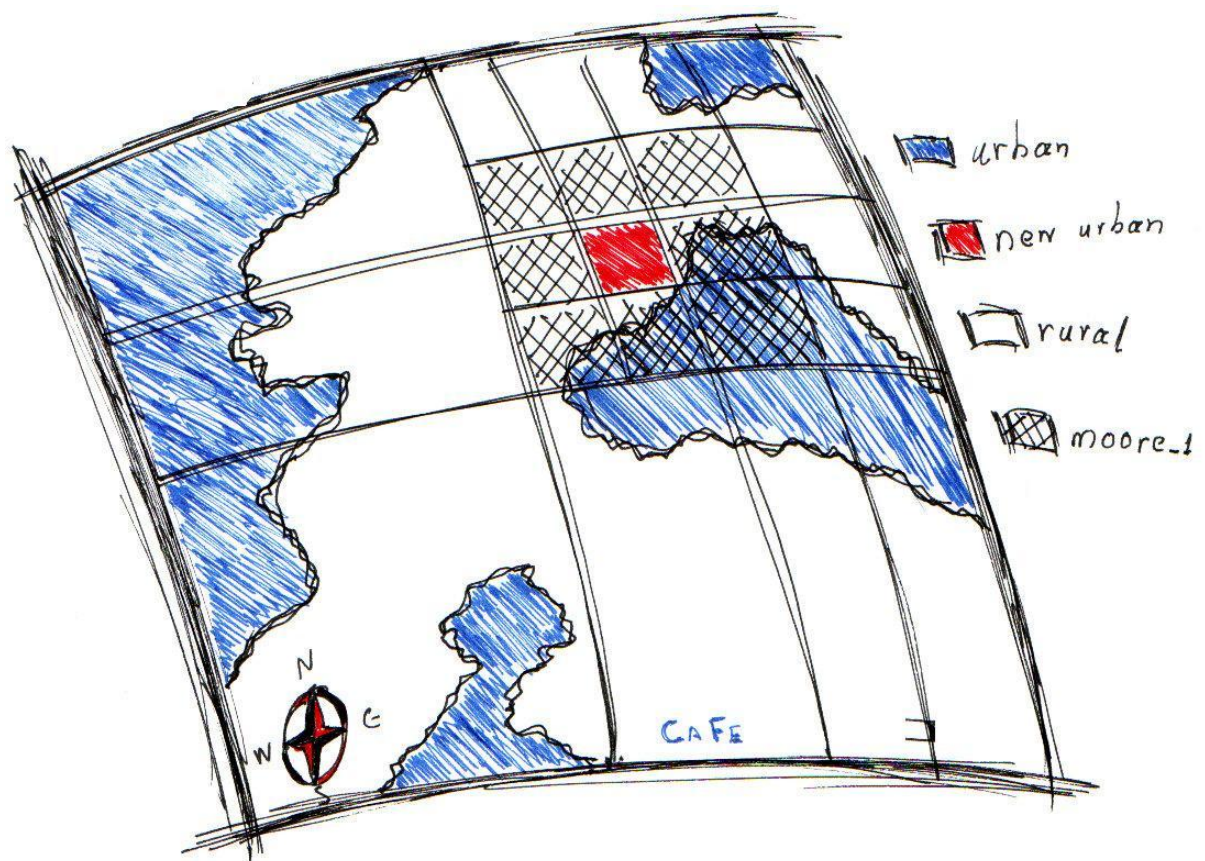


CaFe – Cellular Automata Fuzzy Engine

*Υπολογιστική Προσομοίωση Αστικής Επέκτασης
με χρήση Ασαφών Κυψελοειδών Αυτομάτων*



Διδακτορική Διατριβή

Μαντέλας Ελευθέριος

ΑΘΗΝΑ 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΤΜΗΜΑ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ & ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΧΩΡΟΥ

CaFe – Cellular Automata Fuzzy Engine

**Υπολογιστική Προσομοίωση Αστικής Επέκτασης
με χρήση Ασαφών Κυψελοειδών Αυτομάτων**

Διδακτορική Διατριβή

Μαντέλας Ελευθέριος

ΑΘΗΝΑ 2011



**NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY
OF ATHENS**

**SCHOOL OF RURAL & SURVEYING
ENGINEERING**

**LABORATORY OF GEOGRAPHY & SPATIAL
ANALYSIS**

CaFe – Cellular Automata Fuzzy Engine

**Computational Simulation of Urban Expansion
using Fuzzy Cellular Automata**

Doctoral Thesis

Mantelas Lefteris

ATHENS 2011

‘Η έγκρισης της παρούσης διδακτορικής διατριβής

υπό του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου

δεν υποδηλώνει αποδοχήν

των γνώμεων του συγγραφέως’

[Νόμος 5343/1932, άρθρο 202]

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

Κωνσταντίνος Κουτσόπουλος, Καθηγητής Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

ΜΕΛΗ:

Πουλίκος Πραστάκος, Ερευνητής Α΄ Τομέα Περιφερειακής Ανάλυσης, Ι.Υ.Μ., Ι.Τ.Ε.

Τίμος Σελλής, Καθηγητής Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Ε.Μ.Π.

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Κωνσταντίνος Κουτσόπουλος, Καθηγητής Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

Πουλίκος Πραστάκος, Ερευνητής Α΄ Τομέα Περιφερειακής Ανάλυσης, Ι.Υ.Μ., Ι.Τ.Ε.

Τίμος Σελλής, Καθηγητής Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Ε.Μ.Π.

Άγγελος Σιόλας, Καθηγητής Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

Γιώργος Φώτης, Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήματος Μηχανικών Χωροταξίας, Πολεοδομίας και Περιφερειακής Ανάπτυξης, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Κώστας Καλαμποκίδης, Αναπληρωτής Καθηγητής του Τμήματος Γεωγραφίας, Πανεπιστήμιο Αιγαίου

Ανδρέας-Γεώργιος Σταφυλοπάτης, Καθηγητής Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Ε.Μ.Π.

*Στη σύζυγό μου Μαρία,
τους γονείς μου, Άγγελο & Μαρία
και τον αδερφό μου Βασίλη*

Πρόλογος

Στον πρόλογο της διατριβής θα ήθελα να χρησιμοποιήσω πρώτο πρόσωπο και να εκφράσω κάποιες σκέψεις οι οποίες είναι σχετικές με το αντικείμενο της παρούσης διατριβής. Η επαφή μου με τα μοντέλα αστικής επέκτασης ξεκίνησε όταν έκανα πρακτική άσκηση στο Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας, όπου εξοικειώθηκα τόσο με τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών όσο και με τα μοντέλα αστικής επέκτασης και συγκεκριμένα με τις τεχνικές των Κυψελοειδών Αυτομάτων. Ολοκληρώνοντας τις σπουδές μου στο Τμήμα Εφαρμοσμένων Μαθηματικών του Πανεπιστημίου της Κρήτης συνέχισα τις σπουδές μου όχι στα Επιχειρησιακά Μαθηματικά όπως αρχικά σκόπευα, αλλά στην Γεωπληροφορική. Στο ομότιτλο πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου ήρθα σε επαφή ανάμεσα στα άλλα με την Λογική της Ασάφειας και τα Ασαφή Συστήματα. Ακολούθως, στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, μου δόθηκε η δυνατότητα να αναπτύξω ένα απλό μοντέλο αστικής επέκτασης χρησιμοποιώντας Ασαφή Κυψελοειδή Αυτόματα. Κατά τα προηγούμενα χρόνια, ως υποψήφιος διδάκτορας στο Εργαστήριο Γεωγραφίας και Ανάλυσης Χώρου, είχα τη δυνατότητα να εμβαθύνω σε αυτό το ιδιαίτερα ενδιαφέρον για εμένα αντικείμενο και να εξελίξω το μεθοδολογικό πλαίσιο μοντελοποίησης που περιγράφεται στη παρούσα διατριβή.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στον άνθρωπο που θεωρώ μέντορά μου, τον Δρ. Πραστάκο Πουλίκο. Εκτός από το να με εμπνεύσει να ασχοληθώ με τα μοντέλα αστικής επέκτασης, κατά τη διάρκεια του διδακτορικού φρόντισε να θέτει καίριες ερωτήσεις, χωρίς ωστόσο – και τον ευχαριστώ ιδιαίτερα για αυτό – να επιβάλει ποτέ κάποια απάντηση. Επίσης τον ευχαριστώ για τη συνεργασία που μου προσέφερε με την Ομάδα Περιφερειακής Ανάλυσης του Ινστιτούτου Υπολογιστικών Μαθηματικών στο Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας. Η συνεργασία αυτή μου προσέφερε τους απαραίτητους οικονομικούς πόρους και την δυνατότητα να παραστώ σε διεθνή συνέδρια και να παρουσιάσω διαφορετικά τμήματα και στάδια της εργασίας. Επιπλέον, επέκτεινε τους ερευνητικούς μου ορίζοντες διαμορφώνοντας εν πολλοίς την δουλειά μου τόσο στα πλαίσια του διδακτορικού όσο και γενικότερα.

Το διδακτορικό αυτό ωστόσο, δε θα μπορούσε να ολοκληρωθεί χωρίς την ουσιαστική επίβλεψη από τον καθηγητή Δρ. Κουτσόπουλο Κωνσταντίνο τον οποίο ευχαριστώ ιδιαίτερα για την καθοδήγηση που μου προσέφερε τόσο κατά την εξέλιξη και όσο και τη συγγραφή του διδακτορικού. Ακόμα περισσότερο ωστόσο τον ευχαριστώ για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε επιτρέποντάς μου να ασχοληθώ με ιδέες που θεωρούσα ενδιαφέρουσες, ακόμα και αν αυτές εν τέλει δεν ενσωματώθηκαν στο σώμα της διατριβής. Επίσης θέλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον Δρ. Χατζηχρήστο Θωμά που με έφερε σε επαφή με την Λογική της Ασάφειας και με βοήθησε σε σχετικά θέματα σε διάφορα στάδια του διδακτορικού. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Χρυσουλάκη Νεκτάριο για την διάθεση ορισμένων δεδομένων που ήταν απαραίτητα για την εφαρμογή του μοντέλου όσο ήταν και δυσεύρετα.

Θα ήταν απαράδεκτη παράλειψη να μην ευχαριστήσω τους γονείς μου για την συνεχή ηθική και οικονομική συμπαράστασή τους καθ'όλη την διάρκεια των σπουδών μου και βεβαίως τη σύζυγό μου Μαρία, η οποία φρόντισε τα τελευταία χρόνια να έχω την απαραίτητη ηρεμία στη ζωή μου για να εξελίξω το διδακτορικό και να συγγράψω τη παρούσα διατριβή.



Μαντέλας Ελευθέριος

Αθήνα 2011

Περίληψη

Είναι εξαιρετικά σημαντικό, η αστική επέκταση να λαμβάνει χώρα με έναν σχεδιασμένο τρόπο, μεγιστοποιώντας τα οφέλη για τον αστικό πληθυσμό, ελαχιστοποιώντας παράλληλα τόσο τα οικονομικά όσο και τα περιβαλλοντικά κόστη. Για να γίνει αυτό χρειάζονται ακριβείς και ρεαλιστικές εκτιμήσεις της αστικής επέκτασης και ευσταθή μοντέλα προσομοίωσης. Η μοντελοποίηση αναφέρεται στην δημιουργία ενός αυστηρά ορισμένου αναλόγου της πραγματικότητας δια μέσου της αφαιρετικής διαδικασίας για να παρέχει προσομοιώσεις και προβολές στο μέλλον υπό συγκεκριμένες θεωρήσεις και να δώσει μια εκτίμηση του πώς μπορεί να μοιάζει το μέλλον.

Δεν υπάρχει ωστόσο κάποιο σαφές πλαίσιο για την μοντελοποίηση ενός σύνθετου χώρο-χρονικού φαινομένου όπως η αστική επέκταση, καθώς υπάρχει σημαντική ενδογενής χωρική και χρονική ετερογένεια, αλλά και ετερογένεια σε επίπεδο λήψης αποφάσεων. Παράλληλα, οι γνώσεις μας φαίνεται ότι δεν περιγράφουν την δυναμική της αστικής επέκτασης στο σύνολο της, αλλά μόνο το τμήμα της που έχει παρατηρηθεί και καταγραφεί. Επιπλέον, η γνώση μας για τις διαφορετικές λειτουργικές κλίμακες του αστικού τύπου, των αστικών διαδικασιών και την αλληλεπίδραση των διαφόρων κλιμάκων, είναι ελλιπής, ανάμεσα στα άλλα, εξαιτίας της έλλειψης λεπτομερών χωρικών δεδομένων. Συν τοις άλλοις, προκειμένου ένα μοντέλο να είναι χρήσιμο, πρέπει όχι μόνο να παρέχει ακριβείς εκτιμήσεις αλλά και να περιγράφει τα αποτελέσματα και τους μηχανισμούς του – τις σχέσεις, τις αλληλεπιδράσεις και τις θεωρήσεις – με έναν ανοιχτό, εμφανή και κατανοητό τρόπο έτσι ώστε να μπορούν να αμφισβητηθούν.

Για τους παραπάνω λόγους εξελίχθηκε ένα πλαίσιο μοντελοποίησης της αστικής επέκτασης με το κωδικό όνομα CaFe (Cellular Automata Fuzzy Engine), ο στόχος του οποίου είναι:

- Να είναι αξιόπιστο και ρεαλιστικό. Δηλαδή να παρέχει ακριβείς εκτιμήσεις για την μελλοντική αστική κάλυψη και να αναπαράγει αποδοτικά τα υποκείμενα χώρο-χρονικά πρότυπα της δυναμικής της αστικής επέκτασης.
- Να είναι ανοιχτό και προσαρμόσιμο στις επιθυμίες του χρήστη. Αυτό περιλαμβάνει:

- να περιγράφει τους μηχανισμούς του μοντέλου και την ροή της πληροφορίας με απλό και κατανοητό τρόπο και
- να υποστηρίζει την προσομοίωση εναλλακτικών σεναρίων αστικής επέκτασης.
- Να είναι εύχρηστο και ελαστικό απέναντι στους περιορισμούς της μελέτης, δηλαδή:
 - να διατηρεί μια προσαρμόσιμη μορφή ώστε να μην υπόκειται σε σημαντικούς περιορισμούς δεδομένων και
 - να χρησιμοποιεί μια μορφή γνώσης, τέτοια ώστε να μπορούν να προστεθούν ή να αφαιρεθούν κανόνες χωρίς να επηρεάζεται ο πυρήνας της γνώσης.

Το προτεινόμενο μοντέλο αναπαριστά την γνώση σε μορφή κανόνων οι οποίοι μπορεί να είναι εμπειρικοί ή εξαγόμενοι εκ των δεδομένων. Επίσης μπορεί να είναι χώρο-χρονικά μεταβαλλόμενοι. Ως εκ τούτου η βάση γνώσης (το σύνολο των κανόνων) μπορεί να ταιριάζει καλύτερα στην πραγματικότητα, επιτρέποντας στον χρήστη να υπερβεί πιθανές ελλείψεις δεδομένων εισάγοντας εξωγενή γνώση, προσαρμοσμένη στο μοντέλο διαμέσου εμπειρικών προτύπων ομοιότητας. Παράλληλα, εφαρμόζεται μια καινοτόμα σύνδεση μεταξύ των εξωγενών παραμέτρων (των μεταβλητών εισόδου) και του συστήματος προσομοίωσης της αστικής κάλυψης (μεταβλητή εξόδου). Όλες οι μεταβλητές εισόδου συγχωνεύονται σε μια μόνο εσωτερική μεταβλητή, την *‘καταλληλότητα προς αστικοποίηση’*, που καθορίζει την δυνατότητα κάθε περιοχής να αναπτυχθεί. Για να γίνει αυτό εξελέγη ο τελεστής *‘ευαίσθητο άθροισμα’*, ένας νέος ασαφής τελεστής που εφαρμόζει μια δυναμική παράλληλη συνδεσμολογία μεταξύ των διαφορετικών μεταβλητών, λαμβάνοντας υπόψη τη μεταξύ τους στατιστική συσχέτιση. Σαν αποτέλεσμα δεν απαιτούνται συγκεκριμένες μεταβλητές ενώ υποστηρίζεται μια μορφή βάσης γνώσης που μπορεί εύκολα να επεκταθεί ή να περιορισθεί.

Ο μηχανισμός προσομοίωσης διαχωρίζεται από τον υπολογισμό της *‘καταλληλότητας προς αστικοποίηση’* και ενσωματώνει εξελεγμένες τεχνικές κυψελοειδών αυτομάτων. Αυτές εφαρμόζουν χώρο-χρονικές συναρτήσεις μετάβασης με μεταβλητή ακτίνα και υποστηρίζουν *‘δράση από απόσταση’*. Ειδικότερα, εκτός από τα *‘κλασσικά’* κυψελοειδή αυτόματα, το μοντέλο εισάγει την χρήση *κυψελοειδών αυτομάτων που δρουν κατά κατεύθυνση* ενώ υιοθετεί επιπλέον συμπεριφορά *ψευδό-πρακτόρων*.

Το μοντέλο εφαρμόστηκε για την ευρύτερη περιοχή των Μεσογείων στην ανατολική Αττική με πραγματικά δεδομένα για τα έτη 1988, 2000 και 2007. Ειδικότερα το CaFe δομήθηκε και βαθμονομήθηκε με δεδομένα για την περίοδο 1988-2000 και ακολούθως εφαρμόστηκε για τις περιόδους 2000-2007 και 1988-2007. Σε αυτές τις περιόδους, η αστική κάλυψη αυξήθηκε κατά 66%, 66% και 200% αντίστοιχα καθιστώντας έτσι την προσομοίωσή της ιδιαίτερα δύσκολη. Και στις τρεις περιόδους/εφαρμογές ωστόσο, το μοντέλο αποτυπώνει με επιτυχία την δυναμική της αστικής

επέκτασης ενώ προσομοιώνει την αστική ανάπτυξη με ικανοποιητική ακρίβεια επιτυγχάνοντας υψηλούς δείκτες προσαρμογής αλλά και σχετικά σταθερό μέσο σφάλμα στις διαφορετικές εφαρμογές.

Λέξεις-Κλειδιά: αστική επέκταση, κυψελοειδή αυτόματα, κυψελοειδή αυτόματα κατά κατεύθυνση, χώρο-χρονική συνάρτηση μετάβασης με μεταβλητή ακτίνα, λογική της ασάφειας & ασαφή συστήματα, ασαφής τελεστής ευαίσθητο άθροισμα

Abstract

It is of major importance that urban growth occurs in a planned way, maximizing the benefits for urban population while minimizing both environmental and economical cost. This requires accurate and realistic estimations of the urbanization process and this is what urban models do. The term modeling refers to creating a strictly defined analog of real world by subtraction and provides simulations and future projections under identifiable assumptions to suggest what the future might be like.

Nevertheless, there is no rigorous framework for modeling such a spatio-temporal phenomenon as urban growth since there lies great inherent spatial, temporal and decision-making heterogeneity, which results from socio-economic and historical heterogeneity itself. Apparently, our knowledge, is not really describing urban growth dynamics in general, but instead the part of the urban growth dynamics that have already occurred and have been observed and experienced. What is more, knowledge about the operational scale(s) of urban form and process, and the interaction and parallelism among different scales, is poor, partially due to the recurring problem of lacking spatially detailed data. Apart from dealing with the above mentioned issues, for a model to be useful it should not only provide accurate estimations but also express both its results and its mechanism – relations, interactions and assumptions – in an open, visible, explicit and comprehensible way in order to be challenged by knowledgeable people.

For these reasons a modeling framework has been developed, CaFe (Cellular Automata - Fuzzy Engine) whose goal is to:

- Be reliable and realistic. This means to provide accurate estimations for the future urban cover and reproduce efficiently the spatio-temporal patterns of the urban growth dynamics
- Be open and adaptable to the user's requirements. This is to:
 - describe the model's mechanisms and the workflow in simple and comprehensible terms and
 - support the population of alternative scenarios

- Be easy to use and resilient to the case study limitations, more specifically to:
 - sustain a generic versatile form, disengaged from severe data limitations and
 - use knowledge base in such form that it can be reduced or extended

The proposed model is rule-based and supports spatio-temporal rules that may be either data-driven or empirical. As a result, the knowledge base may fit better to reality allowing the user to overcome possible data limitations – which lead to lacking of specific knowledge – by using exogenous knowledge adapted to the model according to empirical similarity patterns. What allows the desired objectives to be accomplished is the combination of the descriptive strength of Fuzzy Logic and the computational strength of Cellular Automata.

The model applies an innovative workflow to connect the input and the output variables. All input variables are merged in a single thematic layer, the ‘*urbanization suitability*’, which defines the potentials of each area to develop. To do so, the model utilizes *Sensitive Sum*; a new fuzzy operator that is developed to employ a dynamic parallel connection between the effects of separate input variables while taking into account their statistical correlation. As a result, the model does not require certain variables/data to run while it implements a reducible/extensible form of Knowledge Base which can include both data-driven and empirical rules.

The simulation engine is separated by the suitability calculator and incorporates advanced Cellular Automata techniques. These techniques apply spatio-temporal multi-radius transition functions and support *action in distance*. Specifically, on top of the ‘traditional’ cellular automata, CaFe introduces *directional cellular automata* and adopts *pseudo-agent behavior*.

CaFe is applied in the broader area of Mesogia in east Attica (Athens – Greece) using real data for 1988, 2000 και 2007. More specifically, the model was structured and calibrated for 1988-2000 and was applied for 2000-2007 και 1988-2007. During these periods, urban cover grew by 66%, 66% and 200% respectively, composing thus a challenging case study. Nevertheless, CaFe manages to map urban cover successfully and to efficiently simulate urban growth while scoring high fitting indicators and retaining a stable average error.

Keywords: urban growth, cellular automata, directional cellular automata, spatio-temporal multi radius transition function, fuzzy logic & fuzzy system, sensitive sum fuzzy operator

Περιεχόμενα

Πρόλογος	i
Περίληψη	iii
Abstract	vi
Περιεχόμενα	viii
Κατάλογοι	xi
Κατάλογος Χαρτών	xi
Κατάλογος Εικόνων	xii
Κατάλογος Εξισώσεων	xiii
Κατάλογος Γραφημάτων	xiv
Κατάλογος Πινάκων	xv
Κατάλογος Συντομογραφιών	xvi
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	1
1.1 Ερευνητικά Ερωτήματα	2
1.2 Αντικείμενο & Στόχοι	3
1.3 Δομή & Περιεχόμενα	4
Κεφάλαιο 2: Αστική Επέκταση & Αστικά Μοντέλα	6
2.1 Αστικοποίηση και Αστική Επέκταση	6
2.2 Μοντέλα Αστικής Επέκτασης	8
2.2.1 Ο Ρόλος των Αστικών Μοντέλων	9
2.2.2 Θεωρητικές Προσεγγίσεις Μοντελοποίησης	10
2.2.3 Κατηγοριοποιήσεις Μοντέλων Αστικής Επέκτασης	11
2.2.4 Τεχνικές και Μέθοδοι Μοντελοποίησης	12
Κεφαλαίο 3: Η Λογική της Ασάφειας	15
3.1 Θεωρία Ασαφών Συνόλων	16
3.1.1 Ασαφή Σύνολα	16
3.1.2 Συναρτήσεις Συμμετοχής	17
3.2 Διασύνδεση με την Φυσική Γλώσσα	18
3.2.1 Έννοιες, Όροι και Λεκτικές Μεταβλητές	18
3.2.2 Λεκτικοί Προσδιορισμοί	19
3.3 Ασαφή Συστήματα	21
3.3.1 Ασαφοποίηση	22
3.3.2 Δημιουργία/Εκφραση Βάσης Γνώσης	23

3.3.3 Εξαγωγή Συμπεράσματος	23
3.3.4 Αποσαφήνιση	26
3.4 Λογική της Ασάφειας για την Θεώρηση της Αστικής Επέκτασης	26
Κεφάλαιο 4: Κυψελοειδή Αυτόματα	30
4.1 Μαθηματικός Ορισμός.....	31
4.2 Στοιχεία και Κατηγορίες Κυψελοειδών Αυτομάτων	32
4.2.1 Το Πλέγμα των Κυψελοειδών Αυτομάτων	32
4.2.2 Η Έννοια της Γειτονιάς στα Κυψελοειδή Αυτόματα.....	33
4.2.3 Οι Καταστάσεις των Κυψελών	34
4.2.4 Η Συνάρτηση Μετάβασης.....	35
4.3 Κυψελοειδή Αυτόματα στα Πλαίσια της Λογικής της Ασάφειας	37
4.3.1 Ασαφή Κυψελοειδή Αυτόματα ή Ασαφή Κυψελοειδή Συστήματα;	37
4.3.2 Πλεονεκτήματα των Ασαφών Κυψελοειδών Αυτομάτων	38
Κεφάλαιο 5: Αστικά Κυψελοειδή Αυτόματα.....	39
5.1 Η Λογική των Αστικών Κυψελοειδών Αυτομάτων	39
5.2 Αριθμητικά & Δυναδικά Αστικά Κυψελοειδή Αυτόματα	41
5.2.1 Το μοντέλο SLEUTH.....	41
5.2.2 Τα Μοντέλα Moland/Murbandy	42
5.2.3 Το Μοντέλο Obeus	42
5.3 Ασαφή Αστικά Κυψελοειδή Αυτόματα	43
5.3.1 Το Μοντέλο του Wu	43
5.3.2 Το Μοντέλο των Liu & Phinn.....	44
5.3.3 Μεταγενέστερες Εφαρμογές	45
5.4 Αξιολόγηση της Αριθμητικής Προσαρμογής των Αστικών ΚΑ	46
Κεφάλαιο 6: Το Μεθοδολογικό Πλαίσιο Μοντελοποίησης CaFe.....	48
6.1 Τα Στάδια Εξέλιξης του CaFe.....	49
6.2 Θεώρηση των Βασικών Μεγεθών της Αστικής Επέκτασης	50
6.2.1 Θεώρηση της Αστικής Κάλυψης	50
6.2.2 Θεώρηση της Μεταβολής της Αστικής Κάλυψης	51
6.2.3 Θεώρηση του Χώρου	51
6.2.4 Θεώρηση του Χρόνου	52
6.3 Καταλληλότητα προς Αστικοποίηση	53
6.3.1 Εξαγωγή Βάσης Γνώσης για την Καταλληλότητα	55
6.3.2 Καθορισμός Εξαιρουμένων Κυψελών	56
6.3.3 Χρονική Μεταβλητότητα των Κανόνων Καταλληλότητας	57
6.3.4 Παράλληλη Συνδεσμολογία Κανόνων Καταλληλότητας – Ο Τελεστής Ευαίσθητο Άθροισμα	58
6.4 Εξελιγμένος Υβριδικός Μηχανισμός Κυψελοειδών Αυτομάτων – CA++	60
6.4.1 Διαδικασίες Προσομοίωσης Αστικής Επέκτασης.....	61
6.4.2 Δράση από Απόσταση.....	62
6.4.3 Χαρακτηριστικά της Μετάδοσης του Σήματος της Αστικής Επέκτασης	63
6.4.4 Πολυωνυμικός Τελεστής Εντατικοποίησης.....	64
6.4.5 Κυψελοειδή Αυτόματα κατά Κατεύθυνση.....	65
6.4.6 Λεκτικοί Προσδιορισμοί.....	67
6.4.7 Χωρική και Χρονική Μεταβλητότητα της Συνάρτησης Μετάβασης.....	68
6.4.8 Βαθμονόμηση του CA++	69

Κεφάλαιο 7: Ανάπτυξη και Εφαρμογή του CaFe	71
7.1 Η Δομή της Εφαρμογής του CaFe	71
7.1.1 Εξαγωγή Γνώσης για τον Υπολογισμό της Καταλληλότητας	72
7.1.2 Δείκτες Αριθμητικής Προσαρμογής των Αποτελεσμάτων	74
7.2 Προπαρασκευαστικά Στάδια.....	76
7.2.1 Η Περιοχή Μελέτης	76
7.2.2 Αρχικά Δεδομένα	78
7.3 Ανάπτυξη του CaFe	84
7.3.1 Υπολογισμός Καταλληλότητας.....	84
7.3.2 Βαθμονόμηση του Μηχανισμού CA^{++}	91
7.3.3 Αποτελέσματα του Μοντέλου.....	92
7.4 Αποτίμηση του Μοντέλου	94
7.4.1 Υπολογισμός Καταλληλότητας.....	94
7.4.2 Αποτελέσματα του Μοντέλου.....	102
7.5 Αναπροσαρμογή του Μοντέλου.....	105
7.5.1 Υπολογισμός Καταλληλότητας και Βαθμονόμηση του Μοντέλου	105
7.5.2 Αποτελέσματα του Μοντέλου.....	105
7.6 Προσομοίωση της Μελλοντικής Αστικής Επέκτασης.....	109
7.6.1 Υπολογισμός Καταλληλότητας.....	109
7.6.2 Εναλλακτικά Σενάρια Ανάπτυξης.....	117
 Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα.....	 121
8.1 Συνεισφορά του CaFe	121
8.1.1 Συνεισφορά του CaFe στον χώρο των Αστικών Κυψελοειδών Αυτομάτων	122
8.1.2 Καινοτόμα Τεχνικά Χαρακτηριστικά του CaFe	123
8.2 Μελλοντική Εργασία	124
8.2.1 Ανοιχτά Ερευνητικά Ερωτήματα	125
8.2.2 Δυνητική Εξέλιξη του CaFe.....	125
 Βιβλιογραφία	 I
Ελληνική Βιβλιογραφία	I
Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία.....	II
Σύνδεσμοι Ιστοσελίδων	XV

Κατάλογοι

Κατάλογος Χαρτών

Χάρτης 7.1: Η θέση της περιοχής μελέτης	77
Χάρτης 7.2: Η εξέλιξη της αστικής κάλυψης στην Αττική και την περιοχή μελέτης	80
Χάρτης 7.3: Οι δήμοι, η ακτογραμμή, οι προστατευόμενες δασικές περιοχές, η γραμμή και οι σταθμοί του Προαστιακού σιδηρόδρομου, οι σταθμοί του Μετρό και οι ανισόπεδοι κόμβοι (αριστερά) και το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (δεξιά)	81
Χάρτης 7.4: Χρήσεις γης βάση ταξινόμησης Corine για το 1990 (αριστερά) και το 2000 (δεξιά)	81
Χάρτης 7.5: Το πρωτεύον (κόκκινο) και δευτερεύον (μπλε) οδικό δίκτυο για το 1988 (αριστερά), 2000 (κέντρο) και 2007 (δεξιά)	82
Χάρτης 7.6: Η ασαφопоιημένη αστική κάλυψη για το 1988 (αριστερά), το 2000 (κέντρο) και το 2007 (δεξιά)	82
Χάρτης 7.7: (από αριστερά προς τα δεξιά) απόσταση από την ακτογραμμή, τους σταθμούς επιβίβασης, τους ανισόπεδους κόμβους και κλίσεις επιφανείας	82
Χάρτης 7.8: Απόσταση (άνω) και πυκνότητα (κάτω) για το πρωτεύον οδικό δίκτυο για το 1988 (αριστερά), το 2000 (κέντρο) και το 2007 (δεξιά)	83
Χάρτης 7.9: Απόσταση (άνω) και πυκνότητα (κάτω) για το δευτερεύον οδικό δίκτυο για το 1988 (αριστερά), το 2000 (κέντρο) και το 2007 (δεξιά)	83
Χάρτης 7.10: Καταλληλότητα βάση χρήσεων γης (άνω), κλίσεων επιφανείας (κέντρο) και απόστασης από την ακτογραμμή (κάτω) για το 1988	88
Χάρτης 7.11: Καταλληλότητα βάση απόστασης (αριστερά) και πυκνότητας (δεξιά) για το πρωτεύον (άνω) και το δευτερεύον (κάτω) οδικό δίκτυο για το 1988	89
Χάρτης 7.12: Συγκεντρωτική καταλληλότητα προς αστικοποίηση για το 1988	90
Χάρτης 7.13: Η αστική κάλυψη για το 1988 (άνω αριστερά) και το 2000 (άνω δεξιά) και η εκτίμηση του μοντέλου για την αστική κάλυψη για το έτος 2000 με βάση την αστική κάλυψη για το έτος 1988 (κάτω)	93
Χάρτης 7.14: Καταλληλότητα βάση χρήσεων γης (άνω), κλίσεων επιφανείας (κέντρο) και απόστασης από την ακτογραμμή (κάτω) για το 2000	99
Χάρτης 7.15: Καταλληλότητα βάση απόστασης (αριστερά) και πυκνότητας (δεξιά) για το πρωτεύον (άνω) και το δευτερεύον (κάτω) οδικό δίκτυο για το 2000	100
Χάρτης 7.16: Καταλληλότητα βάση απόστασης από ανισόπεδους κόμβους (αριστερά) και σταθμούς του Μετρό (δεξιά) για το 2000	100
Χάρτης 7.17: Συγκεντρωτική καταλληλότητα προς αστικοποίηση για το 2000	101
Χάρτης 7.18: Η αστική κάλυψη για το 2000 (άνω αριστερά) και το 2007 (άνω δεξιά) και η εκτίμηση του μοντέλου για την αστική κάλυψη για το έτος 2007 με βάση την αστική κάλυψη για το έτος 2000 (κάτω)	104
Χάρτης 7.19: Η αστική κάλυψη για το 2000 (άνω αριστερά) και το 2007 (άνω δεξιά) και η εκτίμηση του μοντέλου για την αστική κάλυψη για το έτος 2007 με βάση την αστική κάλυψη για το έτος 2000 (κάτω)	108

