



UNIVERZITET U NIŠU  
EKONOMSKI FAKULTET

Časopis „EKONOMSKE TEME”

Godina izlaza 50, br. 4, 2012, str. 683-700

Adresa: Trg kralja Aleksandra Ujedinitelja 11, 18000 Niš

Tel: +381 18 528 624 Fax: +381 18 4523 268

## AGENT BAZIRANO MODELIRANJE – NOVA PARADIGMA EKONOMSKOG MODELIRANJA

Ognjen Radović\*

Ksenija Denčić -Mihajlov\*

**Rezime:** Standardni modeli u finansijama polaze od pretpostavki racionalnosti tržišnih agenata i teorije efikasnog tržišta. Veliki broj empirijskih činjenica ukazuju na nerealnost ovih pretpostavki. Agent-bazirano modeliranje i simulacije predstavljaju nov pristup u posmatranju i modeliranju ekonomskih sistema kroz prizmu nelinearnih dinamičkih sistema. Agent-bazirano modeliranje je računarsko-matematički metod zasnovan na sintetičkom pristupu izgradnje modela od većeg broja autonomnih entiteta (agenata) i simulacije njihovog ponašanja i međusobnih interakcija. Cilj ovog rada je da prikaže osnovne postavke agent-baziranog modeliranja i prednosti ovog pristupa u odnosu na klasične finansijske modele. Pored toga, u radu je prikazan jednostavan agent-bazirani model finansijskog tržišta sa periodičnom aukcijom. Rezultujuće vremenske serije našeg modela veštačkog finansijskog tržišta uspešno repliciraju najznačajnije statističke osobine prinosa na realnim finansijskim tržištima i ukazuju na jasno odstupanje od normalne distribucije prinosa kao stuba klasične finansijske teorije.

**Ključne reči:** Agent-bazirano modeliranje, Agent-bazirane simulacije, Agent, Veštačka finansijska tržišta.

### Uvod

Tokom poslednje dve decenije pojavio se veliki broj empirijskih dokaza o problematičnosti postavki savremene finansijske teorije. Takođe, osnovne karakteristike perfektnog tržišta nisu pronađene ni na jednom finansijskom tržištu. U cilju prevazilaženja mana klasičnih teorija, krenulo se u više različitih pravaca. Jedan pravac dolazi od *Teorije kompleksnosti* i posmatranja tržišta kao nelinearnih adaptivnih sistema sastavljenih od velikog broja jednostavnih komponenti. Drugi pravac čine bihevioralne finansije, skup istraživanja iz oblasti kognitivne

---

\* Univerzitet u Nišu, Ekonomski fakultet  
ognjen.radovic@eknfak.ni.ac.rs ksenija.dencic-mihajlov@eknfak.ni.ac.rs  
UDK 004:336

Primljeno: 09.07.2012. Prihvaćeno: 10.12.2012.

psihologije investitora. Kombinacijom ova dva pristupa, nastala je *Hipoteza adaptivnog tržišta*, dopuna klasične *Hipoteze efikasnog tržišta*. Objedinjujući postavke „novih“ teorija, agent-bazirano modeliranje pruža računarski okvir za proveru kako relaksirajućih klasičnih modela tako i novih finansijskih modela.

Agent-bazirano modeliranje (ABM) je računarski metod kojim se sistem modelira kao skup autonomnih entiteta (agenata) koji samostalno odlučuju i međusobno interaguju. Agent-bazirana veštačka finansijska tržišta (ASM), deo agent-bazirane računarske ekonomije (ACE), posmatra tržišta kao evoluirajuće sisteme sastavljene od heterogenih autonomnih agenata ograničene racionalnosti u kojima cene instrumenata nastaju kao emergentni fenomeni.

Cilj ovog rada je da se prikažu osnove agent-baziranog modeliranja i njegova primena na finansijskim tržištima. U prvom delu rada razmotrićemo kritiku klasičnih teorija, dok u drugom ukratko izložimo postavke „novih“ finansijskih teorija. U trećem delu prikazaćemo osnove agent-baziranog modeliranja i simulacija. U četvrtom delu prezentiramo pojednostavljeni agent-bazirani model finansijskog tržišta, dok u petom delu diskutujemo rezultate simulacije. Poslednji deo rada sadrži zaključna razmatranja.

## 1. Kritika klasičnih finansijskih teorija

Klasična teorija cene aktive zasniva se na apstrahovanju unutrašnjih mehanizama tržišta i u osnovi ima racionalne investitore koji momentalno prilagođavaju svoja očekivanja novim informacijama. Sam proces trgovanja posmatra se kao „crna kutija“ koja nema uticaja na otkrivanje cene. Centralne postavke klasične finansijske teorije baziraju se na Hipotezi efikasnog tržišta (EMH) i Hipotezi o racionalnosti investitora (Hipotezi racionalnih očekivanja – REH). Obe hipoteze su suočene sa empirijskim protivrečnostima odakle i dolaze kritike klasične finansijske teorije.

Kontroverze o tržišnoj efikasnosti uglavnom dolaze od testova slabe-forme i pretpostavci o slučajnom kretanju cena. Kako je sve veća količina tržišnih podataka postala dostupna, novija istraživanja pokazala su postojanje značajne autokorelacije u prinosima (Lo and MacKinlay, 1988; Conrad and Kaul, 1988), kao i da podaci o dividendama (Fama and French, 1988) i P/E rasio (Campbell and Shiller, 1988) povećavaju predvidljivost prinosa. Testovi normalnosti distribucije prinosa pokazuju da ova pretpostavka nije valjana. Distribucije prinosa pokazuju „debele repove“ i velike skokove što je u suprotnosti sa normalnom distribucijom. Ponovo, i dalje ne postoji adekvatna distribucija prinosa, mada istraživanja sugerišu na neki oblik Pareto-Levy distribucije. Možemo zaključiti, novija istraživanja su uglavnom pokazala postojanje predvidljivosti i pružila dokaze protivne Hipotezi efikasnog tržišta.

Tržišna efikasnost se uglavnom proverava analizom statističkih osobina finansijskih vremenskih serija. Empirijske činjenice koje odstupaju od predviđanja EMH nazivaju se *tržišne anomalije*. Bailey (2005) navodi najpoznatije anomalije EMH: **1. Anomalije slabe-forme EM:** (a) *Dugoročno pamćenje (Long-term memory) ili dugoročna istrajnost (Long-term persistence)* (Mandelbrot, 1969, 1972; Lo, 1991); (b) *Prevelika volatilnost (Excess volatility)* (Shiller, 1979; LeRoy i Porter, 1981; Cutler et al., 1989); (c) *Grupisanje volatilnosti (Volatility clustering)* (Mandelbrot, 1963); (d) *Korelacija obim/volatilnost (Volume/volatility correlation)* (Lobato i Velasco, 2000) itd; **2. Kalendarske anomalije (Calendar effects):** (a) *Efekat januara (January effect) ili efekat „kraja godine“ ('turn-of-the-year')* (Keim, 1983; Ariel, 1987; Haugen i Jorion, 1996); (b) *Efekat ponedeljka (Monday effect)*. (French, 1980; Gibbons i Hess, 1981; Barone, 1990); (c) *Efekat praznika (Holiday effect)* (Lakonishok i Smidt, 1988; Petengill, 1989) itd; **3. Anomalije polujake-forme EMH:** (a) *Efekat „malih“ firmi (small-firm effect), ili efekat veličine (size effect)* (Reiganum, 1981; Banz, 1981; Fama i French, 1992, 1993); (b) *Efekat višeg dobit/cena odnosa (high earnings/price ratio effect)* (Basu, 1977) itd.; **4. Anomalije jake-forme EMH:** (a) *Efekt insajderskih transakcija (Insider transaction effect)* (Finnerty, 1976; Lakonishok i Lee, 2001).

