

UNIVERSITATEA BABEȘ-BOLYAI DIN CLUJ-NAPOCA  
FACULTATEA DE ȘTIINȚE ECONOMICE ȘI GESTIUNEA  
AFACERILOR  
DEPARTAMENTUL DE INFORMATICĂ ECONOMICĂ



TEZĂ DE DOCTORAT REZUMAT

---

**Contribuții la dezvoltarea aplicațiilor  
inteligente de tranzacționare bursieră**

---

*Conducător:*

profesor univ.dr. GHIȘOIU Nicolae

*doctorand:*

STAN Alexandru-Ioan

27 noiembrie 2013

*Comisie de Doctorat:*

prof.univ.dr. TOMAI Nicolae, *președinte*

prof.univ.dr. COCIANU Cătălina-Lucia, *referent*

prof.univ.dr. NEGREA Bogdan, *referent*

prof.univ.dr. SILAGHI Gheorghe Cosmin, *referent*

# Cuprinsul tezei

Cuprinsul tezei	v
Nomenclatură	ix
Listă de figuri	x
Listă de tabele	xiv
Listă de algoritmi	xvi
<b>I Introducere, Context și Studiul Literaturii</b>	<b>1</b>
<b>1 Introducerea Tezei</b>	<b>2</b>
1.1 Context . . . . .	3
1.2 Motivație . . . . .	4
1.3 Obiectivele Cercetării . . . . .	6
1.4 Organizarea tezei . . . . .	8
<b>2 Crahul Bursier Reversibil din 2010 și Metrica VPIN</b>	<b>11</b>
2.1 Crahul Bursier Reversibil din 2010 . . . . .	12
2.2 Metrica VPIN . . . . .	15
2.2.1 O Descriere Succinată a Modelului Teoretic . . . . .	16
2.2.2 Metrica VPIN ca Estimator al Toxicității Fluxului de Ordine Bursiere . . . . .	18
2.2.3 Metrica VPIN ca Instrument de Supervizare a Piețelor Fi- nanciare . . . . .	19
2.3 Concluzii . . . . .	20
<b>3 Piețele Financiare Artificiale Multi-agent</b>	<b>21</b>
3.1 Modelele Multi-agent . . . . .	22

3.2	Modelele Multi-agent în Economie și Finanțe . . . . .	23
3.3	Piețele Financiare Artificiale Multi-agent . . . . .	26
3.3.1	ATOM . . . . .	30
3.3.1.1	Prezentare generală . . . . .	31
3.3.1.2	Scurtă prezentare a conceptelor platformei ATOM . . . . .	33
3.4	Concluzii . . . . .	36
<b>II Rezultate și Contribuții Academice</b>		<b>38</b>
4	<b>Un Model Dinamic în Volum-timp pentru Caracterizarea Crahurilor Reversibile Ultra-rapide</b>	<b>39</b>
4.1	Introducere . . . . .	40
4.2	Modelul . . . . .	43
4.2.1	Modelarea Proceselor de Preț . . . . .	43
4.2.2	Estimarea Dinamicii Tranzacțiilor Informate pe Durata Crahului . . . . .	48
4.2.3	Determinarea Frației de Volum Informat . . . . .	50
4.2.4	Estimarea Parametrilor Sistemului . . . . .	53
4.2.4.1	Piața fără Efect de Levier . . . . .	54
4.2.4.2	Cazul General . . . . .	56
4.3	O Versiune Competitivă a Modelului Prețului . . . . .	57
4.4	Rezultate Experimentale . . . . .	61
4.4.1	Cadrul Simulării . . . . .	61
4.4.2	Rezultate . . . . .	62
4.5	Concluzii . . . . .	65
4.6	Contribuții . . . . .	66
5	<b>Evaluarea Metricii VPIN cu Ajutorul unei Configurații Specifice de Tranzacționare la Înaltă Frecvență</b>	<b>69</b>
5.1	Introducere . . . . .	70
5.2	Câteva Posibilele Neajunsuri ale Modelului VPIN . . . . .	71
5.3	Strategie Empirică . . . . .	73
5.3.1	O Scurtă Descriere a Platformei de Simulare . . . . .	74
5.3.2	Comportamentul Agenților . . . . .	74
5.4	Rezultate Experimentale . . . . .	75
5.5	Un argument teoretic cu privire la efectul inerțial al metricii VPIN . . . . .	78
5.6	Concluzii . . . . .	84

5.7	Contribuții . . . . .	85
<b>6</b>	<b>O Metodă Alternativă de Determinare a Toxicității Fluxului de Ordine utilizând SVM</b>	<b>87</b>
6.1	Introducere . . . . .	88
6.2	Modelul . . . . .	89
6.3	Estimarea Probabilității de Tranzacționare Informată . . . . .	91
6.4	Strategia Empirică . . . . .	96
6.4.1	Comportamentul Agenților . . . . .	98
6.5	Rezultate Experimentale . . . . .	98
6.6	Concluzii . . . . .	102
6.7	Contribuții . . . . .	102
<b>7</b>	<b>A VPIN Alternative Algorithmic Approach to Assessing Flow Toxicity</b>	<b>104</b>
7.1	Introducere . . . . .	105
7.2	Strategia Empirică . . . . .	106
7.2.1	Contextul Simulării . . . . .	106
7.2.2	Tipurile de Agenți și Comportamentele Lor . . . . .	107
7.3	Modele Bazate pe Martingale Aditive . . . . .	108
7.3.1	Modelele în timp discret . . . . .	108
7.3.2	Caracteristicile Modelelor ce utilizează Martingale Aditive . . . . .	109
7.3.3	Modelul I (A) . . . . .	110
7.3.4	Modelul I (B) . . . . .	113
7.3.5	Modelul neomogen I (C) . . . . .	116
7.3.6	Modelul II . . . . .	118
7.4	Modele Bazate pe Martingale Multiplicative . . . . .	125
7.4.1	Caracteristicile Modelelor Bazate pe Martingale Multiplicative . . . . .	125
7.4.2	Model I (C) . . . . .	126
7.4.3	Modelul II . . . . .	127
7.5	Îmbunătățirea Viabilității Modelelor prin Optimizare Multi-obiectiv . . . . .	129
7.6	Strategie Algoritmă . . . . .	129
7.7	Rezultatele Simulării . . . . .	130
7.8	Concluzii . . . . .	133
7.9	Contribuții . . . . .	134

<b>8 Contribuții, Concluzii și Perspective ale Cercetării</b>	<b>135</b>
8.1 Contribuții și Concluzii . . . . .	136
8.2 Perspective ale Cercetării . . . . .	140
<b>Bibliografie</b>	<b>141</b>
<b>Listă de publicații</b>	<b>158</b>
<b>Appendices</b>	<b>159</b>
<b>Anexa A</b>	
<b>Implementarea Algoritmului Nepredictiv al Creatorilor de Piață</b>	<b>160</b>
A.1 Introducere . . . . .	161
A.2 Algoritmul Nostru Nepredictiv . . . . .	162
A.3 Implementare . . . . .	163
A.4 Rezultatele Simulării Algoritmului . . . . .	165
<b>Anexa B</b>	
<b>Generarea Proceselor Poisson</b>	<b>167</b>
B.1 Generarea Proceselor Poisson Omogene . . . . .	168
B.2 Generarea Proceselor Poisson Neomogene . . . . .	168

# Cuprinsul rezumatului

Cuprinsul tezei	i
Cuprinsul rezumatului	v
Nomenclatură	vi
<b>1 Introducere</b>	<b>1</b>
1.1 Context . . . . .	2
1.2 Motivație . . . . .	3
1.3 Obiectivele Cercetării . . . . .	5
1.4 Organizarea tezei . . . . .	7
1.4.1 Partea Întâi - Introducere, Context and Studiul Literaturii .	7
1.4.2 Partea a Doua - Rezultate și Contribuții Științifice . . . . .	8
<b>2 Contribuții și Concluzii</b>	<b>10</b>
Listă de publicații	16
Bibliografie	17

**Cuvinte cheie.** crahul bursier din 6 mai 2010, piețe artificiale multi-agent, simularea craturilor bursiere, inteligență artificială, finanțe computaționale

# Nomenclatură

ATOM Artificial Open Market Framework

CFTC United States Commodity Futures Trading Commission

ETF Exchange-traded Funds or Index Trackers

PIN Probability of Informed Trading

SEC United States Securities and Exchange Commission

SVM Support Vector Machines or Support Vector Networks

TF Trend Followers

VPIN The Volume Synchronized Probability of Informed Trading

ZIT Zero Intelligence Traders



# Capitolul 1

## Introducere

## 1.1 Context

Există foarte puține domenii de cercetare care să nu fi fost afectate sau complet remodelate de revoluția computațională apărută în a doua jumătate a secolului trecut, revoluție ce continuă să câștige teren și amploare de la un an la altul. Științele economice, în general, și știința financiară, în special, nu fac excepție de la această tendință. Apariția calculatoarelor de înaltă performanță a permis economiștilor moderni să împingă limitele cercetării economice. Abordarea bazată pe modele informatice în economie a dat naștere unei *paradigme computaționale* [117, 170] alternative rigidei și austerei teorii neoclasice bazate pe modele matematice complexe ce neglijează nenumărate aspecte legate de acuratețea descrierii realităților economice.