Χάρτης 7.20: Καταλληλότητα βάση χρήσεων γης (άνω), κλίσεων επιφανείας (κέντρο) και απόστασης από την ακτογραμμή (κάτω) για το 2007	114
Χάρτης 7.21: Καταλληλότητα βάση απόστασης (αριστερά) και πυκνότητας (δεξιά) για το πρωτεύον (άνω) και το δευτερεύον (κάτω) οδικό δίκτυο για το 2007.....	115
Χάρτης 7.22: Καταλληλότητα βάση απόστασης από ανισόπεδους κόμβους (αριστερά) και σταθμούς του Μετρό (δεξιά) για το 2007	115
Χάρτης 7.23: Συγκεντρωτική καταλληλότητα προς αστικοποίηση για το 2007.....	116
Χάρτης 7.24: Το σενάριο Α υποθέτει αύξηση της αστικής κάλυψης κατά 40% (αριστερά) ενώ το σενάριο Β αύξηση της αστικής κάλυψης κατά 80% (δεξιά)	118
Χάρτης 7.25: Η υπόθεση της εξωγενούς ανάπτυξης οικισμού στο νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης (αριστερά) περιορίζει σε μεγάλο βαθμό την ανάπτυξη άλλων περιοχών (δεξιά) στο σενάριο Γ.....	119
Χάρτης 7.26: Η υπόθεση της μεταφοράς του αεροδρομίου εκτός περιοχής μελέτης (αριστερά) επιτρέπει την μέτρια ανάπτυξη στην εν λόγω περιοχή και στα σύνορα αυτής χωρίς ωστόσο να επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις υπόλοιπες περιοχές (δεξιά) στο σενάριο Δ.....	119
Χάρτης 7.27: Η υπόθεση της θέσπισης μέτρων για την προστασία παραδοσιακών αμπελώνων και ελαιώνων στην περιοχή μελέτης (αριστερά) στρέφει την αστική επέκταση στον Υμηττό (δεξιά) στο σενάριο Ε.....	120
Χάρτης 7.28: Η υπόθεση της επέκτασης του πρωτεύοντος οδικού δικτύου και του Αττικού Μετρό (αριστερά) στρέφει την αστική επέκταση στις περιοχές όπου γίνονται τα αναπτυξιακά έργα (δεξιά) στο σενάριο ΣΤ.....	120

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 4.1: Γειτονιές Neumann (αριστερά) και Moore (δεξιά) ακτίνας 1 έως 4.....	33
Εικόνα 4.2: Η εξέλιξη της ίδιας αρχικής κατάστασης χρησιμοποιώντας γειτονιά Moore (αριστερά) και γειτονιά σχήματος Χ (δεξιά).....	34
Εικόνα 6.1: Η αντιστοίχιση του μονοδιάστατου κλειδιού των φατνίων στη πρόσοψη του πίνακα	52
Εικόνα 6.2: Αναπαράσταση της ‘καταλληλότητας προς αστικοποίηση’ ως κλίσεις επιφανείας (αριστερά), αναπαράσταση της αστικής κάλυψης για το 1990 βάση Corine ως ρευστό (κέντρο) και η διάχυση του ρευστού που προσομοιώνεται σε αυθαίρετο χρόνο από τεχνικές Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (δεξιά).....	54
Εικόνα 6.3: Όλες οι μεταβλητές εισόδου συνδυάζονται προκειμένου να υπολογισθεί η καταλληλότητα προς αστικοποίηση	54
Εικόνα 6.4: Η προτεραιότητα εφαρμογής των τεσσάρων διαδικασιών του CA++	61
Εικόνα 6.5: Με την ίδια αρχική κατάσταση (μπλε κελιά) αποτυπώνεται η δυνατότητα προσπέλασης της περιοχής μέσα σε δυο επαναληπτικά βήματα. Άνω εφαρμόζονται μόνο οι διαδικασίες 1 και 2 (πράσινα κελιά) ενώ κάτω εφαρμόζονται επιπλέον οι διαδικασίες 3 και 4 (πορτοκαλί κελιά)	63
Εικόνα 6.6: Τα ΚΑ κατά κατεύθυνση χρησιμοποιούν το μέγιστο αστικό φορτίο που εντοπίζεται προς οχτώ κατευθύνσεις	66
Εικόνα 6.7: Αναπαράσταση της επίδρασης του προσδιορισμού ‘άνω 10%’ στον χώρο, αριστερά το αρχικό ασαφές σύνολο και δεξιά το παραγόμενο.....	68

Κατάλογος Εξισώσεων

Εξίσωση 3.1: Ο προσδιορισμός 'ακραία'	20
Εξίσωση 3.2: Η μέθοδος αποσαφήνισης 'Μέσος Μεγίστων'	26
Εξίσωση 3.3: Η μέθοδος αποσαφήνισης 'Κέντρο Βάρους'	26
Εξίσωση 4.1: Ο Μαθηματικός ορισμός του Αυτομάτου	31
Εξίσωση 4.2: Ο Μαθηματικός ορισμός των Κυψελοειδών Αυτομάτων	31
Εξίσωση 6.1: Αντιστοίχιση του μονοδιάστατου κλειδιού των φατνίων στον χώρο	51
Εξίσωση 6.2: Θεώρηση της γειτονιάς Moore	52
Εξίσωση 6.3: Ο βαθμός μεταβολής της αστικής κάλυψης	52
Εξίσωση 6.4: Εκθετική σχέση αρχικής και τελικής αστικής κάλυψης	52
Εξίσωση 6.5: Εκθετική σχέση αρχικής και ενδιάμεσης αστικής κάλυψης	53
Εξίσωση 6.6: Θεώρηση του πραγματικού χρόνου	53
Εξίσωση 6.7: Εκθετική σχέση αρχικής και ενδιάμεσης αστικής κάλυψης για μεταβλητή ανάπτυξη	53
Εξίσωση 6.8: Εξαγωγή ΠΒ για μεμονωμένες τιμές της μεταβλητής εισόδου	55
Εξίσωση 6.9: Ο τελεστής ΕΑ για δυο κανόνες	59
Εξίσωση 6.10: Γενίκευση του τελεστή ΕΑ για n κανόνες	59
Εξίσωση 6.11: Θεώρηση της στατιστικής εξάρτησης στον ΕΑ	59
Εξίσωση 6.12: Εκθετικός τελεστής εντατικοποίησης	65
Εξίσωση 6.13: Ο προσδιορισμός 'άνω α%'	67
Εξίσωση 6.14: Ο προσδιορισμός 'κάτω α%'	67
Εξίσωση 7.1: Η συνάρτηση καταλληλότητας για τις κλίσεις επιφανείας για το 1988	87
Εξίσωση 7.2: Η συνάρτηση καταλληλότητας για την απόσταση από την ακτογραμμή για το 1988	87
Εξίσωση 7.3: Η συνάρτηση καταλληλότητας για την απόσταση από πρωτεύον οδικό δίκτυο για το 1988	87
Εξίσωση 7.4: Η συνάρτηση καταλληλότητας για την πυκνότητα πρωτεύοντος οδικού δικτύου για το 1988	87
Εξίσωση 7.5: Η συνάρτηση καταλληλότητας για την απόσταση από δευτερεύον οδικό δίκτυο για το 1988	87
Εξίσωση 7.6: Η συνάρτηση καταλληλότητας για την πυκνότητα δευτερεύοντος οδικού δικτύου για το 1988	87
Εξίσωση 7.7: Η συνάρτηση καταλληλότητας για τις κλίσεις επιφανείας για το 2000	98
Εξίσωση 7.8: Η συνάρτηση καταλληλότητας για την απόσταση από την ακτογραμμή για το 2000	98
Εξίσωση 7.9: Η συνάρτηση καταλληλότητας για την απόσταση από σταθμούς για το 2000	98
Εξίσωση 7.10: Η συνάρτηση καταλληλότητας για την απόσταση από κόμβους για το 2000	98
Εξίσωση 7.11: Η συνάρτηση καταλληλότητας για την απόσταση από πρωτεύον οδικό δίκτυο για το 2000	98
Εξίσωση 7.12: Η συνάρτηση καταλληλότητας για την πυκνότητα πρωτεύοντος οδικού δικτύου για το 2000	98
Εξίσωση 7.13: Η συνάρτηση καταλληλότητας για την απόσταση από δευτερεύον οδικό δίκτυο για το 2000	98
Εξίσωση 7.14: Η συνάρτηση καταλληλότητας για την πυκνότητα δευτερεύοντος οδικού δικτύου για το 2000	98
Εξίσωση 7.15: Η συνάρτηση καταλληλότητας για τις κλίσεις επιφανείας για το 2007	113

Εξίσωση 7.16: Η συνάρτηση καταλληλότητας για την απόσταση από την ακτογραμμή για το 2007.....	113
Εξίσωση 7.17: Η συνάρτηση καταλληλότητας για την απόσταση από σταθμούς για το 2007	113
Εξίσωση 7.18: Η συνάρτηση καταλληλότητας για την απόσταση από κόμβους για το 2007.....	113
Εξίσωση 7.19: Η συνάρτηση καταλληλότητας για την απόσταση από πρωτεύον οδικό δίκτυο για το 2007	113
Εξίσωση 7.20: Η συνάρτηση καταλληλότητας για την πυκνότητα πρωτεύοντος οδικού δικτύου για το 2007	113
Εξίσωση 7.21: Η συνάρτηση καταλληλότητας για την απόσταση από δευτερεύον οδικό δίκτυο για το 2007	113
Εξίσωση 7.22: Η συνάρτηση καταλληλότητας για την πυκνότητα δευτερεύοντος οδικού δικτύου για το 2007	113

Κατάλογος Γραφημάτων

Γράφημα 3.1: Αρχική συνάρτηση συμμετοχής και επίδραση των προσδιορισμών (από αριστερά προς δεξιά) ‘πολύ’, ‘περίπου’ και ‘ακραία’	21
Γράφημα 6.1: Η συχνότητα εμφάνισης αστικής κάλυψης βάση κλίσεων επιφανείας όπως υπολογίζεται για όλη την περιοχή (αριστερά) και μόνο για τις δυναμικές κυψέλες (δεξιά).....	57
Γράφημα 6.2: Η διαχρονική εξέλιξη της καταλληλότητας βάση κλίσεων εδάφους αποτυπωμένη επί πραγματικών δεδομένων για έξι χρονικές στιγμές.....	58
Γράφημα 6.3: Οι προσδιορισμοί ‘άνω α%’ (αριστερά) και ‘κάτω α%’ (δεξιά)	67
Γράφημα 6.4: Οι παραστάσεις των ασαφών συνόλων της δισδιάστατης ασαφούς χωρικής μεταβλητής, BA, ΒΔ, NA, ΝΔ και Κέντρο (αριστερά) και B, N, A και Δ (δεξιά).....	69
Γράφημα 7.1: Η συχνότητα εμφάνισης Αστικής Κάλυψης ανά κατηγορία Corine για το σύνολο της περιοχής (αριστερά) και τις δυναμικές περιοχές (δεξιά) για το 1988	85
Γράφημα 7.2: Η συχνότητα εμφάνισης Αστικής Κάλυψης ανά κλίσεις επιφανείας για το σύνολο της περιοχής (αριστερά) και τις δυναμικές περιοχές (δεξιά) για το 1988.....	85
Γράφημα 7.3: Η συχνότητα εμφάνισης Αστικής Κάλυψης ανά απόσταση από την ακτογραμμή για το σύνολο της περιοχής (αριστερά) και τις δυναμικές περιοχές (δεξιά) για το 1988 ...	85
Γράφημα 7.4: Η συχνότητα εμφάνισης Αστικής Κάλυψης ανά απόσταση (άνω) και πυκνότητα (κάτω) για το πρωτεύον οδικό δίκτυο για το σύνολο της περιοχής (αριστερά) και τις δυναμικές περιοχές (δεξιά) για το 1988	86
Γράφημα 7.5: Η συχνότητα εμφάνισης Αστικής Κάλυψης ανά απόσταση (άνω) και ανά πυκνότητα (κάτω) για το δευτερεύον οδικό δίκτυο για το σύνολο της περιοχής (αριστερά) και τις δυναμικές περιοχές (δεξιά) για το 1988.....	86
Γράφημα 7.6: Η μεταβολή του δείκτη Kappa (αριστερά), του K-Histogram (κέντρο) και του K-Location (δεξιά) ως προς τα επαναληπτικά βήματα του μηχανισμού προσομοίωσης για την περίοδο 1988-2000.....	92
Γράφημα 7.7: Η συχνότητα εμφάνισης Αστικής Κάλυψης ανά κατηγορία Corine για το σύνολο της περιοχής (αριστερά) και τις δυναμικές περιοχές (δεξιά) για το 2000	95
Γράφημα 7.8: Η συχνότητα εμφάνισης Αστικής Κάλυψης ανά κλίσεις επιφανείας για το σύνολο της περιοχής (αριστερά) και τις δυναμικές περιοχές (δεξιά) για το 2000.....	95
Γράφημα 7.9: Η συχνότητα εμφάνισης Αστικής Κάλυψης ανά απόσταση από την ακτογραμμή για το σύνολο της περιοχής (αριστερά) και τις δυναμικές περιοχές (δεξιά) για το 2000 ...	95

Γράφημα 7.10: Η συχνότητα εμφάνισης Αστικής Κάλυψης ανά απόσταση (άνω) και πυκνότητα (κάτω) για το πρωτεύον οδικό δίκτυο για το σύνολο της περιοχής (αριστερά) και τις δυναμικές περιοχές (δεξιά) για το 2000.....	96
Γράφημα 7.11: Η συχνότητα εμφάνισης Αστικής Κάλυψης ανά απόσταση (άνω) και ανά πυκνότητα (κάτω) για το δευτερεύον οδικό δίκτυο για το σύνολο της περιοχής (αριστερά) και τις δυναμικές περιοχές (δεξιά) για το 2000.....	96
Γράφημα 7.12: Η συχνότητα εμφάνισης Αστικής Κάλυψης ανά απόσταση από ανισόπεδους κόμβους για το σύνολο της περιοχής (αριστερά) και τις δυναμικές περιοχές (δεξιά) για το 2000.....	97
Γράφημα 7.13: Η συχνότητα εμφάνισης Αστικής Κάλυψης ανά απόσταση από σταθμούς Μετρό για το σύνολο της περιοχής (αριστερά) και τις δυναμικές περιοχές (δεξιά) για το 2000.....	97
Γράφημα 7.14: Η μεταβολή του δείκτη <i>Kappa</i> (αριστερά), του <i>K-Histogram</i> (κέντρο) και του <i>K-Location</i> (δεξιά) ως προς τα επαναληπτικά βήματα του μηχανισμού προσομοίωσης για την περίοδο 2000-2007.....	103
Γράφημα 7.15: Η μεταβολή του δείκτη <i>Kappa</i> (αριστερά), του <i>K-Histogram</i> (κέντρο) και του <i>K-Location</i> (δεξιά) ως προς τα επαναληπτικά βήματα του μηχανισμού προσομοίωσης για την περίοδο 1988-2007.....	107
Γράφημα 7.16: Η συχνότητα εμφάνισης Αστικής Κάλυψης ανά κατηγορία <i>Corine</i> για το σύνολο της περιοχής (αριστερά) και τις δυναμικές περιοχές (δεξιά) για το 2007.....	110
Γράφημα 7.17: Η συχνότητα εμφάνισης Αστικής Κάλυψης ανά κλίσεις επιφανείας για το σύνολο της περιοχής (αριστερά) και τις δυναμικές περιοχές (δεξιά) για το 2007.....	110
Γράφημα 7.18: Η συχνότητα εμφάνισης Αστικής Κάλυψης ανά απόσταση από την ακτογραμμή για το σύνολο της περιοχής (αριστερά) και τις δυναμικές περιοχές (δεξιά) για το 2007.....	110
Γράφημα 7.19: Η συχνότητα εμφάνισης Αστικής Κάλυψης ανά απόσταση (άνω) και πυκνότητα (κάτω) για το πρωτεύον οδικό δίκτυο για το σύνολο της περιοχής (αριστερά) και τις δυναμικές περιοχές (δεξιά) για το 2007.....	111
Γράφημα 7.20: Η συχνότητα εμφάνισης Αστικής Κάλυψης ανά απόσταση (άνω) και ανά πυκνότητα (κάτω) για το δευτερεύον οδικό δίκτυο για το σύνολο της περιοχής (αριστερά) και τις δυναμικές περιοχές (δεξιά) για το 2007.....	111
Γράφημα 7.21: Η συχνότητα εμφάνισης Αστικής Κάλυψης ανά απόσταση από ανισόπεδους κόμβους για το σύνολο της περιοχής (αριστερά) και τις δυναμικές περιοχές (δεξιά) για το 2007.....	112
Γράφημα 7.22: Η συχνότητα εμφάνισης Αστικής Κάλυψης ανά απόσταση από σταθμούς Μετρό για το σύνολο της περιοχής (αριστερά) και τις δυναμικές περιοχές (δεξιά) για το 2007.....	112

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1: Αριθμητικές εκφράσεις τελεστών	25
Πίνακας 5.1: Πίνακας με τους αριθμητικούς δείκτες προσαρμογής μερικών αστικών ΚΑ	47
Πίνακας 7.1: Οι δήμοι στην περιοχή μελέτης και το ποσοστό της επιφάνειάς τους που ανήκει στην περιοχή μελέτης	77
Πίνακας 7.2: Η καταλληλότητα προς αστικοποίηση για κάθε μονοσύνολο των χρήσεων γης βάση <i>Corine</i> για το 1988	87

Πίνακας 7.3: Οι συναρτήσεις καταλληλότητας των μεταβλητών εισόδου και οι τιμές των αντίστοιχων Παραμέτρων Βεβαιότητας για το 1988	87
Πίνακας 7.4: Οι τιμές των δεικτών αριθμητικής προσαρμογής για την εκτίμηση της πραγματικής αστικής κάλυψης για το έτος 2000 με βάση την αστική κάλυψη για το έτος 1988.....	92
Πίνακας 7.5: Η καταλληλότητα προς αστικοποίηση για κάθε μονοσύνολο των χρήσεων γης βάση Corine για το 2000	98
Πίνακας 7.6: Οι συναρτήσεις καταλληλότητας των μεταβλητών εισόδου και οι τιμές των αντίστοιχων Παραμέτρων Βεβαιότητας για το 2000	98
Πίνακας 7.7: Οι τιμές των δεικτών αριθμητικής προσαρμογής για την εκτίμηση της πραγματικής αστικής κάλυψης για το έτος 2007 με βάση την αστική κάλυψη για το έτος 2000.....	103
Πίνακας 7.8: Οι τιμές των δεικτών αριθμητικής προσαρμογής για την εκτίμηση της πραγματικής αστικής κάλυψης για το έτος 2007 με βάση την αστική κάλυψη για το έτος 1988.....	107
Πίνακας 7.9: Η καταλληλότητα προς αστικοποίηση για κάθε μονοσύνολο των χρήσεων γης βάση Corine για το 2007	113
Πίνακας 7.10: Οι συναρτήσεις καταλληλότητας των μεταβλητών εισόδου και οι τιμές των αντίστοιχων Παραμέτρων Βεβαιότητας για το 2007	113

Κατάλογος Συντομογραφιών

ΑσΕ	Αστική Επέκταση	UE	Urban Expansion
ΑΚΑ	Ασαφή Κυψελοειδή Αυτόματα	FCA	Fuzzy Cellular Automata
ΑΚΣ	Ασαφή Κυψελοειδή Συστήματα	FCS	Fuzzy Cellular Systems
ΕΑ	Ευαίσθητο Άθροισμα	SS	Sensitive Sum
ΘΑΣ	Θεωρία Ασαφών Συνόλων	FST	Fuzzy Set Theory
ΛΑ	Λογική της Ασάφειας	FL	Fuzzy Logic
ΛΑΚ	Λογισμός Ασαφών Κανόνων	CFR	Calculus of Fuzzy Rules
ΚΑ	Κυψελοειδή Αυτόματα	CA	Cellular Automata
ΠΒ	Παράμετρος Βεβαιότητας	CF	Certainty Factor

Εισαγωγή

Η Αστική Επέκταση (ΑσΕ) είναι το αποτέλεσμα μιας πληθώρας διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε ποικίλα χωρικά, χρονικά και κοινωνικό-οικονομικά επίπεδα. Στα πλαίσια της σύγχρονης κοινωνίας, είναι εμφανής η ανάγκη για την μελέτη της ΑσΕ αλλά και την πρόβλεψη και τον σχεδιασμό των μελλοντικών της καταστάσεων. Αυτό πρέπει να λαμβάνει χώρα υπό το πρίσμα του κεντρικού προγραμματισμού για την κάλυψη των τρεχουσών αλλά και των μελλοντικών αναγκών του αστικού πληθυσμού με την ελάχιστη δυνατή επιβάρυνση του οικοσυστήματος, Για να γίνει αυτό χρειάζονται ρεαλιστικά μοντέλα προσομοίωσης της ΑσΕ.

Παρά το γεγονός ότι η μοντελοποίηση της ΑσΕ έχει απασχολήσει την επιστημονική κοινότητα από τα μέσα του προηγούμενου αιώνα, δεν έχει αναπτυχθεί ένα κοινώς αποδεχτό πλαίσιο για την μοντελοποίηση ενός τέτοιου σύνθετου χώρο-χρονικού φαινομένου. Αντίθετα, αποτελεί ένα ανοιχτό επιστημονικό πεδίο με ιδιαίτερη ποικιλομορφία όσον αφορά τις μεθόδους και τις τεχνικές που εφαρμόζονται. Κεντρική θέση ανάμεσα στις διάφορες τεχνικές που έχουν προταθεί και εφαρμοστεί για την μοντελοποίηση της ΑσΕ κατέχουν οι τεχνικές Κυψελοειδών Αυτομάτων (ΚΑ). Τα μοντέλα αστικής επέκτασης βάση κυψελοειδών αυτομάτων (τα οποία χάριν συντομίας πλέον θα καλούνται Αστικά Κυψελοειδή Αυτόματα) μπορεί να είναι είτε αριθμητικά, είτε να εφαρμόζουν ποιοτικούς κανόνες. Η διαφορά εντοπίζεται στο ότι τα αριθμητικά αστικά ΚΑ εστιάζουν στην ακρίβεια των εκτιμήσεων και παράγουν αρκετά ακριβή αποτελέσματα. Αντίθετα, τα μοντέλα που εφαρμόζουν ποιοτικούς κανόνες (της μορφής “Εάν – Τότε”) παρουσιάζουν μικρότερη ακρίβεια αλλά περιγράφουν με πλέον κατανοητό τρόπο τους μηχανισμούς της ΑσΕ.

Τα ασαφή κυψελοειδή αυτόματα (ΑΚΑ) αποτελούν μια σχετικά πρόσφατη εξέλιξη και εφαρμόζουν μια υβριδική προσέγγιση. Η προσέγγιση αυτή παρέχει μια πλέον κατανοητή περιγραφή των μηχανισμών και των διαδικασιών της ΑσΕ που πηγάζει από την περιγραφική δύναμη της Λογικής της Ασάφειας (ΛΑ). Εν συγκρίσει ωστόσο με τα αριθμητικά αστικά ΚΑ, οι λιγοστές εφαρμογές τους υστερούν σε ακρίβεια. Επιπλέον, τα ΑΚΑ κληρονομούν δυο εγγενή μειονεκτήματα των αστικών ΚΑ. Ειδικότερα, αδυνατούν να προσομοιώσουν την ΑσΕ σε περιοχές που δεν

γειτνιάζουν με την αρχική αστική κάλυψη (leapfrog settlements) και δε περιλαμβάνουν μια θεώρηση του πραγματικού χρόνου στην διαδικασία της μοντελοποίησης και προσομοίωσης της ΑΣΕ. Γύρω από αυτά τα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν τα αστικά ΑΚΑ επικεντρώνονται τα ερευνητικά ερωτήματα της διατριβής που παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα.

1.1 Ερευνητικά Ερωτήματα

Η παρούσα διατριβή καλείται να δώσει απάντηση στο εξής κεντρικό ερευνητικό ερώτημα:

Πως μπορούμε να αναπτύξουμε ένα αξιόπιστο και σύναμμα ευέλικτο και προσαρμόσιμο πλαίσιο για την μοντελοποίηση της αστικής επέκτασης;

Στην πράξη ωστόσο, το γενικό αυτό ερώτημα μπορεί να εξειδικευτεί σε μια σειρά από ερωτήσεις, όπως:

Πως μπορούμε να εφαρμόσουμε παράλληλη συνδεσμολογία μεταξύ μεταβλητών χωρίς να έχουμε απώλεια πληροφορίας;

Πως μπορούμε να ορίσουμε τον πραγματικό χρόνο σε ένα αστικό κυψελοειδές αυτόματο;

Μπορεί να συνδυαστεί η πλέον ρεαλιστική και κατανοητή αναπαράσταση και περιγραφή των μηχανισμών της αστικής επέκτασης των ασαφών κυψελοειδών αυτομάτων με την αριθμητική απόδοση των δυαδικών αριθμητικών κυψελοειδών αυτομάτων;

Τι είδους τεχνικές παρεμβάσεις μπορεί να γίνουν για να προσδώσουν στα κυψελοειδή αυτόματα τη δυνατότητα να προσομοιώνουν την αστική επέκταση σε απομονωμένες περιοχές (δράση από απόσταση);

Η παρούσα διατριβή αποπειράται να δώσει ορισμένες απαντήσεις στα παραπάνω ερωτήματα ενώ ανάμεσα στους στόχους της, που περιγράφονται αναλυτικότερα στην επόμενη ενότητα, είναι να στοιχειοθετήσει τις απαντήσεις αυτές στα πλαίσια υπολογιστικής εφαρμογής με πραγματικά δεδομένα.

1.2 Αντικείμενο & Στόχοι

Αντικείμενο της διδακτορικής θέσης αποτελεί ο σχεδιασμός και η πειραματική εφαρμογή ενός αποδοτικού και προσαρμόσιμου πλαισίου μοντελοποίησης για την υπολογιστική προσομοίωση της ΑσΕ. Το πλαίσιο αυτό θα πρέπει να υποστηρίζει την λήψη αποφάσεων σε θέματα που σχετίζονται με τον αστικό σχεδιασμό και έμμεσα να επιτρέπει την περαιτέρω έρευνα για μια σειρά από αστικές μελέτες που απαιτούν μια ρεαλιστική εικόνα της εξέλιξης της αστικής διαμόρφωσης. Υπό αυτό το πρίσμα, το πλαίσιο μοντελοποίησης θα πρέπει να είναι σε θέση να:

- εξερευνεί και να αποτυπώνει τη δυναμική της ΑσΕ
- αναπαράγει ρεαλιστικά τα πρότυπα μεταβολής και να παρέχει αποδοτικές προσομοιώσεις του φαινομένου
- υποστηρίζει την αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων ανάπτυξης.

Σε τεχνικό επίπεδο ωστόσο, η υπολογιστική εφαρμογή του μοντέλου, θα πρέπει να επιτυγχάνει συγκεκριμένους στόχους, ειδικότερα να:

- παρέχει ακριβείς εκτιμήσεις για την μελλοντική αστική κάλυψη σε αντιστοιχία με τον πραγματικό χρόνο
- μπορεί να διαχειρισθεί τόσο ποιοτική όσο και ποσοτική πληροφορία υπό μορφή κανόνων ‘Εάν – Τότε’
- εφαρμόζει μια παράλληλη σύνδεση των κανόνων έτσι ώστε να είναι μπορούν να προστεθούν ή να αφαιρεθούν κανόνες χωρίς να επηρεάζεται ο πυρήνας της γνώσης
- περιγράφει τους μηχανισμούς του μοντέλου, την ροή της πληροφορίας, την επίδραση των εξωγενών παραμέτρων και τα αποτελέσματα με κατανοητό τρόπο
- διατηρεί μια ευέλικτη μορφή ώστε να μην υπόκειται σε (σημαντικούς) περιορισμούς δεδομένων

Για να επιτευχθούν οι παραπάνω στόχοι, στην υπολογιστική εφαρμογή του μοντέλου χρησιμοποιούνται τεχνικές κυψελοειδών αυτομάτων (Cellular Automata) που εφαρμόζουν μια ασαφή μηχανή μετάβασης (Fuzzy Engine). Μάλιστα, από τις αγγλικές λέξεις Cellular Automata Fuzzy Engine και χάριν συντομίας, στο υπόλοιπο κείμενο για την αναφορά στην υπολογιστική εφαρμογή του μοντέλου θα χρησιμοποιείται το αρκτικόλεξο CaFe.

1.3 Δομή & Περιεχόμενα

Η παρούσα διατριβή αναπτύσσεται σε εννέα κεφάλαια. Το κεφάλαιο 2 της διατριβής εστιάζεται στην αστική επέκταση ως φαινόμενο αλλά και ως πολυδιάστατο πρόβλημα αναδεικνύοντας την αναγκαιότητα αστικών μοντέλων. Ακολούθως, γίνεται μια εισαγωγή στα αστικά μοντέλα και περιγράφονται οι διαφορετικές θεωρητικές προσεγγίσεις τους, μια γενική κατηγοριοποίησή τους και οι σημαντικότερες τεχνικές και μέθοδοι που εφαρμόζουν.

Τα δυο επόμενα κεφάλαια εστιάζονται στις κύριες μεθόδους που εφαρμόζονται στο προτεινόμενο μοντέλο. Το κεφάλαιο 3 παρουσιάζει την Λογική της Ασάφειας. Ειδικότερα, στην πρώτη ενότητα παρουσιάζονται τα θεμέλια της Θεωρίας των Ασαφών Συνόλων ενώ στις επόμενες δύο ενότητες περιγράφεται η διασύνδεση με την Φυσική Γλώσσα και δίδεται το γενικό πλαίσιο εφαρμογής της Λογικής της Ασάφειας σε Ασαφή Συστήματα. Στη τελευταία ενότητα περιγράφονται συνοπτικά οι εφαρμογές της Λογικής της Ασάφειας για την μοντελοποίηση της αστικής επέκτασης.

Το κεφάλαιο 4 παρουσιάζει τα Κυψελοειδή Αυτόματα σαν μαθηματικές οντότητες αρχίζοντας με μια σύντομη εισαγωγή στην ιστορία τους. Ακολούθως, δίδεται ο μαθηματικός τους ορισμός και περιγράφονται τα βασικά στοιχεία και οι κατηγορίες τους. Η τελευταία ενότητα περιγράφει το θεωρητικό πλαίσιο διασύνδεσης μεταξύ των κυψελοειδών αυτομάτων και της λογικής της ασάφειας.

Το κεφάλαιο 5 περιλαμβάνει μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση των Αστικών Κυψελοειδών Αυτομάτων. Στη πρώτη ενότητα παρατίθενται τα στοιχεία που καθιστούν τα ΚΑ ενδεικνύμενες τεχνικές για την μοντελοποίηση της Αστικής Επέκτασης ενώ στις επόμενες δύο ενότητες αναφέρονται μερικά αντιπροσωπευτικά αστικά κυψελοειδή αυτόματα. Στην τέταρτη ενότητα αντιπαρατίθενται ενδεικτικοί δείκτες αριθμητικής προσαρμογής μερικών γνωστών αστικών μοντέλων ΚΑ.

Στο κεφάλαιο 6 περιγράφεται αναλυτικά το προτεινόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο μοντελοποίησης. Στη πρώτη ενότητα δίδονται συνοπτικά τα διαδοχικά στάδια εξέλιξης του ενώ ακολούθως περιγράφεται η θεώρηση της αστικής κάλυψης, του χώρου και του χρόνου. Στην ενότητα τρία αναλύεται η εσωτερική μεταβλητή *‘καταλληλότητα προς αστικοποίηση’*. Στην ίδια ενότητα περιγράφεται η διαδικασία εξαγωγής γνώσης και αναλύονται τα χαρακτηριστικά του ασαφούς συστήματος γνώσης που εφαρμόζεται. Έμφαση δίδεται στην χρονική μεταβλητότητα και στην παράλληλη συνδεσμολογία των κανόνων. Η τέταρτη ενότητα περιγράφει τον εξελιγμένο υβριδικό μηχανισμό Κυψελοειδών Αυτομάτων που εφαρμόζεται, τις χωρικές διεργασίες ανάπτυξης που ενσωματώνει και τα καινοτόμα τεχνικά χαρακτηριστικά του.

Στο κεφάλαιο 7 περιγράφεται η διαδικασία ανάπτυξης και εφαρμογής του προτεινόμενου μοντέλου CaFe χρησιμοποιώντας δεδομένα που περιγράφουν πραγματικές συνθήκες με την πρώτη

ενότητα να αναλύει την δομή του μοντέλου. Η δεύτερη ενότητα παρουσιάζει τα προπαρασκευαστικά στάδια της εφαρμογής και εστιάζεται στα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης και την συλλογή και προ-επεξεργασία των δεδομένων. Ακολούθως, οι ενότητες 3 και 4 περιγράφουν αντίστοιχα την δοκιμαστική ανάπτυξη του μοντέλου και την προσαρμογή του σε πραγματικές και γνωστές συνθήκες. Τέλος, οι ενότητες 5 και 6 εστιάζουν στην εφαρμογή του μοντέλου με σκοπό την εκτίμηση της μελλοντικής αστικής κάλυψης και τον υπολογισμό εναλλακτικών σεναρίων ανάπτυξης. Η διατριβή ολοκληρώνεται στο κεφάλαιο 8 όπου παρουσιάζονται τα συμπεράσματα για το σύνολο του μοντέλου ενώ προδιαγράφεται η δυνητική εξέλιξη του μεθοδολογικού πλαισίου.

