication/2018/08-01-02_01_2018.htm) (21.1.2022.)
- [48.] Državni zavod za statistiku. (2019a). *Osnovne škole kraj šk. G. 2017./2018. I početak šk. G. 2018./2019.* [https://web.dzs.hr/Hrv\\_Eng/publication/2019/08-01-02\\_01\\_2019.htm](https://web.dzs.hr/Hrv_Eng/publication/2019/08-01-02_01_2019.htm) (21.1.2022.)
- [49.] Državni zavod za statistiku. (2019b). *Osnovne škole kraj šk. G. 2017./2018. I početak šk. G. 2018./2019./basic schools end of 2017/2018 school year and beginning of 2018/2019 school year.* [https://www.dzs.hr/Hrv\\_Eng/publication/2019/08-01-02\\_01\\_2019.htm](https://www.dzs.hr/Hrv_Eng/publication/2019/08-01-02_01_2019.htm) (21.1.2022.)
- [50.] Državni zavod za statistiku. (2020). *Osnovne škole kraj šk. G. 2018./2019. I početak šk. G. 2019./2020.* [https://web.dzs.hr/Hrv\\_Eng/publication/2020/08-01-02\\_01\\_2020.htm](https://web.dzs.hr/Hrv_Eng/publication/2020/08-01-02_01_2020.htm) (21.1.2022.)
- [51.] Državni zavod za statistiku. (2021). *Osnovne škole kraj šk. G. 2019./2020. I početak šk. G. 2020./2021.* [https://web.dzs.hr/Hrv\\_Eng/publication/2021/08-01-02\\_01\\_2021.htm](https://web.dzs.hr/Hrv_Eng/publication/2021/08-01-02_01_2021.htm) (21.1.2022.)
- [52.] Državni zavod za statistiku. (2022a). *Prirodno kretanje stanovništva.* Državni zavod za statistiku. <https://podaci.dzs.hr/media/meehkts/msi-stanovnistvo.xlsx> (1.11.2022.)

- [53.] Državni zavod za statistiku. (2022b). *Procjena stanovništva*. Državni zavod za statistiku. <https://podaci.dzs.hr/media/vb1ae2vm/procjene-stanovnistva.xlsx> (1.11.2022.)
- [54.] Edwards, C., Edwards, A., Qing, Q., & Wahl, S. T. (2007). The Influence of Computer-Mediated Word-of-Mouth Communication on Student Perceptions of Instructors and Attitudes Toward Learning Course Content. *Communication Education*, 56(3), 255–277. <https://doi.org/10.1080/03634520701236866>
- [55.] Einhorn, H. J. (1974). Expert judgment: Some necessary conditions and an example. *Journal of Applied Psychology*, 59, 562–571. <https://doi.org/10.1037/h0037164>
- [56.] Eliman, A. A. (1991). A decision support system for Univeristy admission policies. *European Journal of Operational Research*, 50(2), 140–156. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(91\)90237-P](https://doi.org/10.1016/0377-2217(91)90237-P)
- [57.] Ericsson, K. A., Charness, N., Feltovich, P. J., & Hoffman, R. R. (Eds.). (2006). *The Cambridge handbook of expertise and expert performance* (pp. xv, 901). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511816796>
- [58.] *Euler's Method*. (2022). Lamar University. <https://tutorial.math.lamar.edu/classes/de/eulersmethod.aspx> (17.1.2022.)
- [59.] European Education and Culture Executive Agency. (2022). *The structure of the European education systems 2022/2023: Schematic diagrams*. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2797/21002>
- [60.] Eurydice. (2015). *Nastavnička struka u Europi: Praksa, percepcija i politike*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2797/323773>
- [61.] Eurydice. (2020a). *Structural indicators for monitoring education and training systems in Europe 2020: Overview of major reforms since 2015*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2797/659558>
- [62.] *Eurydice*. (2020b). Eurydice - European Commission. [https://eacea.ec.europa.eu/national-policies/eurydice/index\\_en.php\\_en](https://eacea.ec.europa.eu/national-policies/eurydice/index_en.php_en) (13.11.2022.)



- [63.] Faculty of Teacher Education, University of Zagreb. (2022). *Učiteljski fakultet Sveučilišta u Zagrebu | Mrežne stranice Učiteljskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu*. <https://www.ufzg.unizg.hr/> (27.2.2022.)
- [64.] Faham, E., Rezvanfar, A., Movahed Mohammadi, S. H., & Rajabi Nohooji, M. (2017). Using system dynamics to develop education for sustainable development in higher education with the emphasis on the sustainability competencies of students. *Technological Forecasting and Social Change*, 123, 307–326. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.03.023>
- [65.] Feurer, M., & Hutter, F. (2019). Hyperparameter Optimization. In F. Hutter, L. Kotthoff, & J. Vanschoren (Eds.), *Automated Machine Learning: Methods, Systems, Challenges* (pp. 3–33). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-05318-5\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-05318-5_1)
- [66.] Fisch, K. (2007, June 22). The Fischbowl: Did You Know? 2.0. *The Fischbowl*. <http://thefischbowl.blogspot.com/2007/06/did-you-know-20.html> (5.9.2019.)
- [67.] Flynn, T., Yuan Tian, Masnick, K., McDonnell, G., Huynh, E., Mair, A., & Osgood, N. (2014). Discrete choice, agent based and system dynamics simulation of health profession career paths. *Proceedings of the Winter Simulation Conference 2014*, 1700–1711. <https://doi.org/10.1109/WSC.2014.7020020>
- [68.] Ford, A., & Flynn, H. (2005). Statistical screening of system dynamics models. *System Dynamics Review*, 21(4), 273–303. <https://doi.org/10.1002/sdr.322>
- [69.] Forrester, J. W. (1961). *Industrial dynamics*. M.I.T. Press.
- [70.] Forrester, J. W., & Senge, P. M. (1980). *Test for building confidence in system dynamics models—Rather, confidence in a system dynamics—StudeerSnel*. <https://www.studeersnel.nl/nl/document/technische-universiteit-delft/systeemdynamica/test-for-building-confidence-in-system-dynamics-models/9406278>
- [71.] Fraenkel, J. R., Wallen, N. E., & Hyun, H. H. (2012). *How to design and evaluate research in education* (8th ed). McGraw-Hill Humanities/Social Sciences/Languages.

- [72.] Galbraith, P. L. (1998). System dynamics and university management. *System Dynamics Review*, 14(1), 69–84. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1727\(199821\)14:1<69::AID-SDR139>3.0.CO;2-T](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1727(199821)14:1<69::AID-SDR139>3.0.CO;2-T)
- [73.] *Google obrasci*. (2022). <https://www.facebook.com/GoogleDocs/> (24.10.2022.)
- [74.] Griffin, A. F., & Stanish, C. (2007). An Agent-based Model of Prehistoric Settlement Patterns and Political Consolidation in the Lake Titicaca Basin of Peru and Bolivia. *Structure and Dynamics*, 2(2). <https://doi.org/10.5070/SD922003290>
- [75.] Grigoryev, I. (2016). *AnyLogic 7 in three days: A quick course in simulation modeling* (Treće izdanje).
- [76.] Guilford, J. P. (1973). *Fundamental statistics in psychology and education* (5th edition). McGraw-Hill.
- [77.] Gunashekar, S., Flanagan, I., d'Angelo, C., Motsi-Omoijade, I. D., Virdee, M., Feijao, C., & Porter, S. (2022). *Using Quantum Computers and Simulators in the Life Sciences: Current Trends and Future Prospects*. RAND Corporation. [https://www.rand.org/pubs/research\\_reports/RRA1899-1.html](https://www.rand.org/pubs/research_reports/RRA1899-1.html)
- [78.] Hallak, L. A., Ayoubi, R. M., Moscardini, A., & Loutfi, M. (2019). A system dynamic model of student enrolment at the private higher education sector in Syria. *Studies in Higher Education*, 44(4), 663–682. <https://doi.org/10.1080/03075079.2017.1393061>
- [79.] Haramija, P. (2007). Marketing usmenom predajom: Fenomen i mogućnosti. *Bogoslovska smotra*, 77(4), 881–900.
- [80.] Hekimoğlu, M., & Barlas, Y. (2016). Sensitivity analysis for models with multiple behavior modes: A method based on behavior pattern measures. *System Dynamics Review*, 32(3–4), 332–362. <https://doi.org/10.1002/sdr.1568>
- [81.] Helbing, D., & Baliatti, S. (2015). How to Do Agent-Based Simulations in the Future: From Modeling Social Mechanisms to Emergent Phenomena and Interactive Systems Design. *Technical Report 11-06-024*.
- [82.] Herman, K., & Wiener, A. J. (1967). *The Year 2000: A Framework for Speculation on the Next Thirty-Three Years*.
- [83.] Hodgson, Q. E., Chan, E. W., Bodine-Baron, E., Boling, B., Boudreaux, B., Lilly, B., & Lohn, A. J. (2022). *Securing U.S. Elections: A Method for*

- Prioritizing Cybersecurity Risk in Election Infrastructure*. RAND Corporation.  
[https://www.rand.org/pubs/research\\_reports/RRA512-1.html](https://www.rand.org/pubs/research_reports/RRA512-1.html)
- [84.] Hofman, J., Doyle, J., Haider, A., & Bruckmayer, M. (2022). Skills Needs in Selected Occupations Over the Next 5–10 Years: Research Report. *Gov.Uk Website (2022)*.  
[https://www.rand.org/pubs/external\\_publications/EP68984.html](https://www.rand.org/pubs/external_publications/EP68984.html)
- [85.] Holanda, G. M., Gerolamo, G. P. B., Franco, J. H. A., Martins, R. B., & Bazzan, A. L. C. (2003). *Modelling the Bass Diffusion Process Using an Agent-Based Approach*. 6.
- [86.] Hrvatski zavod za zapošljavanje. (2020). *Preporuke za obrazovnu upisnu politiku i politiku stipendiranja*. <https://publikacije.hzz.hr/media/7706/hzz-preporuke-za-obrazovnu-upisnu-politiku-i-politiku-stipendiranja-1220.pdf> (5.10.2021.)
- [87.] Hrvatski zavod za zapošljavanje. (2022a). *Statistika On-Line—Izlasci iz evidencije*. <https://statistika.hzz.hr/Statistika.aspx?tiplzvjestaja=3> (22.1.2022.)
- [88.] Hrvatski zavod za zapošljavanje. (2022b). *Statistika On-Line—Registrirana nezaposlenost*. <https://statistika.hzz.hr/Statistika.aspx?tiplzvjestaja=1> (13.11.2022.)
- [89.] Hrvatski zavod za zapošljavanje. (2022c). *Statistika On-Line—Ulasci u evidenciju*. <https://statistika.hzz.hr/Statistika.aspx?tiplzvjestaja=2> (13.11.2022.)
- [90.] Hsia, P., Samuel, J., Gao, J., Kung, D., Toyoshima, Y., & Chen, C. (1994). Formal approach to scenario analysis. *IEEE Software*, 11(2), 33–41.  
<https://doi.org/10.1109/52.268953>
- [91.] Hussler, C., Muller, P., & Rondé, P. (2011). Is diversity in Delphi panelist groups useful? Evidence from a French forecasting exercise on the future of nuclear energy. *Technological Forecasting and Social Change*, 78(9), 1642–1653. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2011.07.008>
- [92.] IEEE Guide for Developing Software Life Cycle Processes. (1996). *IEEE Std 1074.1-1995*, 1–64. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.1996.81030>
- [93.] Ingersoll, R., Merrill, L., & Stuckey, D. (2014). *Seven Trends: The Transformation of the Teaching Force: (579212012-001)* [dataset]. American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/e579212012-001>

- [94.] IPBES. (2020, March 25). *Scenario methodologies*.  
<https://www.ipbes.net/scenarios-models/what/scenario-methodologies>  
 (22.8.2023.)
- [95.] Iqbal, M., Suthar, B., Chauhan, R., & Patriani, Y. (2020). Sensitivity Analysis: Effect of the Change in the Data. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 29, 528–531.
- [96.] Ishikawa, T., Ohba, H., Yokooka, Y., Nakamura, K., & Ogasawara, K. (2013). Forecasting the absolute and relative shortage of physicians in Japan using a system dynamics model approach. *Human Resources for Health*, 11, 41.  
<https://doi.org/10.1186/1478-4491-11-41>
- [97.] Jia, S., Li, Y., & Fang, T. (2022). System dynamics analysis of COVID-19 prevention and control strategies. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(3), 3944–3957. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15902-2>
- [98.] Jo, H., Lee, H., Suh, Y., Kim, J., & Park, Y. (2015). A dynamic feasibility analysis of public investment projects: An integrated approach using system dynamics and agent-based modeling. *International Journal of Project Management*, 33(8), 1863–1876.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2015.07.002>
- [99.] Kaurinović, T. (2022). *Razvoj web aplikacije korištenjem okvira Django i biblioteke HTMX*. 31.
- [100.] Kennedy, M. (2011). A Review of System Dynamics Models of Educational Policy Issues. *Proc. 29th System Dynamics Conference, Washington, USA.*, 24.
- [101.] Kerr, C. C., Stuart, R. M., Mistry, D., Abey Suriya, R. G., Rosenfeld, K., Hart, G. R., Núñez, R. C., Cohen, J. A., Selvaraj, P., Hagedorn, B., George, L., Jastrzębski, M., Izzo, A., Fowler, G., Palmer, A., Delport, D., Scott, N., Kelly, S., Bennette, C. S., ... Klein, D. J. (2021). *Covasim: An agent-based model of COVID-19 dynamics and interventions* (p. 2020.05.10.20097469). medRxiv.  
<https://doi.org/10.1101/2020.05.10.20097469>
- [102.] Kosow, H., & Gaßner, R. (2008). *Methods of Future and Scenario Analysis: Overview, Assessment, and Selection Criteria* (Vol. 39). Deutsches Institut für Entwicklungspolitik gGmbH.

