

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

Νέες τάσεις στη σύγχρονη χρηματοοικονομική
μηχανική: από τη στοχαστική προσέγγιση στις
υπολογιστικά νοήμονες μεθοδολογίες

Εκτενής περίληψη στα ελληνικά της διατριβής που κατατέθηκε για την απόκτηση
του διδακτορικού διπλώματος

Νικόλαος Θωμαΐδης
Δίπλωμα Μηχανικού Παραγωγής & Διοίκησης
MSc in Mathematics & Finance

Τριμελής συμβουλευτική επιτροπή

Γεώργιος Δούνιας
Αναπληρωτής Καθηγητής

Αριστοφάνης Δημάκης
Καθηγητής

Γεώργιος Λιάγκουρας
Επίκουρος Καθηγητής

ΧΙΟΣ 2007

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η διδακτορική διατριβή με τίτλο: «νέες τάσεις στη σύγχρονη χρηματοοικονομική μηχανική: από τη στοχαστική προσέγγιση στις υπολογιστικά νοήμονες μεθοδολογίες» εκπονήθηκε στο εργαστήριο Διοίκησης Επιχειρήσεων και Λήψης Αποφάσεων (ΔΕΛΑΠ) του Τμήματος Μηχανικών Οικονομίας & Διοίκησης (ΤΜΟΔ), από το Δεκέμβριο του 2002 έως το Φεβρουάριο του 2007. Τη γενικότερη επίβλεψη της έρευνας είχε ο Αναπληρωτής Καθηγητής και Διευθυντής του Εργαστηρίου κ. Γεώργιος Δούνιας, ενώ τη συνεπίβλεψη της διδακτορικής διατριβής ανέλαβαν οι κκ. Αριστοφάνης Δημάκης (Καθηγητής και Πρόεδρος ΤΜΟΔ) και Γεώργιος Λιάγκουρας (Επίκουρος Καθηγητής ΤΜΟΔ).

Στόχος της έρευνας μας ήταν η ανάπτυξη μίας πρωτότυπης κλάσης μοντέλων για την επίλυση τυπικών προβλημάτων στη χρηματοοικονομική μηχανική, όπως π.χ. την πρόβλεψη χρημ/κών δεδομένων και την τιμολόγηση χρεογράφων. Η οικογένεια των μοντέλων που προτείνονται στην εργασία αυτή συνδυάζει μία μέθοδο υπολογιστικής νοημοσύνης, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (artificial neural networks-NN), με κλασικά οικονομετρικά υποδείγματα μεταβλητότητας τύπου GARCH (Generalised Autoregressive Conditional Heteroskedasticity). Ο συνδυασμός αυτός δημιουργεί ένα ευέλικτο πλαίσιο μοντελοποίησης που δύναται να απεικονίσει πολλές από τις χαρακτηριστικές ιδιότητες των χρημ/κών χρονοσειρών που αναφέρονται στη βιβλιογραφία (μη γραμμικές διορθώσεις τιμών, αλλαγές στα επίπεδα μεταβλητότητας, μη γκαουσιανές κατανομές, κ.α.). Εξετάζουμε μία σειρά στρατηγικών για τον προσδιορισμό και τον έλεγχο επάρκειας της δομής των μοντέλων αυτής της κατηγορίας, που βασίζονται σε στατιστικούς ελέγχους, και προτείνουμε παραλλαγές αυτών των ελέγχων που είναι *εύρωστες* (robust), δηλ. διατηρούν την εγκυρότητά τους στην περίπτωση που το μοντέλο δεν απεικονίζει πλήρως την πιθανολογική σχέση που συνδέει την μεταβλητή στόχο με τις εξαρτημένες μεταβλητές. Η απόδοση των στατιστικών αυτών διαδικασιών διερευνάται με τη βοήθεια πειραμάτων προσομοίωσης Monte-Carlo. Ως μία επίδειξη των δυνατοτήτων της προτεινόμενης μεθοδολογίας, παραθέτουμε δύο μελέτες σε εμπειρικά δεδομένα. Στην πρώτη από αυτές, εφαρμόζουμε συνδυαστικά μοντέλα NN-GARCH στην πρόβλεψη της κατανομής των αποδόσεων σε διεθνείς χρηματιστηριακούς δείκτες (DAX, FTSE 100, S&P 500). Στόχος της δεύτερης εφαρμογής είναι να συγκρίνει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου διαδοχικών στατιστικών ελέγχων, που εφαρμόζεται στη διατριβή αυτή, με άλλες στατιστικές και εμπειρικές τεχνικές προσδιορισμού της αρχιτεκτονικής νευρωνικού δικτύου στην τιμολόγηση παραγώγων συμβολαίων τύπου δικαιώματος προαίρεσης (option).

Το κείμενο που ακολουθεί είναι μία εκτενής περίληψη της αντίστοιχης διδακτορικής διατριβής που συγγράφηκε στην αγγλική γλώσσα. Στο πρώτο μέρος της ελληνική περίληψης περιγράφουμε τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του χώρου εφαρμογής που κατεύθυναν την έρευνά μας στους συγκεκριμένους τομείς. Η δεύτερη ενότητα επιχειρεί να σκιαγραφήσει τη γενικότερη συνεισφορά της διατριβής στα ερευνητικά πεδία της χρημ/κής μηχανικής, οικονομετρίας και υπολογιστικής νοημοσύνης. Στην τρίτη ενότητα παραθέτουμε μία περίληψη του κάθε κεφαλαίου της διδακτορικής διατριβής, συνοψίζοντας τα βασικά πορίσματα.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους συνετέλεσαν στην πραγματοποίηση του ερευνητικού μου έργου, ως υποψηφίου διδάκτορα του εργαστηρίου Διοίκησης Επιχειρήσεων και Λήψης Αποφάσεων, ιδιαίτερα τον επιβλέποντα, κ. Γεώργιο Δούνια για συνεχή υποστήριξη και ενθάρρυνση και τα μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, κκ. Αριστοφάνη Δημάκη και Γεώργιο Λιάγκουρα.

Ειδική μνεία οφείλω στον Δρ. Νικόλαο Κοντάκη, Επισκέπτη Καθηγητή του Τμήματος και Διευθύνοντα Σύμβουλο της Kepler Asset Management (Wall Street, New York), για παροχή δεδομένων και προγραμμάτων αλλά κυρίως για τις επικερδείς συζητήσεις που είχαμε σχετικά με την πρακτική πλευρά των μεθόδων και εργαλείων που ανεπτύχθησαν στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής. Κατά τη διάρκεια της συμμετοχής μου στα Διεθνή Ερευνητικά Δίκτυα EUNITE (EUropean Network on Intelligent TEchnologies for Smart Adartive Systems) και NISIS (Network On Nature-Inspired Smart Information Systems) ωφελήθηκα αρκετά από τη συνεργασία που είχα με τους Αναπληρωτές Καθηγητές Jan Jantzen, του Πολυτεχνείου της Κοπεγχάγης, και Uzay Kaymak, του Erasmus School of Economics, του Πανεπιστημίου του Rotterdam. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω όλα τα μέλη του προσωπικού του Τμήματος Μηχανικών Οικονομίας και Διοίκησης, ιδιαίτερα τους Δρ. Μιχαήλ Μιχαλόπουλο, Επισκέπτη Καθηγητή και Διευθυντή της Τράπεζας της Ελλάδος, για παροχή δεδομένων, την κ. Δέσποινα Αμυγδάλου για γραμματειακή υποστήριξη, τον κ. Παναγιώτη Λεονταρίδη για τεχνική υποστήριξη και τους διδάσκοντες, Δρ. Δημοσθένη Δριβαλιάρη και Λέκτορα Αθανάσιο Κουλακιώτη, για επικερδείς συζητήσεις στα θέματα τις έρευνάς μου. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω δύο πρώην φοιτητές του Τμήματος, τους κ.κ. Βασίλειο Βασιλειάδη και Βασίλειο Τζασιούδη, για την επικουρική τους εργασία σε θέματα που άπτονται των ερευνητικών μου ενδιαφερόντων.

Η έρευνα στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής έγινε με την οικονομική υποστήριξη του Κοινωφελούς Ιδρύματος «Αλέξανδρος Σ. Ωνάσης» (Πρόγραμμα Υποτροφιών προς Έλληνες 2003-2004) και την επιχορήγηση του Εμπειρικού Ιδρύματος.

Θωμαΐδης Νικόλαος

Χίος, Φεβρουάριος 2007

ΣΥΝΤΟΜΟ ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

Ο κ. Νικόλαος Θωμαΐδης απέκτησε το Δίπλωμα Μηχανικού Παραγωγής & Διοίκησης από το Πολυτεχνείο Κρήτης και πραγματοποίησε τις μεταπτυχιακές του σπουδές στο Τμήμα Μαθηματικών του Imperial College of Science, Technology and Medicine, απ' όπου και απέκτησε το Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Εξειδίκευσης Master of Science in Mathematics and Finance. Το 2002 έγινε δεκτός για εκπόνηση διδακτορικής διατριβής στο Τμήμα Μηχανικών Οικονομίας & Διοίκησης, του Πανεπιστημίου Αιγαίου, σε θέματα χρηματοοικονομικής μηχανικής και υπολογιστικής νοημοσύνης. Από το 2007 είναι Υπεύθυνος Έρευνας & Ανάπτυξης στην Kepler Asset Management (Wall Street, New York). Στο διάστημα της παρουσίας του στον ακαδημαϊκό χώρο, ο κ. Θωμαΐδης έχει ενεργή ερευνητική δραστηριότητα, που περιλαμβάνει τη συγγραφή ερευνητικών εργασιών (αναλυτικός κατάλογος παρατίθεται στη συνέχεια) και τη συμμετοχή σε διεθνή ερευνητικά δίκτυα και επιστημονικά συνέδρια. Επίσης, ασχολείται με τη δημοσίευση κριτικών επιστημονικών βιβλίων χρηματοοικονομικής μηχανικής, στατιστικής και υπολογιστικών μεθόδων σε συνεργασία με τον εκδοτικό οίκο Springer-Verlag και την ομάδα Quantnotes του Imperial College. Τα ερευνητικά του ενδιαφέροντα επικεντρώνονται στην εφαρμογή μη γραμμικών οικονομετρικών μεθόδων και μοντέλων υπολογιστικής νοημοσύνης στη χρηματοοικονομική μηχανική.