Αστική Επέκταση & Αστικά Μοντέλα

Η Αστική Επέκταση (ΑσΕ) είναι η χωρική εκδήλωση του συμβιβασμού μεταξύ των προσδοκιών και των δυνατοτήτων του πληθυσμού που λαμβάνει χώρα σε ατομικό επίπεδο ενώ ως φαινόμενο αποτελεί μια από τις σημαντικότερες διαμορφωτικές διαδικασίες τόσο για το φυσικό όσο και για το ανθρωπογενές περιβάλλον. Καθώς οι πόλεις επεκτείνονται, είναι απαραίτητος ο έλεγχος της ΑσΕ και η σχεδιασμένη εξέλιξή της. Αυτό μπορεί να λάβει χώρα στα πλαίσια ενός διορατικού και αποδοτικού αστικού σχεδιασμού και την εφαρμογή των απαραίτητων μέτρων πολιτικής. Το παρόν κεφάλαιο εστιάζεται στην αστική επέκταση ως φαινόμενο και ως πολυδιάστατο πρόβλημα και αποτελεί μια εισαγωγή στα μοντέλα ΑσΕ.

2.1 Αστικοποίηση και Αστική Επέκταση

Με τον όρο ‘αστικοποίηση’ αναφερόμαστε στην διαδικασία κατά την οποία μια περιοχή μετατρέπεται από κυρίως αγροτική σε κυρίως αστική. Οι πληθυσμοί συσσωρεύονται μαζικά στα αστικά κέντρα στην αναζήτησή τους για καλύτερες συνθήκες αλλά και προοπτικές εργασίας και διαβίωσης λόγω αυξημένης συγκέντρωσης οικονομικών και πολιτιστικών δραστηριοτήτων. Ωστόσο, έτσι δημιουργείται ένας ατέρμονος κύκλος. Τα μεγάλα αστικά κέντρα αναδεικνύονται ως βασικές πηγές οικονομικής ανάπτυξης και κοινωνικής και πολιτιστικής εξέλιξης. Ως εκ τούτου, αυξάνονται τα κίνητρα των ανθρώπων να ζουν, να εργάζονται, να καταναλώνουν και να δημιουργούν μέσα στο αστικό περιβάλλον. Κατά συνέπεια νέοι πληθυσμοί προσελκύονται στις πόλεις και ο κύκλος συνεχίζεται.

Το έτος 2007 το 50% του παγκόσμιου πληθυσμού ζούσε σε πόλεις με πληθυσμό άνω των 20.000 κατοίκων όταν το 1950 το αντίστοιχο ποσοστό ήταν 30%. Υπολογίζεται δε, ότι σε παγκόσμιο επίπεδο, 60 εκατομμύρια ανθρώπων μετακινούνται κάθε χρόνο στα αστικά κέντρα, ενώ υπάρχει η

εκτίμηση ότι οι ρυθμοί αυτοί θα διατηρηθούν για τα επόμενα 30 χρόνια (Marshall 2007). Με αυτόν τον τρόπο, η πληθυσμιακή συσσώρευση 'πιέζει' τον αστικό χώρο από μέσα προς τα έξω αναγκάζοντας τον να επεκταθεί – προκαλώντας έτσι την *αστική επέκταση*.

Οι αλλαγές που συμβαίνουν στις οικονομικές και κοινωνικές δραστηριότητες της πόλης, ο νέος πληθυσμός που εγκαθίσταται και οι νέες δραστηριότητες που αναπτύσσονται οδηγούν σε μια αλλαγή των χρήσεων της γης, την κατασκευή νέων κτιρίων και την επέκταση των υποδομών ώστε να εξυπηρετούν τις ανάγκες του νέου πληθυσμού και των διαφόρων λειτουργιών της πόλης (Κομνηνός 1986). Η ΑσΕ όμως προκαλείται τόσο από την έλευση νέου πληθυσμού όσο και από την αύξηση του γηγενούς πληθυσμού. Σε κάθε περίπτωση, οι κάτοικοι επιθυμούν και αναζητούν να διαμένουν σε περιοχές που πληρούν ορισμένα κριτήρια, όπως ενδεικτικά:

- εύκολη προσβασιμότητα στους χώρους εργασίας
- παρουσία χώρων αστικού πρασίνου και πάρκων
- άνετο παρκινγκ και πρόσβαση στο δίκτυο συγκοινωνιών
- άνετη προσβασιμότητα σε υπηρεσίες και αγαθά
- χαμηλή εγκληματικότητα
- καλό κλίμα και περιβαλλοντικές συνθήκες

Βεβαίως όλα τα παραπάνω είναι μάλλον δύσκολο να εντοπισθούν στην ίδια περιοχή. Επιπλέον, όσο περισσότερα κριτήρια ικανοποιούνται τόσο αυξάνονται οι τιμές των ακινήτων και των ενοικίων. Ως εκ τούτου, η ΑσΕ μπορεί να περιγραφεί ως ο χωρικά αναφερόμενος συμβιβασμός ανάμεσα στις διαφορετικές ανάγκες και δυνατότητες του πληθυσμού.

Η ανάπτυξη μεγάλων αστικών κέντρων δημιουργεί νέες οικονομικές και κοινωνικές προοπτικές, ταυτόχρονα όμως προκαλεί και μια σειρά νέων προβλημάτων. Κατά έναν ειρωνικό τρόπο τα προβλήματα αυτά τείνουν να υπερκαλύπτουν τα αρχικά οφέλη σα να τηρείται η 'αρχή της φυγής προ της βίας'¹. Κάποια από τα προβλήματα έχουν 'αστικό' χαρακτήρα και παραμένουν εντός των 'τειχών'

¹ Αρχή της Χιμείας σύμφωνα με την οποία ένα κλειστό σύστημα τείνει να αναιρέσει την επίδραση μιας εξωγενούς παρέμβασης, στην περίπτωση της ΑσΕ π.χ. ένας νέος αυτοκινητόδρομος αρχικά θα διευκολύνει την κυκλοφορία σε μια περιοχή. Καθώς όμως η βελτιωμένη κυκλοφορία θα αποτελεί κίνητρο για τους κατοίκους να χρησιμοποιούν τον αυτοκινητόδρομο σύντομα η κυκλοφορία θα κορεσθεί και θα επανέλθει σε προηγούμενα επίπεδα.

της πόλης. Αυτά περιλαμβάνουν την υπέρ-συγκέντρωση πληθυσμού, τον κορεσμό των συγκοινωνιών, την κυκλοφοριακή συμφόρηση, την ηχορύπανση και την απώλεια ανοιχτών χώρων. Κάποια άλλα επηρεάζουν έναν πολύ ευρύτερο χώρο, όπως η ρύπανση της ατμόσφαιρας και η μεταβολή του μικροκλίματος, η υπερκατανάλωση των ενεργειακών αποθεμάτων και η καταστροφή των φυσικών πόρων.

Η ΑσΕ αποτελεί πλέον ένα παγκόσμιο φαινόμενο το οποίο είναι τόσο η αιτία όσο και το αποτέλεσμα ποικίλων οικονομικών, κοινωνικών και περιβαλλοντικών διαδικασιών. Είναι πλέον απαραίτητο η ΑσΕ να λαμβάνει χώρα με έναν βιώσιμο τρόπο, μεγιστοποιώντας τα οφέλη για τον αστικό πληθυσμό ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα το οικονομικό και περιβαλλοντικό κόστος. Προκειμένου να υπάρξει ένα λειτουργικό σχήμα διαχείρισης της ΑσΕ, οι επιστήμονες καλούνται να περιγράψουν τους ρυθμούς και τα πρότυπα των μεταβολών στην αστική κάλυψη σε ένα ευρύτερο χώρο-χρονικό πλαίσιο. Για να γίνει αυτό πρέπει να εντοπιστούν οι αιτίες που προκαλούν τις μεταβολές και να αποκτηθεί αντικειμενική γνώση γύρω από το φαινόμενο της ΑσΕ. Για τον σκοπό αυτό χρειάζονται ακριβή και ρεαλιστικά μοντέλα προσομοίωσης της ΑσΕ.

2.2 Μοντέλα Αστικής Επέκτασης

Ο Ιππόδαμος ο Μιλήσιος έζησε τον 5^ο αιώνα π.Χ και θεωρείται ο ‘πατέρας’ του αστικού σχεδιασμού (Burns 1976). Το ‘διαμαντένιο πλέγμα’ που σχεδίασε αποτελείται από ευθύγραμμους δρόμους που τέμνονται σχηματίζοντας γωνίες 45^ο και 135^ο και εφαρμόστηκε αρχικά στην αρχαία Μίλητο και σε πολλές άλλες πόλεις στο πέρασμα της ιστορίας (Paden 2001). Το σχέδιο αυτό προέβλεπε μεγάλα ακάλυπτα τμήματα γης χωρίς κάποια ιδιαίτερη χρήση, ώστε όταν αργότερα ο πληθυσμός αυξανόταν, οι εκτάσεις αυτές να μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν είτε για κατοικίες είτε για δημιουργία νέων τοπικών αγορών. Πρόκειται για το πρώτο μοντέλο ΑσΕ που συνέλαβε την ιδέα της διαδικασίας αστικοποίησης που πολύ αργότερα ονομάστηκε ως η μετατροπή μιας μονό-κεντρικής πόλης σε πολυκεντρική. Η σύγχρονη πραγματικότητα απαιτεί πλέον πολυσύνθετες αναλύσεις και ακριβείς διαδικασίες μοντελοποίησης. Ο σκοπός όμως παραμένει ο ίδιος: να καλυφθούν οι *μελλοντικές ανάγκες* της πόλης.

Η μοντελοποίηση παρέχει προσομοιώσεις και προβολές στο μέλλον υπό συγκεκριμένες υποθέσεις για να δώσει μια εκτίμηση του πώς μπορεί να μοιάζει το μέλλον (Ness & Low 2000). Ο όρος μοντελοποίηση αναφέρεται στην δημιουργία ενός αυστηρά ορισμένου αναλόγου της πραγματικότητας δια μέσου της αφαιρετικής διαδικασίας (Κουτσόπουλος 2002). Δεν υπάρχει ωστόσο κάποιο σαφές πλαίσιο για την μοντελοποίηση ενός τέτοιου χώρο-χρονικού φαινομένου όπως η ΑσΕ. Αυτό οφείλεται στην εγγενή χωρική και χρονική ετερογένεια, καθώς επίσης και στην ετερογένεια σε

επίπεδο λήψης αποφάσεων (Cheng & Masser 2003), που προκύπτει από την υποκείμενη κοινωνικό-οικονομική και οικολογική ετερογένεια. Η πολύ-επίπεδη αυτή ετερογένεια δεν επιτρέπει τον καθορισμό ενός γενικού και ταυτόχρονα εφαρμόσιμου και αξιόπιστου πλαισίου για την μελέτη και μοντελοποίηση της αστικής επέκτασης. Επιπλέον, η γνώση μας για τις διαφορετικές λειτουργικές κλίμακες του αστικού τύπου, των αστικών διαδικασιών και την αλληλεπίδραση των διαφόρων κλιμάκων είναι ελλιπής (Dietzel et al. 2005a), συχνά, ανάμεσα στα άλλα, εξαιτίας της έλλειψης χωρικά λεπτομερών δεδομένων (Chrysoulakis et al. 2004).

Από την πρώτη προσέγγιση του von Thunen το 1826 (1826) και το συγκεντρικό μοντέλο του Burgess το 1925 (Campbell 1998) μέχρι σήμερα, η επιστημονική κοινότητα προσπαθεί να αποκτήσει όλο και καλύτερη αντίληψη της ΑσΕ. Για να εντοπιστούν τα αίτια της και να περιγραφούν τα χωρικά πρότυπα με τα οποία εκδηλώνεται, έχει αναπτυχθεί και εφαρμοσθεί ένας μεγάλος αριθμός υπολογιστικών μοντέλων. Μέσα από τις εφαρμογές διάφορων μοντέλων έχει μελετηθεί και αναλυθεί συνολικά μια μεγάλη λίστα από παραμέτρους. Τέτοιες είναι η δημογραφία, η τεχνολογία, η οικονομία, διάφοροι πολιτικοί και κοινωνικοί θεσμοί αλλά και πολιτιστικές τάσεις και πεποιθήσεις (Agarwal et al. 2000). Τα διάφορα μοντέλα ΑσΕ εφαρμόζουν ένα μεγάλο εύρος διαφορετικών μεθόδων και τεχνικών. Εντούτοις, όλα συγκαταλέγονται σε έναν μικρό σχετικά αριθμό θεωρητικών προσεγγίσεων και διαδραματίζουν τον ίδιο ρόλο.

2.2.1 Ο Ρόλος των Αστικών Μοντέλων

Με την εφαρμογή μοντέλων, μπορούμε να περιγράψουμε πολύπλοκα συστήματα με απλό και κατανοητό τρόπο και να εκτιμήσουμε τις επιπτώσεις διαφόρων παρεμβάσεων στα συστήματα αυτά (Liu 2009). Όταν κανείς χρησιμοποιεί ένα μοντέλο πρέπει να λαμβάνει υπόψη ότι αυτό έχει σχεδιαστεί για να δίδει απαντήσεις σε συγκεκριμένες ερωτήσεις, ενώ παράλληλα πρέπει να αναλογιστεί και όλες τις ερωτήσεις που αδυνατεί να απαντήσει (Meadows et al 2005). Επίσης δεν πρέπει να λησμονεί ότι τα μοντέλα έχουν υποδηλωτικό ρόλο (Liu 2009), δηλαδή δεν αποτυπώνουν το μέλλον, απλά περιγράφουν μια ή περισσότερες δυνητικές καταστάσεις του.

Για να είναι χρήσιμο ένα μοντέλο δεν αρκεί να παρέχει ακριβείς εκτιμήσεις. Πρέπει επιπλέον να περιγράφει τα αντικείμενα, τις σχέσεις, τις αλληλεπιδράσεις και τις υποθέσεις με έναν ανοιχτό, εμφανή και κατανοητό τρόπο. Έτσι ώστε τα αποτελέσματα και οι μηχανισμοί του να μπορούν να αξιολογηθούν από εμπειρογνώμονες (Ness & Low 2000) και να βελτιωθούν. Η χρησιμότητα τόσο των αποτελεσμάτων όσο και της γνώσης που παράγει ένα μοντέλο είναι εξίσου σημαντική με την συνέπειά τους ως προς την πραγματικότητα. Έτσι μπορεί αφενός να εκτιμήσει την μελλοντική εξέλιξη ενός συστήματος και αφετέρου να αποκαλύψει την δομή και τους μηχανισμούς του.

Η χρησιμότητα των μοντέλων ΑσΕ δεν εξαντλείται στην παραγωγή μεμονωμένων εκτιμήσεων για το μέλλον. Αντίθετα, ο ουσιαστικός ρόλος των μοντέλων ΑσΕ εντοπίζεται στην δυνατότητα να

αξιολογήσουν διαφορετικές εξωγενείς παρεμβάσεις και να εκτιμήσουν την επίδρασή τους. Ο ουσιαστικός ρόλος των μοντέλων ΑσΕ είναι να προετοιμάσει τις πόλεις για τις μελλοντικές εξελίξεις, να καθοδηγεί και όχι να αντιδρά εκ των υστέρων.

2.2.2 Θεωρητικές Προσεγγίσεις Μοντελοποίησης

Κάθε μοντέλο ΑσΕ διαφοροποιείται από τα άλλα ως προς έναν μικρό ή μεγάλο αριθμό χαρακτηριστικών. Αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν το θεωρητικό και τεχνικό υπόβαθρο, το πλήθος των κατηγοριών χρήσης γης και των παραμέτρων που λαμβάνονται υπόψη, την χωρική και χρονική κλίμακα, τις μεθόδους προσομοίωσης και βαθμονόμησης που χρησιμοποιούνται κ.α. Υπάρχει τέτοια ποικιλομορφία στα παραπάνω χαρακτηριστικά που είναι ιδιαίτερα δύσκολο να θεωρηθούν σαφείς διακριτές κατηγορίες. Ακόμα ποιο δύσκολο είναι να σχεδιαστεί μια αναλυτική και πλήρης κατηγοριοποίηση των μοντέλων ΑσΕ βάση όλων των χαρακτηριστικών τους. Εντούτοις, χωρίς βλάβη της γενικότητας, τα περισσότερα αστικά μοντέλα μπορούν να ενταχθούν σε μια από τις παρακάτω θεωρητικές προσεγγίσεις (Liu 2009):

- Η Αστική Οικολογική Προσέγγιση (Urban Ecological Approach) διαπραγματεύεται την ανθρώπινη συμπεριφορά υπό το πρίσμα βιολογικών/οικολογικών κανόνων, όπως ο ανταγωνισμός, η επιλογή, η διαδοχή και η επικράτηση.
- Η Κοινωνικό-Φυσική Προσέγγιση (Social Physical Approach) βασίζεται στην θεώρηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των ανθρώπων στον χώρο. Σε αναλογία με τον νόμο της Βαρύτητας του Νεύτωνα, τα μοντέλα βαρύτητας (gravity models), όπως αλλιώς ονομάζονται, υποθέτουν ότι η κίνηση στον χώρο των ανθρώπινων δραστηριοτήτων είναι ανάλογη με την 'μάζα' των δραστηριοτήτων στον χώρο και αντιστρόφως ανάλογη με το κόστος της μετακίνησης.
- Η Νέο-κλασική Προσέγγιση (Neoclassical Approach) θεωρεί την ΑσΕ και την αστική ανάπτυξη ως αμιγώς οικονομικά φαινόμενα που καθορίζονται πλήρως από την ζήτηση και την προσφορά για διάφορα μεγέθη, όπως για παράδειγμα η απόσταση της κατοικίας από το ιστορικό κέντρο της πόλης.
- Η Προσέγγιση Συμπεριφοράς (Behavioral Approach) θεωρεί ότι κάθε άτομο θα επιδιώξει το ίδιο όφελος και εστιάζει στα κίνητρα της συμπεριφοράς των ανθρώπων στα πλαίσια του αστικού περιβάλλοντος και στην διαδικασία λήψης αποφάσεων σε ατομικό ή οικογενειακό επίπεδο.
- Η Συστημική Προσέγγιση (Systems Approach) αντιμετωπίζει την πόλη σαν ένα αστικό σύστημα που αποτελείται από έναν αριθμό στοιχείων και υποσυστημάτων τα οποία μπορεί να

περιλαμβάνουν την διαθέσιμη γη, τον πληθυσμό, την εργασία, τις υποδομές, τις υπηρεσίες κ.α. που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους μέσω κοινωνικοοικονομικών και χωρικών συσχετίσεων.

2.2.3 Κατηγοριοποιήσεις Μοντέλων Αστικής Επέκτασης

Υπάρχει μια πληθώρα διαφορετικών τυπολογιών χωρικών μοντέλων σε διάφορα επίπεδα τα οποία δεν είναι πάντα ευδιάκριτα και ξένα μεταξύ τους. Παρατηρείται ωστόσο μια σχετική συμφωνία στο ότι μια πρωταρχική και γενική κατηγοριοποίηση μπορεί να γίνει βάση του πόσο κοντά είναι στην πραγματικότητα (Thomas & Hugget 1980, Κουτσόπουλος 2002, Liu 2009). Μια θεώρηση (Κουτσόπουλος 2002), περιλαμβάνει το τρίπτυχο εικονικά, αναλογικά και συμβολικά ή μαθηματικά μοντέλα. Σε αυτήν την θεώρηση, τα εικονικά μοντέλα αποτελούν αντίγραφο των πραγματικών αντικειμένων μόνο ως προς την κλίμακα ενώ στα αναλογικά μοντέλα μετασχηματίζονται και οι ιδιότητες των αντικειμένων. Τέλος, στα συμβολικά ή μαθηματικά μοντέλα οι ιδιότητες της πραγματικότητας μετασχηματίζονται σε αριθμούς και εξισώσεις.

Ακόμη και σε αυτόν τον θεμελιώδη διαχωρισμό όμως δεν υπάρχει απόλυτη συμφωνία. Μια άλλη θεώρηση (Thomas & Hugget 1980, Liu 2009) ενσωματώνει τα εικονικά και τα αναλογικά μοντέλα στην ίδια κατηγορία, στα μοντέλα υπό κλίμακα. Επιπλέον, διαχωρίζει τα συμβολικά μοντέλα από τα μαθηματικά μοντέλα θεωρώντας ότι τα συμβολικά μοντέλα αναπαρίστανται διαγραμματικά ή με λεκτικούς όρους. Συμφωνία ωστόσο επιτυγχάνεται και πάλι όσον αφορά στο ότι τα μαθηματικά μοντέλα, είναι τα πλέον χρήσιμα παρά το αυξημένο επίπεδο αφαίρεσής. Τα μαθηματικά μοντέλα και πιο συγκεκριμένα τα μαθηματικά χωρικά μοντέλα, υπόκεινται σε μια περεταίρω αν και αρκετά γενική κατηγοριοποίηση (Tobler 1979). Χρησιμοποιώντας τον συμβολισμό $g(t,i,j)$ για την τιμή μια μεταβλητής στην τοποθεσία i,j την χρονική στιγμή t , η κατηγοριοποίηση του Tobler είναι η εξής:

- Ανεξάρτητο Μοντέλο (independent model) - το $g(t+\Delta t,i,j)$ δε σχετίζεται με το $g(t,i,j)$.
- Συναρτησιακά ή Λειτουργικά Εξηρημένο Μοντέλο (functionally dependent model) - η νέα τιμή σε μια περιοχή εκφράζεται ως συνάρτηση της προηγούμενης κατάστασης

$$g(t+\Delta t,i,j) = f(g(t,i,j))$$
- Ιστορικό Μοντέλο (historical model) - η νέα τιμή σε μια περιοχή εκφράζεται ως συνάρτηση αρκετών προηγούμενων καταστάσεων

$$g(t+\Delta t,i,j) = f(g(t,i,j), g(t-\Delta t,i,j), g(t-2\Delta t,i,j), \dots , g(t-n\Delta t,i,j))$$
- Πολυμεταβλητό Μοντέλο (multivariate model) - η νέα τιμή σε μια περιοχή εξαρτάται από άλλες μεταβλητές στην ίδια περιοχή

$$g(t+\Delta t,i,j) = f(g(t,i,j), u(t,i,j), v(t-\Delta t,i,j), \dots , z(t,i,j))$$
- Γεωγραφικό Μοντέλο (geographical model) - η νέα τιμή σε μια περιοχή εκφράζεται ως συνάρτηση των προηγούμενων καταστάσεων των περιοχών που ανήκουν σε μια

προκαθορισμένη γειτονιά N

$$g(t+\Delta t, i, j) = f(g(t, i, j) / \forall i, j \in N)$$

2.2.4 Τεχνικές και Μέθοδοι Μοντελοποίησης

Ανεξαρτήτως σε ποια από τις γενικές κατηγορίες ανήκει ένα μοντέλο ΑΣΕ, υπάρχει μια ποικιλία τεχνικών και μεθόδων που μπορούν να εφαρμοσθούν. Η δημιουργία ενός πλήρους καταλόγου που να περιλαμβάνει όλες τις τεχνικές που έχουν προταθεί είναι ένα σχετικά δύσκολο έργο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι υπάρχουν πολλές κατηγοριοποιήσεις στη βιβλιογραφία οι οποίες είναι συχνά επικαλυπτόμενες. Επιπροσθέτως, υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός υβριδικών μοντέλων που συνδυάζουν διαφορετικές τεχνικές, δυσχεραίνοντας έτσι την σαφήνεια της ταξινόμησής τους. Παρόλα αυτά, παρακάτω περιγράφονται μερικές γενικές και επικαλυπτόμενες κατηγορίες τεχνικών και μεθόδων όπως αυτές προκύπτουν από τις εργασίες των Parker (2002), Berling-wolff & Wu (2004), Waddel (2004), Koomen & Stilwell (2007) και Haase & Schwarz (2009).

- Μοντέλα Χωρικής Αλληλεπίδρασης (Spatial Interaction) - Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει μερικά από τα πρώτα αστικά μοντέλα και ουσιαστικά τα μοντέλα βαρύτητας. Οι έννοιες της κλίμακας και της απόστασης εισάγονται στην περιγραφή των χωρικών συσχετίσεων αλλά η επίδρασή τους είναι σχετική. Η κεντρική ιδέα είναι ότι η αλληλεπίδραση δυο οντοτήτων είναι ανάλογη του μεγέθους τους και αντιστρόφως ανάλογη της μεταξύ τους απόστασης. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκει το μοντέλο του Lowry (Lowry 1964), το MEPLAN (Abraham 1998) και το Tranus (Vichiensan et al. 2003).
- Χωρικά Οικονομικά/Οικονομετρικά Μοντέλα και Χωρικά Μοντέλα Εισροών-Εκροών (Spatial Economic/Econometric Models & Spatial Input/Output) - Τα μοντέλα αυτής της κατηγορίας εστιάζονται κατά βάση στην επίδραση των γεω-δημογραφικών παραγόντων στην αγορά γης εφαρμόζοντας κατά καιρούς διάφορες οικονομικές θεωρίες. Σε αυτήν την κατηγορία εντάσσεται και το κλασσικό μοντέλο του von Thunen (1826). Τα μοντέλα Εισροών-Εκροών βασίζονται επίσης στην οικονομική θεωρία. Διαφοροποιούνται ωστόσο καθώς δίδουν έμφαση στην κατανομή της κατανάλωσης και της παραγωγής σε προκαθορισμένες περιοχές/ζώνες και στις μετακινήσεις αγαθών ανάμεσα στις ζώνες αυτές. Αντιπροσωπευτικό δείγμα της κατηγορίας αυτής είναι το μοντέλο Land Use Scanner (Kuhlman et al. 2005).
- Αριθμητικά Μοντέλα και Μοντέλα Γραμμικού και Μη Γραμμικού Προγραμματισμού (Equation based & Linear and Non-Linear Programming) - Τα περισσότερα μοντέλα εφαρμόζουν μια ποσοτική διαχείριση της πληροφορίας. Τα μοντέλα αυτής της κατηγορίας όμως, εκφράζουν τις θεωρητικές συσχετίσεις μεταξύ μεγεθών ως μαθηματικές συναρτήσεις. Αντιπροσωπευτικό δείγμα της κατηγορίας αυτής είναι η εργασία των Sklar και Costanza

- (1991). Μια υποκατηγορία αυτών μοντέλων βασίζεται στην θεωρία βελτιστοποίησης και τον γραμμικό προγραμματισμό. Σε αυτήν την περίπτωση επιδιώκεται η βελτιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης ωφέλειας παρουσία ορισμένων αριθμητικών περιορισμών. Ενδεικτικά στα μοντέλα γραμμικού προγραμματισμού εντάσσονται τα μοντέλα Polis (Prastacos 1985, 1986a & 1986b) και LUMASS (Herzig 2008).
- **Συστημικά Μοντέλα / Δυναμικά Συστήματα (System Models / System Dynamics)** - Τα μοντέλα αυτά περιγράφουν το αστικό σύστημα με όρους αποθεμάτων, ροών και ανάτροφοδοτικών μηχανισμών ως προς τις πληροφορίες, τις πρώτες ύλες και την ενέργεια. Οι μεταβολές περιγράφονται σε διακριτό χρόνο και καταλήγουν σε ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων με γνωστές αρχικές συνθήκες. Ενδεικτική εργασία σε αυτήν την κατηγορία αποτελεί το μοντέλο του Forester (1969) και του Sanders (2004).
 - **Έμπειρα Συστήματα και Μοντέλα βάση Γνώσης (Expert Systems & Knowledge based Models)** - Η κατηγορία αυτή εστιάζεται στην περιγραφή της ΑσΕ αναλύοντάς την σε έναν αριθμό φυσικών διαδικασιών. Η γνώση αναπαρίσταται υπό μορφή κανόνων και συνήθως είναι εμπειρική. Μπορεί ωστόσο να συνδυαστεί με πιθανοθεωρητικές τεχνικές δίδοντας στην ποιοτική γνώση μια ποσοτική διαμόρφωση. Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί ένας μεγάλος αριθμός μεθόδων για την εξαγωγή γνώση τέτοιας μορφής από δεδομένα, επεκτείνοντας έτσι την χρηστικότητα των μοντέλων αυτών. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα μοντέλα CLUE (Verburg et al. 2002) και WhatIf? (Klosterman 1999).
 - **Μοντέλα Μίκρο-Προσομοίωσης (Micro-simulation Models)** - Η Μίκρο-προσομοίωση αναφέρεται στην προσομοίωση των διαδικασιών σε μικροσκοπικό επίπεδο. Τα μοντέλα ΑσΕ αυτής της κατηγορίας εστιάζονται στις ομάδες των ατόμων που επηρεάζουν τις μεταβολές των χρήσεων γης και προσπαθούν να καταγράψουν τον τρόπο με τον οποίο λαμβάνουν αποφάσεις. Μπορούν να προσομοιώσουν ιδιαίτερα σύνθετες συμπεριφορές αλλά απαιτούν παράλληλα έναν μεγάλο όγκο από λεπτομερή δεδομένα. Πλέον ενδεικτικό της κατηγορίας αυτής είναι το μοντέλο UrbanSim (Alberti & Waddell 2000, Waddell 2004) και το μοντέλο Dortmund (Wegener 1985).
 - **Ασαφή Μοντέλα (Fuzzy Models)** - Τα ασαφή μοντέλα χρησιμοποιούν βάση γνώσης υπό μορφή κανόνων όπως τα έμπειρα μοντέλα και τα μοντέλα βάσης γνώσης. Διαφοροποιούνται ωστόσο ως προς την διαχείριση των δεδομένων και της πληροφορίας η οποία λαμβάνει χώρα στα πλαίσια της λογικής της ασάφειας. Ειδικότερα, παρέχουν μια ανεπτυγμένη σύνδεση με την φυσική γλώσσα και υποστηρίζουν την άμεση χρήση της εμπειρικής γνώσης ενώ επιπλέον επιτρέπουν την αμφίδρομη σύνδεση ποιοτικών και ποσοτικών μεγεθών. Αποτελούν μια σχετικά σύγχρονη εξέλιξη καθώς το πρώτο ασαφές μοντέλο είναι αυτό του Wu (Wu 1996, 1998).

- Μοντέλα Κυψελοειδών Αυτομάτων (Cellular Automata based Models) - Τα μοντέλα κυψελοειδών αυτομάτων ή κυψελοειδή μοντέλα προσεγγίζουν την εξέλιξη ενός συστήματος βάση τοπικών συσχετίσεων. Παρουσιάζουν ομοιότητες με τα δυναμικά συστήματα αλλά διαφοροποιούνται σε δύο σημεία. Τα κυψελοειδή αυτόματα είναι εγγενώς χωρικές οντότητες και παρέχουν μια άμεση σύνδεση μεταξύ μικροσκοπικών και μακροσκοπικών μεγεθών. Τα μοντέλα κυψελοειδών αυτομάτων αποτελούν ένα μεγάλο και σημαντικό κομμάτι των σύγχρονων μοντέλων ΑΣΕ. Ενδεικτικά μοντέλα της κατηγορίας είναι το Sleuth (Clarke et al. 1997, Herold et al. 2002, Dietzel & Clarke 2004, Dietzel et al. 2005a & 2005b) και το Cage (Blecic et al. 2004).
- Μοντέλα Πρακτόρων και Συστήματα Πολλαπλών Πρακτόρων (Agent based Models & Multi-Agent Systems) - Η κατηγορία αυτή είναι μια από τις πιο πρόσφατες εξελίξεις στα μοντέλα ΑΣΕ. Τα συστήματα αυτά προσομοιώνουν την δυναμική συμπεριφορά μεμονωμένων ατόμων – πρακτόρων – και εστιάζονται στο πως κάθε μονάδα αντιλαμβάνεται το περιβάλλον της και πως αλληλεπιδρά με άλλα άτομα. Υπάρχουν κοινά σημεία με τα μοντέλα μικρο-προσομοίωσης αλλά διαφοροποιούνται ως προς την αυτονομία των μονάδων. Αυτό σημαίνει ότι δυο πράκτορες που ανήκουν στην ίδια κατηγορία ατόμων μπορεί να λάβουν διαφορετικές αποφάσεις. Στην πράξη, οι τεχνικές Πολλαπλών Πρακτόρων συνήθως συνδυάζονται με μεθόδους κυψελοειδών αυτομάτων με αντιπροσωπευτικό παράδειγμα το μοντέλο Obeus (Benenson & Kharbash, 2006).

Οι παραπάνω κατηγορίες είναι ενδεικτικές των τάσεων που έχουν παρατηρηθεί στα μοντέλα ΑΣΕ και είναι εν γένει επικαλυπτόμενες. Στην πράξη τα περισσότερα μοντέλα εφαρμόζουν κάποιον συνδυασμό τεχνικών και κατά συνέπεια ανήκουν σε παραπάνω από μια κατηγορίες. Με αυτόν τον τρόπο προσπαθούν να συνδυάσουν τα πλεονεκτήματα των αρχικών τεχνικών αλλά και να περιορίσουν τα μειονεκτήματά τους. Σε αυτήν την κατεύθυνση κινείται και η παρούσα διατριβή που αποπειράται να συνδυάσει την υπολογιστική δύναμη των κυψελοειδών αυτομάτων με την περιγραφική δυνατότητα της λογικής της ασάφειας και να περιορίσει ορισμένες αδυναμίες των προηγούμενων προσεγγίσεων. Οι βασικές αυτές τεχνικές που θα χρησιμοποιηθούν περιγράφονται στα δύο επόμενα κεφάλαια.