Glavni problem dokazivanja empirijskih istraživanja leži u činjenici da EMH sama po sebi nije proverljiva. To je pre svega rezultat nemogućnosti provere tržišne efikasnosti bez znatnih ograničenja u dinamici očekivanog prinosa. Druga problematična pretpostavka klasičnih finansija je *Hipoteza racionalnih investitora*.

## 2. Teorija kompleksnosti i nelinearna dinamika

*Teorija kompleksnosti* proučava interakcije i adaptacije u dinamičkim sistemima i njihov uticaj na stvaranje novog kvaliteta i evoluciju sistema (Bar-Yam, 2003). *Dinamički sistem* je sistem koji evoluirá prema skupu dobro definisanih pravila. Ako su ova pravila nelinearna, tada se ovi sistemi nazivaju *nelinearnim dinamičkim sistemima*. Kod ovih sistema, izlaz sistema nije proporcionalan ulazu u sistem (kao kod linearnih sistema). Naprotiv, proizvoljno male promene na ulazu u sistem mogu dovesti i do eksponencijalnih promena na izlazu iz sistema. *Teorija haosa* proučava određenu klasu nelinearnih dinamičkih sistema koji pod određenim uslovima pokazuju haotično ponašanje. Posebnu klasu nelinearnih sistema čine *kompleksni nelinearni dinamički sistemi* ili kraće *kompleksni sistemi*. Mada ne postoji opšte prihvaćena definicija, *kompleksni sistem* je skup relativno jednostavnih komponenti bez centralne kontrole, u kojem se pojavljuje emergentno ponašanje. Prisustvo kompleksnih sistema se zapaža na svim organizacionim nivoima, od galaktičkih struktura preko živih organizama do atomskih struktura.

Kompleksni adaptivni sistemi predstavljaju posebnu klasu kompleksnih sistema. Pojam *kompleksni adaptivni sistemi* (*Complex Adaptive Systems – CAS*),

objašnjen je u Santa Fe Institute (SFI) kao „dinamička mreža sastavljena od interagujućih agenata. Svaki adaptivni agent opisan je određenim skupom pravila. Ovi agenti se adaptiraju menjajući svoja pravila ponašanja sa porastom iskustva. U CASu, okruženje jednog adaptivnog agenta čine drugi agenti tako da najveći deo nastojanja agenta da se prilagodi sredini zavisi od prilagođavanja drugih agenata. Ova osobina sistema je glavni izvor nastajanja kompleksnih obrazaca koje tokom vremena generiše CAS“ (Holland, 1995, str.10). Kao što se može videti iz ovog opisa, SFI istraživači komponente kompleksnih adaptivnih sistema nazivaju generičkim imenom – agenti (ćelije, pojedinci, firme, nacije itd.). Ovim terminom se upravo ističe njihova aktivna osobina, odnosno da agenti imaju sposobnost „izbora“ ili donošenja odluka koje utiču na druge u sistemu i okruženju (Harrison, 2006, str. 3).

Mada, kao što smo već istakli, ne postoji neka opšte prihvaćena definicija kompleksnih adaptivnih sistema, autori najčešće ističu sledeće zajedničke osobine:

1. Veliki broj međusobno povezanih heterogenih delova.
2. Višestruki hijerarhijski sistemi (*multiple scales of resolution*).
3. Višestruka metastabilna stanja.
4. Osetljivost na početne uslove.
5. Lokalna obrada informacija.
6. Samoorganizovanost.
7. Emergentnost (*emergence*).
8. Prilagođavanje i koevolucija.
9. Ravnoteža haosa i reda.

Tesfatsion (2002) posmatra „decentralizovanu tržišnu ekonomiju kao kompleksni adaptivni sistem koji se sastoji od velikog broja kupaca i prodavaca uključenih u masivne paralelne lokalne interakcije“. Lokalne interakcije su izvor makroekonomskih zakonitosti, poput zajedničkih tržišnih protokola i normi ponašanja, koje i obrnuto, povratnom spregom utiču na lokalne interakcije. Kao rezultat toga nastaje komplikovana dinamika sa rekurentnim uzročnim lancima koji povezuju ponašanja pojedinaca, mreže interakcija i okruženje. Ovakve dvosmerne povratne sprege između mikrostrukture i makrostrukture od ranije su poznate u ekonomiji. Međutim, one bivaju ponovo aktuelne u radovima Arthura (1990, 2005) sa mogućnošću njihove računarske simulacije.

U okviru Teorije kompleksnosti postoje dva različita pristupa modeliranju osobina i ponašanja socioekonomskih sistema - *Ekonomologija* („evolucionarna ekonomija“) i *Ekonomofizika* (Econophysics) (Ricklefs, 2009). Oba ova pristupa, u cilju objašnjavanja kolektivnih fenomena polaze od populacionog nivoa (nivoa agenata). Kolektivne (makroskopske) osobine se posmatraju kao posledice interakcija na mikroskopskom nivou (nivou agenata).

### 3. Agent-bazirano modeliranje

Metodologija koja objedinjuje postavke novih finansija jeste agent-bazirano modeliranje (ABM). *Agent-bazirano modeliranje (ABM)* je računarski metod kojim se sistem modelira kao skup autonomnih entiteta koji samostalno odlučuju i međusobno interaguju na netrivialan način. ABM se sastoji od skupa agenata i okvira za simulaciju njihovih interakcija i odlučivanja. Polazeći od Teorije kompleksnosti, cilj izgradnje agent-baziranih modela je razumevanje principa koji dovode do pojave emergentnog ponašanja i nastajanja novih kvaliteta. Osnovna ideja ABM je da se mnoge pojave, čak i veoma složene, najbolje mogu shvatiti kao sistem autonomnih agenata koji su relativno jednostavni i slede relativno jednostavna pravila za interakcije.

Prednosti agent-baziranog modeliranja u odnosu na ostale tehnike modeliranja, Bonabeau (2002) sumira u tri stavke: (i) ABM obuhvata emergentne fenomene, (ii) ABM pruža prirodan opis sistema, (iii) ABM je fleksibilan.

Da bismo izgradili agent-bazirani model nekog sistema, polazimo od navedenog sintetičkog pristupa. Sistem moramo da posmatramo sa mikro i makro nivoa. Na mikro nivou moramo da uočimo osnovne komponente sistema. Na makro nivou, posmatramo interakcije komponenti i emergentne fenomene. U suštini, postoje dve osnovne komponente ABM (Wooldridge, 2002): agenti i okruženje. Svaki agent okarakterisan je skupom individualnih osobina i svojim ponašanjem. Ponašanje agenata određeno je jednostavnim pravilima na osnovu međusobnih interakcija. Okruženje ima određenu autonomiju, tj. poseduje određeni stepen nezavisnosti od onoga šta agenti rade, ali je takođe pod uticajem ponašanja agenata. Modeliraju se međusobne interakcije između agenata, kao i interakcija između agenata i okruženja.

Prvo ćemo pojasniti šta je to agent, zatim zajednica agenata i na kraju okruženje u kome se nalaze agenti.