ΛΙΣΤΑ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΩΝ ΣΤΟ ΠΕΛΙΟ ΤΗΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ¹

Άρθρα σε περιοδικά με κριτές

1. N. S. Thomaidis, V. Tzastoudis and G. Dounias (2006), “ A comparison of neural network model-selection strategies for the pricing of S&P 500 stock index options”, *International Journal of Artificial Intelligence Tools, World Scientific*, forthcoming (Κεφ. 7)
2. N. S. Thomaidis and G. Dounias (2006), “Cointegration and error-correction models: towards a reconciliation between behavioural finance and econometrics”, *The ICAI Journal of Behavioral Finance* III(3) (Κεφ. 2, 8)
3. N. S. Thomaidis (2006), “The Implications of Behavioural Finance for the Modelling of Securities Prices”, in *D. Satish and P. Krishna Kishore., Behavioral Finance, ICAI Books, 2006*, also appeared in *The ICAI Journal of Behavioral Finance* II(2), 2005. (Κεφ. 2, 8)
4. N. S. Thomaidis, N. Kondakis and G. Dounias (2006), “An Intelligent Statistical Arbitrage Trading System”, *Lecture Notes in Computer Science (LNCS) 3955, Springer-Verlag* (Κεφ. 4, 6, 8)
5. V. Tzastoudis, N. S. Thomaidis and G. Dounias (2006), “Improving Neural Network Based Option Price Forecasting”, *Lecture Notes in Computer Science (LNCS) 3955, Springer-Verlag.* (Κεφ. 7)
6. N. S. Thomaidis, N. Nikitakos, G. Dounias (2006), “The Evaluation of Information Technology Projects: a Fuzzy Multicriteria Decision-Making Approach”, *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 5(1), *World Scientific*.
7. M. Michalopoulos, N. S. Thomaidis, G. D. Dounias and C. Zopounidis (2004), “Using a Fuzzy Sets Approach to Select a Portfolio of Greek Government Bonds”, *Fuzzy Economic Review* IX(2). (Κεφ. 1)

Άρθρα σε πρακτικά συνεδρίων (με κριτές)

1. A. Koulakiotis, K. Lyroudi and N.S. Thomaidis (2006), “Cross Listings, Volatility, and Exchange Rates”, in *Proceedings of the 61st International Atlantic Economic Conference*, Berlin, Germany, 15-19 March.
2. N.S. Thomaidis, N Kondakis, G. Dounias (2005), “The cross-dynamics of international financial markets: a suitable domain for applying nature inspired intelligent techniques”, in *Proceedings of the 1st European Symposium on Nature-Inspired Smart Information Systems (NISIS)*, Albufeira, Portugal. (Κεφ. 8)

¹ Σε παρένθεση σημειώνουμε τα κεφάλαια της διατριβής που σχετίζονται με το θέμα της δημοσίευσης.

3. N. S. Thomaidis, G. Dounias, N Kondakis (2005), “Financial statistical modelling with a new nature-inspired technique”, in Proceedings of the 1st *European Symposium on Nature-Inspired Smart Information Systems (NISIS)*, Albufeira, Portugal. (Κεφ. 4)
4. Kaymak U., G. Dounias, N. S. Thomaidis (2005), “Benchmark financial and managerial problems to be handled by nature inspired intelligent methodologies”, in Proceedings of the 1st *European Symposium on Nature-Inspired Smart Information Systems (NISIS)*, Albufeira, Portugal. (Κεφ. 8)
5. N. S. Thomaidis, G. Dounias (2004), “Behavioural finance: a new challenge to Computational Intelligence”, in Proceedings of the 4th *European Symposium on Intelligent Technologies and their implementation on Smart Adaptive Systems (EUNITE-04)*, Aachen, Germany, (Κεφ. 2, 8)
6. N. S. Thomaidis, G. Dounias and P. Vassilakis (2004), “National and International Political and Economic Factors that Determine the Course of Athens Stock Exchange”, in Proceedings of the 1st *International Conference on Applied Financial Economics (AFE 2004)*, Samos, Greece
7. N. S. Thomaidis, Dounias G., Zalimidis P., (2003) “Measuring the Penetration of Intelligent Technologies in Medical Business”, in Proceedings of the 3rd *European Symposium on Intelligent Technologies and their implementation on Smart Adaptive Systems (EUNITE-03)*, Oulu, Finland
8. N. S. Thomaidis, P. Zalimidis, G. Dounias (2004), “Intelligent Tools and Techniques for Supporting Tourism Services and Applications”, in Proceedings of the 1st *International Conference on Sustainable Touristic Development and Environment*, Chios, Greece
9. N. S. Thomaidis, Dounias G. (1999) “Stock Market Analysis Using DataEngine and WinROSA”, in Proceedings of the 3rd *International Symposium on Data Analysis*, Aachen, Germany
10. N. S. Thomaidis, Dounias G., Zopounidis C., (1999) “A fuzzy rule-based learning method for corporate bankruptcy prediction”, in Proceedings of the *International Advanced Course on Machine Learning and Applications (ACAI 99)*, Chania, Greece
11. M. Michalopoulos, Dounias G., Thomaidis N.S., Tselentis G. (1999) “Decision Making Using Fuzzy C-means and Inductive Machine Learning for Managing Bank Branches Performance”, in Proceedings of the *European Symposium on Intelligent Techniques (ESIT'99)*, Chania, Greece

Υποβληθείσες εργασίες²

1. N. S. Thomaidis and G. Dounias (2006), “ A general class of neural network GARCH models for financial time series analysis”, submitted to the *Journal of Forecasting* (Κεφ. 4, 6),

² Οι περισσότερες από αυτές τις εργασίες είναι διαθέσιμες από το Social Science Research Network, URL <http://ssrn.com>[February2007].

2. N. S. Thomaidis, V. Vassiliadis and N Kondakis (2006), "Intra-day return transmissions between US and European equity markets", submitted to *Managerial Finance* (Κεφ. 8)
3. N. S. Thomaidis, and G. Dounias (2006), "On detecting the optimal structure of a neural network model under strong statistical features in errors", submitted to *Neural Processing Letters* (Κεφ. 5)
4. N. S. Thomaidis, and G. Dounias (2006), "A comparison of statistical tests for the adequacy of a neural network regression model", submitted to *Statistical Methods & Applications* (Κεφ. 5)
5. N.S. Thomaidis and G. Dounias (2006), "A hybrid intelligent system for financial time-series forecasting", submitted to *Intelligent Engineering Systems* (Κεφ. 4, 6)
6. N. S. Thomaidis & G. Dounias (2004), "Equilibrium correction models in computation intelligence", *Intelligent Systems in Accounting, Finance & Management* (under revision) (Κεφ. 2, 8)

I. Εισαγωγή

Την τελευταία τριακονταετία συντελέστηκαν μεγάλες αλλαγές στο παγκόσμιο χρηματοπιστωτικό σύστημα με σημαντικότερη ίσως τη ραγδαία ανάπτυξη της αγοράς παραγώγων (derivatives market). Χαρακτηριστικά αυτών των αλλαγών ήταν η εμφάνιση πολύπλοκων χρημ/κών προϊόντων, κυρίως παραγώγων διαφόρων ειδών (options, futures, swaps), και η όλο και μεγαλύτερη εμπλοκή των χρηματοπιστωτικών οργανισμών στις κεφαλαιαγορές, ιδιαίτερα στην αγορά των παραγώγων. Στη δεκαετία του '90 η διεθνής κοινότητα έγινε μάρτυρας «κατάρρευσης» μεγάλων χρηματοπιστωτικών οίκων, η οποία προκλήθηκε κυρίως από ζημιές σε θέσεις στην αγορά παραγώγων. Παράλληλα, διάφορες χρηματοοικονομικές κρίσεις, όπως π.χ. η «Μαύρη Δευτέρα» (Black Monday) (19 Οκτωβρίου 1987) στο χρηματιστήριο της Νέας Υόρκης και η Κρίση στις Ασιατικές Αγορές (Asian Crisis) του 1997, αύξησαν την ανησυχία για τη σταθερότητα του χρηματοπιστωτικού συστήματος και οδήγησαν στην αναζήτηση νέων μεθόδων και εργαλείων για την επιτυχημένη πρόβλεψη μελλοντικών σεναρίων αγοράς και την ανάλυση/διαχείριση του χρηματοοικονομικού κινδύνου.

Η τελευταία τριακονταετία σηματοδότησε και μεγάλες εξελίξεις στο χώρο της χρημ/κής επιστήμης. Το 1973 οι F. Black & M. Scholes δημοσίευσαν το περίφημο μοντέλο τους σχετικά με την εύρεση μίας «δίκαιας» τιμής για χρεόγραφα τύπου δικαιώματος προαίρεσης (option). Η μελέτη αυτή έδωσε το έναυσμα για την ανάπτυξη μίας νέας προσέγγισης-τεχνικής στην αποτίμηση πολύπλοκων χρημ/κών χρεογράφων που βασίζεται στην έννοια της κερδοσκοπικής αντιστάθμισης (arbitrage) (βλ παρακάτω).

Τα χαρακτηριστικά του αναδυόμενου χρημ/κού περιβάλλοντος και οι εξελισσόμενες μέθοδοι οδήγησαν στην ανάπτυξη της *χρηματοοικονομικής μηχανικής*, ενός πρακτικού διεπιστημονικού πεδίου που επιχειρεί να συνδυάσει τη χρημ/κή θεωρία με μαθηματικές τεχνικές και υπολογιστικές μεθόδους στην επίλυση χρημ/κών προβλημάτων. Οι κύριος όγκος έρευνας στη χρημ/κή μηχανική επικεντρώνεται στους παρακάτω τομείς:

- *πρόβλεψη χρημ/κών μεγεθών - τιμολόγηση χρεογράφων*: στόχος είναι η ανάπτυξη μοντέλων για την πρόβλεψη της μελλοντικής τιμής διαπραγματεύσεως χρηματοοικονομικών χρεογράφων (μετοχές, ομόλογα, παράγωγα, κ.α.) ή της πορείας οικονομικών δεικτών που επηρεάζουν την τιμή των χρεογράφων (επιτόκια, χρηματιστηριακοί δείκτες, συναλλαγματικές ισοτιμίες, κ.α.)
- *ανάλυση χρημ/κού κινδύνου*: αντικείμενο έρευνας είναι η αποτίμηση ή ποσοτικοποίηση του κινδύνου που πηγάζει είτε από τη διαπραγμάτευση χρεογράφων (κίνδυνος αγοράς) είτε από την αθέτηση της υποσχέσεως του αντισυμβαλλομένου σε ένα χρημ/κού συμβόλαιο (πιστωτικός κίνδυνος).
- *διαχείριση χαρτοφυλακίου*: αναφέρεται στην εύρεση μίας στρατηγικής κατανομής κεφαλαίου μεταξύ διαφορετικών επενδύσεων που να συμφωνεί με το «προφίλ κινδύνου» ή τους χρημ/κούς στόχους του εκάστοτε οργανισμού.

Από τη στιγμή που η χρημ/κή μηχανική αναδείχθηκε σε ενεργό πεδίο έρευνας συνδέθηκε άρρηκτα με τη θεωρία των πιθανοτήτων και της στατιστικής. Για την ακρίβεια, η τάση

ανάλυσης οικονομικών φαινομένων με εφαρμογή στοχαστικών μοντέλων και στατιστικών τεχνικών πηγαίνει πολύ πίσω στις πρωτοπόρες εργασίες του Trygve M. Haavelmo, τη δεκαετία του '50. Οι στοχαστικές μέθοδοι χρησιμοποιούν τεχνικές πιθανοτήτων, στατιστικής και στοχαστικών διαδικασιών και για να μοντελοποιήσουν την *αβεβαιότητα* που χαρακτηρίζει τη μελλοντική πορεία των χρηματοοικονομικών μεγεθών. Είναι λοιπόν κοινή υπόθεση των στοχαστικών μοντέλων ότι η αβεβαιότητα σε μία χρηματαγορά έχει τη μορφή της *τυχειότητας* (randomness) και επομένως η πορεία των χρημ/κών μεγεθών υπακούει σε ένα νόμο πιθανότητας (πιθανολογική κατανομή). Εκκινώντας, λοιπόν, από την υπόθεση αυτή, μπορεί κανείς να προσδιορίσει ένα στοχαστικό μοντέλο για την πορεία χρημ/κών μεγεθών, θέτοντας έπειτα το μοντέλο αυτό σε εμπειρική επαλήθευση με τη χρήση στατιστικών μεθόδων.