Noua clasă de modele computaționale contestă și redefinește aproape toate ipotezele sacrosancte ale teoriei economice neoclasice, ipoteze ce fac modelele matematice asociate atrăgătoare și mai ales *solubile*. Astfel, concepte fundamentale standard, cum ar fi, de exemplu, *raționalitatea perfectă* a *Omului Economic* sau *omogenitatea agenților economici* sunt respinse și înlocuite cu ipotezele flexibile de *raționalitate limitată* [143], respectiv, *eterogenitatea* atributelor și comportamentului. Noile tipuri de agenți artificiali cu raționalitate limitată nu mai încearcă să optimizeze perfect utilitatea alegerilor lor, ci se rezumă să adopte un comportament mult mai realist, care vizează doar atingerea unor obiective satisfăcătoare.

Nevoia de modelele financiare apropiate de realitate a dus la utilizarea de modele bazate pe agenți (MBA) [89, 175], în particular a mediilor de tranzacționare bursieră artificiale caracterizate prin eterogenitate, raționalitate-limitată și dinamici ale prețurilor activelor care nu tind spre echilibru. Aici, agenții artificiali sunt abstracții mai mult sau mai puțin fidele ale actorilor din piețele de capital, traderi umani și sisteme informatice deopotrivă. Agenții pot fi dotați cu inteligență artificială completă, cu abilități de învățare și de analiză, cu strategii și așteptări financiare complexe, și, mai recent, cu facultăți adaptive și evolutive [84].

Întâlnirea dintre economie și modelele bazate pe agenți a dat naștere la o nouă ramură a economiei care a primit o atenție sporită în cercetarea economică și financiară recentă sub denumirea de *Economie computațională bazată pe agenți* (ECBA) [83] sau, mai precis, în context financiar, *Finanțe computaționale bazate pe agenți* (FCBA) [34]. FCBA studiază procesele economice dintr-o perspectivă computațională prin modelarea lor ca sisteme dinamice multi-agent. În ultimele două decenii, FCBA, în particular, s-a impus ca soluție eficientă în analiza problematicilor bursiere atât pentru cercetători și cât și pentru practicieni, datorită flexi-

bilității în abordarea ipotezelor specifice modelor teoretice neclasice și a faptului ca nu necesita fundamentări matematice specifice și sofisticate de tipul sistemelor dinamice diferențiale.

Modelele FCBA aplică metode numerice sau statistice pentru a analiza datele rezultate din simulările dinamicilor complexe, ce apar în piețele artificiale [99], pentru care modelele teoretice standard nu sunt ușor aplicabile. Ele adopta o filozofie constructivă pentru a reproduce configurații de piețe complicate caracterizate de echilibru instabil [71] în care crahurile și creșterile bruște ale preturilor activelor pot fi reproduse cu ușurință. Prin urmare, modelele FCBA nu au nevoie de ipoteze simplificatoare fiindcă, prin simulări repetate, modelatorul poate investiga cu ușurință diversitatea evoluțiilor posibile și discerne corect dinamica unor configurații financiare foarte specifice, imposibil de abordat în manieră clasică. Din aceste motive, ne propunem să le utilizeze în teza noastră pentru a reproduce și înțelege evenimente de tip *crah ultra rapid* ("Flash crash") pe piețele de capital.

## 1.2 Motivație

La data de 6 mai 2010, cotația contractului S&P 500 E-mini a pierdut brusc aproximativ 9 % din valoare în câteva zeci de secunde, pentru a recupera pierderile câteva minute mai târziu. Acest accident bursier a atras atenția asupra consecințelor extrem de grave pe care le pot avea pleiada de piețe de capital ultra sofisticate și complexe. După aproape cinci luni de investigație, cele două organisme guvernamentale americane de reglementare *Securities and Exchange Commission*(SEC) și *Commodity Futures Trading Commission*(CFTC) au prezentat un raport comun pe 30 septembrie 2010 intitulat "Rezultate privind evenimentele din 6 mai 2010"<sup>1</sup>, raport ce urmărește succesiunea de evenimente care a condus la acest *crah ultra rapid*. Mai multe explicații posibile au fost expuse atât de anchetă oficială cât și de comunitatea academică [49, 94]. Chiar dacă tranzacționarea la înaltă frecvență (*High-frequency trading*) a fost avansată ca una dintre cauzele posibile ale acestui eveniment bursier, raportul nu identifică în mod clar o singură clasă de factori responsabili de apariția crahului.

Dacă ancheta oficială nu culpabilizează în mod expres nici operatorii bursieri ce inițiază ordine cu înaltă frecvență și, nici, diversele și sofisticatele lor noi tipuri de strategii bursiere, aceasta totuși identifică o secvență automată de ordine de vânzare pe piața S& P 500 ca fiind acceleratorul principal al crahului. Această

---

<sup>1</sup><http://www.sec.gov/news/studies/2010/marketevents-report.pdf>

cantitate semnificativă de ordine de vânzare a fost urmată la scurt timp de un șoc de lichiditate, atât la nivelul indicelui compozit și cât al valorilor individuale, care a declanșat în final crahul.

În timp ce autoritățile guvernamentale de reglementare au corelat vag apariția crahului ultra rapid de dominația crescândă a ordinelor de înaltă frecvență în piețe, comunitatea academică [49] a oferit un singur model teoretic cu adevărat viabil capabil să explice satisfăcător șocul de lichiditate. Piatra de temelie a argumentației lor are ipoteza unei *asimetrii informaționale* pe care autorii modelului [49] o numesc *toxicitate a fluxul de ordine* bursiere. Ea presupune că creatorii de piață, în calitate de furnizori de lichiditate, au fost forțați să iasă din piață de către traderi posedând informații nepublice despre evoluția ulterioară a cursului. Aceștia, încercând să profite de avantajul informațional prin inițierea unui volum mare de ordine de înaltă frecvență, au declanșat în cele din urmă prăbușirea cursului.



Figura 1.1: Crahul bursier ultra rapid din 6 Mai 2010

În ciuda atenției considerabile primite din partea a diferite grupuri de analiză, economiști, trusturi media, cercetători și autorități guvernamentale de reglementare, cauza precisă a crahului din 6 mai 2010 rămâne în litigiu. Apariția crahurilor ultra rapide de mare amplitudine este o veste foarte proastă pentru investitori. Mai rea totuși, după părerea noastră, este atitudinea generală apărută ca răspuns, atitudine ce s-a axat mai degrabă pe instaurarea unor măsuri corective de atenuare a efectelor crahului, decât pe elucidarea cauzelor și prevenirea altor reapariții.

Deși crahurile apar uneori pe piețele financiare, experții remarcă cu îngrijorare că, în piețe actuale dominate de tranzacționări automate inițiate de calculatoare, crahurile se repetă cu o frecvență din ce în ce mai de mare. De exemplu, un crah ultra rapid de amplitudine mai mică a avut loc în urmă cu câteva luni, pe 23 aprilie 2013. Chiar dacă amplitudinea acestui eveniment a fost mult mai mică

decât cea a crahului din 2010, crahul ultra rapid din aprilie 2013 a provocat o depreciere rapidă a cursului cu aproape două procente.

Îngrijorarea actuală a investitorilor este alimentată de incidente tehnice din ce în ce mai frecvente. Cu câteva săptămâni în urmă, pe 26 august 2013, ședința de tranzacționare a bursei Nasdaq a fost oprită în plină activitate pentru o perioadă fără precedent de trei ore, ca urmare a unei probleme informatice. Perturbarea a împins responsabilii pieței să revadă sistemul de tranzacționare, și a ridicat noi întrebări despre posibilele neajunsuri ale piețelor electronice. Din fericire, blocarea pieței Nasdaq s-a produs într-o manieră ordonată și nu a provocat panică sau perturbat alte segmente ale piețelor de capital, și, prin urmare, nu a condus la un crah. Oficialii Nasdaq au anunțat ca problema se afla în sistemul software de diseminare a prețurilor. O investigație amănunțită este la ora actuală în curs de desfășurare.

Aceste episoade nu sunt lipsite de repercusiuni financiare concrete. Unii analiști [79] estimează pierderile temporare în valoare de piață urcând până la un trilion de dolari (\$ 1.000.000.000.000), ca urmare a scăderii temporare a cotațiilor din 6 mai 2010. Prin urmare, aceste incidente financiare periculoase sunt, evident, extrem de nocive pentru încrederea investitorilor în fiabilitatea generală a mecanismelor de stabilire a prețurilor. Ele pot induce un sentiment de neîncredere în rândul participanților din piețe, iar repetarea unor astfel de evenimente ar putea afecta strategiile lor investiționale.

În fața incertitudinii relative la cauzele exacte ale crahului din mai 2010, și având în vedere consecințe economice negative pe care crahurile le pot induce, trebuie să intensificăm eforturile de înțelegere a configurațiilor financiare care pot provoca aceste incidente. Având în vedere raritatea statistică a evenimentelor de crah, piețele financiare artificiale multi-agent pot oferi un cadru deosebit de util pentru a reproduce, analiza și înțelege crahurilor ultra rapide și dinamica lor.

### 1.3 Obiectivele Cercetării

Modele bazate pe agenți oferă platforme de simulare capabile să capteze cu exactitate toate aspectele esențiale ale dinamicii piețelor de capital, aspecte care sunt în general dificil de observat și de analizat cu ajutorul modelelor analitice tradiționale. Cercetarea realizată în teza noastră se bazează pe astfel de modele. Prin această abordare creăm noi modele financiare care conțin diverse tipuri de agenți cu raționalitate limitată și comportamente flexibile. În acest cadru, vom examina una dintre cele mai recente și de interes probleme de cercetare din domeniul

finanțelor pe piață: apariția și derularea crahurilor ultra-rapide reversibile. Analiza noastră este completată de utilizarea unor instrumente matematice și statistice tradiționale.