- [103.] Kulkarni, V. (2018). An Approach to Develop a System Dynamics Model for Education Effectiveness Evaluation. *Global Journal of HUMAN-SOCIAL SCIENCE: G Linguistics & Education*, 18(4), 7.
- [104.] Kunc, M. (2019). Strategic Planning: The Role of Hybrid Modelling. *2019 Winter Simulation Conference (WSC)*, 1280–1291.  
<https://doi.org/10.1109/WSC40007.2019.9004881>
- [105.] Kwon, H., Lyu, B., Tak, K., Lee, J., Cho, J. H., & Moon, I. (2016). Optimization of naphtha purchase price using a price prediction model. *Computers and Chemical Engineering*, 84, 226–236.  
<https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2015.08.012>
- [106.] Larson, R., & Gomez Diaz, M. (2012). Nonfixed Retirement Age for University Professors: Modeling Its Effects on New Faculty Hires. *Service Science*, 4, 69–78. <https://doi.org/10.1287/serv.1120.0006>
- [107.] Lättilä, L., Hilletoft, P., & Lin, B. (2010). Hybrid simulation models – When, Why, How? *Expert Systems with Applications*, 37(12), 7969–7975.  
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.04.039>
- [108.] Łatuszyńska, M. (2020). Hybrid System Dynamics—Agent-Based Simulation for Research in Economics and Business. *Springer Proceedings in Business and Economics*, 229–248.
- [109.] Laubenbacher, R., Jarrah, A. S., Mortveit, H., & Ravi, S. S. (2007). *A mathematical formalism for agent-based modeling* (arXiv:0801.0249). arXiv.  
<https://doi.org/10.48550/arXiv.0801.0249>
- [110.] Law, A. M. (2013). *Simulation modeling and analysis* (Fifth edition). McGraw-Hill Education.
- [111.] Law, A. M., Kelton, W. D., & Kelton, W. D. (2007). *Simulation modeling and analysis* (Vol. 3). McGraw-hill New York.
- [112.] Lee, M., & Youn, S. (2009). Electronic word of mouth (eWOM). *International Journal of Advertising*, 28(3), 473–499.  
<https://doi.org/10.2501/S0265048709200709>
- [113.] Lemke, J., & Łatuszyńska, M. (2013). Validation of System Dynamics Models – a Case Study. *Journal of Entrepreneurship, Management and Innovation*, 9(2), Article 2. <https://doi.org/10.7341/2013923>

- [114.] Lewe, J.-H., Hivin, L. F., & Mavris, D. N. (2014). A multi-paradigm approach to system dynamics modeling of intercity transportation. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 71(C), 188–202.
- [115.] Linstone, H., & Turoff, M. (1975). The Delphi Method: Techniques and Applications. In *Technometrics* (Vol. 18). <https://doi.org/10.2307/3150755>
- [116.] List of discrete event simulation software. (2022). In *Wikipedia*. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=List\\_of\\_discrete\\_event\\_simulation\\_software&oldid=1099596695](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=List_of_discrete_event_simulation_software&oldid=1099596695) (22.9.2022.)
- [117.] Macal, C. M., & North, M. J. (2009). Agent-based modeling and simulation. *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (WCS)*, 86–98.
- [118.] Macal, C. M., & North, M. J. (2010). Tutorial on agent-based modelling and simulation. *Journal of Simulation*, 4(3), 151–162. <https://doi.org/10.1057/jos.2010.3>
- [119.] Macal, C., & North, M. (2009). *Agent-based modeling and simulation*. 86–99. <https://doi.org/10.1109/WSC.2009.5429318>
- [120.] Maidstone, R. (2012). *Discrete Event Simulation, System Dynamics and Agent Based Simulation: Discussion and Comparison*. 1–6.
- [121.] Malleson, N., Heppenstall, A. J., See, L., & Evans, A. (2013). Using an Agent-Based Crime Simulation to Predict the Effects of Urban Regeneration on Individual Household Burglary Risk. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 40, 405–426. <https://doi.org/10.1068/b38057>
- [122.] Marković, M. G., Jakupović, A., & Kovačić, B. (2014). A prevalence trend of characteristics of intelligent and adaptive hypermedia e-learning systems. *WSEAS Transactions on Advances in Engineering Education*, 11, 80–101.
- [123.] Mathis, R. L., & Jackson, J. H. (2011). *Human resource management* (13th ed). Thomson/South-western.
- [124.] Mauksch, S., von der Gracht, H. A., & Gordon, T. J. (2020). Who is an expert for foresight? A review of identification methods. *Technological Forecasting and Social Change*, 154, 119982. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.119982>
- [125.] Mendes, J. P., & Aleluia, M. (2019). Aging effects in public policy making. *System Dynamics Review*, 35(3), 232–254. <https://doi.org/10.1002/sdr.1639>

- [126.] Merkulov, N., Nezamoddini, N., & Sabounchi, N. (2015). *Modeling Graduate Education Management System Using System Dynamics Approach*.
- [127.] *Microsoft Excel*. (2022). Microsoft Store. <https://www.microsoft.com/hr-hr/microsoft-365/p/excel/cfq7ttc0hr4r> (24.10.2022.)
- [128.] Mishra, S., & Sharma, R. C. (Eds.). (2005). *Interactive multimedia in education and training*. Idea Group Pub.
- [129.] Mital, P. (2015). *A modeling framework for analyzing the education system as a complex system*. Georgia Institute of Technology.
- [130.] Mohantyl, S. (2002). Sensitivity analysis methods for identifying influential parameters in a problem with a large number of random variables. *Risk Analysis III*.
- [131.] Moizer, J. D., Arthur, D., & Moffatt, I. (2001). *A Formal but Non-Automated Method to Test the Sensitivity of System Dynamics Models*.
- [132.] Montgomery, S. L. (Ed.). (1994). *Object-Oriented Information Engineering: Analysis, Design, and Implementation*. Academic Press.
- [133.] Moran, M. (2018). *Cronbach's Alpha*. Statistics Solutions. <https://www.statisticssolutions.com/cronbachs-alpha/> (22.2.2023.)
- [134.] Nacionalni centar za vanjsko vrednovanje. (2020). *Provedeni ispiti*. NCVVO. <https://www.ncvvo.hr/kategorija/drzavna-matura/provedeni-ispiti/> (23.1.2022.)
- [135.] NN 93/2010. (2010). *Uredba o praćenju, analizi i predviđanju potreba tržišta rada za pojedinim zvanjima te izradi i uzimanju u obzir preporuka za obrazovnu upisnu politiku*. [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2010\\_07\\_93\\_2600.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2010_07_93_2600.html) (5.10.2020.)
- [136.] NN 119/2022. (2022). *Zakon o visokom obrazovanju i znanstvenoj djelatnosti*. [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2022\\_10\\_119\\_1834.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2022_10_119_1834.html) (22.8.2023.)
- [137.] Nusir, S., Alsmadi, I., Al-Kabi, M., & Sharadgah, F. (2012). *Studying the impact of using multimedia interactive programs at children ability to learn basic math skills*. 5(2), 16.
- [138.] Ogano, N. O. (2017). A system dynamics approach to managing project risks in the electricity industry in sub saharan africa. *University of Pretoria*, 367.

- [139.] Ostojic, I. (2010). *Bass innovation diffusion model and its application in policy analysis for adoption of renewable energy technologies*. 24.
- [140.] Ouyang, M. (2014). Review on modeling and simulation of interdependent critical infrastructure systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 121, 43–60. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.06.040>
- [141.] Parker, J., & Epstein, J. M. (2011). A Distributed Platform for Global-Scale Agent-Based Models of Disease Transmission. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation: A Publication of the Association for Computing Machinery*, 22(1), 2. <https://doi.org/10.1145/2043635.2043637>
- [142.] Paul, C., Glenn, R. W., Grill, B., McKernan, M., Raymond, B., Stafford, M., & Trujillo, H. R. (2008). Identifying Urban Flashpoints: A Delphi-Derived Model for Scoring Cities' Vulnerability to Large-Scale Unrest. *Studies in Conflict and Terrorism*. [https://www.rand.org/pubs/external\\_publications/EP20080007.html](https://www.rand.org/pubs/external_publications/EP20080007.html)
- [143.] Pavlov, O. V., & Katsamakas, E. (2020). *Will Colleges Survive the Storm of Declining Enrollments? A Computational Model* (SSRN Scholarly Paper 3841287). Social Science Research Network. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3841287>
- [144.] Peadamallu, C. S., Ozdamar, L., Ganesh, L. S., Weber, G.-W., & Kropat, E. (2010). A System Dynamics Model for Improving Primary Education Enrollment in a Developing Country. *Organizacija*, 43, 90–101. <https://doi.org/10.2478/v10051-010-0010-5>
- [145.] Perelman, L. (1980). Time in system dynamics. *TIMS Studies in Management Sciences*, 14, 75–89.
- [146.] Petz, B. (1997). *Osnovne Statisticke Metode Za Nematematicare* (V). Naklada Slap. <https://www.scribd.com/document/392600111/Osnovne-Statisticke-Metode-Za-Nematematicare-Petz-pdf-pdf>
- [147.] Picton, P. (2001). *Neural Networks*. Palgrave Macmillan.
- [148.] Pidd, M. (2004). *Computer Simulation in Management Science* (5th; Issue 5th). John Wiley and Sons Ltd. <https://eprints.lancs.ac.uk/id/eprint/47721/>
- [149.] *Planiranje ljudskih potencijala u sustavu odgoja i obrazovanja Republike Hrvatske*. (2022). <https://nereides.group.miletic.net/>



- [150.] Poindexter, S., & Orr, C. (2001). The impact of interactive multimedia on knowledge learning: Quantitative evidence. *Journal of Informatics Education and Research*, 3.
- [151.] Portillo-Villasana, G. de J., Huerta-Barrientos, A., & Dillarza Andrade, Y. (2017). Effectiveness of Physical Barriers Installation for Prevention of Incidents in Mexico City's Subway System. *Journal of Industrial Engineering*, 2017, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2017/8125430>
- [152.] Rachmadtullah, R., Zulela, M. S., & Sumantri, M. S. (2019). Computer-based interactive multimedia: A study on the effectiveness of integrative thematic learning in elementary schools. *Journal of Physics: Conference Series*, 1175, 012028. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1175/1/012028>
- [153.] Rangunath, P., Velmourougan, S., Davachelvan, P., Kayalvizhi, S., & Ravimohan, R. (2010). *Evolving A New Model (SDLC Model-2010) For Software Development Life Cycle (SDLC)*.
- [154.] Rahmandad, H., & Sterman, J. (2008). Heterogeneity and Network Structure in the Dynamics of Diffusion: Comparing Agent-Based and Differential Equation Models. *Management Science*, 54(5), 998–1014. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1070.0787>
- [155.] Razavi, S., Jakeman, A., Saltelli, A., Prieur, C., Iooss, B., Borgonovo, E., Plischke, E., Lo Piano, S., Iwanaga, T., Becker, W., Tarantola, S., Guillaume, J. H. A., Jakeman, J., Gupta, H., Melillo, N., Rabitti, G., Chabridon, V., Duan, Q., Sun, X., ... Maier, H. R. (2021). The Future of Sensitivity Analysis: An essential discipline for systems modeling and policy support. *Environmental Modelling & Software*, 137, 104954. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104954>
- [156.] Rebore, R. W. (2001). *Human Resources Administration in Education: A Management Approach. Sixth Edition*. Allyn & Bacon, A Pearson Education Company, 75 Arlington Street, Boston, MA 02116 (\$90).
- [157.] Reichardt, R., Klute, M., Stewart, J., & Meyer, S. (2020). *An Approach to Using Student and Teacher Data to Understand and Predict Teacher Shortages*. 37.