Η Λογική της Ασάφειας

Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει την Λογική της Ασάφειας (ΛΑ). Ειδικότερα, στην πρώτη ενότητα παρουσιάζονται τα θεμέλια της Θεωρίας των Ασαφών Συνόλων (ΘΑΣ) ενώ στις επόμενες δύο ενότητες περιγράφεται η διασύνδεση με την Φυσική Γλώσσα και δίδεται το γενικό πλαίσιο εφαρμογής της Λογικής της Ασάφειας σε Ασαφή Συστήματα. Στην τελευταία ενότητα περιγράφονται συνοπτικά οι εφαρμογές της Λογικής της Ασάφειας για την μοντελοποίηση της ΑΣΕ.

Η ΛΑ προτάθηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1970 από τον Lofti Zadeh (1975) ως μια λογική αιτιολόγησης πολλαπλών τιμών (multi-valued logic) και βασίζεται στην Θεωρία των Ασαφών Συνόλων. Η ΛΑ μπορεί να θεωρηθεί ως γενίκευση της δυαδικής λογικής. Διαχειρίζεται την έννοια της μερικής αλήθειας ανάμεσα στο απολύτως αληθές και στο απολύτως ψευδές και εισαγάγει μια ομαλή μετάβαση από το ένα άκρο στο άλλο. Χρησιμοποιείται για να εκφράσει μαθηματικά την αβεβαιότητα, την αοριστία και την ανακρίβεια που παρατηρείται στον πραγματικό κόσμο. Οι ιδιότητες αυτές μπορεί να ενυπάρχουν σε ορισμούς, περιγραφές και συσχετίσεις μεγεθών, σε δεδομένα και στην έκφραση φυσικών ή τεχνητών περιορισμών. Το γεγονός ωστόσο ότι τα μαθηματικά συχνά εκλαμβάνονται ως συνώνυμα με την αριθμητική ακρίβεια, έχει προκαλέσει την αμφισβήτηση της χρησιμότητας της ΛΑ, τόσο σε επιστημονικό όσο και φιλοσοφικό επίπεδο (Mamdani 1976).

Έτσι δημιουργείται η λαθεμένη εντύπωση ότι η ΛΑ εισαγάγει αβεβαιότητα στην διαδικασία της μοντελοποίησης επιφέροντας ανακρίβεια στα αποτελέσματα. Στην πραγματικότητα, απλά παρέχει τα κατάλληλα εργαλεία για να μοντελοποιηθεί η εγγενής αβεβαιότητα που υπάρχει στον πραγματικό κόσμο, η οποία υπό άλλες συνθήκες απλά θα παραλειπόταν. Ειδικότερα, στην Ελληνική γλώσσα, η ΛΑ συχνά καλείται Ασαφής Λογική, η οποία είναι μια μάλλον ατυχής ονομασία που διαστρεβλώνει την ουσία της ΛΑ. Δεν υπάρχει τίποτα το ασαφές στο λογικό πλαίσιο ή την άλγεβρα της ΛΑ, η ασάφεια εντοπίζεται αποκλειστικά και μόνο ως ιδιότητα των δεδομένων, της πληροφορίας και της γνώσης που διαχειρίζεται.

Τα κύρια πλεονεκτήματα της ΛΑ εντοπίζονται στην ευχέρεια αναπαράστασης της γνώσης υπό μορφή κανόνων, τους μηχανισμούς αιτιολόγησης με λεκτικές μεταβλητές και την δυνατότητα να προσεγγίζει σύνθετα μη-γραμμικά φαινόμενα μέσω απλών μοντέλων (Chen & Linkens 2004). Επιπλέον, η ΛΑ παρουσιάζεται λιγότερο ευαίσθητη σε σφάλματα των δεδομένων ή σε ελλιπή δεδομένα σε σχέση με την κλασσική δυαδική προσέγγιση (Ashley & Jankowski 2005).

3.1 Θεωρία Ασαφών Συνόλων

Η Θεωρία των Ασαφών Συνόλων παρουσιάστηκε από τον Zadeh το 1965 στο άρθρο *'Fuzzy Sets'* (Zadeh 1965) και διαπραγματεύεται την χρήση συνόλων που δεν είναι εφικτό να ορισθούν αυστηρώς μαθηματικά στην διαδικασία της αιτιολόγησης και της συμπερασματολογίας. Ενδεικτικά παραδείγματα τέτοιων συνόλων που αναφέρονται στο ίδιο άρθρο είναι το *'σύνολο των όμορφων γυναικών'* και το *'σύνολο των ψηλών ανθρώπων'*. Δέκα χρόνια αργότερα παρουσίασε ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο συλλογιστικής με ακρογωνιαίο λίθο τα ασαφή σύνολα. Το πλαίσιο αυτό έδωσε ιδιαίτερη έμφαση στην αναπαράσταση και την διαχείριση ασαφούς πληροφορίας αλλά και στην διασύνδεση με την φυσική γλώσσα και τις λεξιλογικές εκφράσεις.

3.1.1 Ασαφή Σύνολα

Η έννοια του συνόλου είναι θεμελιώδης για το οικοδόμημα της επιστήμης των μαθηματικών και κατ' επέκταση των υπολοίπων θετικών επιστημών. Στην κλασσική θεωρία συνόλων, υπό το αξίωμα της διχοτομίας, ένα στοιχείο x ανήκει σε ένα σύνολο A και ισοδύναμα δεν ανήκει στο συμπληρωματικό του A^c . Αντίστοιχα, ένα στοιχείο x αν δεν ανήκει σε ένα σύνολο A τότε ισοδύναμα ανήκει στο συμπληρωματικό του A^c . Σε αυτή τη περίπτωση, η συμμετοχή σε ένα σύνολο εκφράζεται με μια δυική μεταβλητή συμμετοχής που λαμβάνει τις τιμές 0 και 1 (Kirschfink 1999). Σε πολλές περιπτώσεις ωστόσο, η κλασσική δυική συνάρτηση συμμετοχής είναι περιοριστική (Heikkila et al. 2002) και μπορεί να είναι μειονέκτημα όταν ο στόχος είναι η μοντελοποίηση πολύπλοκης συμπεριφοράς ανάμεσα στο 0 και το 1 (Witlox & Derudder 2005).

Στην ΛΑ, η συμμετοχή ενός αντικειμένου σε ένα σύνολο μπορεί να εμπεριέχει αβεβαιότητα. Κατά συνέπεια, ένα αντικείμενο είναι δυνατόν να ανήκει μερικώς σε κάποιο ασαφές σύνολο και συγχρόνως να ανήκει και στο συμπληρωματικό του. Ο Zadeh πρότεινε την άρση της ιδιότητας της διχοτομίας ως αξιωματική αρχή και την χρήση συνεχών συναρτήσεων συμμετοχής ώστε η μετάβαση από την ιδιότητα μέλους στην απουσία αυτής να είναι βαθμιαία. Αυτό επιτρέπει να συγκεραστούν έννοιες, οι οποίες στα πλαίσια της δυαδικής λογικής θα έπρεπε να αντιμετωπιστούν σαν ξένες μεταξύ

τους. Η αρχή της διχοτομίας ωστόσο δεν καταργείται ολοκληρωτικά, απλά δεν αποτελεί εξορισμού ιδιότητα όλων των ασαφών συνόλων. Υπό αυτήν την θεώρηση, τα κλασσικά δυαδικά σύνολα μπορούν να χαρακτηριστούν ως ασαφή σύνολα με δυική ασυνεχή συνάρτηση συμμετοχής. Ανάλογα με την ασαφή μεταβλητή που περιγράφουν, είναι χρήσιμο να αναφέρουμε τρεις βασικές περιπτώσεις και τις αντίστοιχες μορφές ασαφών συνόλων:

- ‘Κλασσικά’ ασαφή σύνολα ή απλά ασαφή σύνολα² – η ασαφής μεταβλητή αναφέρεται σε μετρήσιμη ποσοτική πληροφορία η οποία περιγράφεται από ένα πλήθος διατεταγμένων επικαλυπτόμενων ασαφών συνόλων, π.χ. θερμοκρασία ή ηλικία. Η συσχέτιση μεταξύ της αριθμητικής πληροφορίας και της συμμετοχής σε ένα ή παραπάνω ασαφή σύνολα είναι αμφίδρομη και περιγράφεται πλήρως από την αριθμητική παράσταση της συνάρτησης συμμετοχής.
- Ασαφή σύμβολα – η ασαφής μεταβλητή διαχειρίζεται διατεταγμένη ποιοτική πληροφορία η οποία περιγράφεται από ένα πλήθος πιθανά επικαλυπτόμενων ασαφών συμβόλων, π.χ. ζέστη ή ικανότητα για άθληση. Δεν υφίσταται συσχέτιση μεταξύ της συμμετοχής σε κάποιο σύνολο και αριθμητικής πληροφορίας. Εντούτοις, συναρτήσεις συμμετοχής μπορεί να οριστούν εμπειρικά ή ακόμα και αυθαίρετα προκειμένου να καθορίσουν την μορφή και κατ’ επέκταση την διάταξη και επικάλυψη των ασαφών συμβόλων.
- Ασαφή μονο-σύνολα (singletons) – η ασαφής μεταβλητή διαχειρίζεται μη βαθμωτή ποιοτική πληροφορία η οποία περιγράφεται από ένα πλήθος μη επικαλυπτόμενων μονό-συνόλων, π.χ. χρώμα ή σχήμα ενός αντικειμένου. Δεν ορίζεται συνάρτηση συμμετοχής, ωστόσο ένα αντικείμενο μπορεί να ανήκει σε παραπάνω από ένα μονοσύνολο με τον βαθμό συμμετοχής να ορίζεται συνήθως εμπειρικά.

3.1.2 Συναρτήσεις Συμμετοχής

Στις περιπτώσεις που οι ασαφείς μεταβλητές διαχειρίζονται ποσοτική πληροφορία, η μορφή των ασαφών συνόλων καθορίζεται πλήρως από την συνάρτηση συμμετοχής (membership function). Αν και η συνάρτηση συμμετοχής μπορεί να έχει οποιαδήποτε μορφή, στην πράξη, χρησιμοποιούνται

² Τα περισσότερα άρθρα της σχετικής βιβλιογραφίας δεν αναφέρουν τις υπόλοιπες κατηγορίες ασαφών συνόλων και για αυτό συνήθως ο όρος ‘ασαφή σύνολα’ αναφέρεται στην κατηγορία που εδώ περιγράφεται ως ‘κλασσικά ασαφή σύνολα’.

συγκεκριμένες μορφές γραμμικών και πολυωνυμικών συναρτήσεων. Οι γραμμικές είναι συνήθως Τραπεζοειδείς ή Τριγωνικές ενώ οι πολυωνυμικές μπορεί να είναι καμπύλες Z (Z-shaped), καμπύλες Λ (bell-shaped) ή καμπύλες S (S-shaped).

Καθώς οι συναρτήσεις συμμετοχής επιστρέφουν τιμές στο διάστημα $[0,1]$ συχνά συγχέονται με τις συναρτήσεις κατανομής πιθανοτήτων, ωστόσο, τα ασαφή σύνολα δεν είναι στατιστικής φύσης (Zadeh 1965). Ο ασαφής βαθμός συμμετοχής ενός αντικείμενου σε κάποιο ασαφές σύνολο δεν υποδηλώνει την πιθανότητα να ανήκει το αντικείμενο στο σύνολο αυτό. Αντίθετα, αποτελεί μια έκφραση της αβεβαιότητας που εικάζετε ότι ενυπάρχει στην συμμετοχή του αντικείμενου στο σύνολο (Fisher et al 2007). Η αβεβαιότητα αυτή προκαλείται από ανακριβή ή ελλιπή δεδομένα και υποκειμενικότητα ή ελλείψεις στην περιγραφή των μεγεθών και των συσχετίσεων. Συχνά, η μορφή των συναρτήσεων συμμετοχής καθορίζεται χρησιμοποιώντας (Βλαχάβας et al. 2002):

- Υποκειμενικές εκτιμήσεις
- Προκαθορισμένες απλοποιημένες μορφές
- Συχνότητες εμφανίσεων και πιθανότητες
- Διαδικασίες μάθησης και προσαρμογής

3.2 Διασύνδεση με την Φυσική Γλώσσα

Η φυσική γλώσσα θεωρείται μια από τις καλύτερες μεθόδους αναπαράστασης της γνώσης για τον άνθρωπο (Βλαχάβας 2002). Η σημασία της αναπαράστασης αυτής έγκειται στο ότι *‘ένα μεγάλο τμήμα της ανθρώπινης γνώσης, συμπεριλαμβανομένης της αντίληψης των πιθανοτήτων, εκφράζεται σε φυσική γλώσσα’* (Zadeh 2006). Ωστόσο, δεν ενδείκνυται για αναπαράσταση γνώσης σε υπολογιστικά συστήματα καθώς η αβεβαιότητα είναι ένα εγγενές χαρακτηριστικό της πληροφορίας που περιγράφεται σε φυσική γλώσσα (Zadeh 1975). Κατά συνέπεια δεν είναι σε κατάλληλη μορφή προκειμένου να προσπελαθεί με σαφείς ποιοτικούς όρους (Zadeh 1977).

3.2.1 Έννοιες, Όροι και Λεκτικές Μεταβλητές

Οι *Έννοιες*, ως μονάδες σκέψης και οι *Όροι*, ως οι λέξεις που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τις έννοιες, αποτελούν το μέσο της ανθρώπινης θεώρησης του πραγματικού κόσμου αλλά και της έλλογης επικοινωνίας μεταξύ των ανθρώπων (Ganter & Wille 1998). Ο άνθρωπος προκειμένου να κατανοήσει το περιβάλλον του δημιουργεί εννοιολογικά μοντέλα για την αναπαράσταση και μετάδοση των οποίων χρειάζεται μια κοινή γλωσσολογική βάση. Με τον όρο λεκτική μεταβλητή

(linguistic variable) εννοούμε την μεταβλητή της οποίας οι τιμές είναι λέξεις ή προτάσεις στα πλαίσια της φυσικής ή κάποιας τεχνητής γλώσσας (Zadeh 1975). Οι καταστάσεις μιας λεκτικής μεταβλητής ορίζονται από έννοιες οι οποίες περιγράφονται με γλωσσολογικούς όρους (Kirschfink 1999) ενώ οι τιμές που μπορεί να λάβει μια λεκτική μεταβλητή απαρτίζουν ένα σύνολο φρασεολογίας το οποίο αποτελεί υποσύνολο της γλώσσας που χρησιμοποιείται.

Επιπλέον, στα πλαίσια μιας γλώσσας με συμφραζόμενα, όπως είναι η φυσική γλώσσα, η σχέση Εννοιών-Όρων δεν είναι της μορφής ένα προς ένα. Αυτό συνεπάγεται αφενός ότι όροι διαφορετικοί μεταξύ τους μπορεί να ερμηνεύουν την ίδια έννοια και αφετέρου ότι ο ίδιος όρος μπορεί να χρησιμοποιείται για να περιγράψει διαφορετικές έννοιες (Ganter & Wille 1998). Κατά συνέπεια οι τιμές των λεκτικών μεταβλητών ενδέχεται να μην έχουν μονοσήμαντη ερμηνεία. Η ΛΑ γεφυρώνει το κενό ανάμεσα σε λεκτικές μεταβλητές και αριθμητικές μεταβλητές, μοντελοποιεί την αβεβαιότητα της πληροφορίας και επιτρέπει την χρήση γλωσσολογικών εκφράσεων σε (ασαφή) υπολογιστικά συστήματα. Αυτό επιτυγχάνεται με έναν σχεδόν φυσικό τρόπο, καθώς κάθε ασαφής μεταβλητή αντιστοιχείται σε μία λεκτική μεταβλητή. Ταυτόχρονα, τα ασαφή σύνολα που αποτελούν τις επιτρεπτές καταστάσεις της ασαφούς μεταβλητής, αντιστοιχούνται στους λεκτικούς όρους που είναι οι τιμές της αντίστοιχης λεκτικής μεταβλητής.

Η αντιστοίχιση λεκτικών όρων και ασαφών συνόλων επιτρέπει περαιτέρω την αμφίδρομη σύνδεση των λεκτικών μεταβλητών με αριθμητική πληροφορία μέσω των συναρτήσεων συμμετοχής. Έτσι, η θερμοκρασία 28C. μπορεί να χαρακτηριστεί ως *‘υψηλή για την εποχή’* και αντίστροφα η δήλωση *‘η θερμοκρασία είναι υψηλή για την εποχή’* μπορεί να αντιστοιχηθεί σε μια ή περισσότερες αριθμητικές τιμές με κάποια βεβαιότητα. Πρέπει να σημειωθεί ότι η αντιστοίχιση δεν είναι απαραίτητα ένα προς ένα, αλλά καθορίζεται πλήρως από την μορφή των συναρτήσεων συμμετοχής. Ως εκ τούτου, είναι υποκειμενική και μεταβάλλεται ανάλογα με το υπό μελέτη φαινόμενο, το πεδίο εφαρμογής και την συγκεκριμένη περίπτωση που εξετάζεται.

3.2.2 Λεκτικοί Προσδιορισμοί

Οι λεκτικοί όροι – και αντίστοιχα τα ασαφή σύνολα – μπορούν να διαχωριστούν σε αρχικούς και παραγόμενους ή σύνθετους. Οι αρχικοί λεκτικοί όροι αντιστοιχούνται με *‘απλά’* ασαφή σύνολα, π.χ. θερμοκρασία χαμηλή. Αντίθετα, οι σύνθετοι όροι ορίζουν νέα ασαφή σύνολα εφαρμόζοντας λεκτικούς προσδιορισμούς (hedges) επί των αρχικών λεκτικών μεταβλητών όπως *‘θερμοκρασία πολύ υψηλή’*. Οι λεκτικοί προσδιορισμοί ανάλογα με τη σημασία τους αλλοιώνουν τη συνάρτηση συμμετοχής του αρχικού ασαφούς συνόλου (Zadeh 1975).

Κάθε προσδιορισμός ορίζει μια αριθμητική αναπαραμετροποίηση της συνάρτησης συμμετοχής η οποία είναι συμβατή – αλλά όχι αυστηρά ορισμένη – με την εφαρμογή του προσδιορισμού επί της λεκτικής μεταβλητής στα πλαίσια του συντακτικού της γλώσσας που χρησιμοποιείται. Αριθμητικά, η

εφαρμογή προσδιορισμών περιγράφεται σαν η σύνθεση του μαθηματικού τύπου του προσδιορισμού και της συνάρτησης συμμετοχής. Συνήθως, οι λεκτικοί προσδιορισμοί σε αριθμητικό επίπεδο επιφέρουν την ύψωση της συνάρτησης συμμετοχής σε κάποια θετική δύναμη χρησιμοποιώντας το γεγονός ότι το σύνολο τιμών της συνάρτησης συμμετοχής είναι το $[0,1]$ και τις εξής ιδιότητες:

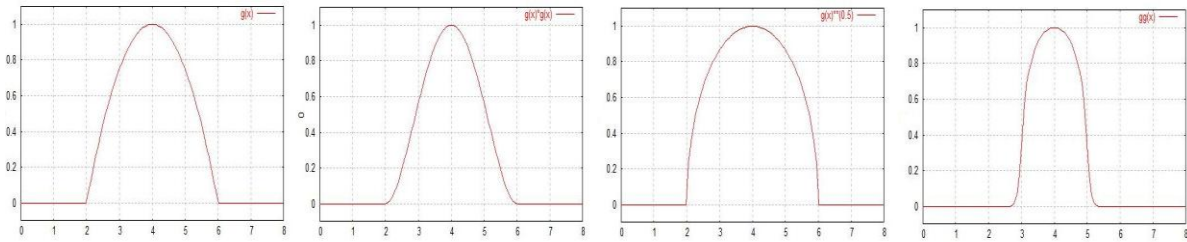
- $\chi < \chi^\alpha$, για $\chi \in (0,1)$ και $\alpha \in [0,1]$
- $\chi > \chi^\alpha$, για $\chi \in (0,1)$ και $\alpha > 1$
- $\chi = \chi^\alpha$, για $\chi = 0$ ή 1 και $\alpha \in \mathcal{R}$

Για παράδειγμα, ο λεκτικός προσδιορισμός ‘πολύ’ αντιστοιχείται συνήθως με ύψωση στο τετράγωνο και λεκτικός προσδιορισμός ‘περίπου’ με τετραγωνική ρίζα, οπότε $\mu(\chi)_{\text{πολύ}} = \mu^2(\chi)$ και $\mu(\chi)_{\text{περίπου}} = \mu^{1/2}(\chi)$ αντίστοιχα. Θεωρητικά ωστόσο, ένας λεκτικός προσδιορισμός μπορεί να αντιστοιχηθεί με μια οποιαδήποτε αναπαραμετρικοποίηση της συνάρτησης συμμετοχής. Υπάρχουν εναλλακτικές προσεγγίσεις που χρησιμοποιούν πλέον σύνθετους λεκτικούς προσδιορισμούς οι οποίοι πρακτικά μεταβάλλουν το πεδίο ορισμού της συνάρτησης συμμετοχής (Moraga 2004) όπως ο προσδιορισμός ‘ακραία’ (Mantelas et al. 2007) με συνάρτηση συμμετοχής:

$$\begin{aligned} \mu_{out} &= \mu_{in}^{2+(0.8-\mu_{in})/2}, & \text{αν } \mu_{in} \geq 0.8 \\ \mu_{out} &= \mu_{in}^{2+4*(0.8-\mu_{in})}, & \text{αν } \mu_{in} \leq 0.8 \end{aligned} \quad (3.1)$$

Για να είναι πλέον κατανοητή η λειτουργία των λεκτικών προσδιορισμών είναι χρήσιμη μια περαιτέρω περιγραφή των χαρακτηριστικών της έννοιας. Η έννοια αποτελείται από δύο τμήματα, την *έκταση* (extension) και την *ένταση* (intension). Η έκταση αναφέρεται στα αντικείμενα που περιλαμβάνει η έννοια ενώ η ένταση στα κοινά χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες των αντικειμένων στην έκταση. Ανάμεσα στην έκταση και την ένταση αναπτύσσεται μια δυική σχέση (Stumme 2002), ή όπως καλείται σύνδεση Galois (Ganter & Wille 1998). Η σχέση αυτή συνεπάγεται ότι καθώς αυξάνονται τα αντικείμενα, μειώνεται το σύνολο των κοινών ιδιοτήτων και αντίστροφα.

Αυτό σημαίνει ότι όσο διευρύνεται ή γενικεύεται μια έννοια, τόσο αυξάνεται ο αριθμός των αντικειμένων που χαρακτηρίζονται από αυτήν την έννοια. Αντίθετα, όσο περιορίζεται ή εξειδικεύεται μια έννοια, τόσο ο αριθμός των αντικειμένων μειώνεται. Διαισθητικά, ένα μέτρο της έκτασης μιας έννοιας στα πλαίσια της ΛΑ είναι το εμβαδόν της συνάρτησης συμμετοχής του ασαφούς συνόλου. Ουσιαστικά, οι αριθμητικές εκφράσεις των λεξιλογικών προσδιορισμών μεταβάλλουν το εμβαδόν των αντίστοιχων ασαφών συνόλων (γράφημα 3.1). Συνολικά, τόσο η αντιστοίχιση των λεκτικών μεταβλητών και των ασαφών συνόλων όσο και η χρήση λεκτικών προσδιορισμών σε αριθμητικό επίπεδο συνδέει λεκτικές εκφράσεις με αριθμητική πληροφορία (Χατζηχρήστος 2001). Η αντιστοίχιση αυτή επιτρέπει την πλέον ρεαλιστική αναπαράσταση και διαχείριση της έννοιας της απόστασης σύμφωνα με την ανθρώπινη αντίληψη στα πλαίσια ασαφών συστημάτων.



Γράφημα 3.1: Αρχική συνάρτηση συμμετοχής και επίδραση των προσδιορισμών (από αριστερά προς δεξιά) ‘πολύ’, ‘περίπου’ και ‘ακραία’

3.3 Ασαφή Συστήματα

Η επίλυση ενός προβλήματος στα πλαίσια της ΛΑ απαιτεί την εφαρμογή ενός Ασαφούς Συστήματος. Αυτή περιλαμβάνει την περιγραφή, αποτύπωση και επεξεργασία της εισόδου υπό την μορφή ασαφών μεταβλητών και την εξαγωγή συμπερασμάτων σε αντιληπτή και χρησιμοποιήσιμη μορφή. Ως ασαφές νοείται το μαθηματικό σύστημα που χρησιμοποιεί ασαφείς συναρτήσεις συμμετοχής και κανόνες που ορίζονται επί ασαφών συνόλων για να εξαγάγει συμπεράσματα βάση των μεταβλητών εισόδου. Η γνώση σε ένα ασαφές σύστημα αναπαριστάται μέσω ενός συνόλου κανόνων της μορφής ‘εάν - τότε’. Έτσι οι μεταβλητές εισόδου, υπό τη μορφή υποθέσεων στο αριστερό μέλος του κανόνα, συνδέονται με τις μεταβλητές εξόδου, υπό τη μορφή συμπερασμάτων στο δεξί μέλος του κανόνα. Οι κανόνες αυτής της μορφής είναι μια φυσιολογική προσέγγιση για αναπαράσταση γνώσης επειδή εκφράζονται διαισθητικά και μοιάζουν με τον τρόπο με τον οποίο οι άνθρωποι οργανώνουν την δική τους γνώση (Βλαχάβας 2002).

Υπάρχουν αρκετές διαφορετικές προσεγγίσεις ασαφών συστημάτων, κάθε μια εκ των οποίων εστιάζει σε προβλήματα με διαφορετικές ιδιαιτερότητες, προτεραιότητες και απαιτήσεις. Η προσέγγιση Mamdani αποτελεί ενδεχομένως την πρώτη μορφή ασαφούς συστήματος και προτάθηκε το 1975 για την επίλυση προβλημάτων Ελέγχου (control problems) μέσω λεξιλογικών κανόνων που εξήχθησαν από πεπειραμένους χειριστές (Mamdani 1975). Το κυρίως χαρακτηριστικό της προσέγγισης αυτής είναι ότι τόσο η υπόθεση όσο και το συμπέρασμα των κανόνων εκφράζονται με ασαφή σύνολα (Zadeh 1993). Αυτό επιτρέπει την αποτύπωση της βάσης γνώσης σε διαφορετικά επίπεδα και την σειριακή πυροδότηση κανόνων. Έτσι προσομοιώνεται ο τρόπος με τον οποίο οι άνθρωποι διαχειρίζονται την γνώση και λαμβάνουν αποφάσεις. Κατά συνέπεια, η προσέγγιση Mamdani παρέχει μια ιδιαίτερα διαισθητική βάση γνώσης η οποία είναι εύκολο να συντηρηθεί και να εφαρμοστεί (Castellano et al. 2003).

Μια εναλλακτική διαχειριστική προσέγγιση της λογικής της ασάφειας είναι η προσέγγιση Sugeno (Takagi & Sugeno 1985, Sugeno & Kang 1986) γνωστή επίσης ως Takagi-Sugeno-Kang ή TSK. Οι ουσιαστικές διαφορές εντοπίζονται κυρίως σε δυο σημεία. Αφενός στο ότι τα συμπεράσματα των κανόνων δεν είναι ασαφή σύνολα αλλά αριθμητικές τιμές που εκφράζουν συμμετοχή και αφετέρου στο απλούστερο συντακτικό. Οι κανόνες σε αυτήν την προσέγγιση είναι της μορφής:

$$\text{'αν το } A \text{ είναι } x \text{ και το } B \text{ είναι } y, \text{ τότε το } \Gamma \text{ είναι } z = f(x, y)\text{'}$$

Κάθε κανόνας έχει ένα βάρος w ενώ το τελικό αποτέλεσμα του συστήματος TSK μπορεί είναι είτε ο σταθμισμένος (ως προς τα βάρη) μέσος είτε το σταθμισμένο άθροισμα των z . Η προσέγγιση TSK είναι πιο απλή υπολογιστικά, προσεγγίζοντας περισσότερη την κλασική μαθηματική ανάλυση, ενώ η βιβλιογραφία υποδεικνύει ότι αποδίδει καλά αποτελέσματα για γραμμικά φαινόμενα. Μια υποκατηγορία της προσέγγισης TSK είναι η προσέγγιση Tsukamoto στην οποία η συνάρτηση f είναι σταθερά (Carlsson & Fuller 2001).

Ανεξαρτήτως της προσέγγισης που εφαρμόζεται, η διαδικασία εξαγωγής ενός τελικού συμπεράσματος από τα συμπεράσματα των μεμονωμένων κανόνων γενικότερα μπορεί να ακολουθεί διάφορες προσεγγίσεις. Για αυτόν τον λόγο εφαρμόζεται ο Λογισμός των Ασαφών Κανόνων (ΛΑΚ) που ορίζεται ως *'το σύνολο των διαδικασιών, τεχνικών και τελεστών για την διαχείριση γνώσης που αναπαρίσταται υπό μορφή κανόνων και ορίζεται επί ασαφών συνόλων'* (Zadeh 1993). Ο ΛΑΚ εφαρμόζεται σε όλα τα στάδια ενός ασαφούς συστήματος τα οποία είναι (Cox 1994, Kirschfink 1999, Χατζηχρήστος 2001):

- Ασαφοποίηση
- Δημιουργία/Εκφραση Βάσης Γνώσης
- Εξαγωγή (ασαφούς) συμπεράσματος
- Αποσαφήνιση

3.3.1 Ασαφοποίηση

Η ασαφοποίηση αποτελεί ουσιαστικά την έκφραση της εισόδου του ασαφούς συστήματος με όρους ασαφών μεταβλητών και περιλαμβάνει τις εξής ενέργειες:

- Τον ορισμό των ασαφών μονό-συνόλων για την απόδοση ποιητικής πληροφορίας
- Τον ορισμό των ασαφών συνόλων και των αντίστοιχων συναρτήσεων συμμετοχής για την απόδοση ποσοτικής πληροφορίας
- Την προαιρετική αντιστοίχιση παραμέτρων βεβαιότητας στα δεδομένα εισόδου

Ο ορισμός των συναρτήσεων συμμετοχής δε λαμβάνει χώρα βάση κάποιων καθολικών κανόνων. Αντίθετα, επαφίεται τόσο στο γενικότερο πλαίσιο αναφοράς του προβλήματος υπό μελέτη, όσο και στην υποκειμενικότητα του χρήστη (Witlox & Derudder 2005).

3.3.2 Δημιουργία/Εκφραση Βάσης Γνώσης,

Η γνώση σε ένα σύστημα αναπαριστάται μέσω ενός συνόλου κανόνων με κάθε κανόνα να ορίζει ένα μικρό τμήμα γνώσης. Τα αριστερά μέλη των κανόνων (υποθέσεις) μπορεί να είναι σύνθετης μορφής, συνδέοντας τις λεκτικές μεταβλητές με χρήση τελεστών όπως οι ‘ΚΑΙ’, ‘Η’, ‘ΟΧΙ’. Επίσης μπορεί να εφαρμόζουν λεκτικούς προσδιορισμούς, για παράδειγμα ‘*αν {δουλειά πολλή} και {ώρα αρκετά αργά} τότε {καφές σχετικά απαραίτητος}*’. Επιπλέον, είναι δυνατό κάθε κανόνας να συνοδεύεται από μια παράμετρο βεβαιότητας (PB - certainty factor / CF), η οποία καθρεπτίζει την πίστη που έχει ο χρήστης στην ορθότητα του κανόνα και μεταβιβάζεται στο συμπέρασμα του κανόνα. Ο σχεδιασμός της Βάσης Γνώσης σε ένα ασαφές σύστημα εκτελείται σε δυο στάδια (Setnes et al 1998a):

- Καθορισμό της δομής των κανόνων
- Υπολογισμό των παραμέτρων.

Στην προσέγγιση Mamdani η γνώση μπορεί να δομηθεί σε διαφορετικά εσωτερικά επίπεδα κανόνων με κάθε επίπεδο να συμπεραίνει επί των υποθέσεων του επομένου. Ένα παράδειγμα βάσης γνώσης με δύο επίπεδα δίδεται από τους παρακάτω κανόνες, όπου Α και Γ αποτελούν την καθολική είσοδο και έξοδο αντίστοιχα του συστήματος ενώ Β είναι μια εσωτερική μεταβλητή:

- ‘*Αν Α υψηλό, τότε Β χαμηλό*’ (1^ο επίπεδο)
- ‘*Αν Β χαμηλό, τότε Γ μέτριο*’ (2^ο επίπεδο)

Ο σχεδιασμός και η εξαγωγή της βάσης γνώσης αποτελεί μια ιδιαίτερα δύσκολη διαδικασία αλλά και ένα ανοιχτό επιστημονικό πεδίο το οποίο δίδει βαρύτητα στην βελτιστοποίηση της απόδοσης της Βάσης Γνώσης (Carlsson & Fuller 2001, Lu & Shu-Cherng 2001) αλλά και στην αποτύπωση της γνώσης με το ελάχιστο πλήθος κανόνων (Setnes et al 1998b).