În primul rând, începem prin a oferi o perspectivă de ansamblu asupra crahurilor financiare ultra-rapide, și a principalului modelului de prognoză propus la ora actuală de comunitatea academică *Volume Synchronized Probability of INformed Trading* (VPIN) (capitolul 2).

Apoi, vom prezenta modul în care modelele multi-agent influențează procesul de simularea financiară odată cu apariția piețelor artificiale. Vom enumera câteva din problemele tehnice și de punere în aplicare legate de utilizarea acestora. Oferim, de asemenea, o prezentare succintă a platformei de simulare pe care o vom folosi în experimentele noastre (capitolul 3).

În contextul oferit de studiul literaturii de specialitate și de prezentarea platformei de simulare, dezvoltăm propriile noastre modele de investigare a crahurilor ultra-rapide reversibile (Capitolul 4). În timp ce principala direcție de cercetare din literatura de specialitate [49, 50, 51] este îndreptată spre o mai bună predicție a riscului de apariție a crahurilor, prea puțină atenție a fost acordată înțelegerii dinamicii unor astfel de evenimente. De aceea, abordarea noastră vizează acest ultim aspect, utilizând atât evoluțiile teoretice menționate mai sus, cât și o ipoteză complementară legată de prezența unor comportamente de tip pradă/prădător ca urmare a asimetriei informaționale. Această ipoteză afirmă natura *prădătoare a piețelor financiare*, [43] în care orice tip de avantaj este imediat exploatat de către participanții din piață ce îl posedă. Exploatarea asimetriei este în modelul nostru este una non strategică. Aceste caracteristici comportamentale ar putea fi cele ce pun în mișcare forțele care determină crahurile, având în vedere că ecosistemele pradă/prădător au frecvent dinamici instabile în care mici perturbații sau deviații împiedică sau încetinesc convergența spre echilibru, inducând mișcări oscilatorii, ceea ce poate explica, într-o anumită măsură, amplitudinea mare a variației prețului activelor pe parcursul desfășurării crahului ultra-rapid reversibil.

Având în vedere volumul relativ modest de observații empirice care susțin VPIN drept proxy fiabil al probabilității de tranzacționare informată, vom încerca, de asemenea, să evaluăm consistența acestuia ca metrică de predicție a crahurilor printr-o configurație experimentală a pieței artificiale multi-agent (Capitolul 5). Concret, dorim să verificăm dacă VPIN detectează niveluri semnificative de tranzacționare informată în medii în care toți participanții de pe piață sunt neinformați. În acest context, am planificat, de asemenea, să analizăm comportamentul și dinamica metricii. Un alt obiectiv este ca, pe baza observațiilor, să

oferim o mai bună bază teoretică pentru unele comportamente specifice ale VPIN identificate de criticii modelului [9].

În cele din urmă, întrucât literatura existentă nu oferă, pe lângă VPIN, alți estimatori de înaltă frecvență a *probabilității de tranzacționare informată* [58, 137], dorim, de asemenea, să dezvoltăm proceduri alternative pentru cuantificarea tranzacționării informate. Scopul nostru este de a dezvolta metrice alternative utilizând tehnici provenind din inteligența artificială. Am dori să oferim și înlocuitori ai VPIN obținuți prin strategii algoritmice clasice. Desigur, vom evalua eficacitatea relativă a acestor noi indicatori comparându-i cu metrica VPIN (capitolele 6 și 7).

### 1.4 Organizarea tezei

Contribuțiile prezentate în această teză aparțin unui singur domeniu de cercetare. Ele se referă la mai multe aspecte ale crahurilor bursiere ultra-rapide prin utilizarea pe extensivă a tehnicilor informatice de simulare. Această lucrare este în primul rând o teză de *Finanțe computaționale* [2] iar abordarea este una complexă și interdisciplinară, înglobând elemente diverse de teorie financiară, de informatică, de matematici financiare, de metode numerice și de econometrie [34].

În ultimele două decenii, finanțele computaționale, ca un domeniu de cercetare, s-au extins în aproape fiecare ramură a științei financiare, în special în studiul piețelor de capital [35]. Acestea pun la dispoziție un set de instrumente de analiză puternice cu aplicabilitate practică imediată și, astfel, pot susține sau infirma modele de piață și ipoteze legate de funcționarea acestora. Această teză are drept scop utilizarea capacităților acestui tip de analize, în vederea reproducerii controlate și înțelegerii aprofundate a mecanismelor ce determină crahurilor bursiere.

Această teză este organizată în două părți, și include un total de opt capitole, ce introduc și, mai apoi, investighează mai multe componente referitoare la subiectul crahurilor reversibile ultra-rapide.

#### 1.4.1 Partea Întâi - Introducere, Context and Studiul Literaturii

Prima parte a lucrării prezintă contextul și literatura de specialitate necesare pe parcursul acestei cercetări. În această parte descriem principalul incident bursier de tip crah reversibil ultra-rapid din 6 mai 2010, crah ce a afectat bursele din întreaga lume. Tot aici prezentăm principalul model teoretic avansat de comuni-

tatea academică pentru a explica apariția crahului financiar. Această parte oferă, de asemenea, o succintă vedere de ansamblu a piețelor artificiale multi-agent.

Capitolul 1. Acest prim capitol oferă introducerea generală a tezei. Aici prezentăm motivația și obiectivele de cercetare ale muncii noastre.

Capitolul 2 prezintă mai multe puncte de interes relative la desfășurarea incidentului bursier din 6 mai 2010. Aici facem referire la concluziile anchetei oficiale, precum și la cercetarea științifică conexă subiectului. Încheiem periplul nostru, trecând în revistă modelul VPIN considerat a fi cel mai bun predictor al evenimentelor de crah reversibil ultra-rapid.

Capitolul 3 oferă o scurtă panoramă a piețelor bursiere artificiale multi-agent, motivația pentru a le utiliza ca simulatoare ale piețelor financiare reale și ca bază a activității de cercetare. Acest capitol subliniază deopotrivă avantajele acestei abordări în comparație cu abordările clasice care emană din teoria economică standard. Continuăm considerând unele concepte importante specifice piețelor bursiere artificiale. Încheiem capitolul cu o scurtă prezentare a cadrului de simulare pe care îl folosim pe tot parcursul tezei: *Artificial Open Market* (sau ATOM).

### 1.4.2 Partea a Doua - Rezultate și Contribuții Științifice

Cea de a doua parte a lucrării conține rezultatele și contribuțiile noastre ca urmare a investigării evenimentelor de crah. Această parte cuprinde patru capitole ce abordează trei probleme de cercetare, mergând de la limitările și avantajele metricii VPIN în contexte și configurații de piață specifice până la încercări de a oferi explicații teoretice bine fundamentate pentru unele aspecte observate în dinamica VPIN pe parcursul sau imediat după derularea crahului. Toate simulările sunt realizate folosind agenți artificiali implementați în limbajul de programare Java pe platforma ATOM. Capitolele prezintă rezultatele cercetării și sunt în legătură cu următoarele lucrări științifice personale ce au fost prezentate, publicate sau acceptate spre publicare [153, 154, 155, 156, 157]. O listă a lucrărilor și prezentărilor de la conferințe poate fi găsită în cadrul tezei.

Capitolul 4 elucidează dinamica și caracteristicile unui crah reversibil ultra-rapid descriind procesele de evoluție a prețurilor activelor în unități de volum-timp. Bazându-se pe ipoteza de asimetrie informațională și utilizând un ecosistem pradă-prădător stohastic de tip Lotka-Volterra [171], dezvoltăm ecuațiile deterministe și stocastice pentru evoluția prețului pe durata crahului. Fundamentul teoretic al abordării noastre se bazează în principal pe ipoteza că crahul este repercusiune imediată a creșterii nivelului de toxicitate a fluxului de ordine în piețele



informațional asimetrice. Ingredientul principal al modelului este presupunerea că setul de agenții care generează în fiecare moment tranzacții informate se comportă într-un mod agresiv față de populația traderi neinformați pe tot parcursul evenimentului bursier [43].

În capitolul 5 evaluăm fiabilitatea metricii VPIN ca estimator al toxicității fluxului de ordine bursiere într-o piață financiară artificială populată cu traderi zero-inteligenți, și traderi tehnici utilizând strategii de urmărire a trendurilor. Verificăm dacă metrica VPIN detectează în mod eronat nivele semnificative de tranzacționare informată într-un mediu experimental specific în care toți participanții de pe piață sunt neinformați. Estimăm comportamentul așteptat al metricii prin simulări succesive de tip Monte Carlo. De asemenea, aducem un scurt argument teoretic pentru a explica o particularitate a dinamicii VPIN observate în timpul fazei de simulare. Argumentul se bazează pe ipoteze ușor modificate ale modelului VPIN.

Capitolul 6 oferă o abordare în volum-timp discret bazată pe *Separatori de largă marjă* (*Support Vector Machine*) pentru estimarea probabilității de tranzacționare informată. Oferim o metrică alternativă măsurii în care furnizorii de lichiditate sunt predispuși să fie antrenați în tranzacții sistematic perdante într-un mediu de tranzacționare de înaltă frecvență caracterizat de condiții de supra-cumpărare sau de supra-vânzare sistematică. Modelul nostru teoretic presupune existența a două clase omogene de participanți bursieri: traderii informați, care încearcă să profite de informațiile private pe care le posedă și traderii neinformați care furnizează lichiditate pe piață. Presupunem că prețul așteptat depinde de excesului de cerere sau ofertă generat de traderii informați. Conform acestei ipoteze, am obținut un estimator punctual a probabilității de tranzacționare informată.