- [158.] Relić, D. (2021). *Razvoj modela za planiranje specijalističkoga usavršavanja doktora medicine u Republici Hrvatskoj* [Info:eu-repo/semantics/doctoralThesis, University of Zagreb. School of Medicine]. <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:105:535797>
- [159.] Relić, D., & Božikov, J. (2020). Application of a system dynamics model in forecasting the supply and age distribution of physicians. *Croatian Medical Journal*, 61(2), 100–106. <https://doi.org/10.3325/cmj.2020.61.100>
- [160.] Ringland, G. (2014). *Scenario Planning* (Revised edition). The Choir Press.
- [161.] *Runge-Kutta Methods*. (2022). Massachusetts Institute of Technology. [https://web.mit.edu/10.001/Web/Course\\_Notes/Differential\\_Equations\\_Notes/node5.html](https://web.mit.edu/10.001/Web/Course_Notes/Differential_Equations_Notes/node5.html) (17.1.2022.)
- [162.] Saeed, K. (2008). Trend Forecasting for Stability in Supply Chain. *Journal of Business Research*, 61, 1113–1124. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2007.11.005>
- [163.] Sahin, O., Siems, R., Stewart, R., & Porter, M. (2014). Paradigm Shift to Enhanced Water Supply Planning Through Augmented Grids, Scarcity Pricing and Adaptive Factory Water: A System Dynamics Approach. *Environmental Modelling & Software*, 75. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.05.018>
- [164.] Salmon, A., Rachuba, S., Briscoe, S., & Pitt, M. (2018). A structured literature review of simulation modelling applied to Emergency Departments: Current patterns and emerging trends. *Operations Research for Health Care*, 19, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.orhc.2018.01.001>
- [165.] Saraji, M. K., & Sharifabadi, A. M. (2017). *Application of System Dynamics in Forecasting: A Systematic Review*. 4(12).
- [166.] Sargent, R. G. (2011). *Verification and validation of simulation models*. 16.
- [167.] *Scenario Modeling*. (2023). Causal. <https://www.causal.app/define/scenario-modeling> (22.8.2023.)
- [168.] Schwaninger, M., & Groesser, S. (2016). *System Dynamics Modeling: Validation for Quality Assurance* (pp. 1–20). [https://doi.org/10.1007/978-3-642-27737-5\\_540-3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-27737-5_540-3)
- [169.] Seber, G. A. F., & Lee, A. J. (2012). *Linear Regression Analysis*. John Wiley & Sons.

- [170.] Senge, P. M. (1990). *The fifth discipline: The art and practice of the learning organization* (Vol. 1). New York: Doubleday/Currency.
- [171.] ŠeR - Školski e-Rudnik. (2022). Mzo.Gov.Hr. <https://mzo.gov.hr/istaknute teme/ser-skolski-e-rudnik-3419/3419> (4.3.2023.)
- [172.] Shattock, A. J., Le Rutte, E. A., Dünner, R. P., Sen, S., Kelly, S. L., Chitnis, N., & Penny, M. A. (2022). Impact of vaccination and non-pharmaceutical interventions on SARS-CoV-2 dynamics in Switzerland. *Epidemics*, 38, 100535. <https://doi.org/10.1016/j.epidem.2021.100535>
- [173.] Shearer, A. L., Bromley, E., Bonds, C., Draxler, C., & Khodyakov, D. (2021). Improving Mental Health Guardianship: From Prevention to Treatment. *Psychiatric Services* (2021). Doi: 10.1176/Appi.Ps.202100020. [https://www.rand.org/pubs/external\\_publications/EP68782.html](https://www.rand.org/pubs/external_publications/EP68782.html)
- [174.] Shi, J., Mo, X., & Sun, Z. (2012). Content validity index in scale development. *Zhong nan da xue xue bao Yi xue ban = Journal of Central South University. Medical sciences*, 37(2), 152–155. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-7347.2012.02.007>
- [175.] Siebers, P. O., Macal, C. M., Garnett, J., Buxton, D., & Pidd, M. (2010). Discrete-event simulation is dead, long live agent-based simulation! *Journal of Simulation*, 4(3), 204–210. <https://doi.org/10.1057/jos.2010.14>
- [176.] Skarin, B., Skorinko, J., Saeed, K., & Pavlov, O. V. (2009). Modeling the Cycles of Gang and Criminal Behavior. *27th International Conference of the System Dynamics Society*, 19.
- [177.] Središnji prijavni ured | Studij.hr. (2022). <https://www.studij.hr/> (4.3.2023.)
- [178.] Staničić, S. (2006). *Upravljanje ljudskim potencijalom u školstvu*. 8.
- [179.] Sterman, J. (2000). Business Dynamics, System Thinking and Modeling for a Complex World. [Http://Lst-liep.liep-Unesco.Org/Cgi-Bin/Wwwi32.Exe/\[In=epidoc1.in\]/?T2000=013598/\(100\)](Http://Lst-liep.liep-Unesco.Org/Cgi-Bin/Wwwi32.Exe/[In=epidoc1.in]/?T2000=013598/(100)), 19.
- [180.] Sterman, J. (2001). System Dynamics Modeling: Tools for Learning in a Complex World. *California Management Review*, 43(4), 8–25. <https://doi.org/10.2307/41166098>
- [181.] Sterman, J. (2002). Business Dynamics—Systems Thinking and Modeling for a Complex World. *Journal of the Operational Research Society*, 53(4).

- [182.] Strauss, L. M., & Borenstein, D. (2015). A system dynamics model for long-term planning of the undergraduate education in Brazil. *Higher Education*, 69(3), 375–397. <https://doi.org/10.1007/s10734-014-9781-6>
- [183.] *System Dynamics Society*. (2022). System Dynamics Society. <https://systemdynamics.org/what-is-system-dynamics/> (20.11.2022.)
- [184.] Tang, W., & Jia, M. (2014). Global Sensitivity Analysis of a Large Agent-Based Model of Spatial Opinion Exchange: A Heterogeneous Multi-GPU Acceleration Approach. *Annals of the Association of American Geographers*, 104(3), 485–509. <https://doi.org/10.1080/00045608.2014.892342>
- [185.] *TIBCO Statistica*®. (2022). TIBCO Software Inc. <https://docs.tibco.com/products/tibco-statistica-13-5-0> (24.10.2022.)
- [186.] Valacich, J., & Schneider, C. (2017). *Information Systems Today: Managing in the Digital World* (8th ed.). Pearson.
- [187.] Van Dyke Parunak, H., Savit, R., & Riolo, R. L. (1998). Agent-Based Modeling vs. Equation-Based Modeling: A Case Study and Users' Guide. In J. S. Sichman, R. Conte, & N. Gilbert (Eds.), *Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation* (Vol. 1534, pp. 10–25). Springer Berlin Heidelberg.
- [188.] Wang, B., Brême, S., & Moon, Y. B. (2014). Hybrid modeling and simulation for complementing Lifecycle Assessment. *Computers & Industrial Engineering*, 69, 77–88. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.12.016>
- [189.] Weisstein, E. W. (2022). *Triangular Distribution* [Text]. Wolfram Research, Inc. <https://mathworld.wolfram.com/TriangularDistribution.html>
- [190.] Wiana, W. (2018). The Effectiveness of Using Interactive Multimedia in Improving the Concept of Fashion Design and Its Application in The Making of Digital Fashion Design. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 306, 012131. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/306/1/012131>
- [191.] Zeigler, B. P., Kim, T. G., & Praehofer, H. (2000). *Theory of Modeling and Simulation*. Academic Press.
- [192.] Zovko, V., Šimović, V., & Ančić, D. (2006). Financijski problem modeliranja uz Vensim; primjer sustavne dinamike. *InterSymp-2006 4th Catallactics: Quantitative and Behavioural Modelling of Human Market Interactions*, 1(1), 74–82.

## Popis slika

Slika 1. Klasifikacija modela .....	7
Slika 2. Ciklus simulacijskog modeliranja .....	8
Slika 3. Razina apstrakcije pojedinih područja (Grigoryev, 2016).....	9
Slika 4. Metoda simulacije obzirom na razinu apstrakcije (Grigoryev, 2016) .....	9
Slika 5. Linearan i nelinearan pristup (Sterman, 2000) .....	11
Slika 6. Dijagram uzročnih petlji.....	12
Slika 7. Dijagram zaliha i protoka .....	15
Slika 8. Paralelni razvoj kombiniranja modela .....	19
Slika 9. Mogućnosti sekvencijalnog razvoja kombiniranja modela.....	20
Slika 10. Ugrađeni razvoj spajanja modela.....	20
Slika 11. Koordinirani razvoj spajanja modela. ....	21
Slika 12. Proces modeliranja prema Sargentu (2011) .....	28
Slika 13. Shematski prikaz modela s obzirom na SD i ABM .....	40
Slika 14. Faze razvoja modela.....	41
Slika 15. Životni ciklus razvoja sustava u odnosu na faze razvoja modela .....	42
Slika 16. CLD dijagram modela u sustavu odgoja i obrazovanja .....	45
Slika 17. Dijagram zaliha i protoka modela sustava odgoja i obrazovanja.....	48
Slika 18. Distribucija trokutaste funkcije (14) .....	51
Slika 19. Shematski prikaz modela razredne nastave .....	58
Slika 20. Model <i>Učitelj</i> .....	59
Slika 21. Dijagram zaliha i protoka 1.dijela modela <i>Učitelj</i> .....	60
Slika 22. Grafički prikaz dinamičke varijable <i>Udio_Rođenih</i> .....	61
Slika 23. Grafički prikaz dinamičke varijable <i>Udio_Umrlih</i> .....	62
Slika 24. Dijagram zaliha i protoka 2.dijela modela <i>Učitelj</i> .....	63
Slika 25. Dijagram zaliha i protoka 3. dijela modela <i>Učitelj</i> .....	66
Slika 26. Model <i>Učiteljski Fakultet</i> .....	68
Slika 27. Grafički prikaz varijable <i>Novi_Maturanti</i> .....	69
Slika 28. Grafički prikaz dinamičke varijable <i>populacija</i> .....	70
Slika 29. Dio modela uz dinamičku varijablu <i>Usmena_Predaja</i> .....	70
Slika 30. Dio modela uz dinamičku varijablu <i>Atraktivnost_Studija</i> .....	72
Slika 31. Grafikoni na stranici <i>Naslovnica</i> .....	89
Slika 32. Grafički prikazi Scenarija A. ....	90
Slika 33. Grafički prikaz Scenarija B.....	90
Slika 34. Prezentacija Scenarija 3. modela <i>Učitelj</i> .....	91
Slika 35. Prikaz interaktivnog mijenjanja elemenata modela u vremenu .....	92

Slika 36. Usporedba realnih i podataka dobivenih modelom <i>Učiteljski Fakultet</i> .....	92
Slika 37. Projekcija varijable <i>Populacija RH</i> do 2025.g. ....	103
Slika 38. Projekcija varijable <i>Maturanti</i> do 2025.g. ....	103
Slika 39. Projekcija varijable <i>Upisi na učiteljske fakultete</i> do 2025.g. ....	104
Slika 40. Projekcija varijable <i>Studenti učiteljskih fakulteta</i> do 2025.g. ....	104
Slika 41. Projekcija varijable <i>Broj učitelja razredne nastave</i> do 2025.g. ....	105
Slika 42. Nepredvidivost uzroka odstupanju stvarnih i modeliranih podataka.....	105
Slika 43. Grafičko korisničko sučelje programa AnyLogic.....	144
Slika 44. <i>Project</i> izbornik primjera modela u programu AnyLogic.....	145