3.3.3 Εξαγωγή Συμπεράσματος

Η εξαγωγή συμπεράσματος (inference) είναι η διαδικασία κατά την οποία τα ασαφή δεδομένα εισόδου μετατρέπονται μέσω των διαδικασιών του συστήματος σε ασαφή δεδομένα εξόδου. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τον έλεγχο των υποθέσεων των κανόνων και την επιλεκτική εφαρμογή αυτών προς εξαγωγή μεμονωμένων συμπερασμάτων. Είναι μια επαναληπτική διαδικασία που λήγει όταν προσπελαθούν όλα τα επίπεδα της βάσης γνώσης και εξαχθούν συμπεράσματα επί των καθολικών μεταβλητών εξόδου. Τέλος, έπεται η σύνθεση των μεμονωμένων συμπερασμάτων σε ένα

τελικό ασαφές συμπέρασμα. Η συμπερασματολογία σε ένα ασαφές σύστημα περιλαμβάνει τα εξής στάδια (Cox 1994, Kirschfink 1999, Hatzichristos & Potamias 2004):

- Συσσώρευση (aggregation)
- Συνεπαγωγή (implication)
- Συγκέντρωση (accumulation)

Η *συσσώρευση* εστιάζει στην αξιολόγηση της πληρότητας της υπόθεσης κάθε κανόνα ξεχωριστά. Υλοποιείται με τον υπολογισμό της πληρότητας κάθε ασαφούς συνόλου που συμμετάσχει στην υπόθεση και τον συγκερασμό αυτών ανάλογα με τη λογική τους σύνδεση μέσα στον κανόνα, όπως καθορίστηκε κατά τον σχεδιασμό της βάσης γνώσης. Στην περίπτωση των κανόνων με απλή υπόθεση (μόνο ένα ασαφές σύνολο) η συσσώρευση είναι τετριμμένη, ενώ σε σύνθετες υποθέσεις η σύνδεση εκτελείται συνήθως με την εφαρμογή των λογικών τελεστών ‘*KAF*’ και ‘*H*’.

Στο στάδιο της *συνεπαγωγής* ολοκληρώνεται η συμπερασματολογία της λογικής δήλωσης ‘*αν A, τότε B*’, συνδέοντας την πληρότητα της υποθέσεως του κανόνα, όπως υπολογίστηκε στο στάδιο της συσσώρευσης, με τον βαθμό βεβαιότητας του κανόνα. Τελικό αποτέλεσμα του σταδίου αυτού είναι ένα συμπέρασμα ανά κανόνα που πυροδοτήθηκε. Η σύνδεση της πληρότητας και της βεβαιότητας λαμβάνει χώρα συνήθως χρησιμοποιώντας τους τελεστές ελάχιστο και γινόμενο.

Σε ένα ασαφές σύστημα βάσης γνώσης το ίδιο συμπέρασμα μπορεί να εξαχθεί από διαφορετικούς κανόνες με διαφορετική εν γέννη βεβαιότητα. Για παράδειγμα, ένας κανόνας επιστρέφει ‘*A υψηλό*’ κατά 70% και ένας άλλος κατά 60%. Επιπλέον, μπορεί να εξαχθούν αντικρουόμενα συμπεράσματα για την ίδια μεταβλητή, για παράδειγμα ένας κανόνας να εξάγει ‘*A υψηλό*’ και κάποιος άλλος ‘*A χαμηλό*’. Στο στάδιο της *συγκέντρωσης*, αρχικά εξάγεται ένα τελικό συμπέρασμα για κάθε ασαφές σύνολο όλων των μεταβλητών εξόδου. Ακολούθως, εξάγεται ένα αποτέλεσμα για κάθε ασαφή μεταβλητή ως αποτέλεσμα πράξεων μεταξύ των συμπερασμάτων για κάθε ασαφές της σύνολο. Αριθμητικά συνήθως εφαρμόζονται οι τελεστές μέγιστο και το αλγεβρικό άθροισμα.

Η επιλογή των κατάλληλων τελεστών σε κάθε στάδιο έγκειται στα πλαίσια του ΛΑΚ και εμπεριέχει ένα βασικό σημείο αντιληπτικής δυσκολίας. Αυτό οφείλεται στο ότι η αντιστοιχία μεταξύ λογικών και αριθμητικών τελεστών δεν είναι της μορφής ‘*ένα προς ένα*’ και συχνά απαιτούνται περιφραστικές περιγραφές των αριθμητικών τελεστών. Οι συνήθεις λογικοί τελεστές είναι το ‘*KAF*’ και το ‘*H*’ που – όπως και στην δυαδική λογική – ισοδυναμούν με τους αριθμητικούς τελεστές ‘*ελάχιστο*’ και ‘*μέγιστο*’ αντίστοιχα ή την τομή και την ένωση σε επίπεδο συνόλων. Στα κλασσικά συστήματα γνώσης όπου όλες οι τιμές είναι είτε 0 ή 1, οι δυο αυτοί τελεστές είναι σε θέση να περιγράψουν όλες τις δυνατές συσχετίσεις. Οποιοσδήποτε άλλος τελεστής θα επέστρεφε πάλι 0 ή 1 και ουσιαστικά θα καθίσταντο περιττός.

Στα ασαφή συστήματα όμως όπου οι παράμετροι λαμβάνουν τιμές στο συνεχές διάστημα [0,1], μπορεί να οριστεί ένα μεγάλο πλήθος από αριθμητικούς τελεστές που παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά από το ‘ελάχιστο’ και το ‘μέγιστο’ (πίνακας 3.1). Για τους ασαφείς τελεστές δεν υπάρχει μια κοινώς αποδεκτή λεκτική περιγραφή αλλά έχουν ορισθεί οι εξής κοινά αποδεκτές κατηγορίες τους (Sasikala & Petrou 2001):

- Συνδυετικός ή ενωτικός (conjunctive) καλείται ένας τελεστής που επιστρέφει τιμή μικρότερη ή ίση σε σχέση με τον τελεστή ‘ελάχιστο’. Οι συνδυετικοί τελεστές εφαρμόζονται όταν απαιτείται ταυτόχρονη ικανοποίηση πολλών κριτηρίων.
- Διαζευκτικός (disjunctive) καλείται ένας τελεστής που επιστρέφει τιμή μεγαλύτερη ή ίση σε σχέση με τον τελεστή ‘μέγιστο’. Οι διαζευκτικοί τελεστές εφαρμόζονται όταν έχουμε πλεονασμό κριτηρίων.
- Συμβιβαστικός (compromise) καλείται ένας τελεστής που επιστρέφει τιμή μικρότερη ή ίση σε σχέση με τον τελεστή ‘μέγιστο’ και παράλληλα μεγαλύτερη ή ίση σε σχέση με τον τελεστή ‘ελάχιστο’.

Ελάχιστο	$\min(\mu_A(x), \mu_B(x))$
Μέγιστο	$\max(\mu_A(x), \mu_B(x))$
Γινόμενο	$\mu_A(x) \cdot \mu_B(x)$
Άθροισμα	$\mu_B(x) + \mu_A(x)$
Πιθανοθεωρητικό Η	$\mu_B(x) + \mu_A(x) - \mu_A(x) \cdot \mu_B(x)$
Zadeh Max-Min	$\max(\min(\mu_A(x), \mu_B(x)), 1 - \mu_A(x))$
Αριθμητικός	$\min(1, 1 - \mu_A(x) + \mu_B(x))$
Δυαδικός	$\max(1 - \mu_A(x), \mu_B(x))$
Τελεστής Γάμα	$\frac{(\mu_A(x) \cdot \mu_B(x))^{(1-\gamma)}}{(\mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \cdot \mu_B(x))^\gamma}$

Πίνακας 3.1: Αριθμητικές εκφράσεις τελεστών

3.3.4 Αποσαφήνιση

Το αντικείμενο της αποσαφήνισης είναι η μετατροπή της ασαφούς εξόδου του συστήματος σε ένα μονοσήμαντο αποτέλεσμα, όποτε αυτό κρίνεται απαραίτητο. Πρόκειται για μια συνάρτηση με πεδίο ορισμού την ένωση των συνόλων τιμών των συναρτήσεων συμμετοχής των ασαφών συνόλων της μεταβλητής εξόδου και σύνολο τιμών που ταυτίζεται με την ένωση των πεδίων ορισμού των ίδιων συναρτήσεων συμμετοχής. Ουσιαστικά αποτελεί μια αντιστροφή – όχι με την αυστηρή μαθηματική έννοια - της ένωσης των ασαφών συνόλων μιας ασαφούς μεταβλητής. Καθότι η μετατροπή ενός ασαφούς συνόλου σε έναν πραγματικό αριθμό δεν είναι κάτι το μονοσήμαντο, διάφορες μέθοδοι αποσαφήνισης έχουν προταθεί. Συνήθως, εφαρμόζεται η μέθοδος της μέγιστης τιμής του μέσου των μέγιστων τιμών και του κέντρου βάρους (Cox 1994, Βλαχάβας 2002):

- Μέσος Μεγίστων: $\bar{\chi} = \sum_{i=1}^n \chi_i^{\max} / n$ (3.2)

- Κέντρο Βάρους: $cog = \left(\int_a^b \chi \cdot \mu_{out}(\chi) d\chi \right) / \left(\int_a^b \mu_{out}(\chi) d\chi \right)$ (3.3)

3.4 Λογική της Ασάφειας για την Θεώρηση της Αστικής Επέκτασης

Η απλή ερώτηση ‘Πού βρίσκεται το βουνό;’ δεν είναι εύκολο να απαντηθεί με συνέπεια και ταυτόχρονα με ακρίβεια (Fisher 2004). Η ασάφεια είναι ένα εγγενές χαρακτηριστικό της πληροφορίας στον πραγματικό κόσμο. Ωστόσο, τα παραδοσιακά (δυναδικά/μη-ασαφή) πλαίσια χωρικής ανάλυσης τείνουν να την παραβλέπουν και να εφαρμόζουν βεβαιωμένα μια προσεγγιστική αναπαράσταση της πραγματικότητας (Liu & Phinn 2001). Όλες οι αναλυτικές λειτουργίες των σύγχρονων Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (ΓΣΠ) βασίζονται στην δυαδική λογική, η οποία είναι εκ φύσεως ακριβής και απόλυτη και ως εκ τούτου δε λαμβάνει υπόψη της την ασάφεια των γεωγραφικών αντικειμένων (Hatzichristos & Potamias 2004).

Τα ζητήματα που έχουν να κάνουν με την διαχείριση της αοριστίας, της ανακρίβειας και της αμφιβολίας της χωρικής πληροφορίας, μπορούν να διευθετηθούν από την ΘΑΣ και της ΛΑ (Malczewski 2004), η οποία παρέχει τα εργαλεία για μια πλέον ρεαλιστική θεώρηση και αναπαράσταση του πραγματικού κόσμου. Μάλιστα, έχει προταθεί η χρήση ασάφειας πολλαπλών επιπέδων για την διαχείριση της ασάφειας της χωρικής πληροφορίας (Fisher et al. 2007), δηλαδή η χρήση ασαφών ορίων για τα ασαφή σύνολα που περιγράφουν γεωγραφικές οντότητες.

Η ασάφεια των γεωγραφικών αντικειμένων εντοπίζεται σε μια σειρά από περιπτώσεις, όπως ενδεικτικά ο χωρικός κατακερματισμός, τα ελλιπή και αβέβαια δεδομένα, η αναγνώριση αντικειμένων, τα σύνορα και η μεταβολή τους στον χρόνο, η ομαδοποίηση αντικειμένων και ο ορισμός των συνόλων, η χωρική και χρονική παρεμβολή (Liu & Phinn 2003). Ο βασικός λόγος ωστόσο για την εφαρμογή της ΛΑ είναι η δυνατότητα αναπαράστασης του ανθρώπινου μηχανισμού αιτιολόγησης σε λεκτικούς όρους και η προσέγγιση σύνθετων μη-γραμμικών σχέσεων με απλά μοντέλα (Chen & Linkens 2004). Κατά συνέπεια, η ανάλυση των φυσικών συστημάτων καθίσταται απλούστερη (Setnes et al 1998a). Ως εκ τούτου, η ΛΑ παρουσιάζεται καθοριστικής σημασίας για τον σχεδιασμό αποδοτικών εργαλείων λήψης χωρικών αποφάσεων (Stefanakis et al 1996) και την εφαρμογή έμπειρων συστημάτων για την μοντελοποίηση χωρικών φαινομένων και μεγεθών (Kalogirou 2002).

Η βιβλιογραφία περιλαμβάνει έναν μεγάλο αριθμό από σύγχρονες εφαρμογές της ΛΑ σε γεωγραφικές αναλύσεις. Αυτές περιλαμβάνουν αντικείμενα όπως ορισμό και τοποθεσία γεωγραφικών αντικειμένων (Fisher 2004, Hatzichristos & Potamias 2004, Fisher et al. 2007, Bejaoui et al. 2007), θεώρηση συνόρων χωρικών φαινομένων (Fonte & Lodwick 2005, Joss et al. 2008), χαρτογράφηση χρήσεων και κάλυψης γης (Henning 2003, Arijit 2006), θεώρηση τοπολογικών σχέσεων (Takemura et al. 2005, Matsakis & Nikitenko 2005), ταξινόμηση δορυφορικών εικόνων (Nedeljkovic 2006), συσχετίσεις γεωγραφικών αντικειμένων (Guesgen 2005, Kratochwil & Benedikt 2005), στατιστική ανάλυση χωρικών δεδομένων (Kollias et al. 1999), εξόρυξη χωρικών δεδομένων (Liu & George 2005), συστήματα υποστήριξης λήψης αποφάσεων (Stefanakis et al 1996), εφαρμογή έμπειρων συστημάτων (Kalogirou 2002), χωρική (Dragicevic 2005) και χρονική παρεμβολή (Dragicevic & Marceau 2000) και θεώρηση του διανύσματος του χρόνου (Dragicevic & Marceau 2001).

Ιδιαίτερα χρήσιμη είναι η εφαρμογή της ΛΑ για την θεώρηση και μοντελοποίηση της ΑσΕ καθώς πρόκειται για ένα φαινόμενο που συγκεντρώνει πολλές διαφορετικές πηγές αοριστίας τόσο σε επίπεδο ορισμού και αναπαράστασης όσο και σε επίπεδο ανάλυσης και προσομοίωσης. Καταρχήν, οι αστικές χρήσεις γης είναι αφηρημένες έννοιες που ορίζονται περισσότερο βάση λειτουργίας παρά βάση μορφής. Ως εκ τούτου, η ΛΑ αποτελεί μια καλύτερη επιλογή για την θεώρηση και χαρτογράφηση των χρήσεων γης (Henning 2003). Επιπλέον, δεν υπάρχει η έννοια του ακριβούς ορίου μεταξύ αστικών, ημιαστικών, αγροτικών και δασικών περιοχών (Liu & Phinn 2001) και κατά συνέπεια η ΛΑ εμφανίζει συγκριτικό πλεονέκτημα όσον αφορά την χαρτογράφηση της κάλυψης γης.

Το ίδιο πλεονέκτημα διατηρείται για την κάλυψη γης αλλά επεκτείνεται και στις χρήσεις γης για την αναπαράσταση μεικτής χρήσης ή κάλυψης γης σε δεδομένη χωρική μονάδα αναφοράς, όπως για παράδειγμα στα ψηφιδωτά αρχεία (raster). Η ΛΑ όχι μόνο δεν επιφέρει ασάφεια, αλλά παρέχει έναν πλέον ακριβή τρόπο και ρεαλιστικό τρόπο για την αναπαράσταση σύνθετων χρήσεων και καλύψεων

γης σε μια περιοχή. Για παράδειγμα, μια περιοχή που αποτελείται από 100 τμήματα γης θεωρείται ότι είναι κατά 60% αστική όταν αποτελείται (Heikkila et al 2002):

- Από 60 πλήρως αστικά και 40 πλήρως αγροτικά τεμάχια,
- Από 100 τεμάχια κάθε ένα εκ των οποίων είναι κατά 60% αστικό
- Η οποιονδήποτε κυρτό συνδυασμό των παραπάνω.

Οι παραπάνω καταστάσεις στα πλαίσια της δυαδικής λογικής θα χαρακτηριζόντουσαν ως 100% αστικές, ενώ δεν αποκλείεται - ανάλογα με τους κανόνες ταξινόμησης και τα αντίστοιχα κατώφλια – κάποιες περιπτώσεις να οριζόντουσαν ως μη-αστικές.

Όσον αφορά την μοντελοποίηση και προσομοίωση της Αστικής Επέκτασης, η ΛΑ παρουσιάζει πρακτικά προτερήματα σε τεχνικό αλλά και σε χρηστικό επίπεδο. Σε τεχνικό επίπεδο, η ΛΑ μπορεί να μοντελοποιήσει την συμπεριφορά συστημάτων με ποιοτικά σχήματα που χρησιμοποιούν ασαφείς ποσότητες, παρέχοντας έτσι μια υβριδική ποιοτική-ποσοτική προσέγγιση (Chen & Linkens 2004). Αυτό επιτρέπει στην ΛΑ να περιγράφει ευκρινέστερα τόσο τις μερικές όσο και τις πολλαπλές συσχετίσεις μεταξύ μεγεθών (Petry et al 2005). Παράλληλα υποστηρίζει εναλλακτικές μεθόδους εξαγωγής γνώσης που βασίζονται στην εμπειρική θεώρηση και αντίληψη περί των πιθανοτήτων.

Σε χρηστικό επίπεδο, το κυρίως προτέρημα της ΛΑ για την μοντελοποίηση της αστικής επέκτασης εντοπίζεται στην ικανότητα να προσομοιώνει τον τρόπο με τον οποίο οι άνθρωποι λαμβάνουν αποφάσεις και να εκφράζει την γνώση σε φυσική γλώσσα. Η χρήση φυσικής γλώσσας επιτρέπει την άμεση εφαρμογή εμπειρικής γνώσης για την ΑΣΕ. Έτσι καθίσταται χρήσιμο ένα μεγάλο κομμάτι της γνώσης για την αστικοποίηση που περιλαμβάνει τις απόψεις ειδικών, θεωρητικές προσεγγίσεις για τους μηχανισμούς της αστικοποίησης αλλά και καταγραφές για την ιστορική ανάπτυξη των πόλεων. Επιπροσθέτως, καθιστά δυνατή την μεταφορά γνώσης βάση εμπειρικών μοτίβων ομοιότητας.

Το πλεονέκτημα της χρήσης της φυσικής γλώσσας στα πλαίσια της ΛΑ έχει να κάνει με την φύση του φαινομένου της αστικοποίησης αυτής καθαυτής. Τα κριτήρια με τα οποία λαμβάνονται αποφάσεις από τους κατοίκους, και ο τρόπος με τον οποίο οι αποφάσεις των φορέων και παραγόντων επιδρούν σε αυτά, δε μπορούν να εκφραστούν ρεαλιστικά στα πλαίσια της δυαδικής λογικής. Για παράδειγμα, όταν ένας κάτοικος είναι σε αναζήτηση κατοικίας μπορεί να θεωρήσει ως μια παράμετρο την προσβασιμότητα σε δίκτυο μέσων μαζικής μεταφοράς σταθερής τροχιάς. Το κριτήριο που βασίζεται σε αυτήν την παράμετρο, ωστόσο δεν επαφίεται στην εφαρμογή ενός κατωφλίου. Κάτι τέτοιο θα σήμαινε ότι ένα διαμέρισμα που απέχει από το Μετρό λίγο λιγότερο από ότι το κατώφλι θα ήταν αποδεκτό, ενώ ένα διαμέρισμα που θα απέχει λίγο περισσότερο από ότι το κατώφλι θα απορριπτόταν. Αυτό θα ίσχυε ακόμα και αν η απόσταση μεταξύ των δύο διαμερισμάτων είναι μόλις

μερικά μέτρα. Κατά συνέπεια, η ΛΑ αποτελεί ένα κατάλληλο πλαίσιο για την μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των κατοίκων μια πόλης και τα αναδυόμενα πρότυπα της αστικής επέκτασης.

Στον αντίποδα, οι ασαφείς προσεγγίσεις υστερούν αναφορικά με την αριθμητική ακρίβεια των προσεγγίσεων που παρέχουν. Ωστόσο, πρόκειται για μια μάλλον δίκαιη ανταλλαγή μεταξύ ακρίβειας και απλότητας αναπαράστασης (Chen & Linkens 2004). Ειδικά αν αναλογιστούμε ότι η αξία της προσομοίωσης δεν εντοπίζεται στην δυνατότητα να προσεγγίζει τις ακριβείς μεταβολές των χρήσεων γης, αλλά στο να ρίχνει φως στις διαδικασίες με τις οποίες η μεταβολή λαμβάνει χώρα (Wu 1998). Ένα σημαντικό τμήμα των εφαρμογών της ΛΑ για την Αστική Επέκταση λαμβάνουν χώρα σε συνδυασμό με τεχνικές Κυψελοειδών Αυτομάτων, οι οποίες παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

Κυψελοειδή Αυτόματα

Το κεφάλαιο 4 παρουσιάζει τα Κυψελοειδή Αυτόματα ως μαθηματικές οντότητες αρχίζοντας με μια σύντομη εισαγωγή στην ιστορία τους. Ακολουθώς, δίδεται ο μαθηματικός τους ορισμός αλλά και περιγράφονται τα βασικά στοιχεία και οι κατηγορίες τους. Η τελευταία ενότητα περιγράφει το θεωρητικό πλαίσιο διασύνδεσης μεταξύ των κυψελοειδών αυτομάτων και της λογικής της ασάφειας.

Η γενική ιδέα πίσω από τα Κυψελοειδή Αυτόματα (ΚΑ) πρωτοεμφανίζεται στις αρχές του προηγούμενου αιώνα. Οι πρώτες επίσημες αναφορές όμως τοποθετούνται στην δεκαετία του 1940 ενώ ο όρος ΚΑ είναι μεταγενέστερος. Η αρχική σύλληψη αποδίδεται στον John Von Neumann (Itami 1994, Krawczyk 2003) αλλά την ίδια περίοδο δημοσιεύτηκαν παρεμφερείς θεωρητικές προσεγγίσεις από τον Konrad Zuse. Οι πρώτες σχετικές εργασίες τους που δημοσιεύθηκαν (Neumann 1948, Zuse 1967) διαπραγματεύονται τις Αυτόματες Μηχανές Πεπερασμένων καταστάσεων και δεν αναφέρουν τον όρο Κυψελοειδή Αυτόματα.

Ο αρχικός αγγλικός όρος Cellular Automata (CA) μεταφράζεται στην ελληνική βιβλιογραφία ως Κυψελοειδή Αυτόματα (όρος που χρησιμοποιείται στο παρόν κείμενο), ως Κυψελωτά ή Κυψελώδη Αυτόματα ή ακόμα και Ψηφιακά Αυτόματα. Ένα σύστημα ΚΑ αποτελείται από πανομοιότυπα απλά στοιχεία τα οποία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους (Wolfram 1984c) και εξελίσσονται ανάλογα με την κατάστασή τους και με τα ερεθίσματα που δέχονται, αλλάζοντας έτσι την κατάσταση όλου του συστήματος.

Τα Κυψελοειδή Αυτόματα είναι αφηρημένες μαθηματικές οντότητες που αποτελούν μια υπολογιστική μέθοδο ικανή να προσομοιώσει εξελικτικές διαδικασίες περιγράφοντας ένα πολύπλοκο σύστημα με ένα σύνολο απλών κανόνων. Στα Κυψελοειδή Αυτόματα το σύστημα υπό μελέτη χωρίζεται σε κυψέλες με συγκεκριμένη θέση στον χώρο οι οποίες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Πρόκειται για μια επαναληπτική διαδικασία προσομοίωσης, η οποία ενδείκνυται για πολύπλοκα φαινόμενα με χωρικές διαστάσεις τα οποία είναι δύσκολο να μοντελοποιηθούν με άλλες τεχνικές.

4.1 Μαθηματικός Ορισμός

Ένα Αυτόματο (ή Αυτόματη Μηχανή) μπορεί να έχει ένα πεπερασμένο πλήθος προκαθορισμένων καταστάσεων ενώ η λειτουργία του περιγράφεται πλήρως από τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται η κατάστασή του (Neumann 1948). Ένα Αυτόματο είναι μια ιδεατή μαθηματική οντότητα η οποία περιγράφει πλήρως την χρονική εξέλιξη ενός χαρακτηριστικού διαμέσου απλών κανόνων και ορίζεται (Liu 1987) ως:

$$A := \{S, I, O, f, g\} \quad (4.1)$$

όπου:

- $S = \{s_0, s_1, \dots, s_n\}$ ένα πεπερασμένο σύνολο καταστάσεων
- $I = \{i_0, i_1, \dots, i_m\}$ ένα πεπερασμένο σύνολο στοιχείων εισόδου,
- $O = \{o_0, o_1, \dots, o_n\}$ ένα πεπερασμένο σύνολο στοιχείων εξόδου,
- $f : S \times I \rightarrow S$ η συνάρτηση μετάβασης και
- $g : S \rightarrow O$ η συνάρτηση εξόδου.

Ένα σύστημα ΚΑ θα μπορούσε να περιγραφεί ως ένα διάλυμα από μεμονωμένα αυτόνομα αυτόματα τα οποία υπόκεινται στον ίδιο ακριβώς προγραμματισμό (συνάρτηση μετάβασης) αλλά επιτρέπεται να έχουν διαφορετική αρχική κατάσταση. Τα μεμονωμένα αυτόματα καλούνται κυψέλες και μεταξύ τους αναπτύσσονται αλληλεπιδράσεις στα πλαίσια γειτονιών οι οποίες υποκαθιστούν το σήμα εισόδου ενώ δεν ορίζεται συνάρτηση εξόδου. Έτσι, αντί να απαιτείται εξωγενής παρέμβαση, το σήμα εισόδου ορίζεται με βάση την κατάσταση που επικρατεί στην προκαθορισμένη γειτονιά. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα εξελίσσεται αυτόνομα, με τη συνάρτηση μετάβασης να καθορίζει την επόμενη κατάσταση κάθε μιας κυψέλης ξεχωριστά χωρίς εξωγενή είσοδο. Σε αναλογία με τον ορισμό του Αυτόματου, ένα σύστημα Κυψελοειδών Αυτόματων ορίζεται ως:

$$KA := (L, S, N, f) \quad (4.2)$$

όπου:

- L ένα πλέγμα/κάναβος στον χώρο,
- $S = \{s_0, s_1, \dots, s_n\}$ ένα πεπερασμένο σύνολο καταστάσεων,
- $N = \{n_0, n_1, \dots, n_k\}$ ένα πεπερασμένο σύνολο γειτονιών και
- $f : S^n \rightarrow S$ η συνάρτηση μετάβασης με $s_{t+1} = f(s_t)$.

4.2 Στοιχεία και Κατηγορίες Κυψελοειδών Αυτομάτων

Τα κυψελοειδή αυτόματα αποτελούν μια από τις πιο απλές μορφές των σύνθετων δυναμικών συστημάτων καθώς ορίζονται με ένα μικρό αριθμό από θεμελιώδη μαθηματικά στοιχεία. Μάλιστα ο ορισμός των ΚΑ είναι απλούστερος σε σχέση με τον ορισμό των Αυτομάτων. Παράλληλα όμως, εξαιτίας την γενικότητας των στοιχείων που ορίζουν τα ΚΑ, μπορεί να δημιουργηθεί ένα πολυπληθές σύνολο εξειδικευμένων ΚΑ. Τα διάφορα ΚΑ μπορεί να παρουσιάζουν εντελώς διαφορετικά χαρακτηριστικά και συμπεριφορές, απλά επεκτείνοντας και τροποποιώντας τις ιδιότητες των στοιχείων του ορισμού. Σε αναλογία με τον ορισμό που δόθηκε, οι διαφοροποιήσεις των ΚΑ εντοπίζονται στις περιπτώσεις που αναλύονται παρακάτω.

4.2.1 Το Πλέγμα των Κυψελοειδών Αυτομάτων

Ως προς το πλέγμα, η χωρική διάσταση, η γεωμετρία και τα σύνορα του πλέγματος δημιουργούν μια σειρά από διαφορετικές υλοποιήσεις των ΚΑ. Τα πρώτα ΚΑ ‘ζούσαν’ σε μια διάσταση και αναπαρίσταντο υπό μορφή ταινίας (Neumann 1948). Ακόμα και σήμερα υπάρχουν εφαρμογές μονοδιάστατων ΚΑ σε γραμμικά φαινόμενα, όπως π.χ. στην μοντελοποίηση κυκλοφοριακής συμφόρησης (Benyoussef 2001). Συνηθέστερα είναι τα 2D ΚΑ ενώ υπάρχουν και αρκετές θεωρητικές προσεγγίσεις ή εφαρμογές σε τρεις διαστάσεις (Gobron & Chiba 1999). Αν και είναι ιδιαίτερα απλό να γενικευθούν τα ΚΑ σε τέσσερις ή και παραπάνω διαστάσεις, τέτοιες υλοποιήσεις υπάρχουν κυρίως σε θεωρητικές προσεγγίσεις λόγω της αδυναμίας διαισθητικής αντίληψης και οπτικοποίησης

Η πλειοψηφία των ΚΑ χρησιμοποιούν ορθοκανονικό πλέγμα, με κάθε κυψέλη να έχει τετραγωνικό σχήμα και να γειτνιάζει με 8 άλλες κυψέλες. Γενικότερα όμως, το πλέγμα μπορεί να είναι κανονικό με τριγωνικές ή εξαγωνικές κυψέλες. Επίσης μπορεί να βασίζεται σε μη κανονική γεωμετρία όπου οι κυψέλες έχουν γεωμετρικά σχήματα βάση κάποιου συγκεκριμένου μοτίβου, όπως π.χ. να είναι πολύγωνα Voronoi (Carvalho 2006). Ακόμα μπορεί να είναι απλά αυθαίρετα σχήματα, αν και στην περίπτωση αυτή μπορεί να είναι δύσκολο να οριστούν οι συνθήκες γειτνίασης χωρίς να προσφέρεται κάποιο εμφανές πλεονέκτημα. Τέλος, πρόσφατα παρουσιάστηκαν ΚΑ τα οποία με δυναμικό πλέγμα το οποίο προσαρμόζεται στα διαθέσιμα δεδομένα (Vilet et al. 2008).

Ένα ακόμη μεταβλητό χαρακτηριστικό του πλέγματος στα ΚΑ εντοπίζεται στον ορισμό των συνόρων του. Ειδικότερα, υπάρχουν τουλάχιστον 3 τρόποι θεώρησης των συνόρων:

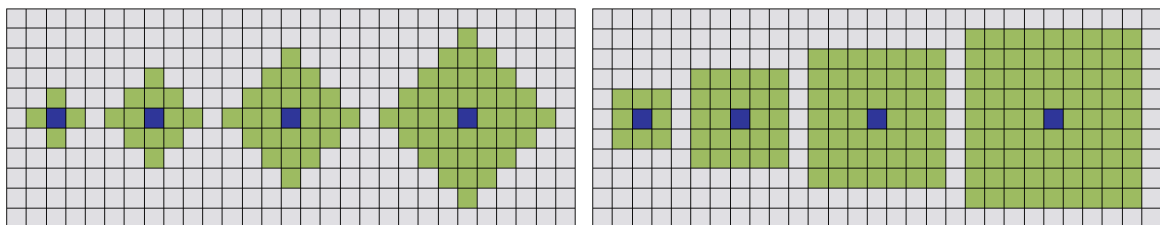
- Το σήμα που φτάνει στο σύνορο απορροφάται και ‘χάνεται’
- Το σήμα που φτάνει στο σύνορο ανακλάται, στην πράξη, αυτό επιτυγχάνεται εικονικά εκτείνοντας συμμετρικά το αρχικό πλέγμα

- Το σήμα που φτάνει στο σύνορο μεταφέρεται σε αντικείμενη κυψέλη επί του συνόρου, στην πράξη, αυτό επιτυγχάνεται τοποθετώντας εικονικά γύρω από το αρχικό πλέγμα αντίγραφα του εαυτού του

Η επιλογή των χαρακτηριστικών του πλέγματος έγκειται στην φύση του υπό μελέτη φαινομένου και στις προδιαγραφές και στους περιορισμούς της μαθηματικής του περιγραφής. Συνήθως, τα αστικά ΚΑ υιοθετούν ορθοκανονικά πλέγματα δύο διαστάσεων με ‘απορροφητικό’ σύνορο καθώς έτσι καθίσταται ιδιαίτερα απλή η μεταφορά των ΚΑ σε ψηφιδωτά γεωγραφικά δεδομένα (raster format).

4.2.2 Η Έννοια της Γειτονιάς στα Κυψελοειδή Αυτόματα

Ως προς το σύνολο γειτονιών N , τα ΚΑ μπορούν να διαχωριστούν βάση της μορφής και της ακτίνας των γειτονιών αλλά και βάση του πλήθους των διαφορετικών γειτονιών που χρησιμοποιούνται. Σε 1D ΚΑ, ο ορισμός της γειτονιάς είναι προφανής και το μόνο μεταβλητό στοιχείο είναι ο αριθμός των κυψελών που ανήκουν στην γειτονιά. Σε περισσότερες διαστάσεις όμως και ειδικότερα στην περίπτωση όπου η γεωμετρία του πλέγματος είναι συγκεκριμένη, οι επιλογές αυξάνονται. Η μορφή της γειτονιάς μπορεί να εκφραστεί ως πρότυπο επί της γεωμετρίας του πλέγματος, το μέγεθος του οποίου δίδεται από την ακτίνα της γειτονιάς, π.χ. σχήμα τετραγώνου (γειτονιά Moore) ή ρόμβου (γειτονιά Neumann) ακτίνας r σε 2D ορθοκανονικό πλέγμα (εικόνα 4.1). Σε αντίθετη περίπτωση, οπότε και το πλέγμα δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να περιγράψει γενικές συνθήκες γειτνιασης, οι γειτονιές δύνανται να οριστούν βάση της αποστάσεως από την κεντρική κυψέλη ή το σύνορο αυτής. Η μορφή και η ακτίνα της γειτονιάς καθορίζουν πλήρως ποιες κυψέλες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους οριοθετώντας καθ’ αυτόν τον τρόπο το γεωγραφικό πεδίο ορισμού της επιρροής (Tobler 1979).