Παράλληλα με τις στοχαστικές μεθόδους, η εξέλιξη της επιστήμης των υπολογιστών συνέβαλε στην ανάπτυξη αλγορίθμων που εμφανίζουν «ευφυή» συμπεριφορά και συχνά χαρακτηρίζονται με τον όρο *υπολογιστικές νοήμονες μέθοδοι* (computational intelligent methods) ή απλά νοήμονες μέθοδοι. Οι τελευταίες προσομοιώνουν στοιχεία ανθρώπινης μάθησης, προσαρμογής σε πολύπλοκα περιβάλλοντα και βιολογικής εξέλιξης για να «εξορύξουν» πολύπλοκες σχέσεις μέσα από δεδομένα του χώρου εφαρμογής. Οι ευφυείς μέθοδοι παρουσιάζουν συχνά πολλά πλεονεκτήματα έναντι των κλασικών στοχαστικών μοντέλων. Αποδεικνύονται ιδιαίτερα αποτελεσματικές στο να εντοπίζουν μη γραμμικές σχέσεις μεταξύ μεγεθών σε πολύπλοκα περιβάλλοντα, όπως π.χ. μία χρημ/κή αγορά. Η ιδιότητα αυτό είναι αποτέλεσμα του γεγονότος ότι οι ευφυείς μέθοδοι είναι σχεδιασμένες για μία κατεξοχήν *εμπειρική* προσέγγιση συστημάτων, δηλ. τον εντοπισμού μοντέλων ή συσχετίσεων μέσα από δεδομένα που πηγάζουν από τη λειτουργία ενός συστήματος.

Με τον όρο νοήμονες μέθοδοι, γίνονται σήμερα κατά κανόνα αντιληπτές προσεγγίσεις, όπως αυτή της ασαφούς λογικής (fuzzy logic), των τεχνητών νευρωνικών δικτύων (artificial neural networks), της μηχανικής μάθησης (machine learning) και του γενετικού προγραμματισμού (genetic programming). Ο εμπειρικός χαρακτήρας αυτών των μεθόδων, η γενικότερη αύξηση της υπολογιστικής ισχύος και η ανάγκη για την ανάπτυξη μοντέλων που δε βασίζονται σε περιοριστικές υποθέσεις επί του χώρου εφαρμογής, έκανε τους ερευνητές της χρημ/κής μηχανικής να αναθεωρήσουν την κλασική προσέγγιση αναζητώντας λύσεις υπολογιστικής νοημοσύνης. Στην δεκαετία που πέρασε έγινε ευρεία χρήση ευφυνών μεθόδων σε προβλήματα χρημ/κής μηχανικής με επιτυχημένα αποτελέσματα σε πολλές περιπτώσεις.

Από την στιγμή που νοήμονες μέθοδοι άρχισαν να χρησιμοποιούνται σε χώρους εφαρμογής με στοχαστική «παράδοση», έγινε μία απόπειρα εφαρμογής στατιστικών-οικονομετρικών τεχνικών στην κατασκευή ή αποτίμηση νοημόνων μοντέλων. Παραδοσιακά, οι νοήμονες μέθοδοι χρησιμοποιούνταν για την απεικόνιση της συναρτησιακής σχέσης μεταξύ της μεταβλητής που ενδιαφέρει τον ερευνητή (μεταβλητή στόχος) και ενός πλήθους μεταβλητών που χρησιμοποιούνται για να ερμηνεύσουν ή να προβλέψουν την πορεία της μεταβλητής-στόχος (επεξηγηματικές ή ανεξάρτητες μεταβλητές). Η προσέγγιση όμως αυτή δεν είναι αποτελεσματική σε χώρους που χαρακτηρίζονται από έντονη αβεβαιότητα, όπως π.χ. οι χρημ/κές αγορές. Ο λόγος είναι ότι σε ένα έμφυτα «στοχαστικό» περιβάλλον, δεν είναι

δυνατό να διατυπώσει κανείς μία ακριβή σχέση μεταξύ μεταβλητών που χαρακτηρίζουν τη λειτουργία του συστήματος, υπάρχει ωστόσο πάντα μία σχέση σε όρους πιθανότητας. Ο απώτερος στόχος κάθε οικονομετρικού μοντέλου είναι να απεικονίσει ικανοποιητικά την πιθανολογική αυτή σχέση, όπως συνοψίζεται από τη *δεσμευμένη πιθανότητα* (conditional probability) ή τη *δεσμευμένη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας* (conditional probability density function). Κάθε σχέση πιθανολογικού χαρακτήρα εκφράζει τη σχετική συχνότητα με την οποία η μεταβλητή στόχος παίρνει τιμές σε ένα διάστημα τιμών, δεδομένων των μετρήσεων των επεξηγηματικών μεταβλητών. Η εύρεση μίας ικανοποιητικής προσέγγισης του δεσμευμένου νόμου πιθανότητας είναι συνήθως μία επαναληπτική διαδικασία που περιλαμβάνει α) ένα στάδιο *προσδιορισμού* (specification), κατά το οποίο ο ερευνητής υποθέτει μία συγκεκριμένη παραμετρική οικογένεια πιθανολογικών μοντέλων, β) ένα στάδιο *εκτίμησης* (estimation), κατά το οποίο εντοπίζεται εκείνο το μοντέλο ή μέλος της οικογένειας που προσεγγίζει κατά βέλτιστο τρόπο την κατανομή (βάσει κάποιου κριτηρίου προσαρμογής) και γ) ένα στάδιο *διαγνωστικού ελέγχου* (diagnostic testing), κατά το οποίο ο ερευνητής εξετάζει αν το μοντέλο περιγράφει επαρκώς τα δεδομένα και αν μπορεί να απλοποιηθεί περαιτέρω.

Ανάλογα με την κλάση μοντέλων που υιοθετεί ο ερευνητής, επιχειρεί να μοντελοποιήσει διαφορετικές πλευρές της πιθανολογικής σχέσης. Ίσως η πιο κλασική οικογένεια υποδειγμάτων είναι τα *μοντέλα παλινδρόμησης* (regression models) που εστιάζουν στην ανίχνευση *αναμενόμενων* σχέσεων ή σχέσεων στο επίπεδο του *μέσου* της δεσμευμένης κατανομής (expectational/mean relations). Κατ' αυτόν τον τρόπο επιχειρούν να διατυπώσουν μία ποσοτική σχέση για το πώς η τιμή της μεταβλητής-στόχος αποκρίνεται *κατά μέσο όρο* σε διαφορετικές τιμές των επεξηγηματικών μεταβλητών. Η πλειοψηφία των μεθόδων υπολογιστικής νοημοσύνης που χρησιμοποιούνται σε πραγματικές εφαρμογές έχει τη μορφή μοντέλων παλινδρόμησης. Μία τέτοια προσέγγιση δικαιολογείται από το γεγονός ότι οι αλγόριθμοι υπολογιστικής νοημοσύνης φτιάχτηκαν αρχικά για χώρους εφαρμογής (όπως π.χ. επεξεργασία σήματος) όπου είτε το ενδιαφέρον του ερευνητή επικεντρώνεται στην εύρεση αναμενόμενων σχέσεων είτε η κατανομή του θορύβου που εμπεριέχεται στις μετρήσεις είναι σταθερή και ανεξάρτητη των τιμών των επεξηγηματικών μεταβλητών. Η μελέτη ωστόσο χρημ/κών χρονοσειρών απέδειξε ότι οι μεταβολές των τιμών χρημ/κών μεγεθών ακολουθούν ιδιόμορφους πιθανολογικούς νόμους, των οποίων τα χαρακτηριστικά απέχουν σημαντικά από το παραπάνω στατιστικό πρότυπο.

Συγκεκριμένα, η δειγματική κατανομή των αποδόσεων μετοχών ή των τιμών συναλλαγματικών ισοτιμιών χαρακτηρίζεται συνήθως από αρνητική ασυμμετρία (skewness), «μυτερή» κορυφή και μακριές «ουρές» (fat tails), είναι δηλ *λεπτοκυρτωπική* (leptokurtic). Βάσει αυτού του προτύπου κατανομής, μία πτώση τιμών είναι γενικά πιο συχνή από μία άνοδο και απότομες μεταβολές τιμών είναι πιο πιθανές από μικρές κινήσεις. Επιπλέον, η *προσωρινή ή βραχυχρόνια* κατανομή (conditional distribution) των τιμών δεν είναι σταθερή ως προς το χρόνο αλλά αλλάζει συναρτήσει παρελθοντικών κινήσεων. Συγκεκριμένα, μία μη αναμενόμενη άνοδος ή πτώση των τιμών τείνει να ανεβάζει βραχυπρόθεσμα τη μελλοντική αβεβαιότητα για τη πορεία που θα ακολουθήσει η χρονοσειρά, οδηγώντας συνεπώς σε μία προσωρινή διεύρυνση της κατανομής πιθανών κινήσεων. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό στη βιβλιογραφία ως *Αυτοπαλίνδρομη*

Δεσμευμένη Ετεροσκεδαστικότητα (Autoregressive Conditional Heteroskedasticity ή απλά ARCH)³. Πολύ συχνά, η κατεύθυνση των πρόσφατων κινήσεων έχει σημασία ως προς τη μεταβλητότητα και μία μη αναμενόμενη πτώση τιμών ανεβάζει περισσότερο τη βραχυχρόνια μεταβλητότητα από μία απότομη άνοδο. Παρατηρούμε συνεπώς ότι το εύρος της βραχυχρόνιας κατανομής αποδόσεων σε χρημ/κά μεγέθη δεν είναι σταθερό ως προς το χρόνο αλλά επηρεάζεται από απότομες ανόδους ή πτώσεις τιμών, συνήθως κατά ασύμμετρο τρόπο.

Επιπλέον χρονικές εξαρτήσεις μεταξύ των διαχρονικών κατανομών παρατηρούνται όταν η τιμή διαπραγματεύσεως ενός χρεογράφου στην αγορά αποκλίνει από τη λεγόμενη *θεμελιώδη αξία* του (fundamental value). Η τελευταία καθορίζεται βάσει θεμελιωδών μεγεθών της αγοράς (γενικός δείκτης, μακροοικονομικά μεγέθη, επιτόκια) ή από τη τιμή άλλων «παρόμοιων» χρεογράφων που διαπραγματεύονται στην αγορά. Βασική υπόθεση της Θεωρίας Αποτελεσματικών Αγορών (Efficient Market Hypothesis) είναι ότι κάθε χρεόγραφο αποτιμάται ορθολογικά στην αγορά, δηλ. οποιεσδήποτε αποκλίσεις μεταξύ πραγματικής και θεμελιώδους τιμής οφείλονται σε τυχαίους παράγοντες και συνεπώς δεν έχουν καμία προβλεπτική αξία για τη μετέπειτα πορεία της τιμής. Εμπειρικές μελέτες χρηματαγορών έδειξαν ωστόσο ότι η μη ορθολογική συμπεριφορά των επενδυτών καθώς και οι «ατέλειες» της αγοράς (κόστη συναλλαγών, μη επαρκής ρευστότητα, θεσμικοί περιορισμοί, κ.α.) ευθύνονται για σημαντικές και διαρκείς αποκλίσεις τιμών από τα θεμελιώδη επίπεδα. Ο μηχανισμός διόρθωσης και συνεπώς η μελλοντική κατανομή τιμών εξαρτάται συχνά τόσο από το μέγεθος όσο και από το πρόσημο των αποκλίσεων.