## Popis tablica

Tablica 1. Svojstva kompleksnog sustava.....	5
Tablica 2. Alati za simulacijsko modeliranje.....	25
Tablica 3. Verifikacija modela kroz testiranje strukture.....	31
Tablica 4. Verifikacija modela kroz testiranje ponašanja.....	32
Tablica 5. Verifikacija modela kroz testiranje implikacija na politike.....	32
Tablica 6. Ljestvica koeficijenta determinacije.....	54
Tablica 7. Elementi prvog dijela modela <i>Učitelj</i> .....	64
Tablica 8. Fakulteti u R. Hrvatskoj s programima za učitelje razredne nastave.....	67
Tablica 9. Elementi drugog dijela modela <i>Učitelj</i> .....	68
Tablica 10. Elementi trećeg dijela model <i>Učitelj</i> .....	71
Tablica 11. Stav o studiju za učitelja razredne nastave .....	75
Tablica 12. Elementi modela <i>Učiteljski Fakultet</i> .....	77
Tablica 13. Analiza osjetljivosti modela <i>Učitelj</i> .....	81
Tablica 14. Analiza osjetljivosti modela <i>Učiteljski Fakultet</i> .....	82
Tablica 15. Usporedba vrijednosti varijable <i>Populacija RH</i> .....	83
Tablica 16. Usporedba vrijednosti varijable <i>Maturanti</i> .....	83
Tablica 17. Usporedba vrijednosti varijable <i>Upisi</i> na učiteljske fakultete.....	84
Tablica 18. Usporedba vrijednosti varijable <i>Studenti</i> učiteljskih fakulteta.....	84
Tablica 19. Usporedba vrijednosti varijable <i>Učitelj</i> razredne nastave.....	84
Tablica 20. Pogreška pri odabiru podataka za razvoj modela 2010.- 2019. g.....	85
Tablica 21. Usporedba vrijednosti varijable <i>Ukupne prijave na UFZG</i> .....	86
Tablica 22. Usporedba vrijednosti varijable <i>Broj studenata</i> na UFZG.....	86
Tablica 23. Detalji Scenarija 1.-4. modela <i>Učitelj</i> .....	90
Tablica 24. Detalji Scenarija 1.-4. modela <i>Učiteljski Fakultet</i> .....	91
Tablica 25. Anketna pitanja prvog dijela ankete.....	98
Tablica 26. Dio ankete vezan za sustavsku dinamiku.....	99
Tablica 27. Dio ankete vezan za modele i scenarije.....	100
Tablica 28. Dio ankete vezan za web aplikaciju.....	101
Tablica 29. Dio ankete vezan uz dodatna istraživanja.....	101
Tablica 30. Broj ispitanika po sveučilištu.....	102

Tablica 31. Analiza odgovora na dio ankete vezan za SD.....	102
Tablica 32. Analiza odgovora na dio ankete vezan za modele i scenarije.....	103
Tablica 33. Analiza odgovora na dio ankete vezan za sučelje.....	104
Tablica 34. Odgovori na anketno pitanje 7.....	104
Tablica 35. Odgovori na anketno pitanje 8.....	105
Tablica 36. Odgovori na anketno pitanje 29.....	105
Tablica 37. Odgovori na anketno pitanje 30.....	106
Tablica 38. Odgovori na anketno pitanje 32.....	107



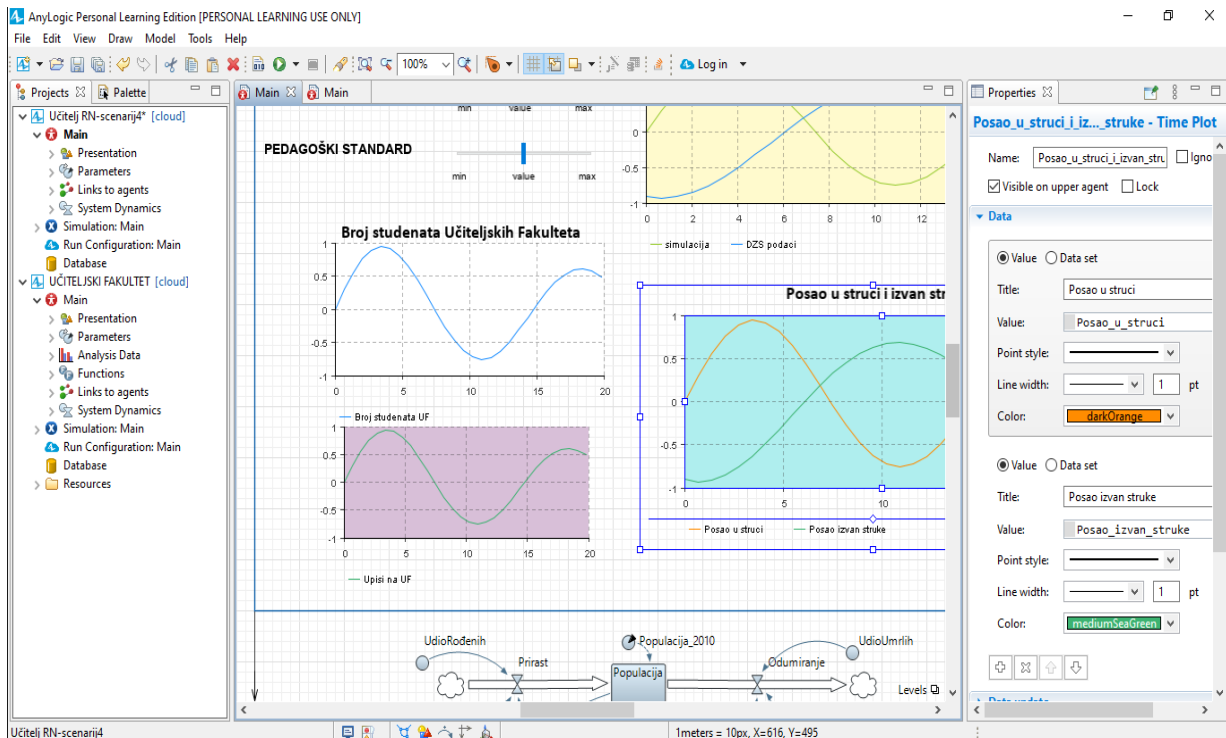
## Popis privitaka

- Privitak 1. Programska podrška AnyLogic
- Privitak 2. Podaci za model *Učitelj* i *Učiteljski Fakultet*
- Privitak 3. Dizajn grafičkog korisničkog sučelja
- Privitak 4. Anketa

## Privitak 1. Programska podrška AnyLogic

AnyLogic je programska podrška kompanije AnyLogic Company koja se bavi programskim rješenjima za simulacijsko modeliranje. Kompanija nudi besplatnu verziju programa (*Personal Learning Edition*) za instalaciju na osobno računalo koja je ograničenih mogućnosti, funkcionalniju verziju programa za znanstvenu zajednicu i obrazovne institucije (*AnyLogic University Resarcher*) te komercijalnu verziju s maksimalnom funkcionalnošću (*AnyLogic Professional*). Također nudi i opciju *Any Logic Cloud* koja je web platforma za izgradnju modela i izvođenje simulacijskih eksperimenata *online*.

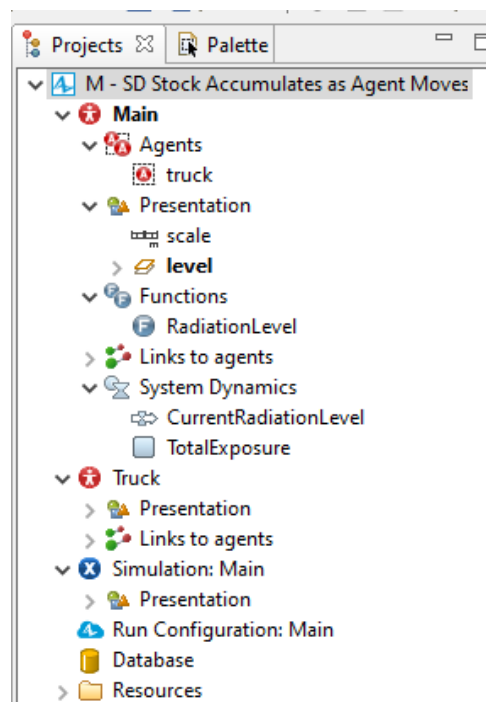
Aplikacija sadrži grafičko korisničko sučelje, koje je već standard u dizajnu softvera, te se vrlo lagano priviknuti na osnovne funkcionalnosti, izgled sučelja izbornika. Grafičko korisničko sučelje (eng. *Graphical User Interface*, GUI) je prikazano na Slici 43.



Slika 43. Grafičko korisničko sučelje programa AnyLogic

GUI preko dijela sučelja s grafičkim editorom omogućava izgradnju modela dodavanjem elemenata. Vizualno je pregledan uvid u strukturu agenata i modela, prezentaciju i grafički prikaz pojedinih elemenata, definiranje dijagrama stanja i događaja, definiranje povezanosti među elementima i dr. Prostor za definiranje elemenata i njihovih osobina te definiranje funkcionalnih ovisnosti omogućava individualni unos Java koda pojedinog elementa. Omogućene su različite funkcionalnosti koje korisniku olakšava rad s alatom. Tako osim zasebnih paleta za DE, SD ili ABM paradigmu modeliranja, omogućene su i palete s elementima predefiniраних biblioteka za modeliranje pješaka, željeznice, palete za prezentaciju, analizu podataka, upravljačke kontrole, dvodimenzionalni i trodimenzionalni prikaz, itd.

AnyLogic je realiziran programskim jezikom Java. AnyLogic modeli su hijerarhijski organizirani, budući da agenti mogu enkapsulirati druge agente do bilo koje željene dubine, što omogućuje dekompoziciju modela na onoliko razina detalja koliko je potrebno, budući da svaki agent obično predstavlja logički odjeljak modela. Svaki AnyLogic model ima agenta najviše razine koji sadrži agente drugih tipova ili elemente drugih paradigmi modeliranja kao što su sustavska dinamika ili modeliranje diskretnih događaja. Na taj način se konstruira hijerarhijsko stablo agenata. Na Slici 44. je prikazan izbornik *Project* primjera hibridnog ABM-SD modela koji unutar agenta ima SD dio. Kako su modeli organizirani hijerarhijski, prikazani su u strukturi stabla: sam model čini najvišu razinu, vrste agenata, eksperimenti, baza podataka modela i resursi datoteka stavke su sljedeće razine, elementi koji čine strukturu agenta organizirani su u granama jedne razine niže, itd.



Slika 44. *Project* izbornik primjera modela u programu AnyLogic

Program nudi interaktivno 2D i 3D animiranje te GIS (eng. *Geographic Information System*) integraciju s modelom. Također je omogućena interaktivna kontrola korisnika nad modelom, integracija modela s vanjskim aplikacijama, kreiranje vlastitih Java biblioteka, itd.

Zaključno, AnyLogic program nudi integraciju najvažnijih paradigmi simulacijskog modeliranja unutar jednog modela i veliki izbor mogućnosti eksperimentiranja s modelom, no dio mogućnosti je ipak nedostupan u besplatnoj varijanti programa.