Capitolul 7 testează dacă abordări algoritmice simple în volum-timp, combinate cu elemente de optimizare pot produce estimatori eficienți ai probabilității de tranzacționare informată în medii artificiale ce reproduc aspecte dinamice observate în piețele financiare propriu-zise. Evaluarea acestei abordări algoritmice se face cu diferite configurații de agenți aparținând unor clase informațional asimetrice.

Capitolul 8 încheie teza și rezumă toate contribuțiile de cercetare obținute pe parcursul ei. În cele din urmă, sunt enumerate mai multe posibile direcții viitoare de cercetare.

## Capitolul 2

### Contribuții și Concluzii

Acest capitol începe prin rezumarea celor mai importante aspecte ale tezei de doctorat, după care, trece în revistă contribuțiile aduse și concluziile trase.

În această teză, am analizat câteva aspecte legate de circumstanțele care duc la apariția crahurilor ultra-rapide reversibile în piețele financiare prin simularea acestora în **medii artificiale multi-agent** [99]. La începutul tezei (capitolele 2 și 3), am prezentat contextul și literatura conexasă cercetării noastre, derularea celui mai marcant eveniment de tip crah ultra-rapid reversibil din 6 mai 2010, și mediile de simulare computaționale ale piețelor de capital. Pentru ecosisteme bursiere **informațional asimetrice** de tip **pradă-prădător** [171], propunem un nou model de predicție al dinamicii crahurilor reversibile ultra-rapide și testăm eficiența acestuia (Capitolul 4). Când aceste evenimente de piață încep să se deruleze, evaluăm eficacitatea modelului de predicție VPIN, recent propus de comunitatea științifică [49, 58] și examinăm unele dintre limitările sale (Capitolul 5). În finalul tezei (capitolele 6 și 7), ne propunem să dezvoltăm două strategii alternative pentru a calcula estimatori ai probabilității de tranzacționare informată și comparăm evoluția acestora cu cea a VPIN-ului pe parcursul derulării crahurilor simulate.

Am testat toate modelele noastre pe platforme Java utilizând un emulator de piață artificială ATOM [120, 121]. Acest produs ne-a oferit un mediu general de simulare care folosește diferite meta-entități flexibile și ușor de parametrizat: microstructura pieței de capital, agenții de tranzacționare și comportamentele lor, canale asimetrice de difuzare a informațiilor publice și private. Agenții de tranzacționare artificiali nu depind de ipoteze de raționalitate sau omogenitate; modelele noastre conțin mai multe tipuri de agenți cu funcții, scopuri și comportamente diferite.

Capitolul 4 elucidează dinamica și caracteristicile unui crah reversibil ultra-rapid descriind procesele de evoluție a prețurilor activelor în unități de timp. Bazându-ne pe ipoteze de asimetrie informațională și utilizând un ecosistem pradă-prădător stohastic de tip Lotka-Volterra [171], dezvoltăm ecuațiile deterministe și stocastice pentru evoluția prețului pe durata crahului. Fundamentul teoretic al abordării noastre se bazează în principal pe ipoteza că crahul este repercusiunea imediată a creșterii nivelului de toxicitate a fluxului de ordine în piețele informațional asimetrice. Ingredientul principal al modelului este presupunerea că setul de agenți ce generează tranzacții informate au comportamente prădătoare non-strategice față de populația de traderi neinformați pe tot parcursul evenimentului bursier [43].

Folosind modelul propus de evoluție a prețului activelor, am determinat fracțiunea PIN a volumului de ordine informate din volumul total de tranzacționare. Am demonstrat teoretic că momentul în care variabila PIN își atinge maximumul reprezintă

un indicator tardiv al momentului în care este atinsă valoarea minimă a prețului. Aceasta limitare rămâne valabilă pentru orice metrică de tip PIN. Mai mult, intervalul de timp dintre momentele în care se realizează cele două extreme, reprezintă în sine un indicator al inteligenței traderilor neinformați, al capacității lor de a detecta apariția unei informații nepublice. Cu cât acest interval de timp este mai scurt cu atât este mai mare viteza de difuzare a informației private în cadrul populației de traderi neinformați. Acest rezultat demonstrează teoretic acuratețea estimatorilor PIN în piețele financiare cele mai eficiente.

Prin modelarea prețului ca funcție a produsului dintre  $volum$  și  $PIN$ , am arătat că PIN-ul crește rapid pe parcursul crahului, dar scade mai lent după acesta, ceea ce explică teoretic o parte din observațiile empirice ale lui Easley și al. [49] și ale adversarilor modelului [9].

Bazându-ne pe modelarea noastră stohastică și folosind VPIN ca proxy pentru PIN, am dezvoltat o metodologie de estimare a parametrilor modelului propus. Acest lucru permite o predicție destul de precisă a amplitudinii crahului, a duratei acestuia, a momentului în care prețul atinge valoarea minimă și a traiectoriei prețului.

Am testat modelul nostru în simulatorul artificial de piață financiară și am arătat că, pentru piețele fără strategii bazate pe împrumut (*unleveraged markets*), am putut estima cu precizie dinamica crahului și caracteristicile acestuia.

Am abordat, de asemenea, cazul general caracterizat de competiție între traderii informați, și am arătat cum putem adapta strategia noastră la o astfel de piață, ceea ce face modelul nostru de uz general. Am arătat că concurența între traderi reduce decalajul metricii PIN atât punctual cât și asimptotic în cazul unui nivel scăzut al ratei de învățare în rândul populației de traderi neinformați.

Am oferit o interpretare directă a efectelor substituibile și multiplicative pe care atât creșterea concurenței cât și nivelul de inteligență o au asupra acurateții PIN ca predictor de crahuri. Un nivel de inteligență mai ridicat al populației de traderi neinformați poate substitui o lipsă de competitivitate în rândul actorilor de piață informați și vice-versa. Ambele variabile se compun multiplicativ și sporesc eficiența PIN ca estimator precoce al crahurilor ultra-rapide. Ratele de substituție depind în primul rând de capacitatea traderilor informați de a exploata informațiile nepublice.

Evident, toate calitățile și limitările metricii PIN, în contextul unui crah bursier reversibil, rămân valabile și pentru estimatorii acesteia, inclusiv VPIN.

În capitolul 5 al tezei am evaluat fiabilitatea metricii VPIN ca estimator al toxicității fluxului de ordine bursiere într-o piață financiară artificială populată

cu traderi zero-inteligenți, și traderi tehnici ca utilizează strategii de urmărire a trendurilor. Verificăm aici dacă metrica VPIN detectează în mod greșit nivele semnificative de tranzacționare informată într-un mediu experimental specific în care toți participanții de pe piață sunt neinformați. Am estimat comportamentul mediu al metricii prin simulări succesive de tip Monte Carlo. De asemenea, am adus un scurt argument teoretic ce explică o particularitate a dinamicii VPIN observată în timpul fazei de simulare. Argumentul se bazează pe ipoteze ușor modificate ale modelului VPIN.

O creștere considerabilă a procentajului de traderi tehnici poate induce evoluții imprevizibile și volatile ale VPIN. Am observat comportamente asimetrice atunci când prețurile sunt angajate în trenduri crescătoare și descrescătoare. Astfel, este mai probabil ca VPIN să crească în timpul trendurilor descrescătoare. Am ajuns la concluzia că, într-un mediu de tranzacționare de înaltă frecvență, VPIN nu este numai un indicator a probabilității de tranzacționare informată, ci un indicator mai general, a gradului în care o minoritate semnificativă a participanților din piață împărtășește o viziune colectivă alternativă asupra evoluției pe termen scurt a prețurilor, viziune ce îi determină să funcționeze ca un actor agregat unic. Aceste comportamente corelate induc în cele din urmă dezechilibre semnificative între cererea și oferta totală, și asimilează metrica unui proxy a excesului de cerere sau ofertă sistematică, indiferent de cauzele care stau la baza acestui fenomen.

Tot în capitolul 5 al tezei, este prezentat și un argument teoretic ce explică de ce VPIN se menține la valori ridicate în timpul fazei de simulare, și oferă o bază teoretică solidă concluziilor empirice trase de [9]. Argumentul este bazat pe ipoteze ușor modificate ale modelul VPIN.

Am demonstrat că varianta modificată a modelului VPIN poate fi asimilată modelului standard, atât timp cât raportul dintre volumul informat ce rămâne să fie tranzacționat este proporțional semnificativ. Când procentajul volumului informat încă netranzacționat este mic, intensitatea volumului informat descrește logaritmic în volum-timp informat. Prin urmare, această variantă a VPIN pare să ofere o motivație teoretică mai bună a efectului inerțial al VPIN și poate furniza o bază interesantă pentru dezvoltări viitoare în domeniu.

Modelele teoretice din capitolele 6 și 7 se bazează în principal pe abordări ce utilizează latici de evoluție a prețurilor binomiale și trinomiale, care descriu cu exactitate ipoteza de martingală a activităților creatorilor de piață (*market makers*)[127]. Conform acestei ipoteze, la nivel local, evoluția prețurilor activelor tranzacționate urmează pe termen scurt mișcări aleatorii, pentru care, în orice moment, probabilitățile unei creșteri sau ale unei scăderi a prețului sunt identice și,

astfel, viabilitatea economică a creatorilor de piață este dată în medie de câștigurile percepute la fiecare tranzacție.