Dizajn agenata je najvažnija komponenta izgradnje agent-baziranog sistema. Premda ne postoji opšte prihvaćena definicija pojma „*agent*“, obično se pod agentom podrazumevaju različiti tipovi nezavisnih komponenti (programi, modeli, pojedinci) čije se ponašanje može kretati od jednostavnih reaktivnih pravila odlučivanja do složenih adaptivnih inteligentnih komponenti (Bošnjak, 2006). Brustoloni (1991) agente smatra jednostavnim sistemima sposobnim za autonomne, namerne akcije u stvarnom svetu. Maes (1995) zamenjuje „realni svet“ terminom „okruženje“. Maes posmatra agenta kao računarski sistem koji je smešten u kompleksno dinamičko okruženje. Agent je (računarski) sistem koji koristi čula (senzore) za praćenje nekog podskupa sveta oko sebe, prosuđuje o opserviranom svetu, i koristi ograničen skup akcija za aktiviranje efektora kojima agent vrši promene u okruženju (Merrick i Maher, 2009). Okruženje se i menja od strane agenta. Agent samo parcijalno opaža stanja u kome se okruženje nalazi. Opservacija (opažanje) se razlikuje od zapaženih stanja.

Osnovna odlika jednog agenta je sposobnost da donosi nezavisne odluke. To zahteva da agent bude aktivna komponenta sistema, a ne čisto pasivna. Casti (1997) tvrdi da agenti treba da sadrže dva nivoa ponašanja, osnovna pravila ponašanja, kao i skup „pravila za promenu pravila“. Osnovni skup pravila određuje odgovore agenta na okolinu dok metapravila („pravila za promenu pravila“) obezbeđuju adaptaciju.

Osnovni gradivni element agent-baziranih modela je *adaptivni autonomni agent*. Ovakvi agenti pokušavaju da zadovolje niz postavljenih ciljeva (koji mogu biti fiksni ili vremenski zavisni) u promenljivom i nepredvidljivom okruženju. Ovi agenti su „*adaptivni*“ u smislu da se oni mogu koristiti svojim iskustvom kako bi kontinuirano unapređivali svoje sposobnosti pri promenljivim ciljevima i motivacijama. Takođe, njihova „*autonomnost*“ govori o samostalnosti u radu i nepostojanju potrebe za centralnom kontrolom. U zavisnosti od sistema koji modeliramo i okruženja koje ispunjavaju agenti, adaptivni autonomni agenti mogu da imaju različite oblike.

Proširujući adaptivnost i autonomnost, Wooldridge i Jennings (1995) uvode termin „*inteligentni agent*“ i definišu ga kao „računarski sistem koji je sposoban za *fleksibilne autonomne aktivnosti* kako bi ispunio projektovane *ciljeve*“. Slično, Poole, Mackworth i Goebel (1998) označavaju agenta kao sistem koji deluje inteligentno na date okolnosti i prema ciljevima, koji je fleksibilan na promene u okruženju i promenu ciljeva.

Ono što razlikuje inteligentnog agenta od jednostavnog agenta jeste njegova fleksibilnost. Prema Wooldridgu i Jenningsu (1995), fleksibilni agent ima sledeće osobine: autonomnost, socijalne sposobnosti, reaktivnost i proaktivnost.

U različitim okruženjima, agenti mogu imati posebne karakteristike sa različitim zadacima. Reakcija na okolinu, autonomija, ciljna orijentacija i istrajnost su glavne karakteristike koje razlikuju agente od drugih programa. Osim toga, agentima se često pripisuje određen stepen *intencionalnosti*. To jest, njihovo ponašanje se objašnjava preko metaforičkog rečnika uverenja, želja, motiva, pa čak i emocija, koncepata koji se više primenjuju na ljude nego na računarske programe.

Moć agenata dolazi od njihove interakcije sa okolinom i drugim agentima. Konkretno, u društvenim naukama kao što je ekonomija, ili u populacionoj biologiji, akcenat se stavlja na interakcije agenata a manje na njihovo autonomno delovanje (Schweitzer, 2007). *Više-agentski sistem* (Multi-Agent System - MAS) je sistem koji se sastoji od *velikog broja* agenata koji međusobno *interaguju* sa *malo ili bez centralne kontrole* (Axelrod, 2003). Uopšteno govoreći, jedan MAS ima sledeće karakteristike (Jennings et al., 1998): (1) svaki agent u MAS je parcijalno informisan ili ograničenih mogućnosti (znanje, informacije ili resursi); (2) ne postoji globalni sistem kontrole; (3) podaci u MAS su decentralizovani; (4) akcije su asinhronne; i (5) agenti mogu biti heterogeni, na primer, prema predstavljanju znanja, formatu podataka, modelu zaključivanja, cilju, arhitekturi, algoritmima, jeziku ili hardverskoj platformi.

Pored toga, agenti mogu da reprezentuju različite komponente sistema koji, takođe, mogu biti kompleksni. Na primer, na finansijskom tržištu, neki agenti mogu predstavljati trgovce, neki investicione analitičare, banke, institucionalne investitore, koji ne moraju obavezno direktno da utiču na tržište, već to čine preko posrednika.

Kod izgradnje MAS, često se postavlja pitanje izbora između složenih agenata ili složenih veza i interakcija. Arthur et al. (1997), ističu da je način interakcije između agenata mnogo važniji od načina pojedinačnog donošenja odluka. Zbog toga, autori smatraju da istraživači agent-baziranih ekonomskih modela treba da pronađu što jednostavnije ponašanje agenata koje će stvoriti traženi emergentni fenomen, pre nego ono koje je blisko aktuelnom ljudskom ponašanju. Pored toga, određene bihevioralne osobine utiču na način i učestalost međusobne interakcije agenata, a ne toliko na sam kvalitet donešenih odluka. Kontrola ovih parametara može da vodi ka ciljnom emergentnom fenomenu. Model koji razvijamo u ovom radu upravo stavlja akcenat na kognitivno-bihevioralno ponašanje agenata u grupi, za razliku od modela sa visoko inteligentnim agentima (poput LeBaronovog modela).

U načelu, agent-bazirano modeliranje predstavlja istraživačku metodologiju koja na poseban način izgrađuje model, a agent-bazirane simulacije su konkretan način korišćenja simulacije. Međutim, gotovo sve agent-bazirane simulacije konstruisane su pomoću ABM metodologije, i obrnuto. Prema tome, ova dva pojma se često koriste kao sinonimi. Zbog toga smo u ovom radu integrisali oba pojma u jedan termin - **agent-bazirano modeliranje i simulacije** (ABMS).

Postupak izgradnje ABMS polazi od posmatranja realnog sistema i prikupljanja podataka. Model se gradi prema apstrakciji ciljnog sistema i utvrđenim pretpostavkama. Izvedeni model se prevodi u računarski program koji se potom izvršava više puta. Procesom simulacije dobijaju se rezultati u obliku serija podataka i odgovarajuće statistike koja govori o valjanosti i pouzdanosti dobijenih rezultata. Simulirani podaci se mogu (i moraju) upoređivati sa podacima prikupljenim iz ciljnog realnog sistema (Troitzsch, 2004). Ipak, u većini slučajeva, računarski modeli ne moraju direktno da polaze od posmatranih podataka, već od teorije na kojoj se zasniva model. Tada se obično polazi od verbalnog opisa teorije koja odražava naša verovanja o tome kako realni sistem funkcioniše, a rezultati simulacije se upoređuju sa stilizovanim činjenicama umesto sa prikupljenim podacima. Ovaj pristup koristimo u izgradnji našeg modela i postupka simulacije. Sa finansijskog tržišta ne koristimo konkretne finansijske vremenske serije, već osnovu modelovanja čine stilizovane činjenice zapažene u velikoj većini tih serija. Takođe, cilj našeg modela je da replicira najvažnije stilizovane činjenice pa se naši rezultati upoređuju sa zajedničkim osobinama finansijskih vremenskih serija, kao i rezultatima drugih modela.