Μία από τις προκλήσεις της χρημ/κής μηχανικής είναι η ανάπτυξη μοντέλων που περιγράφουν επαρκώς τις βασικές ιδιότητες της κατανομής των χρημ/κών μεγεθών. Από τη παραπάνω συζήτηση όμως προκύπτει ότι προκειμένου να επιτύχει κανείς μία καλή απεικόνιση της δυναμικής συμπεριφοράς των τιμών είναι απαραίτητο να θεωρήσει μία ευέλικτη κλάση μοντέλων που μπορούν να απεικονίσουν μη γραμμικές διορθώσεις, αλλαγές στα επίπεδα μεταβλητότητας και λεπτοκυρτωτικές κατανομές. Τα μοντέλα αυτά μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη μελλοντικών κατανομών ή ως προσομοιωτές ρεαλιστικών σεναρίων αγοράς για την τιμολόγηση πολύπλοκων χρημ/κών προϊόντων και την ανάλυση του χρημ/κού κινδύνου.

II. Συμβολή στην έρευνα

Στόχος αυτής της διατριβής είναι η ανάπτυξη μίας ευέλικτης κλάσης μη γραμμικών μοντέλων ανάλυσης χρημ/κών δεδομένων που δύνανται να απεικονίσουν ενδιαφέρουσες στατιστικές ιδιότητες που παρατηρούνται στη δυναμική συμπεριφορά των χρημ/κών τιμών/αποδόσεων. Η οικογένεια των μοντέλων που προτείνουμε συνδυάζει α) μία μέθοδο υπολογιστικής νοημοσύνης, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (NN), για την απεικόνιση μη γραμμικών σχέσεων στον μέσο της κατανομής β) μοντέλα μεταβλητότητας τύπου GARCH για την παραμετροποίηση αλλαγών της διακύμανσης και γ) ένα μοντέλο για την κατανομή των σφαλμάτων (errors) ή κατάλοιπων (residuals) του μοντέλου. Ο παραπάνω συνδυασμός

³ Μία χρονοσειρά ονομάζεται ετεροσκεδαστική όταν το επίπεδο μεταβλητότητάς της αλλάζει με το χρόνο.

δίνει τη δυνατότητα στον ερευνητή να απεικονίσει σχέσεις ή εξαρτήσεις σε επίπεδο κατανομών - κάτι που δε θα ήταν εφικτό με ένα απλό νευρωνικό δίκτυο - και να διερευνήσει ενδιαφέρουσες υποθέσεις που αφορούν τη διαχρονική εξέλιξη του μέσου και της διακύμανσης μίας χρονοσειράς.

Όπως σε κάθε «ημι-παραμετρική»⁴ μέθοδο έτσι και στην κλάση μοντέλων NN-GARCH, ιδιαίτερη σημασία αποκτά ο προσδιορισμός του τελικού υποδείγματος. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα δεδομένα που πηγάζουν από τη λειτουργία φυσικών, οικονομικών ή κοινωνικών συστημάτων δεν έχουν όλα τις ίδιες ιδιότητες. Συνεπώς, είναι βασικό για τον ερευνητή να έχει στη διάθεσή του μία συστηματική διαδικασία που μπορεί να προσδιορίσει το βέλτιστο επίπεδο πολυπλοκότητας του μοντέλου για το δεδομένο δείγμα παρατηρήσεων. Το ζήτημα αυτό διερευνάται διεξοδικά στην παρούσα εργασία. Βασιζόμενοι στις αρχές οικονομετρικής μοντελοποίησης, προτείνουμε μία στατιστική μέθοδο προσδιορισμού μοντέλων τύπου NN-GARCH. Σε αντίθεση με άλλες εμπειρικού τύπου διαδικασίες που συχνά εφαρμόζονται σε μεθόδους υπολογιστικής νοημοσύνης, η στατιστική αυτή προσέγγιση έχει το πλεονέκτημα ότι λαμβάνει υπόψη χαρακτηριστικές ιδιότητες του χώρου εφαρμογής και μπορεί να εφαρμοστεί σε μία ευρεία γκάμα προβλημάτων.

Στην οικονομετρία υπάρχουν δύο κύριες μεθοδολογίες προσδιορισμού υποδειγμάτων: η «από το σύνθετο προς το απλό» (complex-to-simple, top-down) και η «από το απλό προς το σύνθετο» (simple-to-complex, bottom-up). Στην πρώτη από αυτές, ο ερευνητής ξεκινά από ένα πολύπλοκο μοντέλο και στη συνέχεια απλοποιεί τη δομή του, αφαιρώντας τμήματα που για το συγκεκριμένο δείγμα παρατηρήσεων φαίνονται περιττά. Αν και απλή στη σύλληψή της, η διαδικασία αυτή προσδιορισμού μοντέλων επιφέρει προβλήματα, κυρίως υπολογιστικής φύσεως. Το κύριο μειονέκτημά της έγκειται στο γεγονός ότι εκτιμά πολύπλοκα μοντέλα με μεγάλο πιθανώς αριθμό «περιττών» (redundant) παραμέτρων, δηλαδή παραμέτρων που δε συμβάλλουν ουσιαστικά στην ικανότητα προσαρμογή του μοντέλου και συνεπώς δε μπορούν να προσδιοριστούν από τη συμπεριφορά του. Η συνάρτηση πιθανοφάνειας (likelihood function) αυτών των μοντέλων παρουσιάζει πολλαπλά τοπικά μέγιστα, και ενδεχομένως επίπεδα πλατό στην κατεύθυνση των «περιττών» παραμέτρων, που δημιουργούν προβλήματα στην εκτίμηση των παραμέτρων με τη βοήθεια αριθμητικών μεθόδων βελτιστοποίησης. Επιπλέον, το γεγονός ότι κάποιες από τις παραμέτρους του μοντέλου είναι περιττές καθιστά αδύνατη την εφαρμογή συνήθων στατιστικών μεθόδων, όπως π.χ. ελέγχων υποθέσεων ή κριτηρίων πληροφορίας, για τη διαπίστωση της μη σημαντικότητας των παραμέτρων.

Τα παραπάνω προβλήματα αντιμετωπίζονται με την υιοθέτηση μίας διαδικασίας προσδιορισμού που ακολουθεί την αντίθετη κατεύθυνση, δηλ. από το απλό προς το σύνθετο. Οι μέθοδοι αυτού του τύπου ξεκινούν από ένα απλό μοντέλο, π.χ. μία γραμμική παλινδρόμηση στην περίπτωσή μας, και σταδιακά προσθέτουν νέα τμήματα περιπλέκοντας τη δομή του μοντέλου ανάλογα με τα ειδικά χαρακτηριστικά του δείγματος. Λόγω κυρίως του στόχου μας να εφαρμόσουμε στατιστικές μεθόδους στο προσδιορισμό του τελικού

⁴ Ένα μοντέλο λέγεται ημι-παραμετρικό (semi-parametric) όταν δεν κάνει συγκεκριμένες υποθέσεις επί του είδους της συναρτησιακής σχέσης που συνδέει τη μεταβλητή-στόχο με τις εξαρτημένες μεταβλητές.

μοντέλου, στην παρούσα εργασία υιοθετούμε μία τέτοια διαδικασία που βασίζεται σε διαδοχικούς στατιστικούς ελέγχους (sequential statistical tests), τύπου πολλαπλασιαστική Lagrange (Lagrange multiplier - LM), για την ύπαρξη επιπρόσθετης δομής σε επίπεδο μέσου ή διακύμανσης. Σε γενικές γραμμές, η διαδικασία προσδιορισμού που ακολουθούμε ξεκινά από ένα μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης για το δεσμευμένο μέσο. Τα κατάλοιπα του μοντέλου διερευνώνται για «λανθάνουσα» ή «κρυμμένη» (hidden, neglected) μη γραμμικότητα και αυτοσυσχέτιση (serial correlation/autocorrelation), και στη βάση αυτών των ελέγχων προστίθενται επιπλέον νευρώνες ή χρονικές υστερήσεις της μεταβλητής-στόχος. Μόλις το μοντέλο του μέσου προσδιοριστεί ικανοποιητικά, επιπλέον έλεγχοι αποφαίνονται για το αν υπάρχουν μεταβολές στη διακύμανση των καταλοίπων (φαινόμενα αυτοπαλινδρόμησης ετεροσκεδαστικότητας ARCH) και εφόσον κρίνεται απαραίτητο υπολογίζεται ένα μοντέλο διακύμανσης, σε συνδυασμό με το μοντέλο του μέσου. Στη συνέχεια, το μοντέλο της διακύμανσης υποβάλλεται σε μία σειρά νέων διαγνωστικών που ελέγχουν αν η συγκεκριμένη παραμετροποίηση είναι μία ικανοποιητική προσέγγιση της ετεροσκεδαστικότητας των δεδομένων.

Οι στατιστικές μέθοδοι που περιγράφονται παραπάνω ανήκουν στην κατηγορία των ελέγχων πολλαπλασιαστική Lagrange (LM tests), που είναι εύκολοι στην εφαρμογή τους. Η στατιστική των ελέγχων τύπου LM υπολογίζεται από πρώτες παραγώγους της συνάρτησης πιθανοφάνειας και ακολουθεί τυποποιημένη κατανομή (F ή χ^2). Ένα βασικό χαρακτηριστικό των ελέγχων αυτών είναι ότι υπολογίζονται *εξ' ολοκλήρου* από το *περιορισμένο* υπόδειγμα, δηλ. το υπόδειγμα που ενσωματώνει τους περιορισμούς των παραμέτρων που επιβάλλει η μηδενική υπόθεση (null hypothesis). Συνεπώς, κάθε φορά που το μοντέλο συγκρίνεται με ένα νέο υπόδειγμα ο ερευνητής δεν χρειάζεται να επανεκτιμήσει το σύνθετο υπόδειγμα, γεγονός που διευκολύνει τη διαδικασία προσδιορισμού πολύπλοκων μη γραμμικών μοντέλων.

Αν και η προαναφερθείσα προσέγγιση λύνει πολλά προβλήματα στατιστικής και υπολογιστικής φύσεως, εντούτοις μπορεί να οδηγήσει σε ασυνέπεια αν δεν υιοθετηθούν κατάλληλοι τύποι ελέγχου. Η πλειοψηφία των στατιστικών ελέγχων επιπρόσθετης δομής που εφαρμόζονται στη βιβλιογραφία εμπερικλείουν και μία σειρά περιοριστικών υποθέσεων, πέραν αυτής που εξετάζουν, οι οποίες ελέγχονται σε μετέπειτα στάδια της διαδικασίας. Π.χ. ο κλασικός LM έλεγχος μη γραμμικότητας ή αυτοσυσχέτισης υποθέτει ότι τα κατάλοιπα δεν παρουσιάζουν αλλαγές στη διακύμανση. Τα αποτελέσματα προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της διδακτορικής έρευνας δείχνουν ότι όταν ο έλεγχος εφαρμόζεται σε ετεροσκεδαστικά δεδομένα τείνει να απορρίπτει τη μηδενική υπόθεση (γραμμικότητας ή μη αυτοσυσχέτισης) σε ποσοστό αρκετά μεγαλύτερο του ονομαστικού σφάλματος τύπου I που ορίζει ο ερευνητής⁵. Κατά αυτόν τον τρόπο, ο έλεγχος παρερμηνεύει απότομες μεταβολές της χρονοσειράς, λόγω προσωρινής αύξησης της διακύμανσης, ως κρυμμένη μη γραμμικότητα ή αυτοσυσχέτιση και επομένως περιπλέκει το

⁵ Το σφάλμα τύπου I (type I error) ενός στατιστικού ελέγχου είναι η πιθανότητα απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης ενώ αυτή ισχύει. Κατά τη διεξαγωγή οποιαδήποτε στατιστικού ελέγχου ο ερευνητής ορίζει ένα ονομαστικό σφάλμα τύπου I ή επίπεδο σημαντικότητας (significance level) α . Όσο μικρότερη είναι η τιμή του α , τόσο πιο «διστακτικός» είναι ο ερευνητής στο να απορρίψει τη μηδενική υπόθεση.