Capitolul 6 oferă o abordare în volum-timp discret bazată pe *Separatori de largă marjă* (*Support Vector Machine*) pentru estimarea probabilității de tranzacționare informată. Oferim o metrică alternativă măsurii în care furnizorii de lichiditate sunt predispuși să se angajeze în tranzacții sistematic perdante într-un mediu de tranzacționare de înaltă frecvență caracterizat de condiții de supra-cumpărare sau de supra-vânzare sistematică. Modelul nostru teoretic presupune existența a două clase omogene de participanți bursieri: traderii informați, care încearcă să profite de informațiile private pe care le posedă și traderii neinformați care furnizează lichiditate pe piață. Presupunem că prețul mediu depinde de excesului de cerere sau de ofertă generat de traderii informați. Conform acestei ipoteze, am obținut o estimator punctual al probabilității de tranzacționare informată și am prezentat o metodă matricială pentru estimarea sa. Asemeni VPIN, metrica dezvoltată este un exprimă corect dezechilibrele sistematice ce apar între cererea și oferta agregate. Prin teste de cauzalitate și corelație efectuate în diverse condiții de piață, demonstrăm empiric că comportamentul acesteia este aproximativ echivalent cu cel al VPIN. În plus, arătăm ca aceasta este mai stabilă afișând nivele de volatilitate mai reduse și un procentaj mai mic de comportamente atipice.

Capitolul 7 confirmă faptul că abordările algoritmice simple în volum-timp, combinate cu elemente de optimizare pot produce estimatori VPIN eficienți în medii artificiale ce reproduc evoluția piețelor de capital reale. Această abordare ar putea fi, prin urmare, extinsă dincolo de frontierele cadrului de simulare, pentru a soluționa diverse probleme financiare importante care necesită estimări ale PIN [20, 47, 48, 56, 88].

Evaluarea metodei algoritmice se face utilizând diferite configurații de agenți ce provin din clase informațional asimetrice. În aceste condiții, estimarea algoritmică a PIN a fost, de cele mai multe ori, destul de aproape de valoarea VPIN. Prin testele de cauzalitate și corelație efectuate în diferite condiții de piață am demonstrat empiric corectitudinea abordării noastre. Având în vedere impactul considerabil al acumulării de inventar și al volatilității prețurilor asupra capacității creatorilor de piață de a rămâne în piață, am enumerat câteva aspecte de optimizare care ar trebui luate în considerare.

Contribuțiile aduse de această teză aprofundează înțelegerea evenimentelor bursiere *statistic rare* de crah ultra-rapid și validează metodele de analiză ce folosesc piețele artificiale multi-agent în studierea acestui subiect important. Teza recurge la simulări repetate pentru a relaționa evoluția populațiilor eterogene de

agenți cu raționalitate limitată [143], cu dinamica prețurilor activelor pe parcursul desfășurării crahului. Prin aplicarea directă a metodelor de simulare Monte-Carlo, sunt identificate comportamente medii pe baza unor ipoteze flexibile. Simulările atent calibrate au expus o parte dintre legăturile existente între comportamentele agregate ale actorilor bursieri ce aplică strategii de tranzacționare corelate, și evoluția unor metrici de predicție ale apariției crahurilor. Astfel, teza folosește extensiv metodologii de cercetare bazate pe sisteme multi-agent, împreună cu instrumente analitice din domeniul finanțelor computaționale și econometriei pentru a oferi o analiză riguroasă a configurațiilor de piață ce favorizează apariția crahurilor.

# Listă de publicații

- [1] STAN, A. Assessing inbound call centers scheduling through bootstrapping and gdp based monte carlo. *Review of Economic Studies and Research Virgil Madgearu*, 2 (2011), 135–147.
- [2] STAN, A. An automata based approach to modeling real-time trading applications. *Review of Economic Studies and Research Virgil Madgearu*, 2 (2011), 135–147.
- [3] STAN, A. Day trading the emerging markets using multi-time frame technical indicators and artificial neural networks. In *Advanced Intelligent Computational Technologies and Decision Support Systems*, B. Iantovics and R. Kountchev, Eds., vol. 486 of *Studies in Computational Intelligence*. Springer International Publishing, 2014, pp. 191–200.
- [4] STAN, A., AND MOLDOVAN, D. Assessing the dependability of the vpin metric as an order flow-toxicity estimator through a specific high frequency trading experimental setup. In *in Proceedings fo the 12th International conference on Practical on Informatics in Economy (IE'2013)* (2013), ASE, Bucharest, Romania, pp. 589–593.
- [5] STAN, A., AND MOLDOVAN, D. A neural network vwap algorithm for artificial financial markets populated with zero-intelligence trading agents. In *in Proceedings fo the 12th International conference on Practical on Informatics in Economy (IE'2013)* (2013), ASE, Bucharest, Romania, pp. 609–612.



# Bibliografie

- [1] Review of the market events of may 6, 2010, 2010.
- [2] *Simulation in Computational Finance and Economics: Tools and Emerging Applications*. 2013. [7](#)
- [3] ABAD, D., AND YAGÜE, J. From {PIN} to vpin: An introduction to order flow toxicity. *The Spanish Review of Financial Economics* 10, 2 (2012), 74 – 83.
- [4] AKAIKE, H. On entropy maximization principle. *Applications of Statistics* (1977), 27–41.
- [5] ALFARANO, S., LUX, T., AND WAGNER, F. Empirical validation of stochastic models of interacting agents. *The European Physical Journal B* 55, 2 (2007), 183–187.
- [6] ALLEN, L. *An Introduction to Stochastic Processes with Applications to Biology, Second Edition*. Chapman & Hall/CRC, 2011.
- [7] AMARAL, L., CIZEAU, P., GOPIKRISHNAN, P., LIU, Y., MEYER, M., PENG, C.-K., AND STANLEY, H. Econophysics: can statistical physics contribute to the science of economics? *Computer Physics Communications* 121–122, 0 (1999), 145 – 152. [Proceedings of the Europhysics Conference on Computational Physics {CCP} 1998](#)[i/ce:titlej](#).
- [8] ANÉ, T., AND GEMAN, H. Order flow, transaction clock, and normality of asset returns. *Journal of Finance* 55, 5 (October 2000), 2259–2284.
- [9] ANDERSEN, T. S., AND BONDARENKO, O. VPIN and the Flash Crash. *SSRN* (2011). [http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=1881731](http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1881731). [7](#), [12](#), [13](#)

- 
- [10] ANUFRIEV, M., BOTTAZZI, G., AND PANCOTTO, F. Equilibria, stability and asymptotic dominance in a speculative market with heterogeneous traders. *Journal of Economic Dynamics and Control* 30, 9-10 (2006), 1787–1835.
- [11] ARTHUR, W. *Increasing Returns and Path Dependence in the Economy*. Ann Arbor Paperbacks. University of Michigan Press, 1994.
- [12] ARTHUR, W. Inductive reasoning and bounded rationality. *American Economics Review*, 93 (2011), 1–7.
- [13] ARTHUR, W. B. Out-of-Equilibrium Economics and Agent-Based Modeling. vol. 2. 2006, ch. 32, pp. 1551–1564.
- [14] ARTHUR, W. B., HOLL, J. H., LEBARON, B., PALMER, R., AND TAYLER, P. Asset pricing under endogenous expectations in an artificial stock market. In *Economic Notes* (1997), no. 26, Addison-Wesley, pp. 15–44.
- [15] ASHLOCK, D. *Evolutionary Computation for Modeling and Optimization*. Springer, 2006.
- [16] BADEGRUBER, T. *Agent-based Computational Economics: New aspects in learning speed and convergence in the Santa Fe Artificial Stock Market*. PhD thesis, Universitat Graz, Graz, Austria, 2003.
- [17] BARBOSA, P., AND MARYLAND, C. *Ecology of Predator-Prey Interactions*. Oxford University Press, USA, 2005.
- [18] BEN-DAVID, I., FRANZONI, F., AND MOUSSAWI, R. Etf's, arbitrage, and contagion. Working Paper Series 2011-20, Ohio State University, Charles A. Dice Center for Research in Financial Economics, December 2011.
- [19] BETHEL, E. W., LEINWEBER, D., RÜBEL, O., AND WU, K. Federal market information technology in the post flash crash era: roles for supercomputing. In *Proceedings of the fourth workshop on High performance computational finance* (New York, NY, USA, 2011), WHPCF '11, ACM, pp. 23–30.
- [20] BHARATH, S. T., PASQUARIELLO, P., AND WU, G. Does asymmetric information drive capital structure decisions? *Review of Financial Studies* 22, 8 (2009), 3211–3243. [14](#)

- 
- [21] BOER, K., KAYMAK, U., AND SPIERING, J. From discrete-time models to continuous-time, asynchronous modeling of financial markets. *Computational Intelligence*, 23 (2007).
- [22] BOER-SORBAN, K. *Agent-Based Simulation of Financial Markets: A Modular, Continuous-time Approach*. PhD thesis, Erasmus University Rotterdam, Rotterdam, The Netherlands, January 2008.
- [23] BONABEAU, E. Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 99, Suppl 3 (2002), 7280–7287.
- [24] BORKOVEC, M., DOMOWITZ, I., SERBIN, V., AND YEGERMAN, H. Liquidity and price discovery in exchange-traded funds. one of several possible lessons from the flash crash. Tech. rep., Investment Technology Group, 2010.
- [25] BORN, B. E., BRENNAN, J. J., ENGLE, R. F., KETCHUM, R. G., O’HARA, M., PHILIPS, S. M., RUDER, D. S., AND STIGLITZ, J. E. Recommendations regarding regulatory responses to the market events of may 6, 2010, 2011.
- [26] BOSWIJK, H. P., HOMMES, C. H., AND MANZAN, S. Behavioral heterogeneity in stock prices. *Journal of Economic Dynamics and Control* 31, 6 (June 2007), 1938–1970.
- [27] BOTTAZZI, G., DOSI, G., AND REBESCO, I. Institutional architectures and behavioral ecologies in the dynamics of financial markets. *Journal of Mathematical Economics* 41, 1-2 (February 2005), 197–228.
- [28] BOTTAZZI, G., DOSI, G., AND REBESCO, I. Institutional architectures and behavioral ecologies in the dynamics of financial markets. *Journal of Mathematical Economics* 41, 1-2 (February 2005), 197–228.
- [29] BRAHMA, A., CHAKRABORTY, M., DAS, S., LAVOIE, A., AND MAGDON-ISMAIL, M. A bayesian market-maker. In *Proceedings of the 13th ACM Conference on Electronic Commerce EC ’12* (2012), ACM New York, NY, USA, pp. 215–232.
- [30] BRANDOUY, O., MATHIEU, P., AND VERYZHENKO, I. Ex-post optimal strategy for the trading of a single financial asset. In *The Generative Method in Economics*, C. Hernandez, M. Posada, and A. Lopez-Paredes, Eds., no. 93