#### 4. Jednostavni agent-bazirani model finansijskog tržišta

U nastavku rada prikazaćemo jedan pojednostavljeni ABMS model finansijskog tržišta. Osnovni elementi dizajna veštačkog tržišta prikazani su u LeBaron (2001), i Wan et al. (2002), a detaljnije razrađeni i prošireni u Radović (2011). Najznačajnije komponente ABM modela su *model tržišta* (instrumenti trgovanja, tipovi naloga, mehanizam formiranja cene) i *model veštačkog agenta* (investiciona politika i strategija, preference agenata). Iznećemo najznačajnije komponente modela.

Osnovnu strukturu modela čini  $N$  agenata ( $i=1, 2, \dots, N$ ). Model dozvoljava postojanje više vrsta agenata, koji nisu u direktnoj interakciji, već isključivo putem market mejkera. Model koristi model trgovanja koji podrazumeva da se celokupno trgovanje obavlja jednom dnevno. Ovaj prilaz je poznat u literaturi (Levy et al., 2000; Chen and Yeh, 2001) i odslikava trgovanje koje se realizuje na realnim tržištima putem periodične aukcije.

Radi pojednostavljenja, na tržištu postoje dve aktive sa kojima je moguća trgovina: (1) nerizična aktiva – novac, i (2) rizična aktiva – akcije otvorenih javnih kompanija. Ukupan iznos novca ( $C$ ) i akcija ( $S$ ) raspoloživih za trgovanje na tržištu ostaje nepromenjen. Pretpostavka je da je cena akcija kontinuirano promenljiva sa  $p(t)$  cenom po akciji u vremenu  $t$ . Vreme je diskretno ( $i=1, 2, \dots$ ). Pored toga, na ulaganje u gotovinu se ne ostvaruje kamata, a troškovi posredovanja u trgovini se ne naplaćuju.

Bazični okvir veštačkog finansijskog tržišta razmatran u ovom radu predstavljen je standardnim modelom vrednovanja aktive (*standard asset pricing model*). Tržišna dinamika opisana je interakcijom heterogenih agenata. Svaki od njih ima za cilj da maksimizira očekivanu korisnost baziranu na budućim projekcijama. Svaki veštački agent prilagođava svoj portfolio koji se sastoji od  $s$  akcija pojedinačne rizične aktive i nerizične gotovine  $c$ . Pri ceni akcija od  $p$ , ukupan kapital agenta u vremenu  $t$  je  $W_t = c_t + p_t s_t$ . Trgovci mogu da investiranjem povećaju svoj kapital. Drugim rečima, u svakom trenutku vremena, svaki trgovac ima dva načina da zadrži svoje bogatstvo, tj.

$$W_{i,t} = c_{i,t} + p_t h_{i,t} \quad (1)$$

gde  $c_{i,t}$  i  $h_{i,t}$  označavaju novac i broj akcija u posedu trgovca  $i$  u vremenu  $t$ .

Izabrana varijabla za optimizaciju modela je  $h_{i,t}$ . Dobro je poznato da je pod pretpostavkama CARA korisnosti i Gaussian distribucije za projekcije, željena tržišna trgovca  $i$  (ili optimalna frakcija investicija)  $h_{i,t}^*$ , za posedovanjem akcija kao rizične active linerana funkcija očekivanog viška prinosa:



$$h_{i,t}^* = \frac{E_{i,t}(p_{t+1}) - p_t}{\lambda \sigma_{i,t}^2} \quad (2)$$

gde je  $\sigma_{i,t}^2$  uslovna varijansa od  $p_{t+1}$  pod uslovom  $I_{i,t}$ , sa dodatim ograničenjima  $s_i^* \geq 0$  (nema držanja kratke pozicije) i  $w_i \geq p_t s_i^*$  (ne postoji mogućnost zaduživanja). Strategija agenta je da proda akcije ukoliko je  $s_t > s_i^*$ , odnosno da kupi akcije kada je  $s_t < s_i^*$ .

U realnom životu, očekivanja u vezi sa cenama akcija i dividendama umnogome zavise od informacija sa tržišta. U našem modelu informacije dolaze na tržište u slučajnim intervalima vremena. Informacije mogu varirati od „veoma negativnih (-1)“ preko „neutralnih (0)“ do „veoma pozitivnih (+1)“. U našem modelu veštački agenti koriste pojednostavljene modele predviđanja. Radi pojednostavljenja, podrazumevamo postojanje tri različita tipa agenta:

- Agent – fundamentalista (*fundamentalist agent*). On koristi fundamentalističku strategiju koja uvek teži održanju cena na određenom nivou. To znači da će prodati akcije ukoliko je cena iznad fundamentalne vrednosti, i obrnuto kupiti po ceni nižoj od fundamentalne vrednosti. Treba naglasiti da agenti ne interpretiraju na isti način svaku pojedinačnu informaciju koju dobiju. Samo ovaj tip agenata reaguje na novosti.
- Agent – čartista (*chartist agent*). On kreira strategiju na osnovu posmatranja tržišnog trenda za precizirani vremenski period u prošlosti. Ovaj metod je poznat i kao „pomeranje proseka“ (*moving average - MA*). Agent prodaje ako je MA(h) vrednost, izračunata za  $h$  vremenski horizon, viša od tekuće cene. Štaviše, ovi agenti se mogu ponašati kao tzv. *momentum trgovci* (jednostavni trgovci koji se bave tehničkom analizom i čija je projekcija sutrašnjih prinosa jednaka današnjim prinosima).
- Neinteligentni agent. On se odlučuje za transakciju kupiti ili prodati slučajnim izborom sa verovatnoćom 0,5.

Nakon upućivanja svih naloga, kriva tražnje (ponude) nastaje kao agregacija naloga svih agenata koji žele da izvrše kupovinu (prodaju). Tražnja i ponuda određuju ravnotežnu cenu, pri čemu ponuda i tražnja samo balansiraju, tj. market meker pronalazi cenu trgovanja koja obezbeđuje da se svi upućeni nalozi izvrše (ostali mehanizmi koji omogućuju market mejkeru stvaranje profita su izbačeni iz modela radi pojednostavljenja).

Cilj market mejkera koji se odnosi na balansiranje ponude i tražnje može biti ostvaren izborom one cene koja održava nepromenjenim ukupan broj akcija u posedu investitora. U modelu koristimo pojednostavljenu šemu prilagođavanja cena, baziranu isključivo na višku tražnje

$$p = \frac{\sum_j h_j^* c_j}{\sum_j (1 - h_j^*) s_j} \quad (6)$$

gde se za vrednosti  $h_j^*$ ,  $c_j$ , i  $s_j$  uzimaju oni iznosi koji su postojali pre nego što se trgovina realizovala u tekućem danu.