## Privitak 2. Podaci za model *Učitelj i Učiteljski Fakultet*

T.1. Podaci prirasta stanovništva RH

Godina	Broj stanovnika	Broj rođenih	Udio rođenih u ukupnom broju stanovnika	Imigracija
2010.	4295427	43361	0,01009	4985
2011.	4280622	41197	0,00962	8534
2012.	4267558	41771	0,00979	8959
2013.	4255689	39939	0,00938	10378
2014.	4238389	39566	0,00934	10638
2015.	4203604	37503	0,00892	11706
2016.	4174349	37537	0,00899	13985
2017.	4124531	36556	0,00886	15553
2018.	4087843	36945	0,00904	26029
2019.	4065253	36135	0,00889	37726
2020.	4047680	35845	0,00886	33414
2021.	3888529	36508	0,00939	35912

T.2. Podaci smanjenja stanovništva RH

Godina	Broj stanovnika	Broj umrlih	Udio umrlih u ukupnom broju stanovnika	Emigracija
2010.	4295427	52096	0,01213	9860
2011.	4280622	51019	0,01192	12699
2012.	4267558	51710	0,01212	12877
2013.	4255689	50386	0,01184	15262
2014.	4238389	50839	0,01199	20858
2015.	4203604	54205	0,01289	29651
2016.	4174349	51542	0,01235	36436
2017.	4124531	53477	0,01297	47352
2018.	4087843	52706	0,01289	39515
2019.	4065253	51794	0,01274	40148
2020.	4047680	57023	0,01409	34046
2021.	3888529	62712	0,01613	40424

T.3. Broj pristupnika maturi i udjelu u ukupnom stanovništvu

Godina	Broj stanovnika	Broj maturanata	Udio maturanata u ukupnom broju stanovnika
2010.	4295427	36177	0,00842
2011.	4280622	35356	0,00826
2012.	4267558	36623	0,00858
2013.	4255689	35915	0,00844
2014.	4238389	37608	0,00887
2015.	4203604	37009	0,00880
2016.	4174349	34883	0,00836
2017.	4124531	33296	0,00807
2018.	4087843	31793	0,00778
2019.	4065253	31093	0,00765
2020.	4047680	29532	0,00730

T.4. Upisi na Učiteljski fakultet Sveučilišta u Zagrebu – prvi dio

Godina	Ukupno UFZG			Središnjica u Zagrebu		
	broj prijava za upis	prvi izbor studija	upisano studenata	broj prijava za upis	prvi izbor studija	upisano studenata
2010.	3631	547	250	2550	378	132
2011.	3935	573	272	2516	369	153
2012.	3208	510	230	839	233	144
2013.	2481	495	270	1655	334	152
2014.	2395	502	267	1718	358	151
2015.	2020	466	264	1321	301	148
2016.	2160	425	264	1434	292	148
2017.	2120	416	259	1481	306	143
2018.	1709	357	234	1204	270	138
2019.	1523	297	174	1068	222	141
2020.	1255	228	168	770	172	133
2021.	1235	287	223	874	200	145

T.5. Upisi na Učiteljski fakultet Sveučilišta u Zagrebu – drugi dio

Godina	Učiteljski fakultet odsjek u Čakovcu			Učiteljski fakultet odsjek u Petrinji		
	broj prijava za upis	prvi izbor studija	upisano studenata	broj prijava za upis	prvi izbor studija	upisano studenata
2010.	530	105	71	551	64	47
2011.	706	121	71	713	83	48
2012.	146	47	41	206	30	45
2013.	347	92	71	479	69	47
2014.	268	74	70	409	70	46
2015.	308	90	70	391	75	46
2016.	353	87	71	373	46	45
2017.	343	68	71	296	42	45
2018.	242	54	51	263	33	45
2019.	222	38	13	233	37	20
2020.	229	38	26	200	18	9
2021.	190	43	36	171	44	42

T.6. Upisi na Učiteljski fakultet Sveučilišta u Rijeci

Godina	broj prijava za upis	prvi izbor studija	upisano studenata
2010.	265	54	40
2011.	774	108	43
2012.	569	78	45
2013.	340	48	40
2014.	454	62	42
2015.	374	54	40
2016.	500	74	43
2017.	388	56	40
2018.	365	59	41
2019.	298	40	44
2020.	203	49	42
2021.	233	37	41

T.7. Upisi na Filozofski fakultet Sveučilišta u Splitu

Godina	broj prijava za upis	prvi izbor studija	upisano studenata
2010.	265	54	40
2011.	774	108	43
2012.	569	78	45
2013.	340	48	40
2014.	454	62	42
2015.	374	54	40
2016.	500	74	43
2017.	388	56	40
2018.	365	59	41
2019.	298	40	44
2020.	203	49	42
2021.	233	37	41

T.8. Upisi na Fakultet za odgojne i obrazovne znanosti Sveučilišta u Osijeku

Godina	broj prijava za upis	prvi izbor studija	upisano studenata
2010.	1769	222	86
2011.	1476	201	76
2012.	1140	217	74
2013.	877	164	71
2014.	1084	185	71
2015.	954	191	77
2016.	404	120	81
2017.	336	103	80
2018.	635	105	72
2019.	588	115	72
2020.	411	84	70
2021.	436	82	74

T.9. Upisi na Odjel društveno-humanističkih znanosti Sveučilišta u Slavonskom Brodu

Godina	broj prijava za upis	prvi izbor studija	upisano studenata
2010.	863	92	52
2011.	716	113	41
2012.	639	151	42
2013.	557	110	42
2014.	523	75	29
2015.	515	114	51
2016.	236	57	55
2017.	194	52	52
2018.	312	62	56
2019.	261	60	56
2020.	217	63	53
2021.	179	43	31

T.10. Upisi na Sveučilište u Zadru

Godina	Upisi na Odjel za izobrazbu učitelja i odgojitelja u Zadru			Odjel za nastavničke studije u Gospiću		
	broj prijava za upis	prvi izbor studija	upisano studenata	broj prijava za upis	prvi izbor studija	upisano studenata
2010.	1002	97	64	95	26	26
2011.	939	84	67	218	34	39
2012.	688	89	47	231	48	38
2013.	683	76	47	225	50	38
2014.	629	71	50	194	44	40
2015.	622	86	49	223	46	37
2016.	634	86	48	233	65	44
2017.	526	65	47	154	38	45
2018.	393	59	49	101	20	22
2019.	457	69	49	126	23	32
2020.	306	48	46	107	23	24
2021.	331	58	54	81	14	14



T.11. Upisi na Fakultet za odgojne i obrazovne znanosti Sveučilišta u Puli

Godina	Studij na hrvatskom jeziku			Studij na talijanskom jeziku		
	broj prijava za upis	prvi izbor studija	upisano studenata	broj prijava za upis	prvi izbor studija	upisano studenata
2016.	104	34	33	14	4	1
2017.	80	25	19	17	6	3
2018.	77	25	19	4	2	0
2019.	61	23	15	16	6	3
2020.	38	10	12	3	1	0
2021.	134	23	28	13	7	7

T.12. Broj učitelja primarnog obrazovanja RH

Godina (t)	Broj učitelja (N)	prirast ( $N_t/N_{t-1}$ )	srednja vrijednost prirasta
2010.	11454		1,0114
2011.	11444	0,9991	
2012.	11382	0,9946	
2013.	11443	1,0054	
2014.	11693	1,0218	
2015.	11862	1,0145	
2016.	12183	1,0271	
2017.	12204	1,0017	
2018.	12533	1,0270	
2019.	12506	0,9978	
2020.	12824	1,0254	

# Privitak 3. Dizajn grafičkog korisničkog sučelja

## PLANIRANJE LJUDSKIH POTENCIJALA U SUSTAVU ODGOJA I OBRAZOVANJA REPUBLIKE HRVATSKE

### Sustavsko dinamički model primijenjen na populaciju učitelja razredne nastave

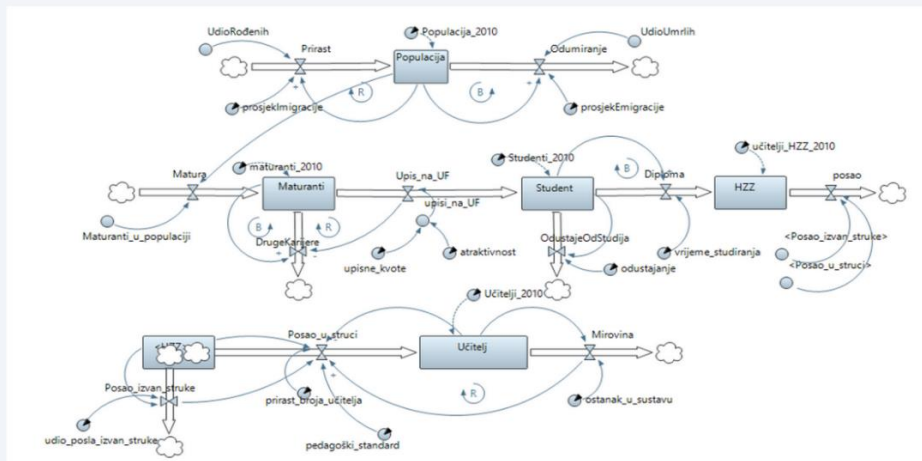
Planiranje ljudskih potencijala u sustavu odgoja i obrazovanja je kompleksan zadatak. Elementi koji određuju cijeli sustav su u dinamičkoj međusobnoj interakciji, uvjetovani povratnim vezama. Prezentiran je model koji razmatra broj učitelja razredne nastave u Republici Hrvatskoj, pritom prateći populacije maturanata, studenata Učiteljskih Fakulteta, te ukupne populacije RH.

#### Primjena modela:

- na makrorazini je naglasak na parametrima koji utječu na trendove na ukupnoj populaciji, primjenjiv prosvjetnim vlastima pri upravljanju strateškim planiranjima ljudskih potencijala u sustavu razredne nastave. U tu svrhu je model „UČITELJ“ s predložena 4 scenarija s promjenama parametara.
- Na mikrorazini je naglasak na primjenjivosti upravnima Učiteljskih Fakulteta pri planiranju upisne politike ili istraživanja atraktivnosti studiranja na pojedinom fakultetu. U tu svrhu je model „UČITELJSKI FAKULTET“ s predložena 4 scenarija.

#### Model „UČITELJ“ se sastoji od tri podcjeline:

- na makrorazini je naglasak na parametrima koji utječu na trendove na ukupnoj populaciji, primjenjiv prosvjetnim vlastima pri upravljanju strateškim planiranjima ljudskih potencijala u sustavu razredne nastave. U tu svrhu je model „UČITELJ“ s predložena 4 scenarija s promjenama parametara.
- Na mikrorazini je naglasak na primjenjivosti upravnima Učiteljskih Fakulteta pri planiranju upisne politike ili istraživanja atraktivnosti studiranja na pojedinom fakultetu. U tu svrhu je model „UČITELJSKI FAKULTET“ s predložena 4 scenarija.



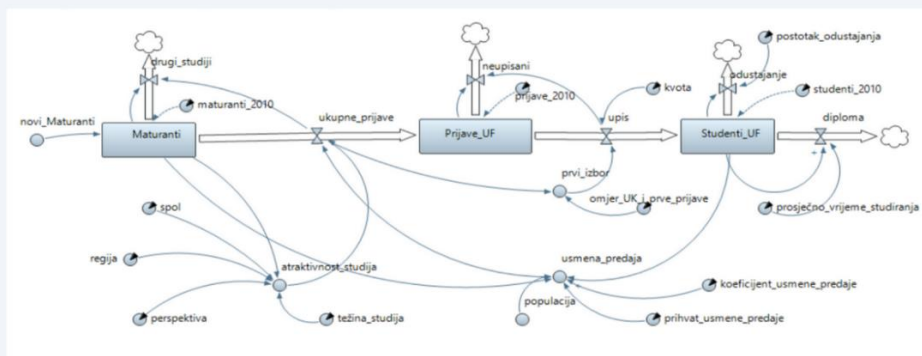
Slika modela UČITELJ

Model je izgrađen na temelju stvarnih podataka u periodu 2010. do 2015.godine, a zatim su uspoređeni stvarni podaci u periodu 2016. do 2021. godine sa modeliranim podacima, te je pritom utvrđeno odstupanje manje od 10%.