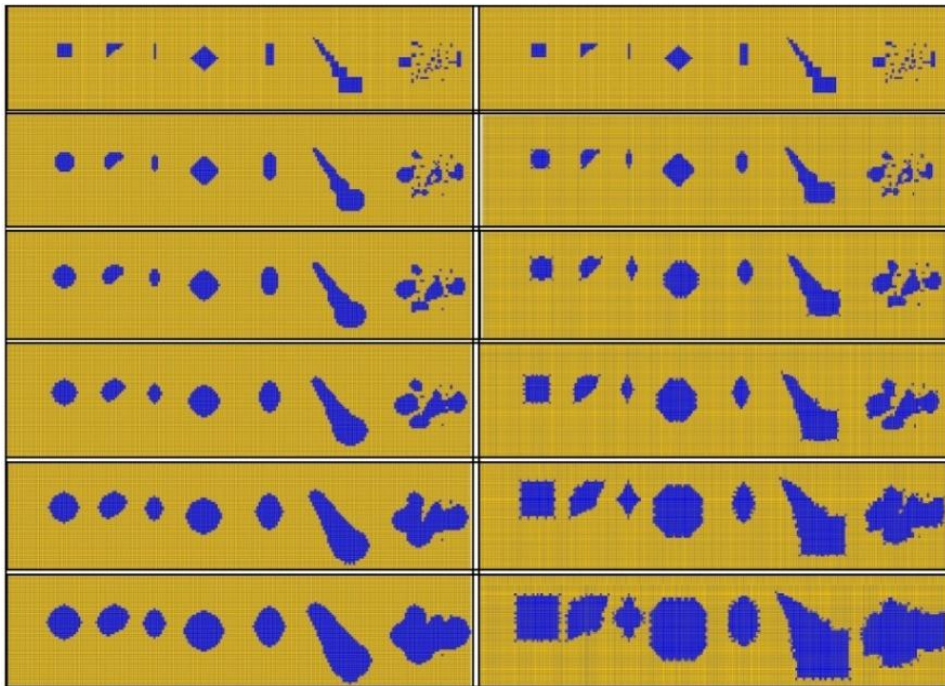


Εικόνα 4.1: Γειτονιές Neumann (αριστερά) και Moore (δεξιά) ακτίνας 1 έως 4

Επίσης, οι γειτονιές φαίνεται να επηρεάζουν τόσο την μεταφορά του σήματος όσο και του σφάλματος που δημιουργείται σε τοπικό επίπεδο (Liu & Phinn 2001, Yeh & Li 2003). Κατά συνέπεια ακόμα και μικρές μεταβολές στην γειτονιά, είτε στο σχήμα είτε στην ακτίνα, είναι ικανές να επιφέρουν σημαντική αλλαγή στην συμπεριφορά του συστήματος ΚΑ. Αυτό γίνεται ακόμα και αν διατηρήσουμε αναλλοίωτα τα υπόλοιπα στοιχεία του όπως φαίνεται στην εικόνα 4.2. Στις εφαρμογές

των ΚΑ σε χωρικά φαινόμενα, όταν χρησιμοποιούνται γειτονιές ακτίνας μεγαλύτερης της μονάδας, τότε σε κάθε κυψέλη ανατίθεται ένα βάρος το οποίο είναι γνήσια φθίνον ως προς την απόσταση από την κεντρική κυψέλη.

Παρά το γεγονός ότι ο ορισμός των ΚΑ υποστηρίζει την χρήση περισσότερων γειτονιών, οι περισσότερες εφαρμογές τους σε κανονικό πλέγμα χρησιμοποιούν μια μόνο γειτονιά σταθερής συνήθως ακτίνας. Αυτό συνεπάγεται ότι ‘η ταχύτητα του φωτός’, δηλ. η μέγιστη ταχύτητα με την οποία μεταφέρεται η πληροφορία (Itami 1994), είναι σταθερή σε όλο το σύστημα. Αυτός ο περιορισμός συχνά δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα και ειδικότερα στην αστική επέκταση, όπου διαφορετικές περιοχές μπορεί να αναπτύσσονται με διαφορετικές ταχύτητες. Σε αυτήν την κατεύθυνση έχουν προταθεί προσεγγίσεις οι οποίες χρησιμοποιούν δυναμικό πλέγμα ή δυναμικές γειτονιές μεταβλητής ακτίνας οι οποίες δεν ορίζονται απαραίτητα βάση τοπολογικών σχέσεων (Blecic et al. 2004) αλλά και πολλαπλές γειτονιές (Vancheri 2004).



Εικόνα 4.2: Η εξέλιξη της ίδιας αρχικής κατάστασης χρησιμοποιώντας γειτονιά Moore (αριστερά) και γειτονιά σχήματος X (δεξιά)

4.2.3 Οι Καταστάσεις των Κυψελών

Το σύνολο καταστάσεων S των ΚΑ είναι ο κύριος παράγοντας της πολυπλοκότητας του συστήματος και προδιαγράφει εν μέρει την προσαρμοστικότητά του στο υπό μελέτη φαινόμενο. Οι πρώτες υλοποιήσεις ΚΑ δεχόντουσαν ως είσοδο τις τιμές 0/1. Αργότερα επεκτάθηκαν ώστε η είσοδος να

είναι προκαθορισμένα αλφαριθμητικά, οπότε εξ ορισμού το σύνολο των καταστάσεων αποτελείται από ένα πεπερασμένο πλήθος προκαθορισμένων διακριτών στοιχείων. Αυτή η διαμόρφωση είναι επαρκής και πλήρης για ποιοτικά φαινόμενα, ωστόσο είναι σχετικά περιοριστική σε ποσοτικά φαινόμενα ή ακόμα και σε φαινόμενα που περιγράφονται από διατεταγμένες ποιότητες με δυσδιάκριτα όρια.

Σύντομα χρησιμοποιήθηκαν ΚΑ τα οποία επέκτειναν το σύνολο καταστάσεων στους φυσικούς αριθμούς \mathbb{N} και αργότερα τους πραγματικούς \mathcal{R} (Ostrov 1997, Vancheri 2004). Αυτό επέτρεψε στα ΚΑ να επιστρέφουν και συνεχείς τιμές. Πρόσφατα η διασύνδεση των ΚΑ και της λογικής της ασάφειας προσέφερε μεταξύ άλλων μια παρεμφερή δυνατότητα διαχείρισης συνεχών τιμών μέσα από μια εντελώς διαφορετική όμως προσέγγιση. Έτσι τα σύγχρονα ΚΑ σε επίπεδο αστικών μοντέλων είναι ικανά να διαχειρίζονται τόσο την εξάπλωση ποιοτικών χωρικών φαινομένων όπως η μεταβολή χρήσεων γης και η αγροτική-αστική μετάβαση, όσο και ποσοτικών όπως η πυκνότητα αστικής κάλυψης.

4.2.4 Η Συνάρτηση Μετάβασης

Αναμφίβολα, η θεωρία (rationale) των ΚΑ εκφράζεται με τη συνάρτηση μετάβασης f . Κάτω από το πρίσμα μιας πλέον αυστηρής και λιτής μαθηματικής θεώρησης, το πλέγμα, οι γειτονιές και οι καταστάσεις των κυψελών μπορούν να θεωρηθούν ως χαρακτηριστικά της συνάρτησης μετάβασης:

- Οι γειτονιές διαμορφώνουν το πεδίο ορισμού της συνάρτησης
- Το πλέγμα ορίζει την γεωμετρία του πεδίου ορισμού
- Οι καταστάσεις των κυψελών απαρτίζουν το σύνολο τιμών της συνάρτησης μετάβασης

Η συνάρτηση μετάβασης καθορίζει την συμπεριφορά του συστήματος ΚΑ σε τέτοιο βαθμό ώστε διαφορετικές αρχικές συνθήκες υπό την ίδια συνάρτηση μπορεί να παρουσιάζουν διαφορετική εξέλιξη παραμένοντας όμως παρόμοιες σε μορφή και στατιστικές ιδιότητες. Διαφορετικοί κανόνες μετάβασης ωστόσο, παρουσιάζουν εντελώς διαφοροποιημένη εξέλιξη, ακόμα και με την ίδια αρχική κατάσταση (Wolfram 1984). Η συνάρτηση μετάβασης μπορεί να περιγραφεί με μια εκτενή σειρά χαρακτηριστικών όπως αυτά περιγράφονται στον μαθηματικό λογισμό, στην πράξη ωστόσο, υπάρχει ένας μικρός αριθμός χαρακτηριστικών που έχουν εφαρμοστεί και μελετηθεί, ειδικότερα:

- Οι περισσότερες εφαρμογές διέπονται από ποιοτική συνάρτηση μετάβασης και βασίζονται στο πλαίσιο της κλασικής θεωρίας συνόλων με την γνώση να εκφράζεται με ένα σύνολο κανόνων της μορφής 'Εάν ... τότε'. Η συνάρτηση μετάβασης ωστόσο μπορεί να είναι ποσοτική και να περιγράφεται με μια αριθμητική παράσταση. Επίσης μπορεί να είναι κάποιος

- συνδυασμός στον οποίο ποιοτική είσοδος αντιστοιχείται σε ποσοτική έξοδο ή το αντίστροφο. Τέλος, η συνάρτηση μετάβασης μπορεί να βασίζεται στο πλαίσιο της λογικής της ασάφειας.
- Ένα ΚΑ χαρακτηρίζεται ως χωρικά ισοτροπικό αν η συνάρτηση μετάβασης δεν λαμβάνει υπόψη τις διαφορετικές μεταθέσεις των γειτονικών κυψελών μέσα στην γειτονιά. Η ισοτροπική ιδιότητα αποτελεί γενίκευση της συμμετρίας σε περισσότερες διαστάσεις. Γενικότερα, οι ανισοτροπικοί κανόνες εκφράζουν κάποια επιρροή της κατεύθυνσης (Deng 2008), για παράδειγμα, ο κανόνας με υπόθεση *‘αν υπάρχει μια κυψέλη με την ιδιότητα X στην γειτονιά’* είναι ισοτροπικός. Αντίθετα, ο κανόνας με υπόθεση *‘αν η κυψέλη βόρειο-ανατολικά έχει την ιδιότητα X’* είναι ανισοτροπικός. Οι περισσότερες εφαρμογές των αστικών ΚΑ είναι ισοτροπικές, ωστόσο πρόσφατα άρχισε να διερευνάτε περισσότερο και η περίπτωση των ανισοτροπικών ΚΑ (Deng 2008, Mantelas 2009).
 - Τα 2D ΚΑ είναι συνήθως ολοκληρωτικά ή καθολικά (totalistic), δηλαδή η συνάρτηση μετάβασης δε λαμβάνει υπ’ όψιν την κατάσταση της κάθε κυψέλης στη γειτονιά ξεχωριστά. Λαμβάνει κάποιον, συνήθως ποσοτικό, δείκτη ορισμένο επί της γειτονιάς όπως π.χ. το συνολικό πλήθος ή το άθροισμα των καταστάσεων στη γειτονιά. Τα πρώτα 1D ΚΑ ωστόσο, δεν ήταν πάντα ολοκληρωτικά μελετώντας κυρίως τις διαμορφώσεις των ΚΑ παρά εστιάζοντας σε πραγματικά φαινόμενα. Είναι εμφανές ότι ένα ολοκληρωτικό ΚΑ είναι ισοτροπικό, ενώ το αντίθετο δεν ισχύει απαραίτητα.
 - Ένα σύστημα ΚΑ χαρακτηρίζεται ντετερμινιστικό ή απόλυτο αν η συνάρτηση μετάβασης εκφράζει νομοτελειακές σχέσεις και αντιστοιχεί μία μοναδική έξοδο για κάθε είσοδο. Αντίστοιχα, χαρακτηρίζεται στοχαστικό ή πιθανοθεωρητικό αν η συνάρτηση μετάβασης λαμβάνει υπόψη πιθανότητες διαφορετικών ενδεχομένων και αντιστοιχεί πιθανώς παραπάνω από μια καταστάσεις, με συγκεκριμένη πιθανότητα την καθεμία, για κάθε είσοδο. Τα στοχαστικά κυψελοειδή αυτόματα συνήθως διαχειρίζονται την κατανομή πιθανοτήτων με χρήση στατικών αλυσίδων Markov (Ganguly 2003, Mulianat & Hariadi 2004).
 - Εν γένει, τα ΚΑ είναι μη αντιστρέψιμα (Packard & Wolfram 1985). Αυτό σημαίνει ότι γνωρίζοντας την κατάσταση του συστήματος σε κάποιο χρονικό βήμα, δε μπορούμε να συμπεράνουμε την κατάστασή του στο προηγούμενο. Υπό συγκεκριμένες συνθήκες ωστόσο, ένα ΚΑ μπορεί να παρουσιάζει αντιστρέψιμη συμπεριφορά (Maes & Shlosman 1991).
 - Τέλος, ένα ΚΑ είναι σύγχρονο ή συγχρονισμένο αν η εξέλιξη των μεμονωμένων κυψελών λαμβάνει χώρα ταυτόχρονα με βάση τις τιμές της γειτονιάς στο προηγούμενο βήμα. Ασύγχρονο ή ετεροχρονισμένο είναι όταν οι κυψέλες εξελίσσονται μια προς μια με βάση τις πιο πρόσφατες διαθέσιμες τιμές. Τα ασύγχρονα ΚΑ παρουσιάζουν ταχύτερη σύγκλιση ενώ τα ασύγχρονα τείνουν να επαναλαμβάνονται (Mamei et al. 2003).

4.3 Κυψελοειδή Αυτόματα στα Πλαίσια της Λογικής της Ασάφειας

Ο συνδυασμός των ΚΑ και της ΛΑ αποτελεί μια σχετικά σύγχρονη εξέλιξη. Εντούτοις, έχει χρησιμοποιηθεί σε αρκετές εφαρμογές όπως μοντέλα διάδοσης πυρκαγιάς (Mraz & Zimic 1999, Bone et al. 2006) και μοντέλα φόρτου ηλεκτρικών δικτύων (Miranda & Monteiro 1999). Αν και οι απόψεις σχετικά με την ονομασία δίστανται, ο συνδυασμός των ΚΑ και της ΛΑ παρέχει ορισμένα πλεονεκτήματα.

4.3.1 Ασαφή Κυψελοειδή Αυτόματα ή Ασαφή Κυψελοειδή Συστήματα;

Από μια ετυμολογική σκοπιά, ο συνδυασμός των Κυψελοειδών Αυτομάτων και της Λογικής της Ασάφειας, θα έπρεπε να καλείται Ασαφή Κυψελοειδή Αυτόματα (ΑΚΑ) ή Ασαφή Κυψελοειδή Συστήματα (ΑΚΣ); Αν και χρησιμοποιούνται και οι δυο όροι, τόσο η βιβλιογραφία όσο και οι διαδικτυακές πηγές φαίνεται να ευνοούν τον όρο ΑΚΑ. Ένα ΑΚΣ ορίζεται ως ένα σύνολο πανομοιότυπων κυψελών που καλύπτουν ένα πλέγμα στον χώρο και αλληλεπιδρούν με τις γειτονικές τους κυψέλες μέσω δυο συνόλων κανόνων. Ένα σύνολο κανόνων περιγράφει τις τοπικές συσχετίσεις και ένα άλλο σύνολο κανόνων περιγράφει την εξέλιξη κάθε κυψέλης (Caponetto et al 1998). Ο ορισμός των ΑΚΣ μπορεί να μεταφραστεί ως ένα επαναληπτικό ασαφές σύστημα που λαμβάνει υπόψη τοπικές συσχετίσεις. Από την άλλη μεριά, τα ΑΚΑ αντιμετωπίζονται ουσιαστικά ως ‘απλά’ ΚΑ εξοπλισμένα με ασαφή συνάρτηση μετάβασης. Ειδικότερα, τα ΑΚΑ ορίζονται (Mraz et al. 2000) ως $\{P, q, N, F, T, \lambda, x\}$, όπου:

- P είναι ένα πλέγμα από κυψέλες,
- q είναι ένα πεπερασμένο διανύσματα μη-κενών ασαφών συνόλων που περιγράφουν τις πιθανές καταστάσεις κάθε κυψέλης,
- N είναι ένα σύνολο (ασαφών) γειτονιών,
- Φ είναι ένα στατικό σύνολο κανόνων που αλλάζει την κατάσταση των κυψελών,
- T είναι η χρονική ασάφεια,
- λ είναι μια στατική απεικόνιση από το σύνολο καταστάσεων προς ένα σύνολο συμβόλων εξόδου, και
- x είναι ένα σύνολο ασαφών μεταβλητών που είναι καθολικές παράμετροι του συστήματος.

Στις περισσότερες εφαρμογές, ο ίδιος συνδυασμός των ΚΑ και της ΛΑ θα μπορούσε να περιγραφεί και από τους δυο ορισμούς. Για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής, ωστόσο θα χρησιμοποιείται ο όρος ΑΚΑ.

4.3.2 Πλεονεκτήματα των Ασαφών Κυψελοειδών Αυτομάτων

Η εφαρμογή της ΛΑ παρέχει στα ΑΚΑ μια σειρά από συγκριτικά πλεονεκτήματα έναντι των ΚΑ, το σημαντικότερο εκ των οποίων είναι η δυνατότητα να διαχειριστούν την αβεβαιότητα, την αοριστία και την ανακρίβεια και να τις ενσωματώσουν στην διαδικασία της μοντελοποίησης. Στον πραγματικό κόσμο, οι καταστάσεις και οι συσχετίσεις δε μπορούν πάντα να περιγραφούν ολοκληρωμένα, με σαφήνεια και μαθηματική αυστηρότητα. Ακόμα και όταν αυτό είναι θεωρητικά εφικτό, τα διαθέσιμα δεδομένα και οι πληροφορίες είναι συχνά ελλιπή, ανεπαρκώς ορισμένα ή ακόμα εμπεριέχουν και σφάλματα. Κατά συνέπεια τα ΑΚΑ μπορούν να καλύψουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών αλλά και να επιδείξουν μεγάλη ελαστικότητα απέναντι στους θεωρητικούς ή τεχνικούς περιορισμούς. Αυτό οφείλεται στην δυνατότητά τους να μπορούν να προσπελάσουν αμφίβολα δεδομένα και να τα επεξεργασθούν με αβέβαιους κανόνες (Mraz 1999).

Επιπλέον, η ΛΑ και η διασύνδεσή της με την φυσική γλώσσα παρέχουν τα κατάλληλα εργαλεία για την προσομοίωση κοινωνικών και εν γένει ανθρωπογενών φαινομένων. Τέτοια φαινόμενα προϋποθέτουν την μοντελοποίηση του τρόπου με τον οποίο οι άνθρωποι αντιλαμβάνονται το περιβάλλον τους, λαμβάνουν αποφάσεις και συμπεριφέρονται, όπως για παράδειγμα στα κυκλοφοριακά μοντέλα και τα μοντέλα αστικής επέκτασης. Τα ΑΚΑ πλεονεκτούν σε εφαρμογές όπου υπάρχει ένας μεγάλος όγκος εμπειρικής γνώσης και είναι απαραίτητη η εμπειρική περιγραφή καταστάσεων ή συσχετίσεων. Για παράδειγμα, ο καθορισμός των στατιστικά εύλογων τιμών ακινήτων ή η κατεύθυνση του ανέμου σε μοντέλα επέκτασης πυρκαγιάς σε πραγματικό χρόνο. Επίσης τα ΑΚΑ ενδείκνυνται για την κατανόηση των μηχανισμών ενός φαινομένου αλλά και την μεταφορά της γνώσης, καθώς εφαρμόζουν μια διαδικασία προσομοίωσης που είναι πλέον κατανοητή στους ανθρώπους (Chang et al. 2006).

Τέλος, τα ΑΚΑ παρουσιάζουν ορισμένα πλεονεκτήματα τεχνικής φύσης. Στα κλασσικά ΚΑ, υπάρχει η περίπτωση δυο ή περισσότεροι κανόνες να εξάγουν αντικρουόμενα αποτελέσματα. Αυτό απαιτεί να οριστεί ένα δευτερεύον σύνολο κανόνων για την επίλυση των διαφωνιών (collision rules). Στα ΑΚΑ, ο Λογισμός των Ασαφών Κανόνων παρέχει όλα τα απαραίτητα εργαλεία για την εσωτερική διευθέτηση των αντικρουόμενων αποτελεσμάτων. Τέλος, έχει δείχθει ότι δυναμική της εξέλιξης των ΑΚΑ παρουσιάζει μια απλούστερη μορφή (Betel & Flochini 2009) και χρησιμοποιούν συνήθως απλούστερες συναρτήσεις μετάβασης. Σαν αποτέλεσμα μειώνεται ο χρόνος που χρειάζεται ένα μοντέλο για να 'τρέξει' και περιορίζεται η διερεύνηση που απαιτείται κατά την διαδικασία της βαθμονόμησης (Al-kheder et al. 2008). Σε κάθε περίπτωση, τόσο τα ΑΚΑ όσο και τα ΚΑ αποτελούν ένα μεγάλο και σημαντικό κομμάτι των μοντέλων ΑσΕ και της μεταβολής χρήσεων γης, το οποίο περιγράφεται στο επόμενο κεφάλαιο.

Αστικά Κυψελοειδή Αυτόματα

Το κεφάλαιο 5 περιλαμβάνει μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση των Αστικών Κυψελοειδών Αυτόματων. Στην πρώτη ενότητα παρατίθενται τα στοιχεία που καθιστούν τα ΚΑ ενδεικνυόμενες τεχνικές για την μοντελοποίηση της ΑσΕ ενώ στις επόμενες δύο ενότητες αναφέρονται μερικά αντιπροσωπευτικά αστικά ΚΑ. Στην τέταρτη ενότητα αντιπαρατίθενται ενδεικτικοί δείκτες αριθμητικής προσαρμογής των αστικών ΚΑ.

‘Μια από τις πλέον χρήσιμες και ουσιαστικές εφαρμογές των ΚΑ εντοπίζεται στην προσομοίωση της αστικής επέκτασης’ (Barredo et al. 2003). Μάλιστα, ανάμεσα σε έναν μεγάλο αριθμό από μεθόδους που έχουν εξελιχθεί στην προσπάθεια να μοντελοποιηθεί η ΑσΕ, τα ΚΑ κατέχουν μια ιδιαίτερα σημαντική θέση (Hagoort et al. 2008). Η χρήση των ΚΑ στα μοντέλα ΑσΕ προέρχεται από την γεωγραφία (Liu 2009). Ο Waldo Tobler πρότεινε μια κυψελοειδή κατάτμηση του χώρου εφαρμόζοντας τον πρώτο νόμο της γεωγραφίας σύμφωνα με τον οποίο *‘όλα τα αντικείμενα συσχετίζονται μεταξύ τους, αλλά τα εγγύς αντικείμενα συσχετίζονται ισχυρότερα σε σχέση με τα απομακρυσμένα’* (Tobler 1970). Μερικά χρόνια αργότερα στο άρθρο *‘Cellular Geography’* (Tobler 1979) περιέγραψε ολοκληρωμένα την ιδέα των κυψελοειδών γεωγραφικών μοντέλων.

5.1 Η Λογική των Αστικών Κυψελοειδών Αυτόματων

Τα ΚΑ εστιάζουν στην δυναμική των βασικών στοιχείων του συστήματος και τις μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις. *‘Με αυτόν τον τρόπο η πολυπλοκότητα του συστήματος αναδύεται από την αλληλεπίδραση των βασικών στοιχείων’* (Malczewski 2004) ενώ η πληροφορία κινείται από κυψέλη σε κυψέλη και διαχέεται σε προκαθορισμένες γειτονιές (Torrens 2003). Αυτό γίνεται με απλούς κανόνες μετάβασης που περιγράφουν την αλλαγή της κατάστασης κάθε κυψέλης και μπορούν να θεωρηθούν ως γεννήτριες ανάπτυξης (Batty 1997). Υπό μια άλλη θεώρηση ωστόσο, οι κανόνες

μετάβασης διαδραματίζουν τον ρόλο του αλγόριθμου που κωδικοποιεί την συμπεριφορά του πραγματικού κόσμου στον τεχνητό κόσμο των ΚΑ (Cecchini & Rizzi 2001).

Οι γειτονίες επί των οποίων ορίζονται οι κανόνες μετάβασης καθορίζουν την απόσταση στην οποία αναπτύσσονται δυνάμεις έλξης ή απώθησης ανάμεσα στην αστική κάλυψη και τις χωρικές μεταβλητές που λαμβάνονται υπόψη (Henning 2008). Εν γένει, η ένταση και η έκταση της χωρικής εξάρτησης των μεγεθών μεταβάλλεται τόσο σε καθολικό επίπεδο όσο και τοπικά (Cheng & Masser 2003) κάτι που εκφράζεται με την χρήση διαφορετικών γειτονιών. Ανεξαρτήτως, ωστόσο, της κλίμακας στην οποία λειτουργούν, μπορούν να αναγνωρισθούν πέντε ομάδες χωρικών μεγεθών που συνήθως λαμβάνονται υπόψη στα αστικά ΚΑ (Baredo et al 2003):

- Παράγοντες που σχετίζονται με ατομικές προτιμήσεις, κοινωνικό-οικονομικά και πολιτικά χαρακτηριστικά που καθορίζουν την συμπεριφορά των ατόμων
- Περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά όπως όρη και ακτογραμμές που συνήθως χρησιμοποιούνται ως χωρικοί περιορισμοί της ΑΣΕ
- Τοπικές χρήσεις γης
- Καθολικά χαρακτηριστικά της πόλης όπως η απόσταση από το κέντρο και προσβασιμότητα μέσω μαζικής μεταφοράς
- Παράμετροι αστικού σχεδιασμού όπως οι συντελεστές δόμησης

Πέρα από τα εγγενή χαρακτηριστικά των ΚΑ που τα καθιστούν αποδοτικά στην μοντελοποίηση της αστικής επέκτασης, η τεχνική αυτή παρουσιάζει μια σειρά από επωφελείς ιδιότητες:

- Είναι απλά στην υπολογιστική εφαρμογή αλλά επιτρέπουν την προσομοίωση σύνθετων φαινομένων (Yacoubou 2008)
- Είναι δυναμικά και δεν εκτιμούν μόνο την τελική κατάσταση του συστήματος αλλά προσομοιώνουν την διαδικασία εξέλιξης
- Είναι εγγενώς χωρικές οντότητες και έχουν μια φυσική ομοιότητα με τα ψηφιδωτά αρχεία (Dietzel et al, 2005)
- Με τον ορισμό των γειτονιών και των σχέσεων μεταξύ των κελιών, επιτρέπουν τον ορισμό εξισώσεων/κανονων που μπορεί είναι διαφορετικές σε κάθε γειτονιά

Στον αντίποδα ωστόσο, το γενικό θεωρητικό πλαίσιο των ΚΑ παρουσιάζει ορισμένες αδυναμίες, ενδεικτικά:

- Υποστηρίζουν μόνο την χωρικά συνεχή επέκταση και αδυνατούν να προσομοιάσουν “δράση από απόσταση”, δηλαδή την αστικοποίηση περιοχών που δεν γειτνιάζουν με την υπάρχουσα αστική κάλυψη

- Ο καθορισμός των γειτονιών είναι συνήθως εμπειρικός και δε στοιχειοθετείται από κάποιο θεωρητικό ή πρακτικό πλαίσιο
- Ο χρόνος μετριέται με όρους επαναληπτικών βημάτων του αλγόριθμου χωρίς να σχετίζεται με τον πραγματικό χρόνο (Herold et al 2002)
- Η βαθμονόμηση των μοντέλων ΚΑ υλοποιείται κυρίως με εμπειρικές ή ευρετικές τεχνικές (Wu 2002)
- Οι απεικονίσεις των ΚΑ είναι στην πλειοψηφία τους μη-αντιστρέψιμες (Packard & Wolfram 1985) δηλαδή διαφορετικές αρχικές καταστάσεις ενός συστήματος μπορεί να οδηγήσουν σε παρεμφερείς ή και όμοιες τελικές καταστάσεις
- Η χρήση προκαθορισμένων διακριτών γειτονιών μπορεί να διαστρεβλώσει τις χωρικές σχέσεις και να επιφέρει σφάλμα στα αποτελέσματα (Yeh et al. 2003)

5.2 Αριθμητικά & Δυναδικά Αστικά Κυψελοειδή Αυτόματα

Η ‘νέα εποχή’ των ΚΑ αρχίζει στα μέσα της δεκαετίας του 1990 με το μοντέλο των White και Engelen (1993). Έκτοτε έχει αναπτυχθεί ένας μεγάλος αριθμός αστικών ΚΑ τα οποία διαφοροποιούνται το ένα από το άλλο ως προς τα τέσσερα βασικά χαρακτηριστικά των ΚΑ (πλέγμα, καταστάσεις κυψελών, γειτονίες και συνάρτηση μετάβασης). Επιπλέον, σημαντικές διαφορές μπορεί να παρατηρηθούν ως προς τις μεθόδους βαθμονόμησης και επικύρωσης των μοντέλων. Η πλήρης παράθεση των διαφορετικών μοντέλων ΚΑ που έχουν εφαρμοστεί υπερβαίνει τους αντικειμενικούς στόχους της παρούσης διατριβής. Εντούτοις, χάριν πληρότητας θα περιγραφούν μερικά σημαντικά αστικά ΚΑ που έχουν επηρεάσει τη δημιουργία του προτεινόμενου μοντέλου.

5.2.1 Το μοντέλο SLEUTH

Το μοντέλο SLEUTH παρουσιάστηκε αρχικά το 1997 (Clarke et al. 1997) και έκτοτε έχει εφαρμοσθεί σε αρκετές περιοχές. Η ονομασία προέρχεται από τα αρχικά των έξι μεταβλητών εισόδου (στην Αγγλική γλώσσα) τα οποία είναι: Slope (επικλινείς επιφάνειες), Land cover (κάλυψη γης), Exclusion (εξαιρούμενες περιοχές), Urbanisation (αστικοποίηση), Transportation (μεταφορές) και Hillshade (λοφώδης περιοχές). Το μοντέλο μπορεί να προσομοιώσει τόσο την ΑσΕ όσο και την γενικότερη μεταβολή των χρήσεων γης. Συνολικά αναγνωρίζει τέσσερις μορφές εξέλιξης: αυθόρμητη ανάπτυξη, επέκταση της αυθόρμητης ανάπτυξης, επέκταση των αρχικών αστικών περιοχών και επέκταση κατά μήκος οδικών αξόνων. Οι μορφές αυτές εφαρμόζονται κυκλικά και ελέγχονται από πέντε

παραμέτρους ανάπτυξης: διάχυση, αναπαραγωγή, διάδοση, οδική βαρύτητα και κλίσεις (Clarke et al. 1997, Clarke and Gaydos 1998).

Το SLEUTH έχει εφαρμοστεί σε έναν μεγάλο αριθμό περιπτώσεων στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής: στην μητροπολιτική περιοχή του Σαν Φρανσίσκο (Clarke, Hoppen & Gaydos 1997), στη Σάντα Μπάρμπαρα (Herold et al. 2002), στην μητροπολιτική περιοχή του Χιούστον (Dietzel et al. 2005a) στην περιοχή Σέντραλ Βάλει της Καλιφόρνια (Dietzel et al 2005b) και στη νότια Καλιφόρνια (Syphard et al. 2005). Επίσης το μοντέλο εφαρμόστηκε στην Ευρώπη και ειδικότερα στις πόλεις Λισσαβόνα και Πόρτο της Πορτογαλίας (Silva & Clarke 2005).

5.2.2 Τα Μοντέλα Moland/Murbandy

Τα μοντέλα Moland/Murbandy βασίζονται στην αρχική εργασία των White και Engelen (1993). Ο πυρήνας της οικογένειας αυτής είναι το υπολογιστικό περιβάλλον για την μοντελοποίηση της ΑΣΕ με την ονομασία Geonamica που αποτελεί προϊόν της εταιρίας RIKS³. Αυτή είναι η βάση για μια σειρά από μοντέλα με παρεμφερή χαρακτηριστικά που ακολούθησαν, όπως τα Prelude, Metronamika, Murbandy και Moland. Περισσότερο γνωστά είναι τα μοντέλα Murbandy και Moland που εξελίχθηκαν στα πλαίσια Ευρωπαϊκών ερευνητικών προγραμμάτων (web5.1).

Τα μοντέλα αυτά προσομοιώνουν την μεταβολή των χρήσεων γης ενώ υιοθετούν την κατηγοριοποίηση Corine και για αυτό χρησιμοποιούν ορθοκανονικό πλέγμα με κυψέλες 100μ. (White et al. 2000, Engelen et al. 2007). Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό τους αποτελεί η χρήση ενός θεματικού επιπέδου με τον τίτλο 'καταλληλότητα' το οποίο απεικονίζει την μερική δυνατότητα κάθε κυψέλης να υποστηρίξει μια συγκεκριμένη χρήση γης (Baredo et al. 2003, 2004). Το Moland έχει εφαρμοστεί σε έναν μεγάλο αριθμό Ευρωπαϊκών πόλεων, μια εκ των οποίων το Ηράκλειο Κρήτης, ωστόσο δεν υπάρχουν δημοσιευμένα αποτελέσματα για το σύνολο των πόλεων.