## 5. Rezultati simulacije

Provera valjanosti ABM modela tržišta vrši se validacijom modela. Validacijom proveravamo sličnost ASM modela sa stvarnim finansijskim tržištem. Kao što smo pokazali u Delu 3.3, postoje tri načina validacije ASM modela: replikativna validacija, kojom upoređujemo izlazne rezultate simulacije sa realnim finansijskim vremenskim serijama; prediktivna validacija, kojom upoređujemo rezultate simulacije sa budućim kretanjima na tržištu; i strukturna validacija, kojom upoređujemo unutrašnju dinamiku simulacionog modela sa strukturom i dinamikom na realnom tržištu.

U ovom radu, provera veštačkog modela berze izvršena je replikativnom validacijom. Možda je najvažnija osobina agent-baziranih modela ta da rezultujuće vremenske serije poseduju najvažnije karakteristike realnih vremenskih serija (LeBaron, 2001). Izgrađeni model smatra se uspešnim ako vremenske serije tržišnih prinosa, dobijenih simulacijom, repliciraju ključne statističke osobine finansijskih vremenskih serija. Statističke osobine finansijskih vremenskih serija tržišnih prinosa nazivaju se „stilizovane činjenice“.

Proveru osobina finansijskih vremenskih serija izvršićemo većim brojem statističkih alata. Za statističku analizu i grafičku prezentaciju rezultata simulacije korišćeni su programski paketi Matlab R2011, Eviews 7.2, i R.

Simulacija se otpočinje sa  $N$  agenata, od kojih svaki poseduje deo ukupne sume novca  $C$  i raspoloživog broja akcija  $S$ . Događaji su raspodeljeni po danima. Nakon što je model pokrenut, agenti plasiraju naloge i realizuju ih jednom u toku svakog dana. Osnovni algoritam je sledeći:

```
% Initialization
Market.Initialize
% Cash and shares distributed amongst agents.
Agent.Initialize
% Start of new day
loop until Market.Day ≥ EndData
    % Agents forecast return-on-investment (with noise)
    [return, variance] = Agent.Forecast
    % Agents calculate optimal investment fraction and
    % submit trading schedules (optimal holdings as a
```

## Agent bazirano modeliranje – nova paradigma ekonomskog modeliranja

```
% function of stock price).  
Agent.SubmitOrder  
% Market maker finds market clearing price  
% (supply balances demand)  
NewPrice = Market.Clearing  
Market.Trade  
% Agents calculate stock's daily return-on-investment  
% and append to history  
Agent.Update  
Market.EndOfDay  
end loop
```

Prikazani model je implementiran u programu NetLogo 5.0. Parametri simulacija prikazani su u tabeli 1. Generisana je veštačka vremenska finansijska serija na osnovu 10.000 opservacija. Prvi korak u analizi odnosi se na procesiranje podataka tako da oni mogu biti statistički testirani. Računa se logaritamski prinos simulirane cene da bi se kreirala originalna vremenska serija. Slika 1 prikazuje simulirane serije cena akcija (a) i logaritamskih prinosa  $\{r_t\}$ , gde je  $r_t = \ln(p_t) - \ln(p_{t-1})$  (b).

Slika 2 pokazuje deskriptivnu statistiku serija prinosa, uključujući srednju vrednost, standardnu devijaciju i dr. Veštačka finansijska serija tržišnog prinosa podeljena je u tri dela: AS-1: od prvog do 3.000 simulacionog dana, AS-2: od 3.001 to 6.000 simulacionog dana, and AS-3: od 6.000 do 10.000 simulacionog dana. Takođe, normalizovana vremenska serija prinosa je „promešana“ na slučajnoj osnovi. Sve serije prinosa pokazuju snažno odstupanje od normalnosti, koeficijenti asimetrije i spljoštenosti statistički značajno odstupaju od očekivanih vrednosti za normalnu distribuciju. Sve serije imaju izraženu leptokurtozu i asimetrične repove. Sve serije imaju duže leve repove. Histogrami serija prinosa (Slika 2) pokazuju postojanje debljih repova i oštrijeg vrha nego kod normalne distribucije. Takođe, distribucije nisu simetrične. Konkretno, leva strana distribucije je duža od desne, tj. češće se dešavaju nagli padovi cene nasuprot skokovima.

Tabela 1. Parametri simulacije

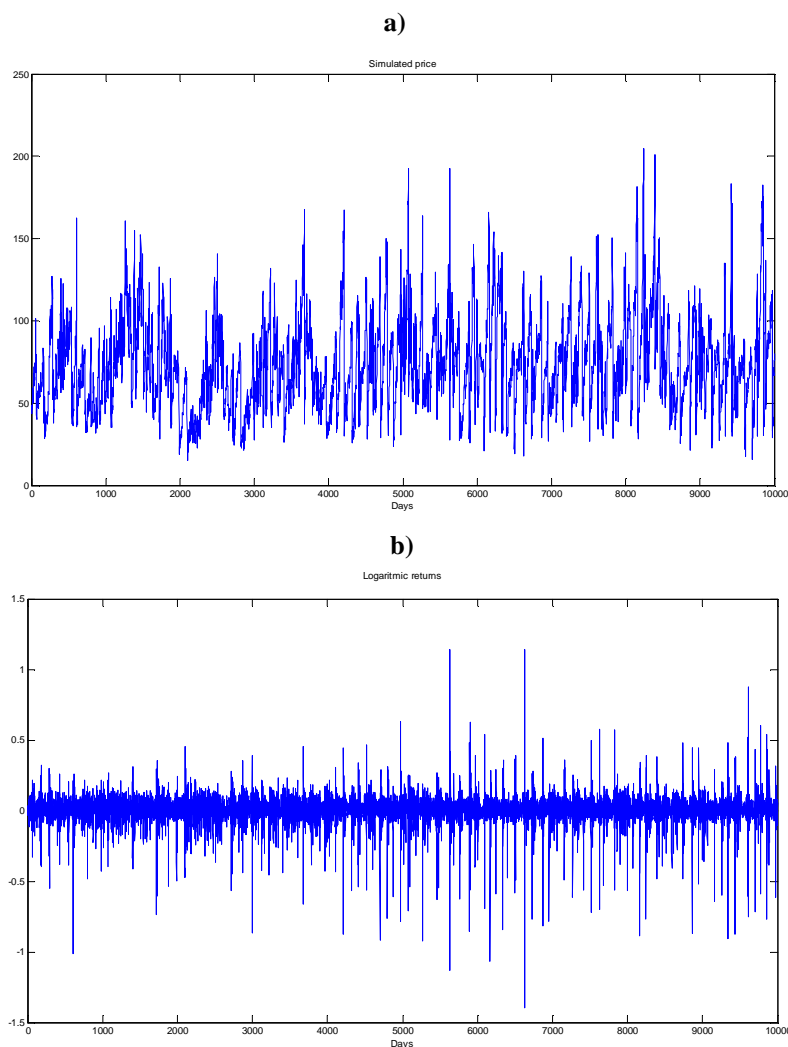
Parameters	Vrednost
Broj agenata ( $N$ )	500
Struktura <i>fundamentalista-čartista-bučan</i>	40-40-20
Ukupan broj akcija ( $S$ )	100.000
Početni kapital - gotovina ( $C$ )	1.000.000
Početna cena	100
Broj dana simulacije ( $T$ )	10000