Grafovi s prikazanim stvarnim i modeliranim podacima pojedinih komponenti sustava te projekcije za period do 2030.godine, s naglaskom da bi se **takav ishod očekivao bez ikakve intervencije u sustavu.**



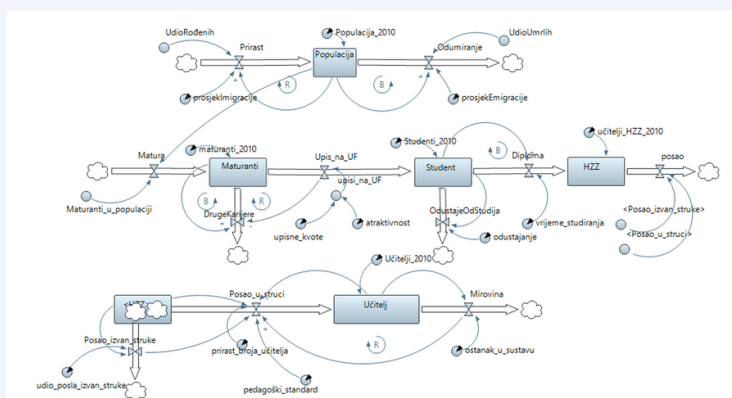
Model UČITELJSKI FAKULTET je razrada modela UČITELJ u dijelu koji prati populaciju maturanata, preko upisa na Učiteljske fakultete do završetka studija. Omogućava unos vrijednosti parametara specifične za pojedini Učiteljski Fakultet u Republici Hrvatskoj



Slika modela UČITELJSKI FAKULTET

- Scenarij 1
- Scenarij 2
- Scenarij 3
- Scenarij 4

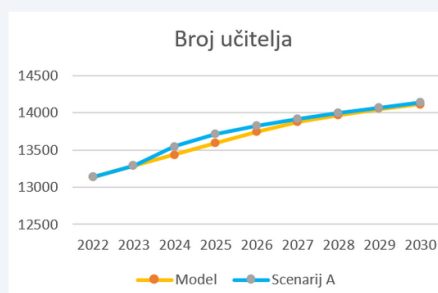
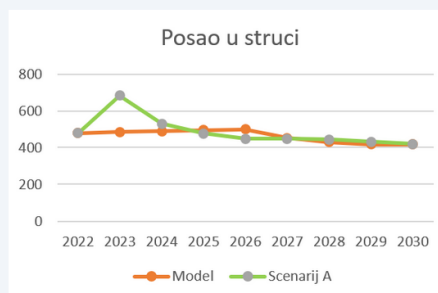
### Model UČITELJ



Sustav odgoja i obrazovanja je dinamičan sustav u kojem se spontano ili planirano događaju intervencije, npr. značajno poraste plaća učiteljima pa postane atraktivnije zanimanje ili npr.poveća se pedagoški standard u školama te se povećava potreba za učiteljskim kadrom. Svrha modela je mogućnost intervencija u virtualnom okruženju. Kroz 4 ponuđena scenarija se nudi mogućnost mijenjanja vrijednosti odabranih parametara te se promatra utjecaj takve intervencije.

#### Primjer scenarija A

Ako poveća se potražnja za učiteljima povećanjem pedagoškog standarda 50% (npr. uvođenjem cjelodnevnog nastave). Kratkotrajno se više učitelja zaposli u struci, no zbog slabijeg upisa na učiteljske fakultete ne rezultira trajno većim brojem zaposlenih učitelja.

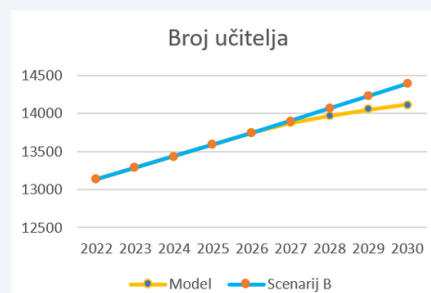
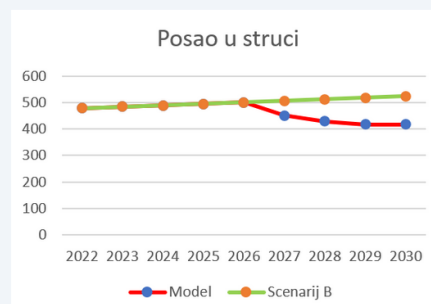


**Scenarij 1.** – Mogućnost mijenjanja parametara:  
**upisne kvote** – mijenjanje upisne kvote Učiteljskih Fakulteta od -50% do +100%  
**pedagoški standard** – mijenjanje postojećeg parametra od -25% do +100%

**Scenarij 3.** – Mogućnost mijenjanja parametara:  
**vrijeme studiranja** – mijenjanje prosjeka studiranja u rasponu 5 do 7 godina (5,663 godine je postojeći prosjek studiranja)  
**odustajanje od studija** – mijenjanje koeficijenta odustajanja od studija za 0% do 10% upisanih studenata (sada 7,92% studenata odustane od studija za učitelja razredne nastave)

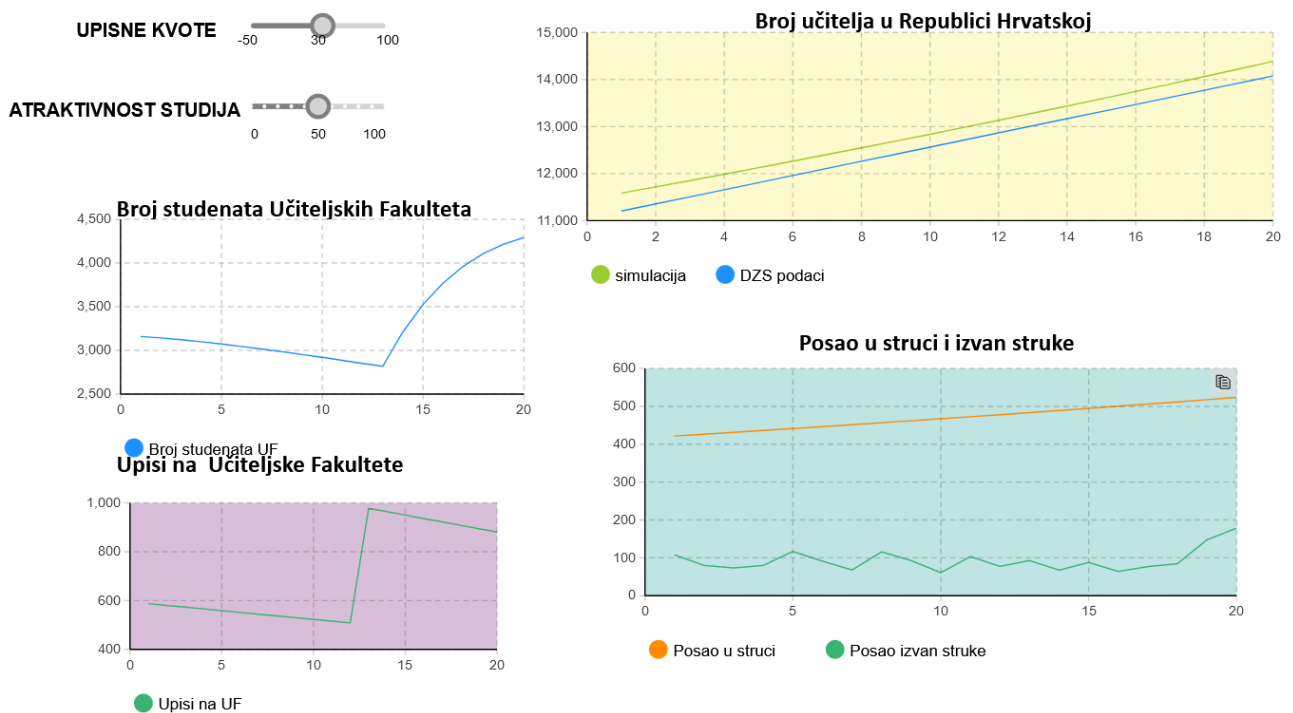
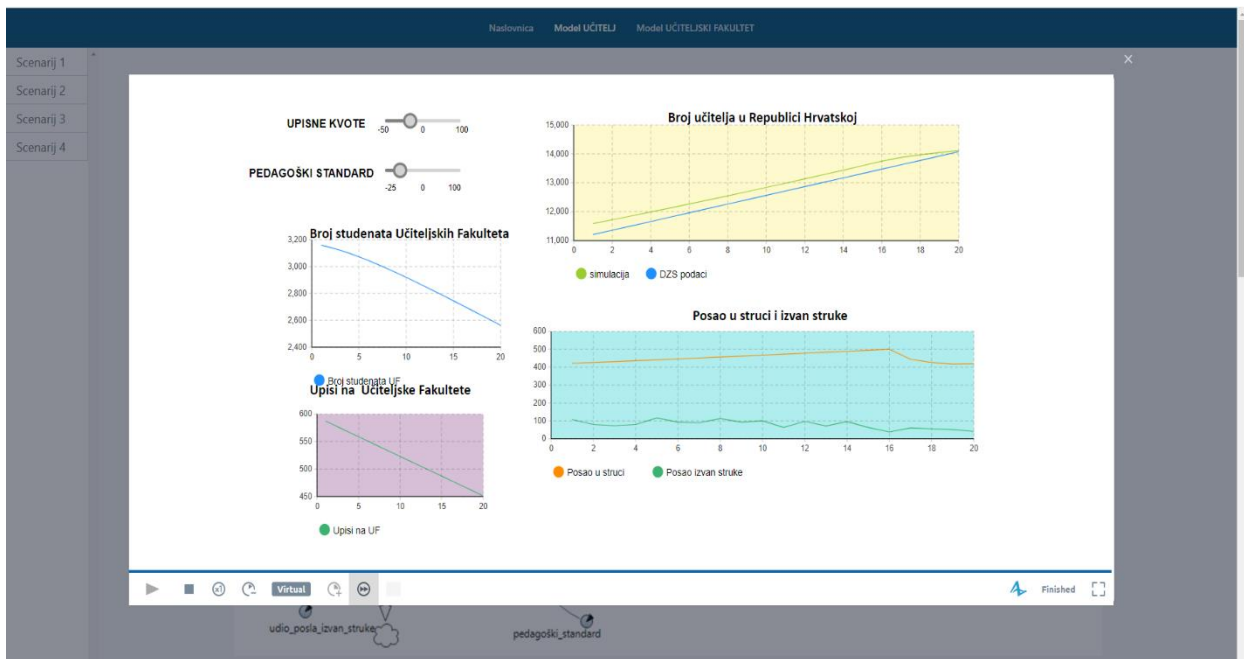
#### Primjer scenarija B

Učiteljski fakulteti povećaju upisne kvote za 50%. Posljedično više učitelja završava fakultete no nije se povećala potražnja za kadrom u nastavi. Promjena se uočava nakon 2026.godine.



**Scenarij 2.** – Mogućnost mijenjanja parametara:  
**upisne kvote** – mijenjanje upisne kvote Učiteljskih Fakulteta od -50% do +100%  
**aktivnost studija** – povećanje parametra za 0% do 100%

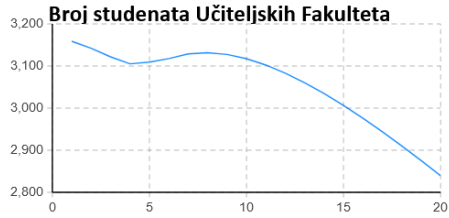
**Scenarij 4.** – Mogućnost mijenjanja parametara:  
**pedagoški standard** – mijenjanje postojećeg parametra od -25% do +100%  
**posao izvan struke** – mijenjanje postojećeg koeficijenta zaposlenja učitelja izvan sustava za -100% do +100%  
**ostanak u sustavu** – mijenjanje koeficijenta ostanka učitelja u sustavu za -50% do +50%