μοντέλο του μέσου. Εξαιτίας όμως του γεγονότος ότι οι μεταβολές αυτές δεν οφείλονται σε συστηματικές ή αναμενόμενες εξαρτήσεις τιμών, ο έλεγχος αυτός οδηγεί τελικά σε «υπερ-παραμετροποιημένα» (over-parametrised) μοντέλα με περιορισμένη ικανότητα πρόβλεψης. Ένας τρόπος που θα μπορούσε να επινοήσει ο ερευνητής για να παρακάμψει το πρόβλημα αυτό είναι να προχωρήσει στο επόμενο στάδιο της διαδικασίας μοντελοποίησης, να προσδιορίσει δηλ. ένα μοντέλο για τη διακύμανση και στη συνέχεια να διεξαγάγει εκ νέου τον έλεγχο μη γραμμικότητας ή αυτοσυσχέτισης. Έτσι ελπίζει ότι το μοντέλο της διακύμανσης θα αποτυπώσει την ετεροσκεδαστικότητα στα κατάλοιπα του μοντέλου και έτσι ο έλεγχος θα οδηγήσει στο σωστό συμπέρασμα σχετικά με την ύπαρξη επιπρόσθετης δομής στον μέσο. Ωστόσο, η πρακτική αυτή εγκυμονεί κινδύνους για τον επιτυχημένο προσδιορισμό της δομής σε κάθε ροπή της κατανομής, μια και η συνεπής εκτίμηση του μοντέλου της διακύμανσης προϋποθέτει το σωστό προσδιορισμό του μοντέλου του μέσου.

Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που πηγάζουν από την εφαρμογή του κλασικού LM ελέγχου, στη παρούσα διατριβή ακολουθούμε δύο στρατηγικές. Η πρώτη *παραβλέπει* την ύπαρξη ετεροσκεδαστικότητας στα κατάλοιπα και διεξάγει τον έλεγχο κατά τρόπο που να είναι *εύρωστος* (robust) σε αυτή τη στατιστική ιδιότητα. Η στρατηγική αυτή βασίζεται σε μία γενική μέθοδο «εξυγίανσης» του κλασικού LM ελέγχου, που εφαρμόζεται σε μη γραμμικά οικονομετρικά μοντέλα. Τα αποτελέσματα προσομοιώσεων που διεξήχθησαν στα πλαίσια της εργασίας μας δείχνουν ότι η στρατηγική αυτή καταφέρνει να αποκαταστήσει το εμπειρικό σφάλμα τύπου I του ελέγχου υπό την ύπαρξη ετεροσκεδαστικότητας, εντούτοις όμως τείνει να αυξάνει το σφάλμα τύπου II, είναι δηλ «συντηρητική» στον εντοπισμό λανθάνουσας δομής στον μέσο όταν τα δεδομένα χαρακτηρίζονται από μη γραμμικότητα ή αυτοσυσχέτιση. Το γεγονός αυτό είναι ένα σοβαρό μειονέκτημα αν ο αναλυτής ενδιαφέρεται να μοντελοποιήσει επαρκώς και τις δύο ροπές της κατανομής.

Η δεύτερη προσέγγιση που προτείνουμε στην μελέτη μας βασίζεται στην ιδέα του να διεξάγει κανείς τον έλεγχο του μέσου χρησιμοποιώντας πληροφορία από τη δομή της διακύμανσης. Μία διεξοδική μελέτη της βιβλιογραφίας έδειξε ότι η προσέγγιση αυτή δεν έχει ξαναχρησιμοποιηθεί στον προσδιορισμό της αρχιτεκτονικής νευρωνικών δικτύων ή στα πλαίσια άλλων μη γραμμικών δημοφιλών μοντέλων που εφαρμόζονται στη βιβλιογραφία⁶. Τα αποτελέσματα προσομοιώσεων δείχνουν ότι ο νέος τύπος ελέγχου είναι επίσης εύρωστος υπό την έννοια ότι ο ερευνητής δεν χρειάζεται να μοντελοποιήσει σωστά το μοντέλο της διακύμανσης για να επιτύχει την εγκυρότητα του ελέγχου. Ωστόσο, όσο πιο αξιόπιστο είναι το μοντέλο της διακύμανσης τόσο πιο αποτελεσματικός γίνεται ο έλεγχος στο να διαχωρίσει τη μη γραμμικότητα, ή γενικά την ύπαρξη επιπρόσθετης δομής στον μέσο, από τις βραχυχρόνιες αλλαγές στα επίπεδα διακύμανσης. Συνεπώς, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ανεξάρτητα με που εστιάζεται το ενδιαφέρον του ερευνητή, είναι πιο αποτελεσματικό να επιχειρεί να μοντελοποιήσει και τις δύο ροπές της κατανομής.

Πέραν της διαδικασίας προσδιορισμού, ένα σημαντικό μέρος της εργασίας μας επικεντρώνεται στο σχεδιασμό κατάλληλων στατιστικών μεθόδων για την αποτίμηση ενός μοντέλου NN-GARCH. Βασιζόμενοι στη θεωρία μεγίστης πιθανοφάνειας, προτείνουμε μία

⁶ Ενδεικτικά αναφέρουμε τα μοντέλα «απότομης» ή ομαλής μετάβασης (threshold/smooth transition models).

σειρά ελέγχων τύπου Wald που μπορεί να χρησιμοποιήσει ο ερευνητής για να εξετάσει εκ των υστέρων τη σημαντικότητα των παραμέτρων του μοντέλου. Οι έλεγχοι αυτοί μπορούν εμμέσως να χρησιμοποιηθούν για τη διερεύνηση της στατιστικής ισχύς διαφόρων υποθέσεων που αφορούν στο χώρο εφαρμογής και έχουν άμεση σχέση με συγκεκριμένες ομάδες παραμέτρων του μοντέλου. Επίσης, προτείνουμε μία σειρά διαγνωστικών ελέγχων που εξετάζουν το βαθμό στον οποίο το παραγόμενο μοντέλο αποτελεί μία αξιόπιστη απεικόνιση της πραγματικής κατανομής των δεδομένων. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των προαναφερθέντων στατιστικών διαδικασιών είναι ότι η ικανότητά τους να οδηγηθούν στο σωστό συμπέρασμα σχετικά με την ύπαρξη επιπρόσθετης δομής (στον μέσο ή στη διακύμανση) ή τη μη σημαντικότητα παραμέτρων δεν εξαρτάται από την υπόθεση της κατανομής των σφαλμάτων που υιοθετεί το μοντέλο. Αν για παράδειγμα, ο αναλυτής έχει υποθέσει μία κανονική κατανομή για τους διαταρακτικούς όρους, οι έλεγχοι δεν «αλλοιώνουν» το ονομαστικό σφάλμα τύπου I όταν η πραγματική κατανομή των κανονικοποιημένων σφαλμάτων του μοντέλου είναι λεπτοκυρτωτική ή ακόμα ασύμμετρη. Το γεγονός αυτό είναι ένα πλεονέκτημα της όλης διαδικασίας, αφού επιτρέπει την «ασφαλή» εξαγωγή στατιστικών συμπερασμάτων σχετικά με τη δομή του μέσου ή της διακύμανσης χωρίς να χρειάζεται ο ερευνητής να μοντελοποιήσει ολόκληρη τη δεσμευμένη κατανομή.

Αφότου το μοντέλο NN-GARCH έχει υποβληθεί στα στάδια προσδιορισμού και ελέγχου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προβλέψεις πάνω στην τιμή της μεταβλητής-στόχος. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των μοντέλων NN-GARCH, που ενδεχομένως τα διαφοροποιεί από άλλα μοντέλα υπολογιστικής νοημοσύνης, είναι ότι οι προβλέψεις που δίνουν έχουν τη μορφή μίας *κατανομής πιθανών τιμών* ή ενός *διαστήματος εμπιστοσύνης* (confidence interval) για την εξαρτημένη μεταβλητή. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για ένα χώρο με μεγάλη αβεβαιότητα, όπως οι χρημ/κές αγορές. Στη διατριβή μας προτείνουμε μία μέθοδο με την οποία ο ερευνητής μπορεί να παραγάγει προβλέψεις ενός ή πολλαπλών βημάτων, βασιζόμενοι στην προσομοίωση μελλοντικών σεναρίων της αγοράς. Η μέθοδος αυτή αποφεύγει περιοριστικές ή μη ρεαλιστικές υποθέσεις σχετικά με την κατανομή των σφαλμάτων του μοντέλου (συμμετρία, κανονικότητα, κ.α.). Εξετάζουμε επίσης μια σειρά κριτηρίων για την εκτίμηση της ποιότητας των προβλέψεων του μοντέλου. Αξίζει να σημειωθεί ότι ένα μεγάλο μέρος σχετικών εργασιών στον τομέα της πρόβλεψης υιοθετεί κυρίως στατιστικά κριτήρια για την αποτίμηση των προβλέψεων του μοντέλου που εστιάζουν στην ικανότητα προσαρμογής του μοντέλου σε νέα δεδομένα. Σε μία ρεαλιστική όμως εφαρμογή του μοντέλου, έχει μεγάλη σημασία και το *οικονομικό αποτέλεσμα* των προβλέψεων. Στην παρούσα εργασία, προτείνουμε μία επενδυτική στρατηγική που είναι κατάλληλα σχεδιασμένη για προβλέψεις τιμών υπό τη μορφή διαστημάτων εμπιστοσύνης. Η στρατηγική αυτή βασίζεται στον εντοπισμό στατιστικά ακραίων ανόδων ή πτώσεων της τιμής, γεγονός που τη διαφοροποιεί από άλλες στρατηγικές που προτείνονται στα πλαίσια οικονομετρικών μοντέλων ή μεθόδων υπολογιστικής νοημοσύνης. Συνδέοντας την επενδυτική στρατηγική με διαστήματα εμπιστοσύνης και όχι σημειακές προβλέψεις, καταφέρνουμε να έχουμε ένα καλύτερο έλεγχο του κίνδυνου που απορρέει από την κατοχή του τίτλου ή χαρτοφυλακίου, του οποίου η τιμή αντικατοπτρίζεται στην υπό μελέτη χρονοσειρά.