Tabela 2. Osnovni statistički testovi heteroskedastičnosti i nelinearnosti

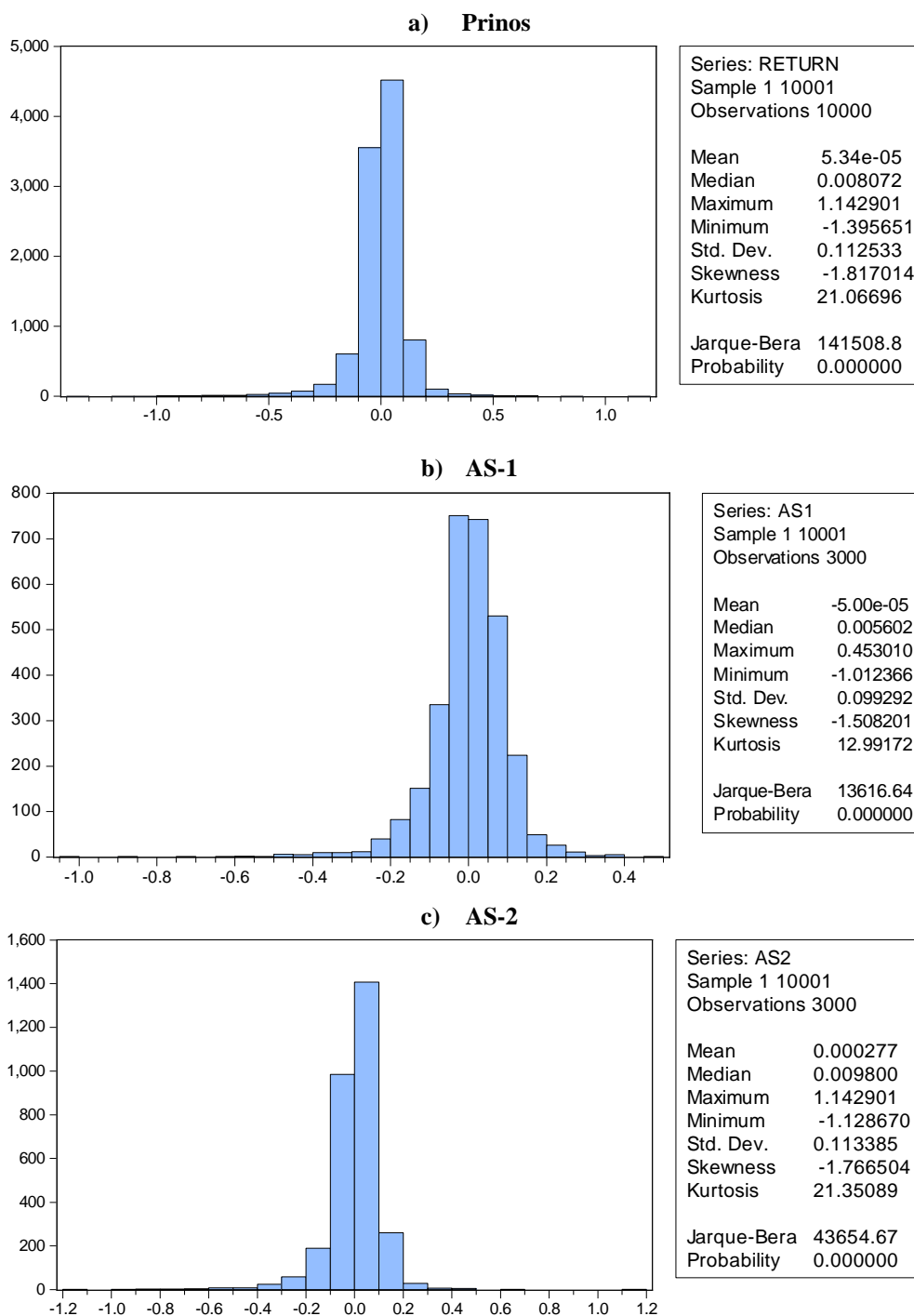
Serije	JB(5%)	KS(5%)	ARCH	BDS
Prinos	141508.85	0.40817	2116.5075	A (71.971)
AS-1 (1-3000)	13616.64	0.41165	459.0469	A (38.231)
AS-2 (3001-6000)	43654.67	0.41001	669.7441	A (38.999)
AS-3 (6001-10000)	67124.87	0.40715	884.0673	A (46.284)
“Promešana” serija (AS)	140010.87	0.05193	3.8917	R (2.044)

Kritična vrednost za Jarque-Bera (JB) test je 5.98637, za Kolmogorov-Smirnov (KS) je 0.01356, i za Arch test je 18.3070. Rezultati testa 'A' (accept) ili 'R' (reject) u koloni BDS zasnivaju se na nivou poverenja od 0.05 za  $\varepsilon=1$ , i DIM=5.

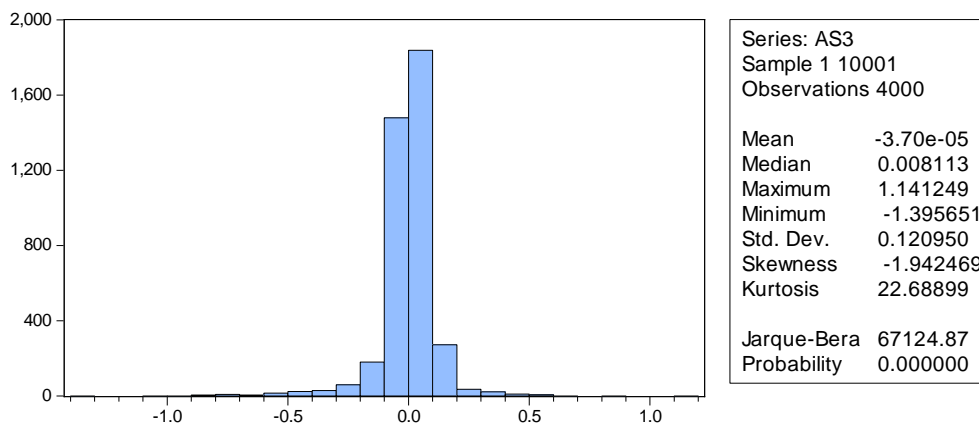
Slika 1. a) Simulirana vremenska serija kretanja cena; b) logaritamski prinos



Slika 2. Statistika serija veštačkih prinosa



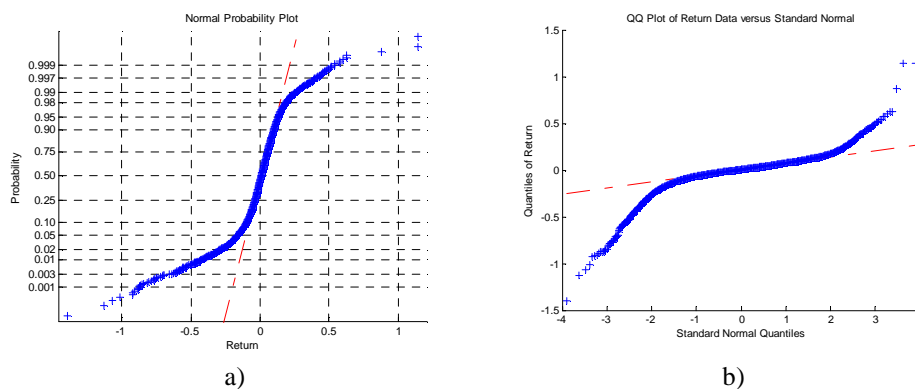
d) AS-3



Grafik verovatnoće normalne raspodele je koristan za procenu da li podaci potiču iz normalne distribucije. Pretpostavka o normalnosti prinosa je razumna ukoliko se većina podataka nalazi u blizini linije. Slično, quantile-quantile grafik je koristan za proveru da li dva uzorka dolaze iz iste raspodele. Oba grafika (slika 3) jasno potvrđuju da distribucija prinosa nije normalna.