- in Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. Springer, 2009, pp. 171–184.
- [31] BRIANZONI, S. Wealth distribution in an asset pricing model: the role of the switching mechanism. *Applied Mathematical Sciences*, 6 (2012), 423–442.
- [32] BRIANZONI, S., MAMMANA, C., AND E.MICHETTI. Updating wealth in an asset pricing model with heterogeneous agents. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 27 (2010).
- [33] CHAN, N., AND SHELTON, C. Technical report. In *An electronic market-maker*. MIT, Cambridge, MA, 2001.
- [34] CHEN, S.-H., CHANG, C.-L., AND DU, Y.-R. Agent-based economic models and econometrics. *The Knowledge Engineering Review* 27 (June 2012), 187–219. [2](#), [7](#)
- [35] CHEN, S.-H., KAMPOURIDIS, M., AND TSANG, E. Microstructure dynamics and agent-based financial markets. In *Multi-Agent-Based Simulation XI*, T. Bosse, A. Geller, and C. Jonker, Eds., vol. 6532 of *Lecture Notes in Computer Science*. Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 121–135. [7](#)
- [36] CHEN, S.-H., TAI, C.-C., AND CHIE, B.-T. Individual rationality as a partial impediment to market efficiency. In *Genetic Algorithms and Genetic Programming in Computational Finance*, S.-H. Chen, Ed. Springer US, 2002, pp. 357–377.
- [37] CHIARELLA, C., AND HE, X.-Z. Dynamics of beliefs and learning under al processes - the heterogeneous case. Research Paper Series 55, Quantitative Finance Research Centre, University of Technology, Sydney, 2001.
- [38] CHIARELLA, C., AND IORI, G. A simulation analysis of the microstructure of double auction markets. *Quantitative Finance* 2, 5 (2002), 346–353.
- [39] CINCOTTI, S., PONTA, L., AND RABERTO, M. A multi-assets artificial stock market with zero-intelligence traders. In *WEHIA* (June 15 2005).
- [40] CLARK, P. K. A subordinated stochastic process model with finite variance for speculative prices. *Econometrica* 41, 1 (January 1973), 135–55.
- [41] CONT, R. Empirical properties of asset returns: stylized facts and statistical issues. *Quantitative Finance* 1 (2001), 223–236.

- [42] CONT, R. Volatility clustering in financial markets: Empirical facts and agent-based models. In *Long Memory in Economics*, G. Teyssière and A. Kirman, Eds. Springer Berlin Heidelberg, 2007, pp. 289–309.
- [43] CORCORAN, C. *Systemic Liquidity Risk and Bipolar Markets: Wealth Management in Today's Macro Risk On / Risk Off Financial Environment*. Wiley Finance, February 2013. [6](#), [9](#), [11](#)
- [44] DA COSTA PEREIRA, C., MAURI, A., AND TETTAMANZI, A. Cognitive-agent-based modeling of a financial market. In *IAT (2009)*, IEEE, pp. 20–27.
- [45] DARLEY, V., AND OUTKIN, A. *A NASDAQ Market Simulation: Insights on a Major Market from the Science of Complex Adaptive Systems*. Complex systems and interdisciplinary science. World Scientific, 2007.
- [46] DE JONG, K. A. *Evolutionary Computation: A unified approach*. Springer, 2002.
- [47] DUARTE, J., HAN, X., HARFORD, J., AND YOUNG, L. Information asymmetry, information dissemination and the effect of regulation FD on the cost of capital . *Journal of Financial Economics* 87, 1 (2008), 24 – 44. [14](#)
- [48] DUARTE, J., AND YOUNG, L. Why is pin priced? *Journal of Financial Economics* 91, 2 (2009), 119–138. [14](#)
- [49] EASLEY, D., DE PRADO, M. L., AND O'HARA, M. The microstructure of the flash crash: Flow toxicity, liquidity crashes, and the probability of informed trading. *The Journal of Portfolio Management* 37, 2 (2010), 118–128. [3](#), [4](#), [6](#), [11](#), [12](#)
- [50] EASLEY, D., DE PRADO, M. L., AND O'HARA, M. The exchange of flow toxicity. *The Journal of Trading* 6, 2 (2011), 8–13. [6](#)
- [51] EASLEY, D., DE PRADO, M. L., AND O'HARA, M. Bulk classification of trading activity. *Johnson School Research Paper Series* 8 (2012). [6](#)
- [52] EASLEY, D., DE PRADO, M. L., AND O'HARA, M. Flow toxicity and liquidity in a high-frequency world. *Review of Financial Studies* 25, 5 (2012), 1457–1493.
- [53] EASLEY, D., DE PRADO, M. L., AND O'HARA, M. The volume clock: Insights into the high-frequency paradigm. *The Journal of Portfolio Management* 39, 1 (2012), 19–29.

- 
- [54] EASLEY, D., DE PRADO, M. L., AND O'HARA, M. Optimal execution horizon. *Mathematical Finance*, to appear (2013).
- [55] EASLEY, D., ENGLE, R. F., O'HARA, M., AND WU, L. Time-varying arrival rates of informed and uninformed trades. *Journal of Financial Econometrics* 6, 2 (2008), 171–207.
- [56] EASLEY, D., HVIDKJAER, S., AND O'HARA, M. Is information risk a determinant of asset returns? *The Journal of Finance* 57, 5 (2002), 2185–2221. [14](#)
- [57] EASLEY, D., KIEFER, N. M., AND O'HARA, M. One day in the life of a very common stock. *Review of Financial Studies* 10, 3 (1997), 805–35.
- [58] EASLEY, D., KIEFER, N. M., O'HARA, M., AND PAPERMAN, J. B. Liquidity, information, and infrequently traded stocks. *The Journal of Finance* 51, 4 (1996), 1405–1436. [7](#), [11](#)
- [59] EASLEY, D., AND O'HARA, M. Price, trade size, and information in securities markets. *Journal of Financial Economics* 19, 1 (September 1987), 69–90.
- [60] EASLEY, D., AND O'HARA, M. Microstructure and ambiguity. *The Journal of Finance* 65, 5 (2010), 1817–1846.
- [61] EHRENTREICH, N. A corrected version of the santa fe institute artificial stock market model. *Social Science Computer Review* 20, 2 (September 2002), 174–196.
- [62] EHRENTREICH, N. Technical trading in the santa fe institute artificial stock market revisited. *Journal of Economic Behavior & Organization* 61, 4 (December 2006), 599–616.
- [63] ENGLE, R. F., AND RUSSELL, J. Analysis of high frequency and transaction data. In *Handbook of Financial Econometrics*, Y. Ait-Sahalia and L. Hansen, Eds., Lecture Notes in Financial Econometrics. North Holland, 2010.
- [64] EPSTEIN, J. M. Remarks on the foundations of agent-based generative social science. In *Handbook of Computational Economics*, L. Tesfatsion and K. L. Judd, Eds., vol. 2 of *Handbook of Computational Economics*. Elsevier, 2006, ch. 34, pp. 1585–1604.

- 
- [65] FAMA, E. F. The Behavior of Stock-Market Prices. *The Journal of Business* 38, 1 (1965), 34–105.
- [66] FAMA, E. F., AND BLUME, M. E. Filter Rules and Stock-Market Trading. *The Journal of Business* 39, 1 (1966), 226–241.
- [67] FARMER, J. D. Market force, ecology and evolution. *Industrial and Corporate Change* 11, 5 (2002), 895–953.
- [68] FARMER, J. D., AND FOLEY, D. The economy needs agent-based modeling. *Nature* 460, 7256 (August 2009), 685–686.
- [69] FARMER, J. D., AND JOSHI, S. The price dynamics of common trading strategies. *Journal of Economic Behavior & Organization* 49, 2 (October 2002), 149–171.
- [70] FARMER, J. D., AND LUX, T. Introduction to special issue on ‘applications of statistical physics in economics and finance’. *Journal of Economic Dynamics and Control* 32, 1 (2008), 1 – 6. Applications of statistical physics in economics and finance.
- [71] FOLLMER, H., HORST, U., AND KIRMAN, A. Equilibria in financial markets with heterogeneous agents: a probabilistic perspective. *Journal of Mathematical Economics* 41, 1-2 (February 2005), 123–155. 3
- [72] GABAIX, X., GOPIKRISHNAN, P., PLEROU, V., AND STANLEY, H. E. A theory of power-law distributions in financial market fluctuations. *Nature*, 6937 (2003), 267–270.
- [73] GANDOLFO, G. Giuseppe palomba and the lotka-volterra equations. *Rendiconti Lincei* 19, 4 (2008), 347–357.
- [74] GEVEL, A. V. D., AND NOUSSAIR, C. The nexus between artificial intelligence and economics. Discussion Paper 2012-087, Tilburg University, Center for Economic Research, 2012.
- [75] GLOSTEN, L. R., AND MILGROM, P. R. Bid, ask and transaction prices in a specialist market with heterogeneously informed traders. *Journal of Financial Economics* 14, 1 (March 1985), 71–100.
- [76] GODE, D., AND SUNDER, S. Allocative efficiency of markets with zero-intelligence traders: Market as a partial substitute for individual rationality. *Journal of Political Economy*, 101 (1993), 119–137.