Στα πλαίσια μίας ειδικής εφαρμογής, συγκρίνουμε την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας διαδοχικών στατιστικών ελέγχων, που εξετάζεται στη διατριβή αυτή, με άλλες στατιστικές και εμπειρικές στρατηγικές προσδιορισμού της αρχιτεκτονικής ενός νευρωνικού δικτύου. Στόχος της εφαρμογής αυτής είναι η εύρεση μίας σχέσης τιμολόγησης για παράγωγα χρεόγραφα τύπου δικαιώματος προαίρεσης (option). Γενικά, η πρόβλεψη της τιμής ενός option είναι ένα δύσκολο πρόβλημα χρημ/κής μηχανικής αφού η τιμή αυτή εξαρτάται από ένα πλήθος παραγόντων κατά μη γραμμικό τρόπο. Γι' αυτό το λόγο η εφαρμογή μίας ημι-παραμετρικής μεθόδου, όπως π.χ. τα νευρωνικά δίκτυα, με μεγάλη ικανότητα προσαρμογής στα δεδομένα είναι ιδιαίτερα ενδεδειγμένη. Στις περισσότερες εφαρμογές μοντέλων αυτής της κατηγορίας σε προβλήματα τιμολόγησης παραγώγων χρησιμοποιούνται εμπειρικές μέθοδοι καθορισμού της βέλτιστης αρχιτεκτονικής του νευρωνικού δικτύου, που έχουν κυρίως τη μορφή «δοκιμής-σφάλματος» (trial-error). Ωστόσο, υπάρχει ένα ερώτημα για το κατά πόσο οι μέθοδοι αυτοί καταφέρνουν να διαχωρίσουν την πραγματική σχέση τιμολόγησης από τυχαίες επιδράσεις που εμφανίζονται στο συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων. Στην παρούσα μελέτη, επιχειρούμε να αντιμετωπίσουμε το θέμα αυτό με ένα πιο συστηματικό τρόπο. Εκτός από εμπειρικές μεθόδους, υιοθετούμε στρατηγικές προσδιορισμού νευρωνικών δικτύων που βασίζονται σε στατιστικούς ελέγχους και κριτήρια πληροφορίας (information criteria). Τα αποτελέσματα της μελέτης δείχνουν ότι οι αρχιτεκτονικές νευρωνικών δικτύων που προκύπτουν από στατιστικά κριτήρια, ιδιαίτερα διαδοχικούς στατιστικούς ελέγχους, συνδυάζουν κατά κανόνα μικρή πολυπλοκότητα με καλή ικανότητα προσαρμογής σε νέα δεδομένα.

III. Οργάνωση του κειμένου

Η παρούσα διατριβή χωρίζεται σε οκτώ κεφάλαια που μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρία μέρη. Στο πρώτο μέρος (κεφάλαια 1-3) εισάγουμε τον αναγνώστη στους βασικούς τομείς έρευνας (χρημ/κή μηχανική, υπολογιστική νοημοσύνη, οικονομετρία) και σε τυπικά προβλήματα που αναφέρονται στη βιβλιογραφία. Στα κεφάλαια 4 & 5 παρουσιάζουμε την κλάση μοντέλων NN-GARCH και αναλύουμε τις ιδιότητές τους τόσο από μία στατιστική-θεωρητική σκοπιά όσο και με τη βοήθεια προσομοιώσεων Monte Carlo. Στα κεφάλαια 6 & 7 παραθέτουμε δύο πρακτικές εφαρμογές των μοντέλων σε πραγματικά δεδομένα. Το κεφάλαιο 8 συνοψίζει τα βασικά πορίσματα της διατριβής και παρουσιάζει κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας.

Μία λεπτομερής επισκόπηση των κεφαλαίων της διδακτορικής διατριβής δίνεται στη συνέχεια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΓΝΩΣΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Στην ενότητα 1.2 μελετούμε το πεδίο της χρημ/κής μηχανικής και παρουσιάζουμε μία σειρά «ανοικτών» ερευνητικών ζητημάτων που ενδιαφέρουν τόσο του ακαδημαϊκούς όσο και τους επαγγελματίες του χώρου. Η ενότητα 1.3 εξετάζει τα βασικά χαρακτηριστικά των μεθόδων υπολογιστικής νοημοσύνης, μία νέα προσέγγιση «εξόρυξης» γνώσης από δεδομένα. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά αυτών των μεθόδων προσέλκυσαν το ενδιαφέρον

των ερευνητών και επαγγελματιών στο χώρο της χρημ/κής μηχανικής, με αποτέλεσμα τη ραγδαία ανάπτυξη εφαρμογών με σημαντικά αποτελέσματα σε πολλές περιπτώσεις. Στην ενότητα 1.4 παρουσιάζουμε αναλυτικά τη μέθοδο των νευρωνικών δικτύων, που έχει ίσως χρησιμοποιηθεί περισσότερο από όλες τις άλλες μεθόδους υπολογιστικής νοημοσύνης στο χώρο της χρημ/κής μηχανικής. Έπειτα από μία εισαγωγή στη μορφολογία αυτών των μοντέλων, επικεντρώνουμε τη συζήτηση σε μεθόδους και τεχνικές που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία για την κατασκευή μοντέλων νευρωνικών δικτύων. Η κεντρική ιδέα αυτών είναι να συμβιβάσουν το σφάλμα του δικτύου στο σύνολο *εκπαίδευσης* (training set) (δηλ. το σύνολο των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό του μοντέλου), με το αναμενόμενο σφάλμα σε ένα νέο σύνολο δεδομένων, που δεν έχουν χρησιμοποιηθεί κατά τον προσδιορισμό του μοντέλου. Ο επιτυχημένος προσδιορισμός της αρχιτεκτονικής του νευρωνικού δικτύου είναι ίσως το βασικότερο πρόβλημα στις πρακτικές εφαρμογές, αν και αποτελεί μέχρι σήμερα ένα «ανοικτό» ερευνητικό ζήτημα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ ΑΠΟΔΟΣΕΩΝ ΧΡΗΜ/ΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ

Στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι να παρουσιάσει χαρακτηριστικές ιδιότητες χρημ/κών χρονοσειρών που απεικονίζουν τη διαχρονική πορεία της τιμής χρεογράφων (μετοχές, ομόλογα, παράγωγα, κ.α.) ή άλλων χρημ/κών μεγεθών (δείκτες, συναλλαγματικές ισοτιμίες, κ.α.). Στην ενότητα 2.2, παίρνοντας ως παράδειγμα ένα δείγμα τιμών από δύο ευρωπαϊκούς χρηματιστηριακούς δείκτες, δείχνουμε ότι η εμπειρική κατανομή των αποδόσεων είναι πιο λεπτοκυρτωτική από μία κανονική κατανομή, έχει δηλ. «μακριές» ουρές και λεπτή κορυφή. Η ενότητα 2.3 συζητά μία άλλη χαρακτηριστική ιδιότητα των χρημ/κών χρονοσειρών, που αναφέρεται στις αλλαγές στα επίπεδα διακύμανσης των τιμών (αυτοπαλίνδρομη δεσμευμένη ετεροσκεδαστικότητα). Διαπιστώνουμε ότι παρόλο που οι τιμές των περισσότερων χρεογράφων διανύουν περιόδους υψηλής και χαμηλής μεταβλητότητας, οι βραχυχρόνιες αλλαγές στα επίπεδα διακύμανσης εξαρτώνται από το μέγεθος ή/και το πρόσημο προσφάτων κινήσεων τιμών, και κατά συνέπεια είναι σε μεγάλο βαθμό προβλέψιμες. Η ενότητα 2.4 συζητά επιπλέον χρονικές εξαρτήσεις μεταξύ των κατανομών που παρατηρούνται όταν η τιμή διαπραγματεύσης ενός χρεογράφου στην αγορά αποκλίνει από τη θεμελιώδη αξία του. Πραγματοποιώντας μία ανασκόπηση νέων θεωριών και ερευνών που έχουν ως αντικείμενο τις ατέλειες της αγοράς και τη μη ορθολογική συμπεριφορά των επενδυτών, αναδεικνύουμε μία άλλη πτυχή της πολύπλοκης δυναμικής των τιμών που αναφέρεται στην επαναφορά ή διόρθωση τις τιμές ενός χρεογράφου στη θεμελιώδη του αξία.

Τα συμπεράσματα αυτού του κεφαλαίου έχουν ιδιαίτερη σημασία για τη φύση των μοντέλων που χρησιμοποιούνται σε χρημ/κές χρονοσειρές. Οδηγούν δε στο συμπέρασμα ότι προκειμένου να πετύχει κανείς μία ακριβή αναπαράσταση της δυναμικής των χρημ/κών τιμών χρειάζεται να θεωρήσει μία ευέλικτη κλάση μοντέλων που δύναται να απεικονίσει μη γραμμικές σχέσεις επαναφοράς, αυτοπαλίνδρομη ετεροσκεδαστικότητα και μη γκαουσιανές κατανομές. Ωστόσο, δεν είναι σίγουρο το κατά πόσο κάθε σύνολο δεδομένων περιέχει τα παραπάνω χαρακτηριστικά, συνεπώς είναι απαραίτητο να υπάρχει μία διαδικασία που να μπορεί να προσαρμόζει το επίπεδο πολυπλοκότητας του μοντέλου ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του δείγματος. Λόγω, ωστόσο, της πιθανότητας

συνύπαρξης περισσότερων εκ του ενός χαρακτηριστικών ιδιοτήτων, όπως π.χ. μη γραμμικές σχέσεις επαναφοράς με αυτοπαλίνδρομη ετεροσκεδαστικότητα, η διαδικασία αυτή πρέπει να είναι ικανή να διαχωρίσει τις επιδράσεις που οφείλονται σε κάθε μία ιδιότητα και να αποδώσει το κατάλληλο επίπεδο πολυπλοκότητας σε κάθε σκέλος του μοντέλου. Τα ζητήματα αυτά αναλύονται διεξοδικότερα στα κεφάλαια 4 και 5.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΑΡΧΕΣ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζουμε βασικές αρχές εντοπισμού ποσοτικών σχέσεων σε δεδομένα μέσω στατιστικών-οικονομετρικών μεθόδων. Αναλύουμε διεξοδικά τις έννοιες της δεσμευμένης ή υπό συνθήκη κατανομής, της δεσμευμένης μέσης τιμής και της δεσμευμένης διακύμανσης. Στην ενότητα 3.2 εξηγούμε τους λόγους για τους οποίους ο απώτερος στόχος της οικονομετρίας είναι η αποτύπωση της δεσμευμένης κατανομής που συνδέει τη μεταβλητή-στόχο, που ενδιαφέρει τον ερευνητή, με ένα σύνολο επεξηγηματικών μεταβλητών, που χρησιμοποιεί ο αναλυτής για να ερμηνεύσει ή να προβλέψει τη συμπεριφορά της πρώτης. Για τον εντοπισμό των βασικών ιδιοτήτων της κατανομής, ακολουθούνται μία σειρά βημάτων (προσδιορισμός, εκτίμηση, αποτίμηση) που εξηγούνται στην ενότητα 3.3. Πραγματοποιούμε επίσης μία ταξινόμηση οικονομετρικών υποδειγμάτων ή μοντέλων υπολογιστικής νοημοσύνης ανάλογα με το σκέλος της δεσμευμένης κατανομής που επιχειρούν να μοντελοποιήσουν. Αναφερόμαστε σε μοντέλα παλινδρόμησης, που επικεντρώνονται στον μέσο της υπό συνθήκη κατανομής, συνδυαστικά μοντέλα μέσου-διακύμανσης καθώς και μοντέλα που επιχειρούν να απεικονίσουν ολόκληρη την υπό συνθήκη κατανομή.