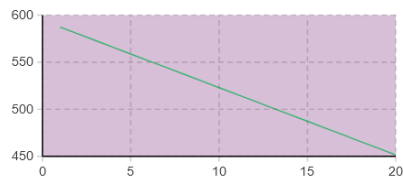
VRIJEME STUDIRANJA



ODUSTAJANJE OD STUDIJA



Broj studenata UF  
Upisi na Učiteljske Fakultete

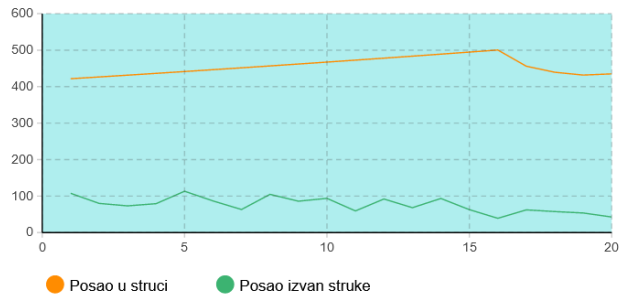


Upisi na UF

Broj učitelja u Republici Hrvatskoj

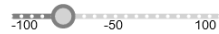


Posao u struci i izvan struke



### Scenarij 3. modela Učitelj

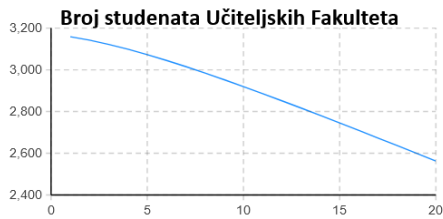
POSAMO IZVAN STRUKE



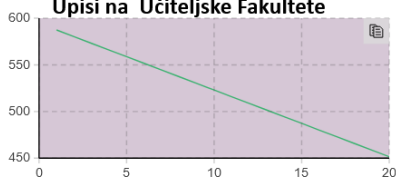
OSTANAK U SUSTAVU



PEDAGOŠKI STANDARD



Broj studenata UF  
Upisi na Učiteljske Fakultete

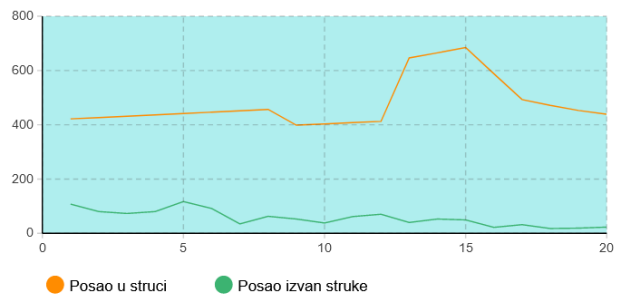


Upisi na UF

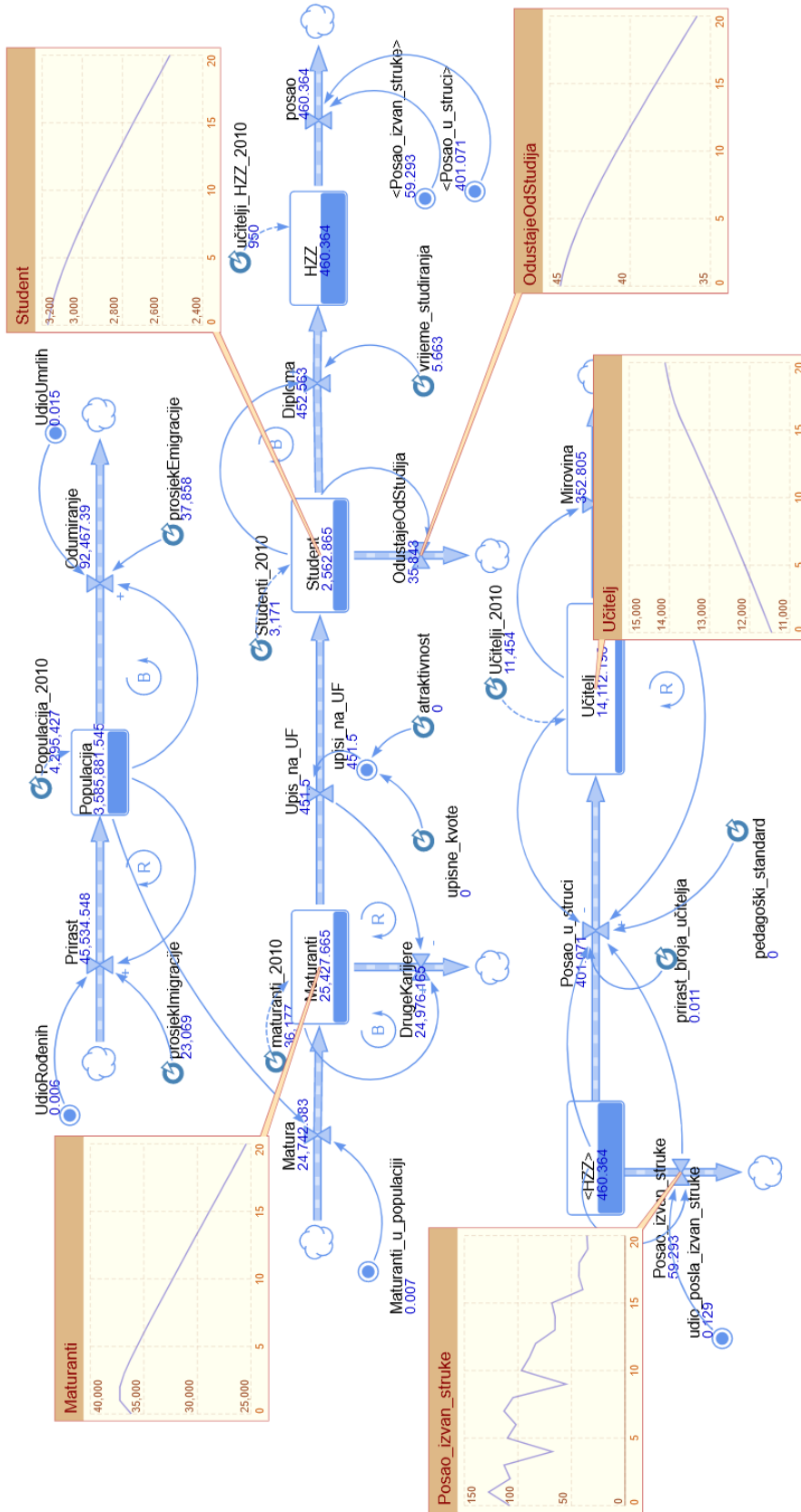
Broj učitelja u Republici Hrvatskoj



Posao u struci i izvan struke



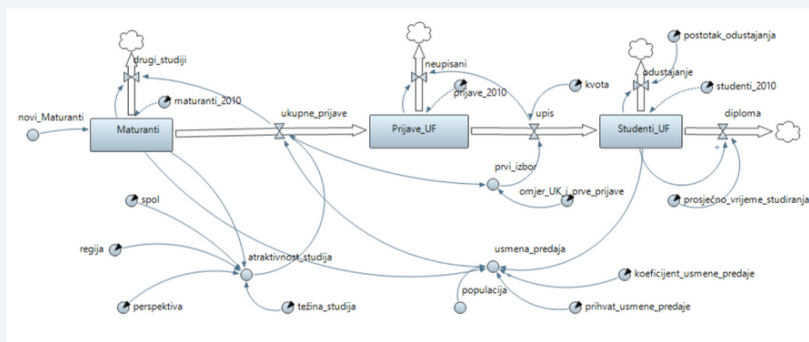
### Scenarij 4 modela Učitelj



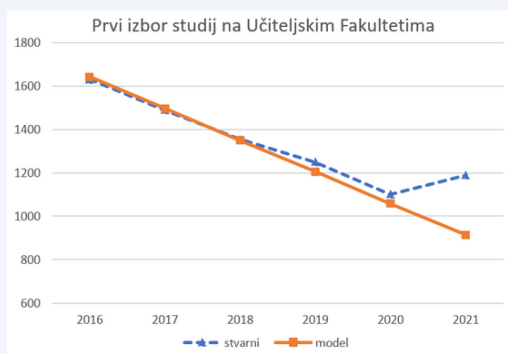
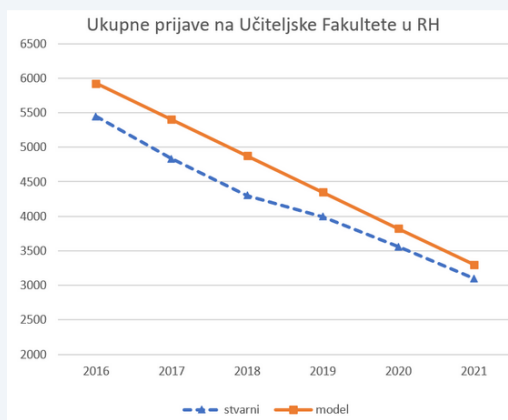
Prikaz interaktivne promjene modela *Učitelj*

- Scenarij 1
- Scenarij 2
- Scenarij 3
- Scenarij 4

### Model UČITELJSKI FAKULTET



Primjer za sve Učiteljske Fakultet u RH, model daje dovoljno dobre vrijednosti uspoređujući sa stvarnim podacima za parametre „ukupne prijave“ i „prvi izbor“. Za pojedinačne Učiteljske Fakultete u RH je potrebno rafinirati parametre ili dodatnim istraživanjima uvrstiti nove parametre.



**Scenarij 1.** – Mogućnost mijenjanja parametara:

**spol** – mijenjanje strukture studenata s obzirom na muški/ženski spol (50% do 100%)

**regija** - mijenjanje zone atrakcije fakulteta, u postocima teritorija RH (0% do 100%)

**Scenarij 3.** – Mogućnost mijenjanja parametara:

**perspektiva** – mijenjanje parametra u sklopu vanjske motivacije „atraktivnost studija“

**težina studija** - mijenjanje parametra u sklopu vanjske motivacije „atraktivnost studija“

**Scenarij 2.** – Mogućnost mijenjanja parametara:

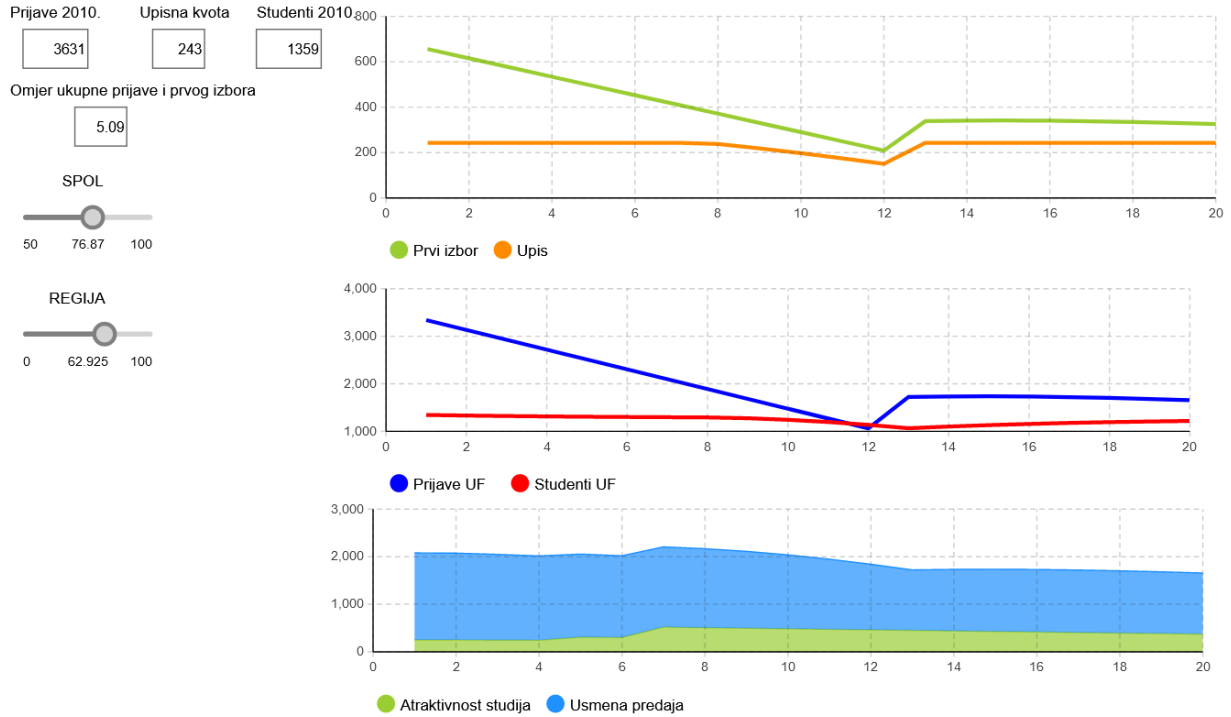
**prosječno vrijeme studiranja** – mijenjanje prosječnog vremena studiranja od 5 do 10 godina