Sve simulirane serija prinosa ukazuju na pojavu grupisanja volatilnosti (heteroskedastičnost) (Bollerslev, 1992). Engleov ARCH test ispituje postojanje grupisanja volatilnosti u vremenskim serijama. Poput ranijih testova, i ARCH test snažno odbacuje nultu hipotezu nepostojanja korelacije volatilnosti i normalnosti distribucije prinosa (tabela 2).

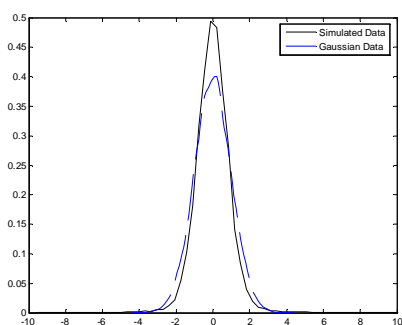
Slika 3. a) Grafik verovatnoće normalne raspodele i b) Quantile-quantile grafik



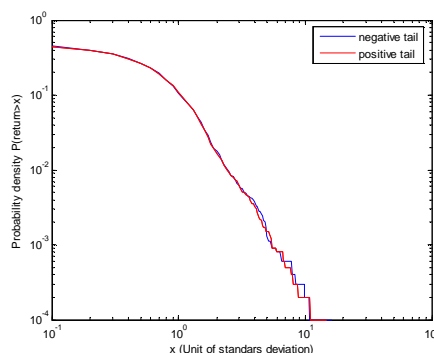
Jedan od najinteresantnijih rezultata simulacija agent-baziranih modela je da rezultujuće serije prinosa prate distribuciju stepenog zakona, sa jasno izraženim debelim repovima. Slike 4 i 5 pokazuju postojanje stepenog zakona distribucije

prinosa. Pored toga, Slika 5 ukazuje na pojavu skaliranja koje je zapaženo u realnim vremenskim serijama (Stanley and Mantegna, 1999). Slika pokazuje razdvojene Gausove distribucije od Levy distribuciji prinosa. Ova osobina ukazuje na pojavu multi-fraktalnog ponašanja i samosličnosti u posmatranim vremenskim serijama.

**Grafik 4. Distribucija normalizovanog prinosa**



**Slika 5. Gustina vevatnoće negativnih i pozitivnih prinosa.**



### Zaključak

Odstupanje empirijskih činjenica finansijskih podataka od pretpostavki klasične finansijske teorije pokrenulo je više različitih pravaca istraživanja. Jedan od njih je agent-bazirano modeliranje i simulacije (ABMS), i njihova primena u ekonomskoj nauci - agent-bazirana računarska ekonomija (ACE). Zasnovana na posmatranju ekonomije kao nelinearnog dinamičkog sistema, ACE stavlja akcenat na modeliranje komponenti sistema, predstavljenih veštačkim agentima i relacija između njih u kome se dinamika modela ispoljava kroz samoorganizovanost komponenti i pojavu emergentnih fenomena. Cilj ovog pristupa je bolje razumevanje kompleksnih obrazaca i fenomena opaženih u ekonomskim sistemima.

Računarska simulacija agent-baziranih modela je važna za izgradnju i proveru novih teorijskih modela. Premda postoji više različitih načina validacije modela kroz simulaciju, ova oblast je još uvek nova i bolje prihvatanje ABM modela u budućnosti će u mnogome zavistiti od izgradnje jasnijih i preciznijih tehnika za proveru izgrađenih modela.

ABMS metodologiju smo primenili u izgradnji jednostavnog modela finansijskog tržišta. Model agenta koji predstavlja trgovca zasniva se na uprošćenom modelu tehničkog i fundamentalnog trgovca. Mehanizam formiranja tržišne cena bazira se na modelu periodične aukcije sa pronalaženjem ravnotežne cene koja izjednačuje ponudu i tražnju. Naši rezultati pokazuju da i pored toga što se model zasniva na izuzetno pojednostavljenom modelu tržišnih učesnika i samog

tržišta, vremenske serije prinosa dobijene računarskom simulacijom ispoljavaju najznačajnije osobine prinosa na realnim finansijskim tržištima. Vremenske serije tržišnih prinosa dobijene simulacijom jasno pokazuju odstupanje od normalne distribucije prinosa. Rezultujuće serije prinosa imaju izraženo visoke vrednosti koeficijenta asimetrije (*skewness*) i spljoštenosti (*kurtosis*), mnogo izraženiji vrh distribucije u odnosu na normalnu distribuciju i pojavu debelih repova u distribuciji (*fat tail distribution of returns*). Konačno, simulirane serije prinosa reprodukuju osobinu postojanja heteroskedastičnosti - grupisanja volatilnosti (*volatility cluster*), kao i pojavu nelinearnosti u seriji prinosa.

Buduća istraživanja autora u ovoj oblasti idu u pravcu kreiranja realnijeg modela trgovaca, inkorporiranja mikrostrukture tržišta u model, i modeliranja relacija između tržišnih učesnika. ABMS modeliranja zahtevaju i kvalitetniju prediktivnu validaciju modela, kao i mnogo bliže povezivanje agent-baziranih računarskih modela i modeliranja rizika na finansijskom tržištu. Međutim, ABMS metodologija predstavlja veliki iskorak u odnosu na klasično matematičko-računarsko modeliranje i sa ubrzanim rastom računarske snage procesora i paralelnog računarstva dobijaće sve značajniju ulogu.

### Literatura

1. Ariel, R. (1987) A Monthly Effect on Stock Returns. *Journal of Financial Economics*. 18: 161-174.
2. Arthur, B. W., Durlauf, S. and Lane, D. (editors) (1997) The Economy as an Evolving Complex System II, *SFI Studies in the Sciences of Complexity*, vol. 27. Addison-Wesley, Reading, MA.
3. Arthur, W. Brian (1990) Positive Feedbacks in the Economy, *Scientific American*, 262 (February 1990), pp.92-99
4. Arthur, W. Brian (2005) Complexity and the Economy: An Interview with W. Brian Arthur, *Complexity And The Economy: Implications for Economic Policy*, John Finch ed., pp.17-32
5. Arthur, W.B. (1994) Inductive reasoning and bounded rationality, *American Economic Review*, 84(2):406-411.
6. Axtell, Robert (2000) Why Agents? On the Varied Motivations for Agent Computing in the Social Sciences, in *Proceedings of the Workshop on Agent Simulation: Applications, Models and Tools*, Argonne National Laboratory, IL.
7. Bailey E. Roy (2005) *The Economics of Financial Markets*, Cambridge University Press.
8. Banz, R (1981) The Relationship Between Market Value and Return of Common Stocks, *Journal of Financial Economics*, November pp.453-460.
9. Barone, E (1990) The Italian stock market: efficiency and calendar anomalies, *Journal of Banking and Finance*, 14, 483-510.
10. Bar-Yam, Yaneer (1997) *Dynamics of complex systems*, Addison-Wesley.
11. Bianchi, C., Cirillo, P., Gallegati, M. and Vagliasindi, P.A. (2007) Validating and Calibrating Agent-Based Models: A Case Study. *Computational Economics*, 30 (3): 245-264.
12. Bollerslev, T., Chou, R.Y., Kroner, K.F. (1992) ARCH modeling in finance: A review of the theory and empirical evidence, *Journal of Econometrics*, 52, 5-59.
13. Bonabeau, Eric (2002) Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems, *PNAS*, vol. 99, suppl. 3, pp.7280-7287
14. Bošnjak, Z. (2006) *Intelligentni sistemi i poslovna primena*, Novi Sad.