Διαπίστωσή μας είναι ότι τα περισσότερα μοντέλα υπολογιστικής νοημοσύνης εμπίπτουν στην κατηγορία των μοντέλων παλινδρόμησης, αν και μεμονωμένες μέθοδοι για την προσέγγιση ολόκληρης της κατανομής έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία. Τα μοντέλα παλινδρόμησης είναι γενικώς ανεπαρκή στο να απεικονίσουν σχέσεις μεταξύ εξαρτημένης και ανεξάρτητων μεταβλητών σε ροπές ανώτερες του μέσου, που συχνά απαντώνται σε χρηματοοικονομικά δεδομένα. Συνεπώς, υπάρχει ανάγκη διεύρυνσης των μεθόδων υπολογιστικής νοημοσύνης προς ανώτερες ροπές τις κατανομής. Από τη σκοπιά της στατιστικής ανάλυσης, τα περισσότερα μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης μπορούν να θεωρηθούν ως μη γραμμικές ημι-παραμετρικές μέθοδοι προσδιορισμού κατανομών. Υπό αυτήν την προοπτική, διάφορα προβλήματα που ανακύπτουν στον προσδιορισμό αυτών των μοντέλων επιλύονται με την εφαρμογή κατάλληλα σχεδιασμένων στατιστικών τεχνικών και εργαλείων, όπως π.χ. ελέγχους υποθέσεων, κριτήρια πληροφορίας, μπεϊσιανή (bayesian) ανάλυση, κ.α..

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΤΕΧΝΗΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ GARCH: ΜΙΑ ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Το κεφάλαιο 4 εξετάζει τη δυνατότητα συνδυασμού μοντέλων νευρωνικών δικτύων και οικονομετρικών υποδειγμάτων μεταβλητότητας σε ένα ενιαίο πλαίσιο μοντελοποίησης

χρημ/κών δεδομένων. Στην ενότητα 4.2 πραγματοποιούμε μία επισκόπηση της βιβλιογραφίας πάνω σε μοντέλα αυτοπαλίνδρομης ετεροσκεδαστικότητας. Η ενότητα 4.3 εισάγει το προτεινόμενο μοντέλο NN-GARCH και συζητά διάφορα στατιστικά ή υπολογιστικά ζητήματα που προκύπτουν κατά την εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου. Στην ενότητα 4.4 παρουσιάζουμε μία μέθοδο ελέγχου της σημαντικότητας των παραμέτρων του μοντέλου που βασίζεται σε στατιστικούς ελέγχους τύπου Wald. Η ενότητα 4.5 παρουσιάζει μία διαδικασία κατασκευής μοντέλων NN-GARCH που βασίζεται σε διαδοχικούς στατιστικούς ελέγχους για επιπρόσθετη δομή στον μέσο ή στη διακύμανση. Διάφορα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου καθώς και ο ακριβής τρόπος προσδιορισμός των μοντέλων του μέσου και της διακύμανσης συζητούνται διεξοδικά σε ξεχωριστές ενότητες. Στην ενότητα 4.6 προτείνουμε ένα πλαίσιο αξιολόγησης ενός NN-GARCH υποδείγματος, που επιχειρεί μέσα από μία σειρά στατιστικών ελέγχων να εξετάσει την ποιότητα της προσαρμογής του μοντέλου στα δεδομένα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΜΕΛΕΤΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι να μελετήσει, με τη βοήθεια πειραμάτων προσομοίωσης, τις ιδιότητες στατιστικών διαδικασιών που προτάθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η ενότητα 5.2 παρουσιάζει μία μελέτη προσομοίωσης που αφορά στην αποτελεσματικότητα των διαδοχικών ελέγχων μη γραμμικότητας στον προσδιορισμό της πολυπλοκότητας του νευρωνικού δικτύου. Η ενότητα 5.3 περιγράφει μία αντίστοιχη σειρά πειραμάτων που σχετίζεται με διαγνωστικούς ελέγχους σε ένα μοντέλο παλινδρόμησης βασισμένο σε νευρωνικό δίκτυο. Στόχος μας και στα δύο πειράματα είναι:

- να σχεδιάσουμε ένα ρεαλιστικό περιβάλλον προσομοίωσης που προσομοιώνει/συνδυάζει βασικές ιδιότητες χρημ/κών χρονοσειρών, όπως π.χ. μη γραμμικότητα, ετεροσκεδαστικότητα και λεπτοκυρτωτικές κατανομές.
- να συγκρίνουμε τη συμπεριφορά των στατιστικών ελέγχων τύπου LM που προτείνονται στην παρούσα εργασία και αφορούν είτε στον προσδιορισμό είτε στην αποτίμηση μοντέλων, υπό τη συνύπαρξη όλων των παραπάνω ιδιοτήτων σε ένα δείγμα δεδομένων. Συγκεκριμένα, συγκρίνουμε την κλασική εκδοχή του ελέγχου με τις εύρωστες εκδοχές που αγνοούν ή μοντελοποιούν την ετεροσκεδαστικότητα (βλ. συμβολή της έρευνας).

Το αποτέλεσμα των πειραμάτων δείχνουν ότι η κλασική μορφή του ελέγχου LM αδυνατεί να διαχωρίσει σχέσεις σε επίπεδο μέσου από αλλαγές στα επίπεδα της διακύμανσης. Το σφάλμα τύπου I του ελέγχου γενικά μεγεθύνεται όταν τα κατάλοιπα του μοντέλου είναι ετεροσκεδαστικά (ιδιαίτερα όταν η ετεροσκεδαστικότητα συνδυάζεται με λεπτοκύρτωση), οδηγώντας σε υπερβάλλοντα αριθμό υποδείξεων σχετικά με την ύπαρξη μη γραμμικότητας ή αυτοσυσχέτισης στα κατάλοιπα. Το γεγονός αυτό πρέπει να εφιστά την προσοχή του ερευνητή κατά την εφαρμογή του ελέγχου σε χρημ/κά δεδομένα. Οι εύρωστες μορφές του LM ελέγχου διατηρούν το σφάλμα τύπου I και επομένως δίνουν τη δυνατότητα στον ερευνητή να ελέγχει την ύπαρξη επιπρόσθετης δομής σε επίπεδο μέσου χωρίς να πρέπει να μοντελοποιήσει διεξοδικά τη διακύμανση ή ανώτερες ροπές της δεσμευμένης κατανομής. Επιπλέον, οι εύρωστες εκδοχές του ελέγχου είναι εξίσου αποτελεσματικές με την κλασική

εκδοχή όταν τα δεδομένα είναι ομοσκεδαστικά (δηλ δεν παρουσιάζουν αλλαγές στη διακύμανση). Συνεπώς, δε «θυσιάζουν» μέρος της αποτελεσματικότητας του ελέγχου για τη διασφάλιση του σφάλματος τύπου I.

Συγκρίνοντας τις δύο εύρωστες εκδοχές, παρατηρούμε ότι ο έλεγχος που αγνοεί τη μορφή της ετεροσκεδαστικότητας έχει καλή απόδοση όταν η διαδικασία που παράγει τα δεδομένα ενσωματώνει τους περιορισμούς που προκύπτουν από τη μηδενική υπόθεση (δηλ η μέση τιμή είναι γραμμική συνάρτηση των εξαρτημένων μεταβλητών ή τα κατάλοιπα δεν παρουσιάζουν αυτοσυσχέτιση). Εντούτοις, ο συγκεκριμένος έλεγχος έχει μικρή ισχύ στο να εντοπίσει ιδιαίτερες ιδιότητες σε επίπεδο μέσου, ειδικά όταν τα κατάλοιπα του μοντέλου είναι ετεροσκεδαστικά ή ακολουθούν μία λεπτοκυρτωτική κατανομή. Η εύρωστη εκδοχή του ελέγχου που χρησιμοποιεί πληροφορία από το μοντέλο της διακύμανσης φαίνεται πιο αποτελεσματική στο να διαχωρίζει τα παραπάνω χαρακτηριστικά. Όπως δείχνουν οι προσομοιώσεις, το σφάλμα τύπου I αυτού του ελέγχου δεν επηρεάζεται από το ενδεχόμενο ο ερευνητής να μην έχει προσδιορίσει επαρκώς τη δυναμικής της διακύμανσης. Ωστόσο, μία καλή εκτίμηση του ερευνητή για τη διαχρονική εξέλιξη της διακύμανσης αυξάνει την αποτελεσματικότητα του ελέγχου στο να εντοπίζει «κρυμμένες» ιδιότητες σε επίπεδο μέσου (μη γραμμικότητα ή αυτοσυσχέτιση).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΠΡΟΒΛΕΨΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΗΜΕΡΗΣΙΩΝ ΑΠΟΔΟΣΕΩΝ ΔΙΕΘΝΩΝ ΧΡΗΜΑΤΙΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζουμε μία εφαρμογή των μοντέλων NN-GARCH στην πρόβλεψη των ημερήσιων αποδόσεων τριών διεθνών χρηματιστηριακών δεικτών (DAX, FTSE 100, S&P 500). Με αφορμή τη μελέτη αυτή, προσπαθούμε να διερευνήσουμε ένα σημαντικό ζήτημα στη χρημ/κή επιστήμη που αφορά στην προβλεψιμότητα των χρημ/κών τιμών. Η κλασική χρημ/κή θεωρία, βασιζόμενη στην υπόθεση αποτελεσματικών αγορών, ισχυρίζεται ότι οι τιμές διαπραγματεύσεως χρεογράφων δε θα έπρεπε να είναι προβλέψιμες βάσει κοινής πληροφόρησης που διαχέεται στις αγορές. Εντούτοις, πρόσφατες μελέτες ανάδειξαν διάφορα χαρακτηριστικά των αγορών, όπως π.χ. αυτοπαλίνδρομη ετεροσκεδαστικότητα, ασύμμετρη διόρθωση τιμών, κ.α., που συνοψίζονται στον όρο *μη γραμμικότητες* και γενικά αυξάνουν την προβλεψιμότητα των τιμών. Πολλά από αυτά τα χαρακτηριστικά αναλύονται στο κεφάλαιο 2.

Αν και οι χρημ/κοί ερευνητές πιστεύουν ότι οι αγορές είναι σε κάποιο βαθμό προβλέψιμες, γενικά υπάρχει διαφωνία ως προς τη φύση της προβλεψιμότητας και συνεπώς ως προς τον τύπο του μοντέλου που πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε κάθε περίπτωση για να αναδείξει τα προβλέψιμα χαρακτηριστικά. Όπως προκύπτει από μία βιβλιογραφική έρευνα, πολλοί συγγραφείς ισχυρίζονται ότι η προβλεψιμότητα των τιμών οφείλεται σε μη γραμμικές σχέσεις σε επίπεδο μέσου, ενώ κάποιοι άλλοι πιστεύουν ότι είναι αποτέλεσμα προβλέψιμων αλλαγών στα επίπεδα μεταβλητότητας των τιμών. Αξίζει να σημειώσουμε ότι σε μία χρονοσειρά δεν αποκλείεται να συνυπάρχουν και οι δύο τύποι προβλεψιμότητας, αφού η ετεροσκεδαστικότητα είναι ιδιότητα της διακύμανσης και δεν αλληλεπιδρά με τον μέσο της κατανομής. Σε κάθε περίπτωση, ωστόσο, είναι σημαντικό να διαχωρίσει κανείς τα

χαρακτηριστικά αυτά αφού κάθε μορφή μη γραμμικότητας έχει διαφορετικές πρακτικές προεκτάσεις όσον αφορά τη διαχείριση κινδύνου ή την επιλογή χαρτοφυλακίου.