5.2.3 Το Μοντέλο Obeus

Το προσχέδιο του μοντέλου Obeus παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 2001 (Benenson et al. 2001) και ενσωμάτωσε δυο πρωτοποριακές ιδέες. Αφενός προέβλεπε ένα αντικειμενοστραφές περιβάλλον, αφετέρου παρουσίασε για πρώτη φορά την ιδέα του να συνδυαστούν ΚΑ και συστήματα πρακτόρων

³ <http://www.riks.nl/>

σε μοντέλα ΑσΕ. Καθώς τα συστήματα πρακτόρων άρχισαν να βρίσκουν εφαρμογές για την μοντελοποίηση της δυναμικής του πληθυσμού (Cheng & Masser 2003) η ιδέα του συνδυασμού των ΚΑ και των πρακτόρων άρχισε να ωριμάζει στην επιστημονική κοινότητα. Σε επίπεδο σύλληψης, οι δυο τεχνικές είναι πολύ κοντά μεταξύ τους και θεωρείται ότι πρακτικά διαφέρουν σε ένα ουσιαστικό σημείο: οι πράκτορες μπορούν να μετακινηθούν στον χώρο ενώ τα ΚΑ όχι (Torrens 2003, Waddel 2004). Το Obeus είναι ένα ολοκληρωμένο θεωρητικό και υπολογιστικό πλαίσιο διασύνδεσης των δυο τεχνικών (Torrens & Benenson 2005, Benenson, Kharbash 2006).

5.3 Ασαφή Αστικά Κυψελοειδή Αυτόματα

Τα δυαδικά (crisp) αστικά ΚΑ μπορεί να είναι είτε αριθμητικά, είτε να εφαρμόζουν ποιοτικούς κανόνες. Τα αριθμητικά ΚΑ εστιάζουν στην αποδοτικότητα των εκτιμήσεων και παράγουν ακριβή αποτελέσματα. Αντίθετα, τα μοντέλα με κανόνες παρουσιάζουν μικρότερη ακρίβεια αλλά μπορούν να περιγράψουν καλύτερα τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της ανθρώπινης συμπεριφοράς και των αποφάσεων που λαμβάνονται στα πλαίσια ενός αστικού κοινωνικό-οικονομικού συστήματος. Τα ασαφή ΚΑ αποτελούν μια ενδιάμεση προσέγγιση που είναι ικανή να συνδυάσει τόσο ποιοτικές όσο ποσοτικές αναλυτικές διαδικασίες. Κατά συνέπεια μπορούν να προσεγγίσουν τις ανθρωπογενείς παραμέτρους της αστικής επέκτασης μέσα από ένα ανοιχτό μοντέλο αλλά και να παρέχουν σχετικά υψηλή – αν και υποδεέστερη σε σχέση με τα αριθμητικά ΚΑ – ακρίβεια. Επίσης είναι σε θέση να ενσωματώσουν την ασάφεια της πληροφορίας στην διαδικασία μοντελοποίησης (Malczewski 2004).

Υπάρχουν αρκετές θεωρητικές προσεγγίσεις ΑΚΑ για την μοντελοποίηση της αστικής επέκτασης. Σε αυτές η ΛΑ μπορεί να χρησιμοποιηθεί τμηματικά για τον υπολογισμό κάποιων παραμέτρων των ΚΑ, όπως στην στοχαστική προσέγγιση του Vancheri (Vancheri et al. 2004). Συνηθέστερα ωστόσο, η ΛΑ εφαρμόζεται στο μοντέλο για την διαχείριση της πληροφορίας. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκει η θεωρητική προσέγγιση της Dragicevic (Dragicevic 2004) η οποία προτείνει την εξαγωγή δεδομένων από δορυφορικές εικόνες με ασαφείς αλγορίθμους ταξινόμησης και την χρήση χρονικά μεταβαλλόμενων συναρτήσεων συμμετοχής. Αντίθετα με τις θεωρητικές προσεγγίσεις όμως, υπάρχει μόνο ένας μικρός αριθμός ολοκληρωμένων εφαρμογών που περιγράφονται στις επόμενες ενότητες.

5.3.1 Το Μοντέλο του Wu

Το πρώτο μοντέλο ΑΚΑ είναι αυτό του Wu (1996, 1998). Το μοντέλο εστιάζει στην προσομοίωση της ΑσΕ και την μετατροπή κάθε κυψέλης από αγροτική σε αστική αλλά περιορίζεται στην επέκταση

των αστικών συνόρων. Τόσο η είσοδος όσο και η έξοδος περιγράφονται με δυαδικά σύνολα αλλά η συνάρτηση μετάβασης ελέγχεται πλήρως από ένα ασαφές σύστημα. Το σύστημα εκφράζει την γνώση με λεκτικούς κανόνες και υποστηρίζει την χρήση λεκτικών προσδιορισμών ενώ εφαρμόζει στοιχειώδη λογισμό ασαφών κανόνων. Συγκεκριμένα, τα κριτήρια που θεωρούνται πηγές της αστικοποίησης συνδέονται μεταξύ τους με τελεστή μεγίστου ενώ τα κριτήρια που θεωρούνται περιορισμοί με τελεστή ελαχίστου. Επιπλέον, η αποσαφήνιση εκτελείται μέσω του τελεστή μεγίστου. Το μοντέλο χρησιμοποιεί γειτονίες Moore ακτίνας δυο ενώ ο χρόνος μετριέται βάση των επαναληπτικών βημάτων του αλγορίθμου χωρίς να συνδέεται με τον πραγματικό χρόνο.

Το μοντέλο του Wu εφαρμόστηκε σε πραγματικά δεδομένα στην πόλη Γουαντζού (Guangzhou) στην νότιο Κίνα χωρίς ωστόσο να βαθμονομηθεί. Επιπλέον, δεν έγινε κάποια μέτρηση της ακρίβειας ή του σφάλματος των αποτελεσμάτων. Ωστόσο, οπτική σύγκριση ανάμεσα στα αποτελέσματα του μοντέλου και τα πραγματικά δεδομένα δείχνει ότι το μοντέλο δουλεύει τουλάχιστον ικανοποιητικά αν και αδυνατεί να συλλάβει την μακροσκοπική επίδραση ορισμένων μεγεθών (Wu 1996). Ανεξαρτήτως των τεχνικών του χαρακτηριστικών, το μοντέλο αυτό ενισχύει δυο σημαντικά επιθυμητά χαρακτηριστικά των αστικών μοντέλων που υιοθετούνται και από το μοντέλο CaFe που προτείνεται στη παρούσα διατριβή. Αυτά είναι η διατήρηση απλών κανόνων που ωστόσο αντικατοπτρίζουν και μιμούνται πολύπλοκες διαδικασίες λήψης αποφάσεων (Wu 1996) και η κατανόηση των διαδικασιών που επιφέρουν τις μεταβολές των χρήσεων γης (Wu 1998).

5.3.2 Το Μοντέλο των Liu & Phinn

Οι Liu και Phinn (Liu & Phinn 2001, 2003) πρότειναν μια προσέγγιση για την προσομοίωση της ΑσΕ που είχε αρκετές ομοιότητες αλλά και διαφορές με το μοντέλο του Wu. Καταρχήν, τόσο η είσοδος όσο και η έξοδος του μοντέλου αποτελούν ασαφείς μεταβλητές που περιγράφονται από πολλαπλά ασαφή σύνολα. Επιπλέον, σε αυτό το μοντέλο χρησιμοποιείται ο πληθυσμός μιας κυψέλης για να οριστεί η τάση προς αστικοποίηση αλλά και για την αρχικοποίηση του συστήματος. Οι κανόνες θεωρούν δυο χρήσεις γης (αστική και μη-αστική) και εκφράζουν λογιστικά πρότυπα ανάπτυξης που παραπέμπουν σε ασαφή συστήματα Sugeno. Κάθε κανόνας χρησιμοποιεί όλες τις μεταβλητές εισόδου στην υπόθεσή του ενώ ως συμπέρασμα εκφράζει διαφορετικές ταχύτητες ανάπτυξης εκφρασμένες ως ασαφή σύμβολα.

Η διαμόρφωση αυτή επιβάλλει κάθε κυψέλη σε κάθε βήμα να πυροδοτεί μόνο έναν από τους κανόνες. Επιπροσθέτως, αποτελεί έναν σχετικά δυσδιάκριτο μηχανισμό που φαίνεται να εστιάζει περισσότερο στην εντατικοποίηση της αστικής κάλυψης παρά στην ΑσΕ. Το μοντέλο χρησιμοποιεί κυκλικές γειτονίες ακτίνας 1, 2 και 3 κυψελών ενώ ο χρόνος μετριέται με εσωτερικά επαναληπτικά βήματα. Στις αρχικές τους δημοσιεύσεις χρησιμοποιούν μια τεχνητή πόλη και τεχνητά δεδομένα για

αστική κάλυψη, υψόμετρα, κλίσεις και οδικό δίκτυο για να μελετήσουν την συμπεριφορά του μοντέλου. Σε αυτό το στάδιο δεν εκτελείται κάποια βαθμονόμηση ή αξιολόγηση του μοντέλου.

Η πρώτη ολοκληρωμένη εφαρμογή του μοντέλου έγινε δυο χρόνια αργότερα στο Σύδνεϋ (Liu & Phinn 2005) σε μια περιοχή που αναλύθηκε σε 66.000 κυψέλες ακμής 250μ. Το μοντέλο αναγνωρίζει πλέον τρεις κατηγορίες χρήσεων γης, μη-αστική, μερικώς αστική και αστική ενώ τα ΚΑ αλληλεπιδρούν σε γειτονίες ακτίνας ένα. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν περιλαμβάνουν κλίσεις, οδικό δίκτυο, ελκυστικότητα εδάφους και ακτής και το σχέδιο πόλης. Η εφαρμογή έλαβε χώρα για το διάστημα 1971-1996 κατά το οποίο η αστική κάλυψη μεταβλήθηκε κατά 28% ενώ η βαθμονόμηση εκτελέστηκε εμπειρικά. Αργότερα το μοντέλο εφαρμόστηκε σε διαφορετική περιοχή του Σύδνεϋ για την περίοδο 1976-2006 κατά την οποία η αύξηση της αστικής κάλυψης ήταν της τάξης του 30% (Liu 2009). Για την αξιολόγηση της προσαρμογής των αποτελεσμάτων των εφαρμογών αυτών στην πραγματικότητα χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης K^4 υπολογισμένος σε γειτονίες 3X3 ο οποίος έλαβε αντίστοιχα τις τιμές 90 και 83.6%.

5.3.3 Μεταγενέστερες Εφαρμογές

Τα μοντέλα των Wu και Liu-Phinn αποτελούν τα πρώτα ολοκληρωμένα και λειτουργία αστικά ΑΚΑ. Έκτοτε παρουσιάστηκαν τουλάχιστον άλλες τρεις εφαρμογές ασαφών ΚΑ για την μοντελοποίηση της ΑσΕ. Η μια εξ αυτών έγινε στην Ινδιανάπολις Η.Π.Α για το διάστημα 1992-2003 (Al-Kheder et al. 2008). Η περιοχή μελέτης μοιράστηκε σε 24 υπό-περιοχές με έκταση περίπου 93τ.χμ η καθεμία. Τα ΚΑ χρησιμοποίησαν κυψέλες ακμής 60μ. και γειτονίες ακτίνας ένα. Οι κανόνες μετάβασης βασίζονταν σε εμπειρική γνώση, η οποία όμως μπορούσε να διαφέρει από υπό-περιοχή σε υπό-περιοχή. Εμπειρικά καθορίστηκαν και οι μορφές των ασαφών συνόλων και των αντίστοιχων συναρτήσεων συμμετοχής ενώ η αποσαφήνιση εκτελέστηκε με την μέθοδο κέντρου βάρους.

Η εφαρμογή έγινε σε δυο στάδια. Στο πρώτο το μοντέλο υπέστη βαθμονόμηση για την περίοδο 1987-1992 ενώ στο δεύτερο εφαρμόστηκε για την περίοδο 1992-2003. Για την αξιολόγηση του μοντέλου ορίστηκαν τέσσερις αριθμητικοί δείκτες σφάλματος. Αυτοί είναι ο λόγος των εκτιμώμενων αστικών κυψελών προς τις πραγματικά αστικές κυψέλες, το σφάλμα υπερεκτίμησης, το σφάλμα υποτίμησης και συνολικό το σφάλμα υπολογισμένα για το σύνολο της περιοχής. Για το διάστημα

⁴ Ο δείκτης K περιγράφεται αναλυτικά στην επόμενη ενότητα.

1987-1992 οι δείκτες προσαρμογής έλαβαν τις τιμές 105.5%, 34.66%, 35.2% και 24.8% αντίστοιχα ενώ για το 1992-2003 τις τιμές 93.8%, 30,7% , 38.4% και 24.3%.

Η δεύτερη εφαρμογή έγινε στην Σαουδική Αραβία (Al-Ahmadi et al. 2008) για τις περιόδους 1987-1997, 1997-2005 και 1987-2005. Το μοντέλο χρησιμοποιεί κυψέλες ακμής 20μ. και δεδομένα που περιλαμβάνουν κλίσεις, υψόμετρα, προσβασιμότητα, σχέδιο πόλης και προστατευόμενες περιοχές. Αν και οι εικόνες δείχνουν ότι το μοντέλο εκτιμά ικανοποιητικά την μελλοντική αστική κάλυψη, δεν υπολογίζεται κάποιος δείκτης ακρίβειας ή σφάλματος. Ανάμεσα στις μεταγενέστερες εφαρμογές αστικών ΑΚΑ εντοπίζεται και ο πρόδρομος του μοντέλου που προτείνεται στη παρούσα διατριβή.

5.4 Αξιολόγηση της Αριθμητικής Προσαρμογής των Αστικών ΚΑ

‘Τα μοντέλα ΑσΕ δε χαρακτηρίζονται από την αριθμητική ακρίβεια των αποτελεσμάτων τους, αλλά από την πίστη στην δυναμική συμπεριφορά που παράγουν’ (Meadows et al 2005). Ωστόσο, η ποιοτική συμπεριφορά ενός μοντέλου δε μπορεί να αξιολογηθεί με αντικειμενικά κριτήρια. Στον αντίποδα, η αριθμητική προσαρμογή των αποτελεσμάτων του μοντέλου ως προς την πραγματικότητα μπορεί να μετρηθεί και να αποτελέσει μια αντικειμενική ένδειξη για την αποδοτικότητα του μοντέλου. Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, συνήθως χρησιμοποιούνται τρεις αριθμητικοί δείκτες προσαρμογής των αποτελεσμάτων, το μέσο σφάλμα χάρτη και τους δείκτες Lee-Sallee και Kappa. Το μέσο σφάλμα χάρτη αποτελεί τον πλέον απλό δείκτη και μετράει το ποσοστό των κυψελών που χωροθετήθηκαν λαθεμένα στο σύνολο της περιοχής. Συνηθέστερα ωστόσο, χρησιμοποιείται το συμπλήρωμα του μέσου σφάλματος που αναφέρεται και ως ακρίβεια του χρήστη (user’s accuracy).

Οι δείκτες Lee-Sallee και Kappa είναι πιο σύνθετοι και υπολογίζουν την ομοιότητα μεταξύ των αποτελεσμάτων του μοντέλου και της πραγματικής αστικής κάλυψης. Ο δείκτης Lee-Sallee είναι ουσιαστικά το πηλίκο της τομής των δυο επιπέδων διά την ένωση τους (Kim et al 2006) και λαμβάνει τιμές στο διάστημα [0,1] με την τιμή 1 να υποδεικνύει πλήρη και τέλεια προσαρμογή. Αντίθετα, ο δείκτης Kappa λαμβάνει τιμές στο διάστημα [-1,1]. Η τιμή 1 υποδεικνύει πλήρη ομοιότητα των επιπέδων και η τιμή -1 την απουσία οποιασδήποτε ομοιότητας ενώ η τιμή 0 αντιστοιχείται στην μέση τυχαία αναμενόμενη ομοιότητα (Jasper 2009). Ο δείκτης Kappa εκτελεί συγκρίσεις ανά ζεύγη κατηγοριών των δεδομένων (Hagoort et al 2008) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σύγκριση επιπέδων με παραπάνω από δυο καταστάσεις. Ως εκ τούτου, οι δείκτες αυτοί χρησιμοποιούνται από μοντέλα μεταβολής χρήσεων γης και από μοντέλα αστικής επέκτασης. Ο πίνακας 5.1 παραθέτει μερικούς ενδεικτικούς δείκτες προσαρμογής των μοντέλων που περιγράφηκαν στο παρόν κεφάλαιο.

Εφαρμογές / χαρακτηριστικά ⁵		ακμή κυψέλης	περίοδος / δεδομένα	μεταβολή % ⁶	LS%	K% ⁷	ακρίβεια χάρτη %
ΚΑ	Sleuth Santa-Barbara	300	1900-1990	-	-	-	97
	Sleuth San Joaquin		1988, 1992, 1994, 1996	-	74	-	93
	Sleuth Houston		1990-2000	26	-	82	87,3
	Sleuth Lisbon		1975, 1984, 1995 1997	-	35		-
	Sleuth Porto			-	58		-
	Moland Dublin A	100	1968-1998	-	-	62 -92	-
	Moland Dublin B		1988-1998	-	-	>80	-
Ασαφή ΚΑ	Liu-Phinn Sydney A	250	1971-1996	28	-	90	-
	Liu-Phinn Sydney B		1976-2006	30	-	83,6	-
	Al-Kheder Indianapolis Calibration	60	1987-1992	-	-	-	75,2
	Al-Kheder Indianapolis Evaluation		1992-2003	-	-	-	75,7

Πίνακας 5.1: Πίνακας με τους αριθμητικούς δείκτες προσαρμογής μερικών αστικών ΚΑ

⁵ Οι δείκτες υπολογίζονται για την περίοδο βαθμονόμησης με εξαίρεση το μοντέλο του Al-Kheder όπου υπολογίζονται τόσο για την περίοδο βαθμονόμησης όσο και για μια μεταγενέστερη περίοδο αξιολόγησης.

⁶ Σε συγκριτική μελέτη που έλαβε χώρα, η μέση μεταβολή της αστικής κάλυψης σε ένα μεγάλο αριθμό εφαρμογών υπολογίστηκε σε 10% (Pontius & Malanson, 2005).

⁷ Το μοντέλο των Liu-Phinn υπολογίζει τον δείκτη Kappa σε γειτονίες 3X3 δηλ. 750X750μ. και κατά συνέπεια επιστρέφει τεχνητά υψηλότερες τιμές προσαρμογής.

Το Μεθοδολογικό Πλαίσιο Μοντελοποίησης CaFe

Στο κεφάλαιο 6 περιγράφεται αναλυτικά το θεωρητικό και τεχνικό υπόβαθρο του προτεινόμενου μεθοδολογικού πλαισίου μοντελοποίησης CaFe. Στη πρώτη ενότητα δίδεται η εξελικτική πορεία του μοντέλου ενώ ακολούθως περιγράφεται η θεώρηση της αστικής κάλυψης, του χώρου και του χρόνου. Στην τρίτη ενότητα αναλύεται η εσωτερική μεταβλητή ‘καταλληλότητα προς αστικοποίηση’. Στην ίδια ενότητα περιγράφεται η διαδικασία εξαγωγής γνώσης και αναλύονται τα χαρακτηριστικά του ασαφούς συστήματος γνώσης που εφαρμόζεται. Έμφαση δίδεται στην χρονική μεταβλητότητα και στην παράλληλη συνδεσμολογία των κανόνων. Η τέταρτη ενότητα περιγράφει τον εξελιγμένο υβριδικό μηχανισμό Κυψελοειδών Αυτομάτων που εφαρμόζεται, τις χωρικές διεργασίες ανάπτυξης που ενσωματώνει και τα καινοτόμα τεχνικά χαρακτηριστικά του.

Το CaFe βασίζεται σε τρεις σχεδιαστικούς άξονες: να είναι *ρεαλιστικό*, *ανοιχτό* και *εύχρηστο*. *Ρεαλιστικό* σημαίνει να μπορεί να εκτιμήσει την δυνητική κατάσταση της μελλοντικής αστικής κάλυψης αλλά και να προσομοιώνει με ικανοποιητική ακρίβεια τα υποκείμενα χωρικά πρότυπα της αστικής επέκτασης. Ο όρος *ανοιχτό* αναφέρεται στην δυνατότητα του χρήστη αφενός να κατανοήσει του μηχανισμούς του μοντέλου και αφετέρου να τους τροποποιήσει ανάλογα με τις επιταγές και τους περιορισμούς της κάθε εφαρμογής. Τέλος, μεγάλη έμφαση έχει δοθεί στην *ευχρηστία* και την *προσαρμοστικότητα* του μοντέλου στα διαθέσιμα δεδομένα. Το CaFe έχει δεχθεί επιρροές από τα ασαφή αστικά ΚΑ των Wu και Liu-Phinn, από τα οποία ωστόσο διαφοροποιείται σε μεγάλο βαθμό. Παράλληλα, το προτεινόμενο μοντέλο υιοθετεί κάποια χαρακτηριστικά των (μη-ασφών) αστικών ΚΑ αλλά εισαγάγει και ορισμένα νεωτεριστικά χαρακτηριστικά. Ειδικότερα στοχεύει στο να:

- δομείται εξ αρχής σύμφωνα με την εκάστοτε εφαρμογή,
- μην υπόκειται σε σημαντικούς περιορισμούς δεδομένων,
- παρέχει ένα ευέλικτο πλαίσιο διαχείρισης της γνώσης και
- συνδυάζει ορισμένα από τα πλεονεκτήματα των αστικών ΚΑ και να περιορίσει ορισμένες από τις αδυναμίες τους.

6.1 Τα Στάδια Εξέλιξης του CaFe

Ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη ενός μοντέλου είναι μια συνεχής διαδικασία. Ωστόσο, η ανάπτυξη του μοντέλου που προτείνεται στη παρούσα διατριβή μπορεί να διαχωριστεί σε τέσσερα στάδια. Στο πρώτο στάδιο προτάθηκε ένα απλό μοντέλο (Mantelas et al. 2007). Το μοντέλο αυτό βασίζεται σε έναν μεγάλο βαθμό στην προσέγγιση του Wu υπό το πρίσμα ότι χρησιμοποιεί εμπειρικά καθοριζόμενους κανόνες και σύνολα. Διαφοροποιείται ωστόσο ως προς αρκετά χαρακτηριστικά. Ειδικότερα, εισάγει την αποκλειστική χρήση της εσωτερικής μεταβλητής *‘καταλληλότητα προς αστικοποίηση’* για τον υπολογισμό της οποίας χρησιμοποιούνται χωρικά μεταβαλλόμενοι κανόνες. Παράλληλα, υποστηρίζει την χρήση πληρέστερης ασαφούς άλγεβρας, συμπεριλαμβανομένων εξειδικευμένων λεκτικών προσδιορισμών. Ο πρώτος αυτός πρόδρομος του CaFe αποτελεί αντικείμενο μεταπτυχιακής εργασίας.

Το μοντέλο που προτείνεται στο δεύτερο στάδιο (Μαντέλας et al. 2008, Mantelas et al. 2008) εξακολουθεί να χρησιμοποιεί εμπειρική γνώση αλλά προτείνει την παράλληλη σύνδεση των κανόνων *‘καταλληλότητας προς αστικοποίηση’* εφαρμόζοντας αποκλειστικά τον τελεστή συγκέντρωσης πιθανοθεωρητικό ‘H’ στα πλαίσια της λογικής αιτιολόγησης των Dempster-Schaffer. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται δυο ξεχωριστά συστήματα ΑΚΑ, ένα σύστημα Mamdani που προσομοιώνει την αστική επέκταση και ένα σύστημα Sugeno που προσομοιώνει την εντατικοποίηση της αστικής κάλυψης το οποίο εφαρμόζει ένα εκθετικό πρότυπο μεταβολής.

Στο τρίτο στάδιο (Mantelas et al. 2010 & 2011), υπάρχουν μεγαλύτερες επιρροές από το μοντέλο της Liu με το μοντέλο να υιοθετεί την χρήση ασαφών συμβόλων στην έξοδο αλλά και μικρότερο αριθμό συνόλων για κάθε ασαφή μεταβλητή. Με αυτόν τον τρόπο αποσκοπεί να διαμορφώσει τη βάση γνώσης που χρησιμοποιείται έτσι ώστε να είναι πλέον εύκολο να κατανοηθεί και να μεταβληθεί εμπειρικά από τον χρήστη. Επιπλέον, προτείνει ένα πλαίσιο για την χρήση δυναμικής *‘καταλληλότητας προς αστικοποίηση’* η οποία μεταβάλλεται ανάμεσα στα διαδοχικά βήματα του μηχανισμού ΚΑ. Τέλος, εφαρμόζει κανόνες ψευδό-πρακτόρων που καθιστούν δυνατή την προσομοίωση της ΑσΕ σε περιοχές που δε γειτνιάζουν με την αρχική αστική κάλυψη.

Το τέταρτο εξελικτικό στάδιο του μοντέλου (Μαντέλας et al. 2010, Mantelas et al. 2010b) εστιάζεται στην βελτίωση της απόδοσης του μοντέλου και στην δυνατότητα μεταφοράς του σε άλλες περιοχές μελέτης. Για αυτόν τον λόγο εφαρμόζεται μια παράλληλη σύνδεση των μεταβλητών εισόδου με την χρήση ενός νέου τελεστή, του τελεστή Ευαίσθητο Άθροισμα (ΕΑ), που λαμβάνει υπόψη την στατιστική συσχέτιση των μεγεθών επί των οποίων εφαρμόζεται. Αυτό αφενός περιορίζει το σφάλμα υπερεκτίμησης, αφετέρου επιτρέπει την αφαίρεση ή προσθήκη κανόνων χωρίς να μεταβάλει την υπόλοιπη βάση γνώσης. Επιπλέον, υλοποιείται ένα υβριδικό ασαφές σύστημα το οποίο συνδυάζει χαρακτηριστικά των συστημάτων Sugeno και Mamdani με την χρήση εκθετικών τελεστών ενώ

εισάγεται η χρήση ΚΑ κατά κατεύθυνση. Τέλος, χρησιμοποιούνται πολλαπλές γειτονιές που μπορεί να διαφοροποιούνται από μια περιοχή σε άλλη αλλά και να μεταβάλλονται στο πέρασμα του χρόνου.

Η τρέχουσα και πλέον ολοκληρωμένη μορφή του μοντέλου προσομοίωσης ΑΣΕ η οποία παρουσιάζεται και προτείνεται στη παρούσα διατριβή φέρει το κωδικό όνομα CaFe και ενσωματώνει το σύνολο των τεχνικών προσεγγίσεων που έχουν προταθεί στα διαφορετικά στάδια της εξέλιξης του μοντέλου μέχρι στιγμής. Οι βασικές θεωρήσεις του μοντέλου και το γενικότερο μεθοδολογικό πλαίσιο μοντελοποίησης παρουσιάζονται αναλυτικά στην επόμενη ενότητα.

6.2 Θεώρηση των Βασικών Μεγεθών της Αστικής Επέκτασης

Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός λογισμικών που υποστηρίζουν τις κλασσικές λειτουργίες των ΚΑ, όπως το JCASim (web6.1), το LogiCell (web6.2) και το Cellab (web6.3), ενώ υπάρχουν αρκετά λογισμικά (κελύφη) για την υλοποίηση ασαφών συστημάτων, όπως το Fuzzy Toolbox της Matlab (web6.4), η Fuzzy-Clips (web6.5) και το DataEngine (web6.6). Δεν υπάρχουν ωστόσο λογισμικά που να υποστηρίζουν την συνδυαστική εφαρμογή της ΛΑ και των ΚΑ. Ως εκ τούτου, το CaFe εξελίχθηκε εξαρχής σε προγραμματιστικό περιβάλλον και ειδικότερα σε γλώσσα C. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε η έκδοση 4.9.9.2 του περιβάλλοντος BloodShed DevC (web6.7) και ο μεταγλωττιστής MingW32 (web6.8).

Η ανάπτυξη του CaFe ως αυτόνομο κώδικα επιτρέπει τον συνδυασμό των τυπικών λειτουργιών τόσο της ΛΑ όσο και των ΚΑ και την εξέλιξη των πρωτότυπων χαρακτηριστικών του μοντέλου, την χρήση της ενδιάμεσης μεταβλητής *‘καταλληλότητα προς αστικοποίηση’*, τον εξελιγμένο μηχανισμό προσομοίωσης της ΑΣΕ και τα κατάλληλα εργαλεία για την υλοποίηση των παραπάνω. Παράλληλα, επιτρέπει την εξειδικευμένη θεώρηση των βασικών μεγεθών της ΑΣΕ.

6.2.1 Θεώρηση της Αστικής Κάλυψης

Το CaFe θεωρεί δυο ποιοτικές καταστάσεις των κυψελών, αστικές και μη αστικές. Οι μη-αστικές κυψέλες περιγράφονται από ένα δυαδικό σύνολο ενώ οι αστικές περιγράφονται στα πλαίσια της ΛΑ. Έτσι αν μια κυψέλη καλύπτεται κατά το ήμισυ της επιφάνειάς της από κτίρια, τότε θεωρείται αστική κατά 50%. Το CaFe εστιάζει στους μηχανισμούς μετατροπής των μη-αστικών περιοχών σε αστικές οικοδομημένες περιοχές. Αυτό σημαίνει ότι το μοντέλο μελετάει κυρίως την αστική επέκταση που οφείλεται στην οικιστική ανάπτυξη χωρίς να επεκτείνεται σε άλλες αστικές χρήσεις, όπως π.χ. εμπορικές και βιομηχανικές ζώνες ή περιοχές αστικού πρασίνου.

Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι μεταβολές των μη οικιστικών αστικών χρήσεων αντιπροσωπεύουν μόλις ένα μικρό ποσοστό των συνολικών μεταβολών. Ως εκ τούτου, η γνώση που εξάγεται με στατιστικές μεθόδους και κατά συνέπεια προσαρμόζεται στα διαθέσιμα δείγματα, απεικονίζει καλύτερα τα πλέον μαζικά πρότυπα μεταβολής, δηλαδή την μεταβολή των οικιστικών χρήσεων γης. Ωστόσο, παρά το γεγονός ότι το CaFe δεν επιστρέφει εκτιμήσεις, παραδείγματος χάριν για τις θέσεις νέων εμπορικών κέντρων ή αθλητικών εγκαταστάσεων, προσομοιώνει την επίδραση των υπαρχουσών ή προβλεπόμενων μη οικιστικών αστικών χρήσεων.

6.2.2 Θεώρηση της Μεταβολής της Αστικής Κάλυψης

Στο CaFe, ο ρυθμός της αστικής οικιστικής ανάπτυξης για το σύνολο της περιοχής μελέτης προσδιορίζεται εξωγενώς. Πρόκειται για μια πολύ σημαντική παράμετρο του μοντέλου η εκτίμηση της οποίας απαιτεί την κοινωνικοοικονομική ανάλυση της περιοχής σε σχέση με άλλες και σε σχέση με το γενικότερο οικονομικό περιβάλλον. Συνεπώς, δεν αποτελεί θέμα της παρούσης διατριβής. Για την εφαρμογή του μοντέλου όσον αφορά τις προβολές στο μέλλον, περιοριζόμαστε στο να υπολογίσουμε διαφορετικά ποιοτικά σενάρια ανάπτυξης τα οποία μπορεί να προβλέπουν σταθερό, αυξημένο ή μειωμένο ρυθμό ανάπτυξης σε σχέση με το παρελθόν. Το CaFe εφαρμόζει έναν επαναληπτικό αλγόριθμο ο οποίος τερματίζει όταν χωροθετηθεί το αστικό φορτίο (δηλαδή η έκταση που θα αναπτυχθεί) το οποίο δίδεται εξωγενώς στο μοντέλο.

6.2.3 Θεώρηση του Χώρου

Ο χώρος χωρίζεται σε κυψέλες και σε ψηφιακή μορφή αναπαρίσταται υπό μορφή ψηφιδωτών αρχείων. Έτσι, τα δεδομένα εισάγονται στο CaFe υπό μορφή ενός τρισδιάστατου πίνακα $M \times N \times V + I$ όπου M είναι το ύψος (μετρημένο σε φατνία) και N το μήκος της περιοχής μελέτης, ενώ V είναι το πλήθος των μεταβλητών εισόδου. Η πρόσοψη του πίνακα ($M \times N \times I$) αντιστοιχείται στην περιοχή υπό μελέτη η οποία πρέπει να έχει ορθογώνιο σχήμα. Έτσι κάθε θέση της πρόσοψης του πίνακα αντιστοιχείται σε ένα φατνίο του ψηφιδωτού αρχείου ενώ η τιμή του πίνακα στη συγκεκριμένη θέση δίδει το μοναδικό κλειδί (ID) της αντίστοιχης κυψέλης στο ψηφιδωτό αρχείο. Καθώς οι διαστάσεις της περιοχής (M και N) είναι γνωστές, η αντιστοίχιση του μονοδιάστατου κλειδιού των φατνίων στην δισδιάστατη πρόσοψη του πίνακα τελείται εφαρμόζοντας την σχέση:

$$(x, y) = (\lfloor ID / N \rfloor, \text{mod}(ID / N)) \quad (6.1)$$

Η αναπαράσταση αυτή επιτρέπει στο μοντέλο την εκτέλεση χωρικών λειτουργιών όπως τον καθορισμό γειτονιών και δεδομένου του μεγέθους των φατνίων, τον υπολογισμό αποστάσεων. Για παράδειγμα, για ένα ψηφιδωτό αρχείο 63232 φατνίων που αναλύεται σε έναν πίνακα 247 X 256 (κάθετα X οριζόντια), το φατνίο με ID I που δε βρίσκεται στα σύνορα της περιοχής μελέτης γειτνιάζει

οριζοντίως με τα φατνία $I-1$ και $I+1$ (το οποίο ισχύει για κάθε M, N) και καθέτως με τα φατνία $I-256$ και $I+256$ (εικόνα 6.1).