- 
- [77] GODE, D. K., AND SUNDER, S. What makes markets allocationally efficient? *The Quarterly Journal of Economics* 112, 2 (May 1997), 603–630.
- [78] GRANT, J. An algo that prevents crashes. *Advanced Trading*, March 18 2011.
- [79] GROCCER, S. Senators seek regulators’ report on causes of market volatility. *WallStreet Journal*, May 7 2010. [5](#)
- [80] HALPERN, J. Y. computer science and game theory. In *The New Palgrave Dictionary of Economics*, S. N. Durlauf and L. E. Blume, Eds. Palgrave Macmillan, Basingstoke, 2008.
- [81] HATEMI-J, A. Asymmetric causality tests with an application. *Empirical Economics* 1, 43 (2012), 447—456.
- [82] HEIN, O., SCHWIND, M., AND SPIWOKS, M. Frankfurt artificial stock market: a microscopic stock market model with heterogeneous interacting agents in small-world communication networks. *Journal of Economic Interaction and Coordination* 3, 1 (2008), 59–71.
- [83] HOLLAND, J. H., AND MILLER, J. H. Artificial adaptive agents in economic theory. *American Economic Review* 81, 2 (May 1991), 365–71. [2](#)
- [84] HOMMES, C. Financial markets as nonlinear adaptive evolutionary systems. *Quantitative Finance* 1, 1 (2001), 149–167. [2](#)
- [85] HOMMES, C. Heterogeneous agent models in economics and finance. *Elsevier* (2005).
- [86] HUGHES, H. P. N., CLEGG, C. W., ROBINSON, M. A., AND CROWDER, R. M. Agent-based modelling and simulation: The potential contribution to organizational psychology. *Journal of Occupational and Organizational Psychology* 85, 3 (2012), 487–502.
- [87] J. FARMER, P. P., AND ZOVKO, I. The predictive power of zero intelligence models in financial markets. vol. 102, National Academy of Sciences of the United States of America, pp. 2254—2259.
- [88] JAYARAMAN, S. Earnings volatility, cash flow volatility, and informed trading. *Journal of Accounting Research* 46, 4 (2008), 809–851. [14](#)



- 
- [89] JENNINGS, N. R. Agent-based computing: promise and perils. In *Proceedings of the 16th international joint conference on Artificial intelligence - Volume 2* (San Francisco, CA, USA, 1999), IJCAI'99, Morgan Kaufmann Publishers Inc., pp. 1429–1436. [2](#)
- [90] JEVONS, W. *The Theory of Political Economy*. Macmillan and Company, 1871.
- [91] JOHNSON, P. What i learned from the artificial stock market. *Social Science Computer Review* 20, 2 (September 2002).
- [92] JUDD, K. L. Computationally intensive analyses in economics. In *Handbook of Computational Economics*, L. Tesfatsion and K. L. Judd, Eds., vol. 2 of *Handbook of Computational Economics*. Elsevier, January 2006, ch. 17, pp. 881–893.
- [93] KAHNEMAN, D. Maps of bounded rationality: Psychology for behavioral economics. *American Economic Review* 93, 5 (September 2003), 1449–1475.
- [94] KIRILENKO, A. A., KYLE, A. S., SAMADI, M., AND TUZUN, T. The flash crash: The impact of high frequency trading on an electronic market. *Capital Markets: Market Microstructure eJournal* 5 (2011). [3](#)
- [95] KLEINERT, H. *Path Integrals in Quantum Mechanics, Statistics, Polymer Physics, and Financial Markets, 5th edition*. World Scientific Publishing Company, 2009.
- [96] KOCHERLAKOTA, N. R. The equity premium: it's still a puzzle.
- [97] KYLE, A. S. Continuous auctions and insider trading. *Econometrica* 53, 6 (November 1985), 1315–35.
- [98] LADLEY, D., AND SCHENK-HOPPE, K. R. Do stylised facts of order book markets need strategic behaviour? *Journal of Economic Dynamics and Control* 33, 4 (2009), 817 – 831.
- [99] LEBARON, B. A builder's guide to agent-based financial markets. *Quantitative Finance* 1, 2 (2001), 254–261. [3](#), [11](#)
- [100] LEBARON, B. Evolution and time horizons in an agent based stock market. *Macroeconomic Dynamics* 5, 2 (2001), 225—254.

- 
- [101] LEBARON, B. Building the santa fe artificial stock market. working paper, graduate. In *School of International Economics and Finance, Brandeis* (2002), pp. 1117–1147.
- [102] LEBARON, B. Empirical regularities from interacting long and short memory investors in an agent based stock market. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 5, 2 (2004), 442–455.
- [103] LEBARON, B., ARTHUR, W., AND PALMER, R. Time series properties of an artificial stock market. *Journal of Economic Dynamics and Control* 23, 2 (1999), 1487–1516.
- [104] LEE, Y., LIN, Y., , AND WAHBA, G. Multicategory support vector machines, theory, and application to the classification of microarray data and satellite radiance data. *Journal of the American Statistical Association* 465, 99 (2004), 67–81.
- [105] LEVY, H., LEVY, M., AND SOLOMON, S. *Microscopic Simulation of Financial Markets: From Investor Behavior to Market Phenomena*. Elsevier Science, 2000.
- [106] LIU, X., GREGOR, S., AND YANG, J. The effects of behavioral and structural assumptions in artificial stock market. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 387, 11 (2008), 2535 – 2546.
- [107] LOTKA, A. J. Analytical note on certain rhythmic relations in organic systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 6 (1920), 410–415.
- [108] LOTKA, A. J. Undamped oscillations derived from the law of mass action. *Journal of the American Chemical Society* 42 (1920), 1595–1599.
- [109] LOTKA, A. J. *Elements of Physical Biology*. Williams and Wilkins Company, 1925.
- [110] LUX, T. {CHAPTER} 3 - stochastic behavioral asset-pricing models and the stylized facts. In *Handbook of Financial Markets: Dynamics and Evolution*, T. Hens and K. R. Schenk-Hoppé, Eds., Handbooks in Finance. North-Holland, San Diego, 2009, pp. 161 – 215.

- 
- [111] LUX, T., AND MARCHESI, M. Scaling and Criticality in a Stochastic Multi-Agent Model of a Financial Market. *Nature* 397 (November 2 1999), 498–500.
- [112] MADHAVAN, A. Exchange-Traded funds, market structure and the flash crash. *Social Science Research Network Working Paper Series* (September 2011).
- [113] MALKIEL, B. G., AND FAMA, E. F. Efficient capital markets: A review of theory and empirical work\*. *The Journal of Finance* 25, 2 (1970), 383–417.
- [114] MANDELBROT, B., AND TAYLOR, H. M. On the distribution of stock price differences. *Operations Research* 15, 6 (1967), 1057–1062.
- [115] MARCHESI, M., CINCOTTI, S., FOCARDI, S., AND RABERTO, M. The genoa artificial stock market: Microstructure and simulations. In *Heterogenous Agents, Interactions and Economic Performance*, R. Cowan and N. Jonard, Eds., vol. 521 of *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*. Springer Berlin Heidelberg, 2003, pp. 277–289.
- [116] MARCHESI, M., CINCOTTI, S., FOCARDI, S., AND ROBERTO, M. Development and testing of an artificial stock market. *Model Dynamic in Economic Finance* (2000).
- [117] MARKOSE, S. M. The new evolutionary computational paradigm of complex adaptive systems: Challenges and prospects for economics and finance. Tech. rep., 2001. [2](#)
- [118] MARKS, R. Validating simulation models: A general framework and four applied examples. *Computational Economics* 30, 3 (October 2007), 265–290.
- [119] MASLOV, S. Simple model of a limit order-driven market. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 278, 3-4 (Apr. 2000), 571–578.
- [120] MATHIEU, P., AND BRANDOUY, O. A generic architecture for realistic simulations of complex financial dynamics. In *Advances in Practical Applications of Agents and Multiagent Systems*, Y. Demazeau, F. Dignum, J. M. Corchado, and J. B. Perez, Eds., vol. 70 of *Advances in Intelligent and Soft Computing*. Springer, 2010, pp. 185–197. [11](#)
- [121] MATHIEU, P., AND BRANDOUY, O. Introducing atom. In *Advances on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems*, Y. Demazeau,

- J. P. Muller, J. M. C. Rodriguez, and J. B. Perez, Eds., vol. 155 of *Advances in Intelligent and Soft Computing*. Springer, 2012, pp. 269–272. [11](#)
- [122] MAZLIAK, L., AND SHAFER, G. The splendors and miseries of martingales. *Electronic Journal for History of Probability and Statistics. Entire issue dedicated to Martingale probability theory. 1*, 5 (June 2009).
- [123] MENGER, C. *Principles of economics*. reprinted by University Press 1983, 1871.
- [124] MENKVELD, A. J., AND YUESHEN, B. Z. Anatomy of the Flash Crash. *SSRN* (April 2013). <http://ssrn.com/abstract=2243520> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2243520>.
- [125] MURANAGA, J., AND OHSAWA, M. Measurement of liquidity risk in the context of market risk calculation. the measurement of aggregate market risk. Tech. rep., Bank for International Settlements, 1998.
- [126] NATURE. A model approach. *Nature 460* (August 2009).
- [127] NEVMYVAKA, Y., SYCARA, K., AND SEPPI, D. J. Electronic Market Making: Initial Investigation. *Electronic Carnegie Mellon University Database* (2004). [13](#)
- [128] NIAZI, M., AND HUSSAIN, A. Agent-based computing from multi-agent systems to agent-based models: a visual survey. *Scientometrics 89*, 2 (2011), 479–499.
- [129] NUTI, G. *An electronic market-making algorithm*. PhD thesis, UCL (University College London), 2008.
- [130] OKSENDAL, B. *Stochastic Differential Equations. An Introduction with Applications, 6th edition*. Springer, 2010.
- [131] O’SULLIVAN, A., AND SHEFFRIN, S. *Economics: Principles in Action*. Prentice Hall, 2005.
- [132] OTHMAN, A. M. *Automated Market Making: Theory and Practice*. PhD thesis, Carnegie Mellon University, 5000 Forbes Avenue, Pittsburgh, PA 15213 USA, 2012. <http://repository.cmu.edu/dissertations/159>.
- [133] PACHAMANOVA, D. A., AND FABOZZI, F. J. *Simulation and Optimization in Finance*. John Wiley & Sons, Inc., 2010.