Στην ενότητα 6.2 πραγματοποιούμε μία επισκόπηση της βιβλιογραφίας πάνω στο θέμα της προβλεψιμότητας των τιμών χρεογράφων. Η ενότητα 6.3 αναλύει τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται στην εφαρμογή μας και στην ενότητα 6.4 συζητάμε το σχεδιασμό των μοντέλων πρόβλεψης. Στην παρούσα μελέτη ενδιαφερόμαστε για προβλέψεις σε «πραγματικό χρόνο», και γι' αυτό επανεκτιμούμε τις παραμέτρους του μοντέλου κάθε φορά που προστίθεται στο δείγμα μία νέα παρατήρηση (δηλ. σε «κυλιόμενα» δείγματα) και περιστασιακά επαναπροσδιορίζουμε τη δομή του μοντέλου. Η σειριακή διαδικασία κατασκευής μοντέλων που περιγράφεται στην ενότητα 4.5 εφαρμόζεται για τον προσδιορισμό της βέλτιστης δομής στο τμήμα του μέσου και της διακύμανσης του μοντέλου. Προκειμένου να διαπιστώσουμε τις συνέπειες της ετεροσκεδαστικότητας και της μη κανονικότητας της κατανομής των καταλοίπων, χρησιμοποιήσαμε κλασικές και εύρωστες μορφές ελέγχων πρόσθετης δομής σε επίπεδο μέσου και διακύμανσης, που παρουσιάζονται στις ενότητες 4.5.1 & 4.5.2. Η προβλεπτική ικανότητα των μοντέλων NN-GARCH συγκρίνεται σε σχέση με ένα γραμμικό αυτοπαλίνδρομο (autoregressive) μοντέλο EGARCH (exponential GARCH), ιδιαίτερα δημοφιλές στην οικονομετρική βιβλιογραφία, και ένα μη γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης, βασισμένο σε ένα απλό νευρωνικό δίκτυο.

Στην ενότητα 6.4.2 προτείνουμε μία τεχνική υπολογισμού προβλέψεων υπό μορφή κατανομής, που βασίζεται σε προσομοίωση υποθετικών σεναρίων της αγοράς. Στην ενότητα 6.5 συζητάμε μία σειρά κριτηρίων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της ποιότητας των προβλέψεων που παρέχονται από μοντέλα τύπου NN-GARCH, και ίσως από οποιαδήποτε μοντέλο που παραμετροποιεί συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας. Συχνά στη βιβλιογραφία η προβλεπτική ικανότητα ενός μοντέλου κρίνεται βάσει στατιστικών κυρίως κριτηρίων που μετρούν την προσαρμογή του μοντέλου στα δεδομένα. Από μία επενδυτική σκοπιά, όμως, είναι πολύ σημαντικό και το οικονομικό αποτέλεσμα των προβλέψεων. Στην ίδια ενότητα προτείνουμε μία επενδυτική στρατηγική που ταυριάζει σε προβλέψεις που έχουν τη μορφή κατανομής ή διασπόμενου εμπιστοσύνης και βασίζεται στον εντοπισμό στατιστικά «ακραίων» τιμών της χρονοσειράς. Ο χαρακτηρισμός αυτός είναι έμμεσα συνυφασμένος με το διάστημα εμπιστοσύνης.

Στην ενότητα 6.6 σχολιάζουμε τα αποτελέσματα των μοντέλων πρόβλεψης, από τα οποία προκύπτουν ενδιαφέροντα συμπεράσματα τόσο για τη μορφή της προβλεψιμότητας στις αποδόσεις των δεικτών όσο και για τη συμπεριφορά των στατιστικών διαδικασιών που εφαρμόζονται στην περίπτωσή μας. Γενικά, τα μοντέλα NN-GARCH των οποίων η δομή αναπροσαρμόζεται με το χρόνο πετυχαίνουν καλύτερη απεικόνιση της διαχρονικής εξέλιξης της βραχυχρόνιας κατανομής των αποδόσεων, σε σχέση με το απλό μοντέλο νευρωνικού δικτύου και το παραμετρικό υπόδειγμα EGARCH. Οι εύρωστοι στατιστικοί έλεγχοι οδηγούν συχνά σε μοντέλα πρόβλεψης που συνδυάζουν μικρή πολυπλοκότητα με καλή προσαρμογή σε νέα δεδομένα. Αντιθέτως, η επιπλέον πολυπλοκότητα που εισάγει ο κλασικός έλεγχος στο τμήμα του μέσου ή της διακύμανσης δεν αποφέρει στις περισσότερες περιπτώσεις κάποια βελτίωση ως προς την προβλεπτική ικανότητα και ενίοτε οδηγεί σε ασταθή συμπεριφορά του μοντέλου εκτός δείγματος. Για το λόγο αυτό, πιστεύουμε ότι η

προβλεψιμότητα των αποδόσεων των δεικτών βρίσκεται κυρίως στο επίπεδο της διακύμανσης, αν και θεωρούμε ότι το συμπέρασμα αυτό έχει άμεση σχέση με τη χρονική περίοδο υπό μελέτη ή τη δειγματική συχνότητα του συνόλου των παρατηρήσεων που επιλέξαμε (ημερήσια δεδομένα).

Το βασικό πόρισμα αυτής της μελέτης είναι ότι η διαδικασία προσδιορισμού του μοντέλου είναι αυτή που καθορίζει την προβλεπτική ικανότητα ενός ευέλικτου ημι-παραμετρικού υποδείγματος. Η ύπαρξη ετεροσκεδαστικότητας ή άλλων ειδικών στατιστικών ιδιοτήτων (όπως π.χ. μη κανονικότητα) στην κατανομή των καταλοίπων μπορεί να οδηγήσει σε υπερ-παραμετροποιημένα μοντέλα με μικρή ικανότητα γενίκευσης μέσα από δεδομένα. Μοντέλα που σχεδιάζονται βάσει εύρωστων ελέγχων είναι κατά κανόνα πιο απλά στη δομή τους και συνδυάζουν καλή προσαρμογή σε νέα δεδομένα με μικρή πολυπλοκότητα. Τα πορίσματα τόσο των πειραμάτων προσομοίωσης όσο και της εμπειρικής εφαρμογής συνηγορούν υπέρ της εφαρμογής εύρωστων μεθόδων σχεδιασμού μοντέλων για πρόβλεψη χρημ/κών δεδομένων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΝΕΥΡΩΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΤΗΝ ΤΙΜΟΛΟΓΗΣΗ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ ΠΡΟΑΙΡΕΣΗΣ ΣΤΟ ΧΡΗΜ/ΚΟ ΔΕΙΚΤΗ S&P 500

Στο κεφάλαιο 7 παραθέτουμε μία συγκριτική μελέτη διαφόρων μεθόδων σχεδιασμού νευρωνικού δικτύου για την τιμολόγηση δικαιωμάτων προαίρεσης (option). Τα δικαιώματα προαίρεσης είναι μία ειδική κατηγορία χρημ/κών συμβολαίων των οποίων η τιμή διαπραγμάτευσης καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά του συμβολαίου (τιμή εξάσκησης, χρόνος μέχρι τη λήξη) και άλλα μεγέθη της αγοράς (τιμή υποκείμενου τίτλου, μεταβλητότητα της τιμής του υποκείμενου τίτλου, επιτόκιο χωρίς κίνδυνο, κ.α.). Τα περισσότερα παραμετρικά μοντέλα τιμολόγησης δικαιωμάτων προαίρεσης, όπως π.χ. το διάσημο μοντέλο Black-Scholes, βασίζονται σε μία σειρά περιοριστικών υποθέσεων επί της φύσεως της αγοράς ή της συμπεριφοράς των επενδυτών, που κατά κανόνα δεν επαληθεύονται στην πράξη. Συνεπώς, έχει ενδιαφέρον να θεωρήσει κανείς μία ευέλικτη, ημι-παραμετρική μέθοδο, όπως τα νευρωνικά δίκτυα, και να προσπαθήσει να «εξαγάγει» την πραγματική σχέση τιμολόγησης που χρησιμοποιεί η αγορά μέσα από εμπειρικά δεδομένα. Ωστόσο, η προσέγγιση αυτή εγκυμονεί κινδύνους, διότι ένα πολύπλοκο νευρωνικό δίκτυο, εκτός της συστηματικής σχέσης μεταξύ της τιμής του δικαιώματος και των παραγόντων που την επηρεάζουν, μπορεί να αποτυπώσει και τυχαίες επιδράσεις που οφείλονται στο συγκεκριμένο σύνολο παρατηρήσεων. Για αυτό το λόγο, είναι απαραίτητο να έχει κανείς στη διάθεσή του μία διαδικασία προσδιορισμού της βέλτιστης πολυπλοκότητας του νευρωνικού δικτύου.

Στην παρούσα μελέτη, εξετάζουμε τον προσδιορισμό μοντέλων τιμολόγησης νευρωνικού δικτύου με τη βοήθεια διαδοχικών στατιστικών ελέγχων και κριτηρίων πληροφορίας. Οι δύο αυτές μέθοδοι έχουν στατιστική βάση και επιπλέον ακολουθούν την «από το απλό προς το σύνθετο» αρχή κατασκευής μοντέλων. Οι παραπάνω μέθοδοι συγκρίνονται με μία απλή «ευρετική» διαδικασία (heuristic) που εκκινεί από ένα πολύπλοκο νευρωνικό δίκτυο και με τη βοήθεια ενός εμπειρικού κριτηρίου αποφαινεται για την ύπαρξη περιττών νευρώνων ή μεταβλητών σε κάθε νευρώνα. Η αποτελεσματικότητα του κάθε μοντέλου εκτιμάται στη

βάση κριτηρίων που α) αξιολογούν την ακρίβεια των προβλέψεων και β) συνυπολογίζουν την ακρίβεια πρόβλεψης με το επίπεδο πολυπλοκότητας του μοντέλου. Τα αποτελέσματα της έρευνας αυτής δείχνουν ότι οι στατιστικές μέθοδοι σχεδιασμού νευρωνικού δικτύου υπερτερούν της εμπειρικής μεθόδου. Αρχιτεκτονικές νευρωνικού δικτύου που προκύπτουν από στατιστικά κριτήρια, κυρίως διαδοχικούς ελέγχους μη γραμμικότητας, συνδυάζουν μικρή πολυπλοκότητα με μεγάλη ακρίβεια πρόβλεψης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Το κεφάλαιο 8 ανακεφαλαιώνει τα βασικά πορίσματα της εργασίας και εξετάζει τη γενικότερη συμβολή της στους επιμέρους τομείς της διδακτορικής έρευνας: χρημ/κή μηχανική, υπολογιστική νοημοσύνη και οικονομετρία. Στο κεφάλαιο αυτό προτείνουμε μία σειρά εξειδικευμένων χώρων εφαρμογής της οικογένειας μοντέλων NN-GARCH ή επεκτάσεων αυτών, που αναδεικνύουν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του μοντέλου και της στατιστικής-οικονομετρικής μας προσέγγισης. Μερικοί από τους τομείς αυτούς αναφέρονται στη συνέχεια:

- ανίχνευση ευκαιριών κερδοσκοπικής αντιστάθμισης (arbitrage) στις τιμές χρεογράφων που ανήκουν στον ίδιο κλάδο της αγοράς
- δημιουργία ευέλικτων (ημι-παραμετρικών) μοντέλων διακύμανσης που βασίζονται σε νευρωνικά δίκτυα
- διερεύνηση πολύπλοκων τύπων αλληλεπιδράσεων μεταξύ των χρημ/κών μεγεθών, όπως π.χ. βραχυπρόθεσμες εξαρτήσεις (short-term dependencies), μακροχρόνιες σχέσεις ισορροπίας (long-run equilibria), σχέσεις μεταβλητότητας (volatility spillovers), κ.α.

Να αναφέρουμε ότι στο διάστημα εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής έχει ήδη πραγματοποιηθεί κάποια έρευνα στους παραπάνω τομείς, τα αποτελέσματα της οποίας έχουν δημοσιευτεί σε σχετικά άρθρα.