### **Agent bazirano modeliranje – nova paradigma ekonomskog modeliranja**

---

15. Brustoloni, J.C. (1991) Autonomous agents: Characterization and requirements, (Technical Report CMU-CS-91-204) Pittsburgh, PA: Carnegie Mellon University.
16. Chen, S.H. and Yeh, C.H. (2001) Evolving traders and the business school with genetic programming: A new architecture of the agent-based artificial stock market, *Journal of Economic Dynamics and Control*, 25(3-4), 363–393.
17. Conrad, J. and Kaul, G. (1988) Time-variation in expected returns, *Journal of Business*, 61(4): 409–425.
18. Cutler, D., Poterba, J. and Summers, L. (1989) What moves stock prices?, *Journal of Portfolio Management*, 15, 4–12.
19. Dawson, M.R.W. (2004) *Minds and Machines: Connectionism and Psychological Modeling*, Blackwell.
20. Engle, R.F. (1995) *ARCH: Selected Readings*, Oxford University Press.
21. Fama, E. and French, K. (1992) The Cross-Section of Expected Stock Returns, *Journal of Finance*, 47, 427–465.
22. Fama, E.F. and French, K.R. (1988) Dividend yields and expected stock returns, *Journal of Financial Economics*, 22: 3–25.
23. Farmer, J. Doyne and Geanakoplos, John (2009), The virtues and vices of equilibrium and the future of financial economics, *Complexity*, 14(3): 11–38.
24. Finnerty, J. (1976) Insiders and Market Efficiency, *Journal of Finance*, 31, pp. 1141–1148.
25. French, Kenneth (1980) Stock Returns and the Weekend Effect, *Journal of Financial Economics*, 8, 55–69.
26. Gibbons, M., and Hess, P. (1981) Day of the week effects and asset returns, *Journal of Business*, 54, 579–596.
27. Haugen, R and Jorion, P (1996) The January Effect: Still Here after All These Years, *Financial Analysts Journal* (January-February): 27 – 31.
28. Holland, J. (1995) *Hidden order: How adaptation builds order*, Basic Books.
29. Holland, J. H. and Miller, J. H. (1991) Artificial adaptive agents in economic theory, *American Economic Review*, 81(2):365–370.
30. Holland, John H. (1992) Genetic Algorithms, *Scientific American*, 267, 66–72.
31. Keim, D (1983) Size-related anomalies and stock return seasonality: further empirical evidence, *Journal of Financial Economics*, 12:13–32.
32. Lakonishok, J. and Lee, I. (2001) Are Insiders' Trades Informative, *Review of Financial Studies*, 14 (1), 79–112.
33. Lakonishok, J. and Smidt, S. (1988) Are seasonal anomalies real? A ninety year perspective, *The Review of Financial Studies*, 1, 403–425.
34. LeBaron, B. (2001) A builder's guide to agent based financial markets, *Quantitative Finance*, 1 (2). 254–261.
35. LeBaron, B. (2006) Agent-based computational finance, In *Handbook of Computational Economics, Vol. 2: Agent-Based Computational Economics*, L.Tesfatsion and K. Judd, Eds. North-Holland.
36. Lo, A. W. and MacKinlay, A. C. (1999) *A Non-Random Walk Down Wall Street*, Princeton University Press.
37. Lo, A.W. and MacKinlay, A.C. (1988) Stock market prices do not follow random walks: evidence from a simple specification test, *Review of Financial Studies*, 1(1): 41–66.
38. Maes, P. (1995) Artificial life meets entertainment: Life like autonomous agents, *Communications of the ACM*, 38(11), 108–114.
39. Mandelbrot, B. (1963) The variation of certain speculative prices. *The Journal of Business*, 36: 394–419.
40. Mandelbrot, B.B. (1972) Statistical methodology for nonparametric cycles: From covariance to R/S analysis, *Annals of Economic and Social Measurement*, 1/3, 259–290.

41. Mandelbrot, B.B., (1969) Long - run linearity, locally Gaussian process, H-spectra, and infinite variances, *International Economic Review*, 10, 82 -111.
42. Merrick, K.E. and Maher, M.L. (2009) *Motivated Reinforcement Learning*, Springer.
43. Poole, D., Mackworth, A., and Goebel, R. (1998) *Computational intelligence - A logical approach*, New York: Oxford University Press.
44. Radović, Ognjen (2011) *Agent-bazirani model elektronskog finansijskog tržišta*, doktorska disertacija, Ekonomski fakultet u Subotici, maj 2011.
45. Reiganum, M (1981) Misspecification of capital asset pricing: empirical anomalies based on earnings, yields and market values, *Journal of Financial Economics* 9:19–46.
46. Rickles, Dean (2009) Econophysics and Financial Market Complexity, In J. Collier and C. Hooker (eds.). *Handbook of the Philosophy of Science, Vol. 10: Philosophy of Complex Systems*. Elsevier.
47. Tesfatsion, L. (2002) Agent-Based Computational Economics: Growing Economies From the Bottom Up, *Artificial Life*, 8, 55–82.
48. Tesfatsion, L. (2003) Agent-based computational economics: modeling economies as complex adaptive systems, *Information Sciences*, 149:4, 262-268.
49. Tesfatsion, L. (2006) Agent-Based Computational Economics: A Constructive Approach To Economic Theory, in L. Tesfatsion and K. L. Judd (eds.), *Handbook of Computational Economics*, Volume 2: Agent-Based Computational Economics, Handbooks in Economics Series, North-Holland.
50. Troitzsch, K. (2004) Validating simulation models, *Proceedings of the 18th European Simulation Multiconference*, pp. 98-106.
51. Wan, H.A., Hunter, A., and Dunne, P. (2002) Autonomous Agent Models of Stock Markets, *Artificial Intelligence Review*, 17:2, 87-128.
52. Wooldridge, M., and Jennings, N. R. (1995) Intelligent agents: Theory and practice, *The Knowledge Engineering Review*, 10(2), 115-152.
53. Wooldridge, Michael (2002) *An Introduction to Multi-Agent Systems*, John Wiley and Sons, Chichester, England.

## **AGENT-BASED MODELING – A NEW PARADIGM OF ECONOMIC MODELING**

**Abstract:** Standard financial models are based on the assumptions of the market agents' rationality and the efficient market theory. A significant empirical evidence indicates the unreality of these assumptions. Agent-based modeling and simulations represent a new approach in the economic systems' monitoring and modeling by using nonlinear dynamic systems. Agent-based modelling is a computational method based on synthetic approach for building a model as a set of a number of autonomous entities (agents) and simulation of their behaviour and interactions. The aim of the paper is to give a review of the postulates of agent-based modeling and to stress the advantages of this approach in comparison to classical financial models. to show its application at the financial markets. Besides that, the authors develop a simple agent-based model of financial market with the periodic auction. Resulting time series of the model of artificial financial market replicate successfully the most important statistical features of the returns at the real financial markets and emphasizes the deviation of the normal distribution as a pillar of the classical financial theory.

**Key words:** Agent-Based Modeling, Agent-Based Simulation, Agents, Artificial Stock Market.