- 
- [134] PACURAR, M. Autoregressive conditional duration models in finance: A survey of the theoretical and empirical literature. *Journal of Economic Surveys* 22, 4 (2008), 711–751.
- [135] PALMER, R. G., ARTHUR, W. B., HOLLAND, J. H., LEBARON, B., AND TAYLER, P. Artificial economic life: a simple model of a stockmarket. *Physica D* 75, 1-3 (Aug. 1994), 264–274.
- [136] PONTA, L., RABERTO, M., AND CINCOTTI, S. A multi-assets artificial stock market with zero-intelligence traders. A Letter Journal Exploring the Frontiers of Physics. *Applied Mathematical Sciences* 84, 2 (2011), 406–411.
- [137] POPESCU, M. *Two Essays on the Probability of Informed Trading*. UMI, 2009. 7
- [138] RAO, C. R., AND TOUTENBURG, H. *Linear models: least squares and alternatives*. Springer, 1999.
- [139] RAVSHANBEK, D., AND GAPPAR, N. Limit cycle, trophic function and the dynamics of intersectoral interaction. *Current Research Journal of Economic Theory* 2, 2 (2010), 32–40.
- [140] ROSSER, J. *Complexity in Economics*. The international library of critical writings in economics. Elgar, 2004.
- [141] ROSSER, J. BARKLEY, J. Speculations on nonlinear speculative bubbles. *Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences* 1, 4 (1997), 275–300.
- [142] ROTH, A. E. The economist as engineer: Game theory, experimentation, and computation as tools for design economics. *Econometrica* 70, 4 (2002), 1341–1378.
- [143] RUBINSTEIN, A. *Modeling Bounded Rationality*. Zeuthen lecture book series. MIT Press, 1998. 2, 15
- [144] SAMANIDOU, E., ZSCHISCHANG, E., STAUFFER, D., AND LUX, T. Agent-based models of financial markets. *Reports on Progress in Physics* 70, 3 (2007), 409.
- [145] SARGENT, T. J. *Bounded rationality in macroeconomics / Thomas J. Sargent*. Clarendon Press ; Oxford University Press Oxford [England] : Oxford ; New York, 1993.

- 
- [146] SCHELLING, T. C. *Schelling Micromotives and Macrobehavior (Fels lectures on public policy analysis)*. W W Norton & Co Ltd, April 1978.
- [147] SCHWARZ, G. E. Estimating the dimension of a model. *Annals of Statistics* 2, 6 (1978), 461–464.
- [148] SEC, AND CFTC. Findings regarding the market events of may 6, 2010. Tech. rep., U.S. Securities and Exchange Commission and Commodity Futures Trading Commission, New York, NY, United States, 2010.
- [149] SHOHAM, Y. Computer science and game theory. *Commun. ACM* 51, 8 (Aug. 2008), 74–79.
- [150] SIMON, H. A. Rational choice and the structure of the environment. *Psychological Review* 63, 2 (1956), 129–38.
- [151] SINDHYA, K., DEB, K., AND MIETTINEN, K. A local search based evolutionary multi-objective optimization approach for fast and accurate convergence. *Parallel Problem Solving from Nature. Lecture Notes in Computer Science*, 5199 (2008), 815–837.
- [152] SINDHYA, K., RUIZ, A. B., AND MIETTINEN, K. A preference based interactive evolutionary algorithm for multi-objective optimization: Pie. *Evolutionary Multi-Criterion Optimization. Lecture Notes in Computer Science*, 6576 (2011), 212–224.
- [153] STAN, A. Assessing inbound call centers scheduling through bootstrapping and gdp based monte carlo. *Review of Economic Studies and Research Virgil Madgearu*, 2 (2011), 135–147. [8](#)
- [154] STAN, A. An automata based approach to modeling real-time trading applications. *Review of Economic Studies and Research Virgil Madgearu*, 2 (2011), 135–147. [8](#)
- [155] STAN, A. Day trading the emerging markets using multi-time frame technical indicators and artificial neural networks. In *Advanced Intelligent Computational Technologies and Decision Support Systems*, B. Iantovics and R. Kountchev, Eds., vol. 486 of *Studies in Computational Intelligence*. Springer International Publishing, 2014, pp. 191–200. [8](#)
- [156] STAN, A., AND MOLDOVAN, D. Assessing the dependability of the vpin metric as an order flow-toxicity estimator through a specific high frequency

- trading experimental setup. In *in Proceedings for the 12th International conference on Practical on Informatics in Economy (IE'2013)* (2013), ASE, Bucharest, Romania, pp. 589–593. 8
- [157] STAN, A., AND MOLDOVAN, D. A neural network vwap algorithm for artificial financial markets populated with zero-intelligence trading agents. In *in Proceedings for the 12th International conference on Practical on Informatics in Economy (IE'2013)* (2013), ASE, Bucharest, Romania, pp. 609–612. 8
- [158] SUTTON, R. S., AND BARTO, A. G. *Introduction to Reinforcement Learning*, 1st ed. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1998.
- [159] TAVELLA, D. *Quantitative Methods in Derivatives Pricing: An Introduction to Computational Finance*. Wiley, 2002.
- [160] TAYLOR, S. *Asset Price Dynamics, Volatility and Prediction*. Princeton University Press, 2005.
- [161] TEFATSION, L. Agent-based computational economics: Growing economies from the bottom up. *Artificial Life* 8, 1 (March 2002), 55–82.
- [162] TEFATSION, L. Agent-based computational economics: Modeling economies as complex adaptive systems. *Information Sciences* 149 (2003), 263–269.
- [163] TEFATSION, L. Agent-based computational modeling and macroeconomics. Staff General Research Papers 12402, Iowa State University, Department of Economics, April 2006.
- [164] TKATCH, I., AND ALAM, Z. S. Strategic order splitting in automated markets. *SSRN* (2009). <http://ssrn.com/abstract=1400307> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1400307>.
- [165] TSANG, E. Computational intelligence determines effective rationality. *International Journal of Automation and Computing* 5, 1 (2008), 63–66.
- [166] TSAY, R. S. *Analysis of Financial Time Series*, 1 ed. Wiley-Interscience, October 2002.
- [167] TVERSKY, A., AND KAHNEMAN, D. Availability: A heuristic for judging frequency and probability. *Cognitive Psychology* 5 (1973), 207–232.

- 
- [168] TVERSKY, A., AND KAHNEMAN, D. Judgment under uncertainty: Heuristics and biases. *Science* 185 (1974), 1124–1131.
- [169] VAPNYARSKII, I. Lagrange multipliers. In *Encyclopaedia of Mathematics* (1994), M. Hazewinkel, Ed., Springer.
- [170] VERYZHENKO, I. *A reexamination of modern nance issues using Artificial Market Frameworks*. PhD thesis, Universite Paris I - Pantheone Sorbonne, 2012. [2](#)
- [171] VOLTERRA, V. *Lecons sur la theorie mathematique de la lutte pour la vie*. Gauthier-Villars, 1931. [8](#), [11](#)
- [172] WALRAS, L. *Elements of Pure Economics: Or the Theory of Social Wealth*. Elements of Pure Economics, Or the Theory of Social Wealth. reprinted by Routledge 2003, 1874.
- [173] WEI, W. C., GERACE, D., AND FRINO, A. Informed trading, flow toxicity and the impact on intraday trading factors. *Australasian Accounting Business and Finance Journal* 7, 2 (2013), 3–24.
- [174] WINDRUM, P., FAGIOLO, G., AND MONETA, A. Empirical validation of agent-based models: Alternatives and prospects. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 10, 2 (2007), 8.
- [175] WOOLDRIDGE, M., AND JENNINGS, N. R. Pitfalls of agent-oriented development. In *Proceedings of the second international conference on Autonomous agents* (New York, NY, USA, 1998), AGENTS '98, ACM, pp. 385–391. [2](#)
- [176] YAMAMOTO, R., AND LEBARON, B. Order-splitting and long-memory in an order-driven market. *The European Physical Journal B - Condensed Matter and Complex Systems* 73, 1 (January 2010), 51–57.
- [177] ZIMMERMANN, G., NEUNEIER, R., AND GROTHMANN, R. Multi-agent fx-market modeling based on cognitive systems. In *Artificial Neural Networks — ICANN 2001*, G. Dorffner, H. Bischof, and K. Hornik, Eds., vol. 2130 of *Lecture Notes in Computer Science*. Springer Berlin Heidelberg, 2001, pp. 767–774.