**postotak odustajanja** – mijenjanje postotka odustajanja od studija od 0%-15%

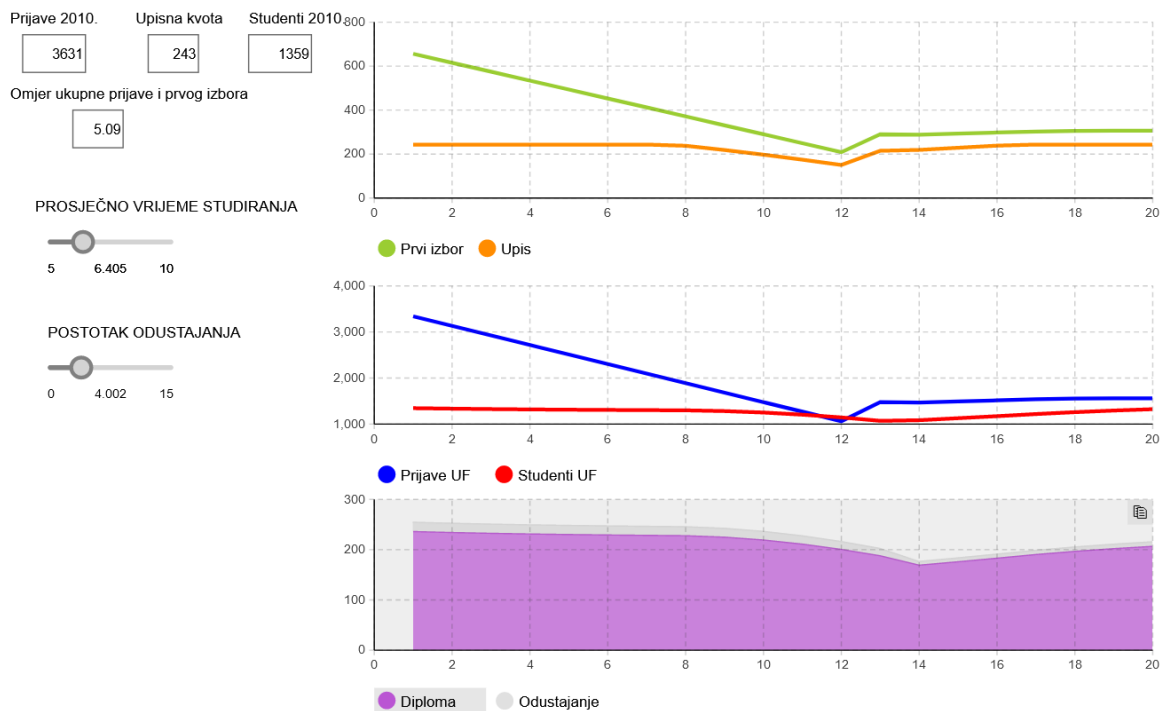
**Scenarij 4.** – Mogućnost mijenjanja parametara:

**koeficijent usmene predaje** - mijenjanje parametra u sklopu unutarnje motivacije „usmena predaja“

**prihvata usmene predaje** - mijenjanje parametra u sklopu unutarnje motivacije „usmena predaja“

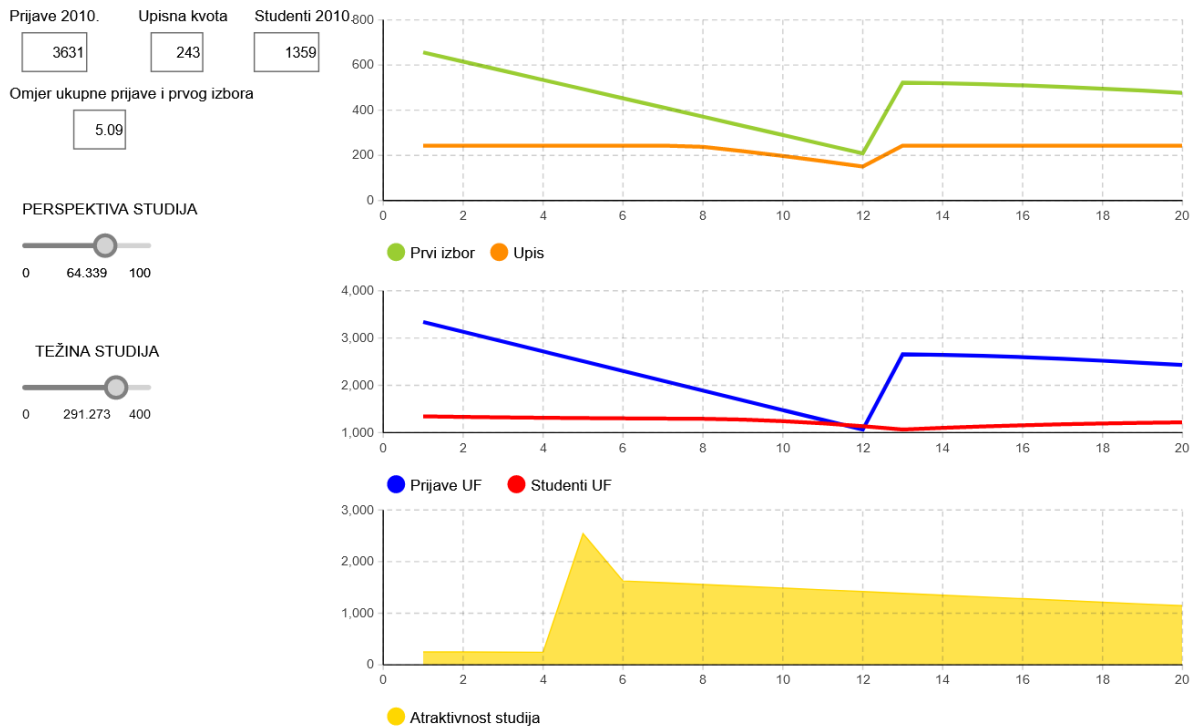


Scenarij 1. modela *Učiteljski Fakultet*

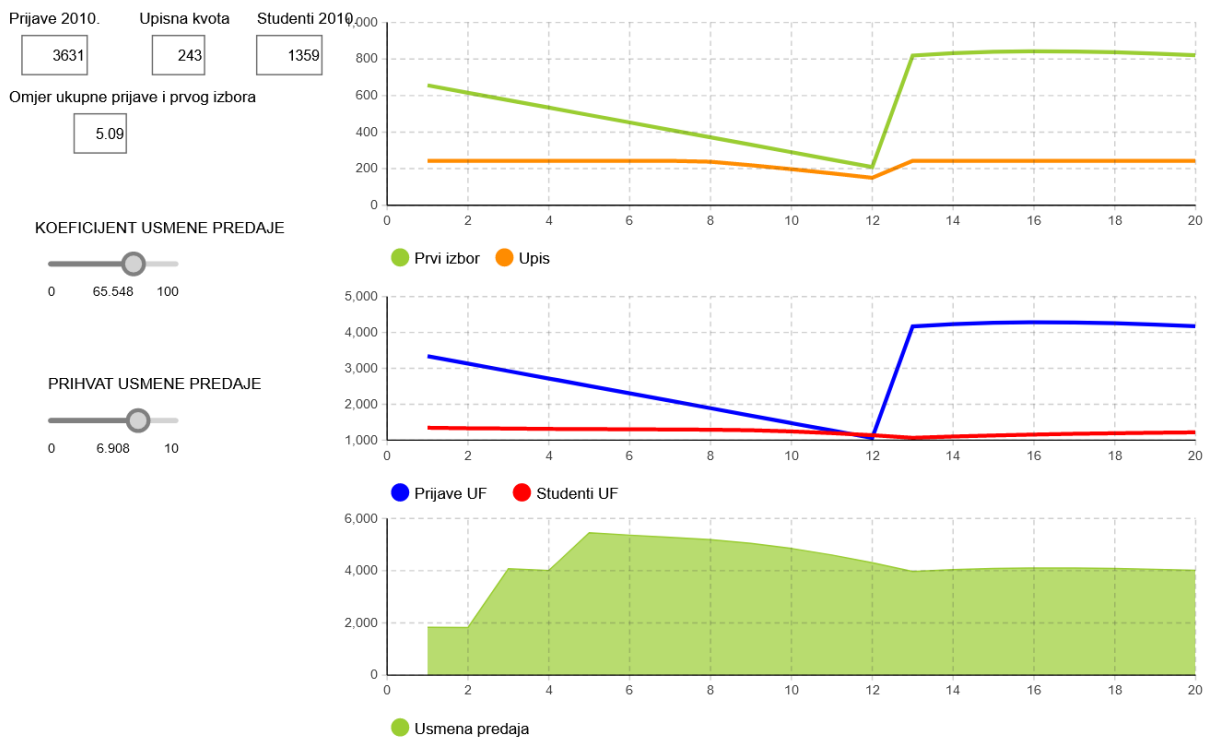


Scenarij 2. modela *Učiteljski Fakultet*





Scenarij 3. modela *Učiteljski Fakultet*



Scenarij 4. modela *Učiteljski Fakultet*

## Privitak 4. Anketa

# Modeliranje ljudskih potencijala i upisne politike učiteljskih fakulteta

Anketa za doktorsku disertaciju "Razvoj modela sustavske dinamike za planiranje ljudskih potencijala u odgoju i obrazovanju"

\* Obavezno pitanje

1. Ime i Prezime
2. e-mail adresa
3. Ustanova \*
  - Učiteljski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
  - Učiteljski fakultet Sveučilišta u Zagrebu - odsjek u Čakovcu
  - Učiteljski fakultet Sveučilišta u Zagrebu - odsjek u Petrinji
  - Učiteljski fakultet Sveučilišta u Rijeci
  - Filozofski fakultet Sveučilišta u Splitu
  - Fakultet za odgojne i obrazovne znanosti Sveučilišta u Osijeku
  - Odjel društveno-humanističkih znanosti Sveučilišta u Slavanskom Brodu
  - Odjel za izobrazbu učitelja i odgojitelja Sveučilišta u Zadru
  - Odjel za nastavničke studije u Gospiću Sveučilišta u Zadru
  - Fakultet za odgojne i obrazovne znanosti Sveučilišta u Puli
4. Koja je Vaša funkcija u upravi? \*
5. Koje je područje Vašeg znanstvenog djelovanja? \*
6. Radno iskustvo (u godinama) \*
7. S kojim načinom modeliranja ljudskih potencijala ste upoznati?
8. S kojim načinom kreiranja upisne politike ste upoznati (ili se koristi u Vašoj ustanovi)?
9. Jeste li čuli za **Sustavsku dinamiku** prije ove prezentacije modela? Ako da, u kojem kontekstu/području? \*

## Stavovi o prezentiranom modelu i primijenjenoj metodi modeliranja

Za sljedeće tvrdnje procijenite razinu Vašeg slaganja na skali 1 do 5, gdje je pritom:

- 1 - nimalo se ne slažem,
- 2 - donekle se ne slažem,
- 3 - niti se slažem niti se ne slažem,
- 4 - donekle se slažem
- 5 - potpuno se slažem

10. *Sustavska dinamika* je korisna metoda u modeliranju ljudskih potencijala u odgoju i obrazovanju. \*
11. *Sustavska dinamika* je korisna metoda u modeliranju upisne politike fakulteta. \*
12. *Sustavsku dinamiku* bih željela/želio primijeniti u svom radu. \*
13. *Sustavska dinamika* je efikasnija metoda za odlučivanje u odnosu na metode temeljene na statističkim podacima. \*
14. Model *Učitelj* je koristan u **modeliranju** ljudskih potencijala u odgoju i obrazovanju. \*
15. Model *Učitelj* je koristan za **podršku odlučivanju** pri donošenju upisne politike. \*
16. Model *Učitelj* želim koristiti pri donošenju odluka u svojoj ustanovi. \*
17. Scenariji modela *Učitelj* pojednostavljaju istraživanje utjecaja pojedinih parametara. \*
18. Model *Učiteljski Fakultet* je koristan u **modeliranju** upisne politike fakulteta. \*
19. Model *Učiteljski Fakultet* je koristan za **podršku odlučivanju** pri donošenju upisne politike fakulteta. \*
20. Model *Učiteljski Fakultet* želim koristiti pri donošenju odluka u svojoj ustanovi. \*
21. Scenariji modela *Učiteljski Fakultet* pojednostavljaju istraživanje utjecaja pojedinih parametara. \*
22. Razvijeni model daje podršku odlučivanju pri donošenju upisne politike visokoškolskih ustanova. \*
23. Web aplikacija je dobar način za upotrebu modela od strane korisnika. \*
24. Web aplikacija je dobar način za prezentaciju interaktivnosti modela. \*

25. Sučelje je jednostavno za korištenje. \*
26. Pokretanje scenarija i prikaz grafikonima je informativno. \*
27. Aplikacija omogućuje da se numeričke vrijednosti dobivene modelom iskoriste za daljnju obradu i istraživanja. \*
28. Web aplikacijom mogu jednostavno koristiti funkcionalnosti modela. \*

### **Dodatna istraživanja**

U nastavku možete dodati prijedloge u vezi prezentiranog modela ili ideje za daljnje istraživanje.

29. Prijedlozi za nadogradnju prezentiranog modela, dodavanje scenarija od interesa i slično.
30. Prijedlozi za daljnje istraživanje temeljem modela ili modeliranja *Sustavskom dinamikom*.
31. Prijedlozi za dodavanje funkcionalnosti web aplikaciji
32. Ostali prijedlozi i komentari.