0	1	...	...	...	254	255
256	...	...	...	...	...	511
...	...	I-257	I-256	I-255	...	...
...	...	I-1	I	I+1	...	...
...	...	I+255	I+256	I+257	...	...
62720	...	...	...	...	...	62975
62976	...	...	...	...	...	63231

Εικόνα 6.1: Η αντιστοίχιση του μονοδιάστατου κλειδιού των φατνίων στη πρόσοψη του πίνακα

Η αντιστοίχιση των ID των φατνίων τελείται μια φορά και ακολούθως η πληροφορία προσπελαύνεται χρησιμοποιώντας την αντίστοιχη θέση (x,y) στον πίνακα. Υπό αυτή τη διαμόρφωση η γειτονιά Moore ακτίνας r με κέντρο την κυψέλη $C(x_0,y_0)$ ορίζεται ως:

$$Moore(C(x_0,y_0), r) := [C(x,y) / x_0-x' < x < x_0-x'', y_0-y' < y < y_0-y''] \quad (6.2)$$

όπου:

$$x' = \min(r, x_0),$$

$$x'' = \min(r+1, M-y_0),$$

$$y' = \min(r, y_0),$$

$$y'' = \min(r+1, N-y_0),$$

6.2.4 Θεώρηση του Χρόνου

Ο χρόνος εισάγεται έμμεσα στο μοντέλο μέσω του εξωγενώς καθοριζόμενου βαθμού ανάπτυξης και του αντίστοιχου χρονικού ορίζοντα. Συγκεκριμένα, εφαρμόζεται ένα εκθετικό πρότυπο αντιστοιχίας μεταξύ ανάπτυξης και χρόνου. Ειδικότερα, ορίζονται οι εξής σχέσεις:

$$a = (u_T - u_0) / u_0 \quad (6.3)$$

$$u_T = u_0 e^{aT} \quad (6.4)$$

$$u_t = u_0 e^{\beta t}$$

(6.5)

όπου:

- t ο πραγματικός χρόνος
- T ο συνολικός χρονικός ορίζοντας
- α ο ρυθμός μεταβολής της αστικής κάλυψης σε χρόνο T
- β ο ετήσιος ρυθμός ανάπτυξης
- u_0 η αρχική αστική κάλυψη
- u_t η αστική κάλυψη στον χρόνο t
- u_T η τελική αστική κάλυψη

Από τις εξισώσεις 6.3 και 6.4 μπορούμε να υπολογίσουμε το β ενώ η επίλυση της 6.5 ως προς t δίδει:

$$t = \ln(u_t / u_0) / \beta$$

(6.6)

Στην περίπτωση που προβλέπονται διαφορετικοί βαθμοί ανάπτυξης για την περιοχή μελέτης για διαφορετικές περιόδους του συνολικού χρονικού ορίζοντα, η πληροφορία αυτή μπορεί να ενσωματωθεί στον τύπο υπολογισμού του ενδιάμεσου χρόνου. Για παράδειγμα, αν έχουμε τρεις διαδοχικές περιόδους T_1 , T_2 και T_3 κατά τις οποίες προβλέπονται ετήσιοι ρυθμοί ανάπτυξης α , β και γ αντίστοιχα, τότε η εξίσωση 6.5 λαμβάνει την μορφή:

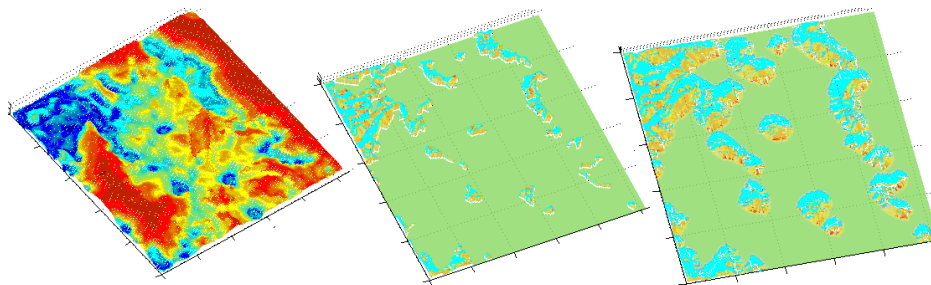
$$u_t = u_0 e^{\alpha t + \beta[t-T_1]^+ + \gamma[t-T_1-T_2]^+}$$

(6.7)

6.3 Καταλληλότητα προς Αστικοποίηση

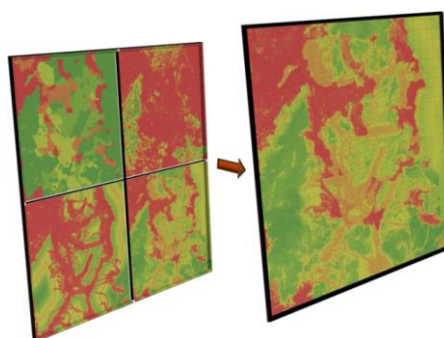
Το CaFe βασίζεται στην ιδέα ενός ρευστού που επεκτείνεται σε μια επικλινή επιφάνεια υπό την δύναμη του βάρους του. Στην αναλογία αυτή, η αστική κάλυψη αντιστοιχείται στο ρευστό ενώ οι κλίσεις της επιφάνειας περιγράφονται ως 'καταλληλότητα προς αστικοποίηση'. Όπως το ρευστό θα κυλήσει προς την κατεύθυνση που μειώνει την δυναμική του ενέργεια, με αντίστοιχο τρόπο η αστική κάλυψη θα επεκταθεί προς μια πλέον ευσταθή ισορροπία. Μάλιστα, η απόπειρα προσομοίωσης της αστικής επέκτασης με τεχνικές Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (εικόνα 6.2) υποδεικνύει ότι η

αναλογία αυτή υπερβαίνει το εννοιολογικό επίπεδο καθώς οι διαφορετικές εξισώσεις διάχυσης ρευστού και τα ΚΑ επιστρέφουν παρόμοια αποτελέσματα. Η ‘καταλληλότητα προς αστικοποίηση’ (που για το υπόλοιπο της διατριβής θα αναφέρεται ως καταλληλότητα) είναι ένα ιδιαίτερο και καινοτόμο χαρακτηριστικό του CaFe ως προς τα Αστικά ΚΑ. Η κεντρική ιδέα είναι ιδιαίτερα απλή και εντοπίζεται στο ότι όλες οι μεταβλητές εισόδου συνδυάζονται σε μια και μόνο εσωτερική μεταβλητή. Ως αποτέλεσμα, οι κανόνες για την προσομοίωση της αστικής επέκτασης εκφράζονται με βάση την καταλληλότητα και όχι με βάση τις μεταβλητές εισόδου.



Εικόνα 6.2: Αναπαράσταση της ‘καταλληλότητας προς αστικοποίηση’ ως κλίσεις επιφανείας (αριστερά), αναπαράσταση της αστικής κάλυψης για το 1990 βάση Corine ως ρευστό (κέντρο) και η διάχυση του ρευστού που προσομοιώνεται σε αυθαίρετο χρόνο από τεχνικές Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (δεξιά)

Το μοντέλο υπολογίζει έναν αριθμητικό δείκτη ανά μεταβλητή εισόδου που αποτυπώνει την επίδρασή της στην αστική επέκταση. Όλοι αυτοί οι δείκτες ενσωματώνονται μέσω μιας παράλληλης συνδεσμολογίας στα πλαίσια ασαφούς πολύ-κριτηριακής ανάλυσης σε ένα και μόνο τελικό δείκτη, την καταλληλότητα (εικόνα 6.3). Η χωροθέτηση της αστικής γης γίνεται λαμβάνοντας υπόψη μόνο την καταλληλότητα και όχι τους δείκτες για κάθε μια μεταβλητή ξεχωριστά. Το όφελος αυτής της διαμόρφωσης είναι ότι διαχωρίζεται η λειτουργία των ΚΑ και ο καθορισμός των γειτονιών τόσο από την χωρική κλίμακα όσο και από την χωρική εμβέλεια της επίδρασης των μεταβλητών εισόδου και κατά συνέπεια απλοποιείται το συντακτικό των κανόνων των ΚΑ, καθιστώντας έτσι πλέον εύκολη την εμπειρική τους διαμόρφωση



Εικόνα 6.3: Όλες οι μεταβλητές εισόδου συνδυάζονται προκειμένου να υπολογισθεί η καταλληλότητα προς αστικοποίηση

6.3.1 Εξαγωγή Βάσης Γνώσης για την Καταλληλότητα

Όταν δυο μεγέθη είναι στατιστικά συσχετισμένα, η μεταξύ τους συσχέτιση μπορεί να οφείλεται σε μια αιτιοκρατική σχέση, ή η συσχέτιση να είναι συμπτωματική. Παρά το γεγονός ότι η στατιστική αλληλεξάρτηση δυο μεγεθών δεν συνεπάγεται απαραίτητα μια σχέση αίτιου και αιτιατού, μπορεί να παρέχει σημαντικές ενδείξεις για την ύπαρξη και την αιτιότητα μιας σχέσης ανάμεσα στα μεγέθη. *Ως εκ τούτου, μπορεί και προβλέπεται να χρησιμοποιείται για την διαμόρφωση θεωριών και πειστηρίων* (Miller 2004).

Ο γενικός ορισμός της καταλληλότητας, τυπικά αποτελεί ένα δείκτη της χρησιμότητας ή της δυνατότητας μιας συγκεκριμένης έκτασης γης να δεχθεί μια συγκεκριμένη χρήση γης (Carr & Zwick 2007). Η καταλληλότητα αποτελεί ένα μη ντετερμινιστικό μέγεθος υπό την έννοια ότι υψηλή καταλληλότητα για μια χρήση δε συνεπάγεται απαραίτητα την υιοθέτηση της χρήσης αυτής. Για την εξαγωγή κανόνων καταλληλότητας στο CaFe, υπολογίζονται οι δεσμευμένες μέσες τιμές της αστικής κάλυψης δεδομένων των τιμών των μεταβλητών εισόδου ξεχωριστά. Με τον όρο δεσμευμένη μέση τιμή εννοούμε την μέση τιμή ενός μεγέθους υπό τον περιορισμό ότι ένα άλλο μέγεθος λαμβάνει μια σταθερή τιμή. Για παράδειγμα, την μέση τιμή της αστικής κάλυψης υπολογισμένη για όλες τις περιοχές που απέχουν 100μ. από κεντρικό δρόμο.

Κάθε μια μεταβλητή εισόδου περιγράφεται από ένα μόνο ασαφές σύνολο το οποίο εκφράζεται απευθείας σε όρους καταλληλότητας. Έτσι για κάθε μεταβλητή εξάγεται ένας και μόνο απλός κανόνας που χρησιμοποιείται για να μετατρέψει την αρχική περιγραφική μεταβλητή σε καταλληλότητα προς αστικοποίηση. Αυτό γίνεται στα πλαίσια ενός συστήματος Takagi-Sugeno. Η διαδικασία εξαγωγής των κανόνων που χρησιμοποιείται είναι ιδιαίτερα απλή και συμβατή με την εμπειρική θεώρηση των πιθανοτήτων, επιτρέποντας έτσι την προσθήκη ή μεταβολή της γνώσης από τον χρήστη. Για κάθε μια τιμή, κάθε μεταβλητής υπολογίζουμε τον αριθμό των κελιών που έχουν αυτή τη τιμή και το αντίστοιχο αστικό φορτίο που συσσωρεύεται σε αυτά. Η καταλληλότητα για την συγκεκριμένη τιμή της μεταβλητής υπολογίζεται ως ο λόγος του αστικού φορτίου προς των αριθμό των κελιών. Αριθμητικά αυτό περιγράφεται από την εξής σχέση:

$$CF_{ki} = \sum_{j|v_{jk}=w_{ik}} u_j / \sum_j 1, \forall i, k \quad (6.8)$$

όπου:

- CF_{ki} είναι η παράμετρος βεβαιότητας του κανόνα για την i τιμή της k μεταβλητής,
- u_j ο αστικός φόρτος στο φατνίο j ,
- v_{kj} η τιμή της k μεταβλητής στο φατνίο j και
- w_{ik} η i διατεταγμένη τιμή της k μεταβλητής.

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα w_{ik} και για όλες τις μεταβλητές. Έτσι το σύνολο των ζευγών $[CF_{ki}, w_{ik}] \forall i$ απεικονίζει την μέση δεσμευμένη συχνότητα εμφάνισης της αστικής κάλυψης που αποτελεί έναν αμερόληπτο εκτιμητή της συνάρτησης κατανομής της συνολικής συχνότητας εμφάνισης. Ο εκτιμητής της κάθε κατανομής διαμορφώνει την συνάρτηση συμμετοχής του ασαφούς συνόλου καταλληλότητας της αντίστοιχης μεταβλητής εισόδου.

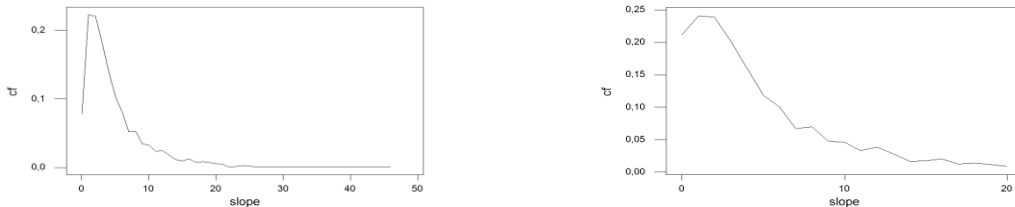
6.3.2 Καθορισμός Εξαιρουμένων Κυψελών

Μελετώντας τις συναρτήσεις που επιστρέφονται για όλες τις μεταβλητές, ο χρήστης μπορεί να εξαιρέσει κάποια διαστήματα στα οποία η συνάρτηση είναι ίση με το μηδέν ή πρακτικά ίση με το μηδέν. Για παράδειγμα, στο γράφημα 6.1, η συνάρτηση καταλληλότητας για τις κλίσεις επιφανείας είναι σταθερά μηδενική για τιμές μεγαλύτερες του 27⁸. Αυτές οι περιπτώσεις, είτε αναφέρονται σε όλο το πεδίο ορισμού μιας συνάρτησης είτε σε κάποιο υποσύνολο αυτού, διαμορφώνουν κανόνες για τον καθορισμό των στατικών περιοχών. Αυτές οι περιοχές θεωρείται ότι δεν αλλάζουν κατάσταση και ως εκ τούτου εξαιρούνται από την περαιτέρω ανάλυση. Η εξαίρεση αυτών των περιοχών παρέχει δυο οφέλη. Αφενός περιορίζεται το σφάλμα υπερτίμησης καθώς δεν επιτρέπει στο μοντέλο να αστικοποιήσει εσφαλμένα αυτές τις περιοχές, αφετέρου μειώνει τον χρόνο εκτέλεσης του αλγορίθμου.

Στην πράξη, ορισμένοι κανόνες εξαίρεσης είναι εξωγενώς καθορισμένοι. Περιοχές όπως οδικό και σιδηροδρομικό δίκτυο, αεροδρόμια και λιμάνια, ορυχεία, ΧΥΤΑ, τεχνητές ζώνες πράσινου, λίμνες και ποτάμια δεν μεταβάλλονται εύκολα (White et al 2000). Ακόμα και όταν μεταβάλλονται, οι αλλαγές είναι συνήθως μικρής έκτασης και γίνονται με αργούς ρυθμούς. Παρόλα αυτά, πρέπει να δίδεται ιδιαίτερη προσοχή στους κανόνες εξαίρεσης για δυο κυρίως λόγους που μπορεί να επιφέρουν σφάλμα στο μοντέλο. Αφενός, συχνά η πράξη διαφοροποιείται της θεωρίας, ειδικά όταν πρόκειται για τεχνητούς περιορισμούς. Για παράδειγμα, στην πράξη δεν αποκλείεται σε μια προστατευόμενη δασική περιοχή να αναπτυχθούν οικισμοί. Αφετέρου ακόμα και μικρές αποκλίσεις στην χωρική αναφορά των δεδομένων μπορούν να εξαιρέσουν λαθεμένα κάποιες περιοχές.

⁸ Το παράδειγμα προέρχεται από πραγματικά δεδομένα στην περιοχή μελέτης που περιγράφεται σε επόμενο κεφάλαιο.

Εφόσον καθορισθούν οι κανόνες εξαίρεσης, η διαδικασία εξαγωγής γνώσης επαναλαμβάνεται μόνο στις περιοχές που είναι δυνατό να υποστηρίξουν αστική δραστηριότητα. Έτσι παράγονται νέες συναρτήσεις καταλληλότητας με περιορισμένο πεδίο ορισμού αλλά και γενσίως μεγαλύτερες τιμές (γράφημα 6.1β). Αυτό συμβαίνει διότι αν οι κανόνες εξαίρεσης είναι σωστά σχεδιασμένοι, τότε η εξαίρεση κάποιων περιοχών μειώνει τον παρονομαστή της εξίσωσης 6.8 αλλά αφήνει αναλλοίωτο τον αριθμητή.



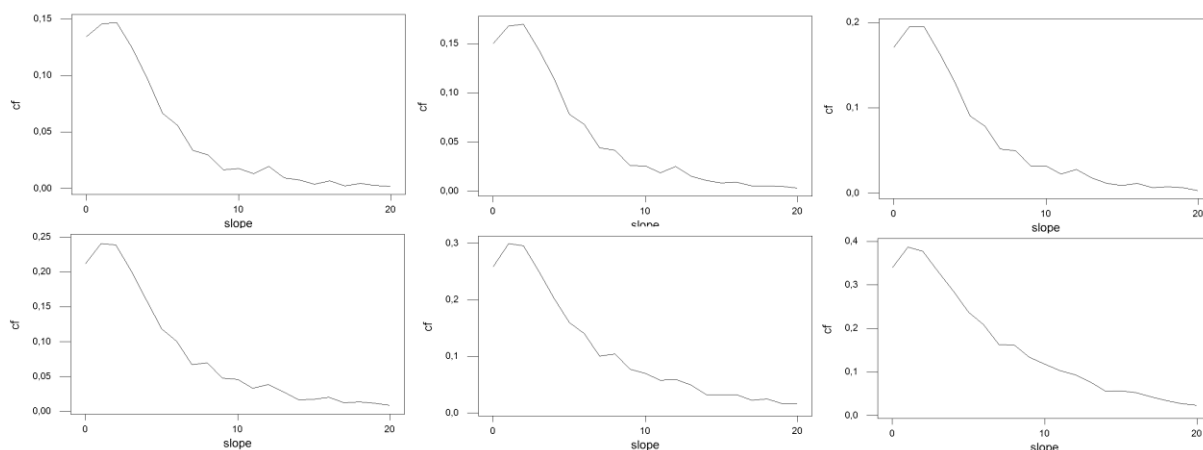
Γράφημα 6.1: Η συχνότητα εμφάνισης αστικής κάλυψης βάση κλίσεων επιφανείας όπως υπολογίζεται για όλη την περιοχή (αριστερά) και μόνο για τις δυναμικές κυψέλες (δεξιά)

6.3.3 Χρονική Μεταβλητότητα των Κανόνων Καταλληλότητας

Οι συναρτήσεις καταλληλότητας που εξάγονται από την παραπάνω διαδικασία αναφέρονται σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Μάλιστα ενδέχεται η συνάρτηση καταλληλότητας για την ίδια μεταβλητή να μεταβάλλεται στον χρόνο. Αυτό γίνεται διότι μεταβάλλεται ο τρόπος με τον οποίο κάθε παράμετρος επηρεάζει την αστική ανάπτυξη ή/και διότι μεταβάλλεται η ίδια η παράμετρος. Το γράφημα 6.2 δίδει την συνάρτηση καταλληλότητας για την μεταβλητή ‘κλίσεις εδάφους’ υπολογισμένα επί πραγματικών δεδομένων για έξι χρονικές στιγμές. Ενώ η μορφή της συνάρτησης δε παρουσιάζει ποιοτικές αλλαγές, το εύρος των τιμών που παίρνει αλλάζει σημαντικά. Ειδικότερα, ενώ την πρώτη χρονική στιγμή μόλις στο 15% των περιοχών με μικρές κλίσεις αποτυπώνεται αστική κάλυψη, την δεύτερη στιγμή το ποσοστό αυξάνεται σε 20% ενώ την έκτη χρονική στιγμή ανέρχεται σε περίπου 40%.

Στην περίπτωση που υπάρχουν δεδομένα για έναν επαρκή αριθμό χρονικών σημείων, μπορούμε να προεκτείνουμε (extrapolate) τις συναρτήσεις καταλληλότητας κάθε μεταβλητής. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να αποκτήσουμε μια εικόνα της καταλληλότητας στο μέλλον. Αυτό μας επιτρέπει να τροποποιούμε σταδιακά την αρχική καταλληλότητα προσεγγίζοντας την εκτίμηση για την συνολική καταλληλότητα καθώς ο πραγματικός χρόνος κυλάει (στην προσομοίωση του μοντέλου). Στο CaFe, αυτό πραγματοποιείται μέσω συνεχούς χρονικής παρεμβολής ανάμεσα στην αρχική και την εκτιμώμενη τελική καταλληλότητα. Η παρεμβολή αυτή επιτρέπει μια πλέον ρεαλιστική θεώρηση της καταλληλότητας όταν παράγονται εκτιμήσεις για την μελλοντική αστική κάλυψη. Επιπροσθέτως,

επιτρέπει την εισαγωγή σχεδιασμένων μεταβολών των υποδομών, π.χ. νέοι δρόμοι ή γραμμές συγκοινωνιών, στην χρονική στιγμή που προβλέπεται να λάβουν χώρα.



Γράφημα 6.2: Η διαχρονική εξέλιξη της καταλληλότητας βάση κλίσεων εδάφους αποτυπωμένη επί πραγματικών δεδομένων για έξι χρονικές στιγμές

6.3.4 Παράλληλη Συνδεσμολογία Κανόνων Καταλληλότητας – Ο Τελεστής Ευαίσθητο Άθροισμα

Το CaFe χρησιμοποιεί ως αποκλειστικό τελεστή συσσώρευσης για την καταλληλότητα μια τροποποιημένη εκδοχή του τελεστή ‘πιθανοθεωρητικό Ή’ εμπνευσμένη από την θεωρία αιτιολόγησης των Dempster-Shafer (Ahmadzadeh et al 2001). Η κεντρική ιδέα είναι ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των κανόνων που συνηγορούν στο ίδιο συμπέρασμα, τόσο μειώνεται το πιθανότητα το συμπέρασμα αυτό να είναι λάθος. Η θεωρία αιτιολόγησης των Dempster-Shafer οικοδομείται πάνω στην θεωρία πιθανοτήτων (Klopotek & Wierzchon 2000). Μια σημαντική επέκταση της θεωρίας ωστόσο διαχειρίζεται διαβαθμισμένες δυνατότητες αντί για πιθανότητες προσεγγίζοντας έτσι την ΛΑ (Zadeh 1986). Μάλιστα μελέτες υποδεικνύουν ότι η ασαφής εκδοχή της θεωρίας είναι πιο αποδοτική (Gelman 2006).

Το βασικό πλεονέκτημα του τελεστή εντοπίζεται στο γεγονός ότι δε λαμβάνει υπόψη μόνο την ισχύ των μεμονωμένων συμπερασμάτων αλλά και τον αριθμό των κανόνων που το υποστηρίζουν. Η θεωρία Dempster-Shafer έχει βρει αρκετές εφαρμογές στην ταξινόμηση χρήσεων της (Corgne et al. 2003, Laha et al. 2006). Το μειονέκτημα της θεωρίας είναι ότι απαιτεί την στατιστική ανεξαρτησία των πληροφοριών επί των οποίων ασκείται (Shaffer 1990). Αν η συνθήκη αυτή δεν ικανοποιείται τότε μπορεί να προκληθεί σημαντικό σφάλμα υπερεκτίμησης το οποίο αυξάνει καθώς αυξάνει ο αριθμός των κανόνων αλλά και καθώς αυξάνεται η συσχέτιση μεταξύ των κανόνων (Corgne et al. 2003). Με άλλα λόγια, το αρχικό πλεονέκτημα μπορεί να μετατραπεί σε μειονέκτημα.

Έχουν παρουσιασθεί κάποιες προσεγγίσεις που επιχειρούν να αντιμετωπίσουν αυτό το πρόβλημα. Μια από αυτές είναι η χρήση δεσμευμένων ανεξάρτητων συναρτήσεων πίστης (Klorotek & Wierzchon 2000), η οποία αν και αποδοτική, μπορεί να είναι αρκετά περιοριστική σε πραγματικά προβλήματα. Στο CaFe προτείνουμε και εφαρμόζουμε έναν νέο τελεστή συσώρευσης που λαμβάνει υπόψη την στατιστική εξάρτηση των υποθέσεων. Ο τελεστής αυτός καλείται 'ευαίσθητο άθροισμα' (EA) και μπορεί εύκολα να επεκταθεί σε χωρικές μεταβλητές. Για την περίπτωση δυο απλών κανόνων (μια μεταβλητή σε κάθε υπόθεση), ο τύπος του EA είναι

$$CCF = 1 - (1 - F_1)(1 - F_2)^{1-\alpha} \quad (6.9)$$

όπου CCF είναι η παράμετρος βεβαιότητας του συμπεράσματος, F είναι η πληρότητα κάθε κανόνα (το αποτέλεσμα της συνεπαγωγής) και α ένας κανονικοποιημένος δείκτης συσχέτισης μεταξύ των μεταβλητών των απλών υποθέσεων των κανόνων. Είναι προφανές ότι αν οι δυο μεταβλητές των δυο υποθέσεων είναι πλήρως εξαρτημένες ($\alpha=1$), τότε η επίδραση του 2^{ου} κανόνα εξαλείφεται. Αντίθετα, αν οι υποθέσεις είναι στατιστικά ανεξάρτητες ($\alpha=0$), τότε το EA ταυτίζεται με το 'πιθανοθεωρητικό Η'. Η παραπάνω φόρμουλα γενικεύεται σε n κανόνες ως εξής:

$$CCF = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - F_i)^{\alpha(i)} \quad (6.10)$$

όπου

$$\alpha(i) = \prod_{j=1}^{i-1} (1 - |\alpha_{ij}|) \quad (6.11)$$

και α_{ij} είναι ο κανονικοποιημένος βαθμός συσχέτισης μεταξύ των μεταβλητών των απλών υποθέσεων των κανόνων i και j .

Ο τύπος επεκτείνεται εύκολα σε χωρικά δεδομένα χρησιμοποιώντας έναν δείκτη χωρικής συσχέτισης. Χρειάζεται όμως ιδιαίτερη προσοχή καθώς ακόμα και οι πλέον απλοί δείκτες χωρικής συσχέτισης ενδέχεται να μην έχουν συγκεκριμένο εύρος τιμών (Reich et al 1994). Ένα άλλο σημείο που απαιτεί προσοχή είναι ότι το EA δεν ικανοποιεί απαραίτητα την αντιμεταθετική ιδιότητα για παραπάνω από δυο κανόνες, εν αντιθέσει με το 'πιθανοθεωρητικό Η' (Malpica et al. 2007). Για αυτόν τον λόγο, στο CaFe, η προσπέλαση των κανόνων γίνεται από την μεγαλύτερη πληρότητα προς την μικρότερη. Υπό αυτή τη διαμόρφωση, το EA είναι διαζευκτικός τελεστής και συνεπώς το τελικό αποτέλεσμα είναι ίσο ή μεγαλύτερο της μεγαλύτερης τιμής εισόδου. Αυτό σημαίνει ότι προσπαθεί να εντοπίσει το πλεόνασμα της πληροφορίας που χρησιμοποιείται.

Στην ιδιαίτερα σπάνια περίπτωση όπου όλοι οι κανόνες είναι ανεξάρτητοι, το EA και το 'πιθανοθεωρητικό Η' παρέχουν τα ίδια πλεονεκτήματα. Στατιστική μελέτη ωστόσο με τρεις μερικώς εξαρτημένους κανόνες, υποδεικνύει μια βελτίωση της απόδοσης κατά 10% κατά μέσο όρο όταν

εφαρμόζεται το EA. Στο CaFe, το EA εφαρμόζεται αποκλειστικά για τον υπολογισμό της καταλληλότητας. Καθώς η καταλληλότητα είναι μια εσωτερική συμβατική μεταβλητή, δεν είναι εφικτό να εκφράσουμε ποσοτικά την βελτίωση που επιφέρει το EA ως προς την καταλληλότητα. Βελτιώνει ωστόσο, την συνολική συμπεριφορά και τα τελικά αποτελέσματα του μοντέλου.

Το πλεονέκτημα του EA είναι διπλό και εξαρτάται από την οπτική γωνία του χρήστη. Από την σκοπιά των συστημάτων βάσης γνώσης το πλεονέκτημα είναι ότι επιτρέπει στην βάση γνώσης να έχει έναν ιδιαίτερα μικρό αριθμό απλών κανόνων. Παραδείγματος χάριν, ένα σύστημα με επτά ασαφή σύνολα εισόδου, με το EA εφαρμόζει επτά κανόνες. Σε άλλη περίπτωση όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί των συνόλων μπορεί να σχηματίσουν έναν αριθμό κανόνων μεγαλύτερο του 7!, δηλαδή μεγαλύτερο του 5040. Από μια άλλη σκοπιά, το EA εφαρμόζει μια παράλληλη συνδεσμολογία μεταξύ των κανόνων. Αυτό επιτρέπει στην βάση γνώσης να λάβει μια προσαρμόσιμη μορφή στα υπάρχοντα δεδομένα. Επιτρέπει δηλαδή την αφαίρεση ή προσθήκη νέων μεταβλητών και κανόνων αφήνοντας ανεπηρέαστη την μορφή και την λειτουργία των υπόλοιπων κανόνων. Αυτό καθιστά την εφαρμογή του μοντέλου δυνατή ανεξαρτήτως των διαθέσιμων δεδομένων. Βεβαίως η απόδοση του μοντέλου φθίνει όσο μειώνονται τα διαθέσιμα δεδομένα, ωστόσο η εφαρμογή του μοντέλου παραμένει εφικτή.

6.4 Εξελιγμένος Υβριδικός Μηχανισμός Κυψελοειδών Αυτομάτων – CA++

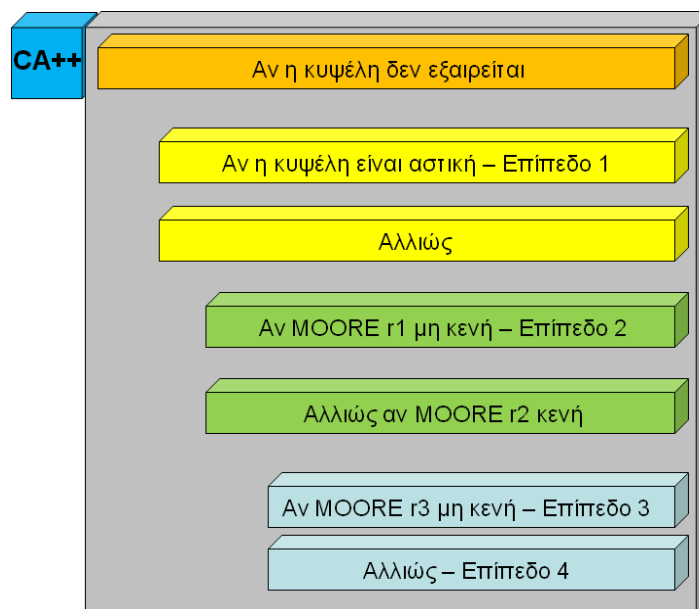
Οι τιμές που λαμβάνει η καταλληλότητα στην περιοχή μελέτης επηρεάζει τόσο την τελική όσο και τις ενδιάμεσες καταστάσεις της αστικής κάλυψης. Η γενική συμπεριφορά όμως του μοντέλου δεν επηρεάζεται από την καταλληλότητα προς αστικοποίηση. Αντίθετα, καθορίζεται πλήρως από τον μηχανισμό KA που εφαρμόζεται. Στην αναλογία του επεκτεινόμενου ρευστού, ο μηχανισμός των KA είναι το διακριτό ανάλογο της διαφορικής εξίσωσης που περιγράφει την επέκταση του ρευστού. Ως εκ τούτου, ενώ διαφορετικές περιοχές με διαφορετικές καταλληλότητες παρουσιάζουν διαφοροποιημένη εξέλιξη, η προσομοίωση της εξέλιξης αυτής ακολουθεί τα ίδια γενικά πρότυπα.

Το CaFe εφαρμόζει έναν εξελιγμένο μηχανισμό KA ο οποίος ενσωματώνει μια σειρά από εργαλεία συμβατά με την έννοια της καταλληλότητας. Κατά τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη του εξελιγμένου μηχανισμού KA, τον οποίο καλούμε CA++, δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην διαμόρφωση συνεργατικών διαδικασιών προσομοίωσης της ΑσΕ αλλά και στον τρόπο με τον οποίο μεταβολές σε μια διαδικασία επηρεάζουν την λειτουργία των υπολοίπων.

6.4.1 Διαδικασίες Προσομοίωσης Αστικής Επέκτασης

Ο μηχανισμός CA++ προσομοιώνει την αστική επέκταση μέσα από τέσσερις διαδικασίες προσομοίωσης της ΑΣΕ ενώ η επιλογή της διαδικασίας που θα εφαρμοσθεί σε κάθε περίπτωση καθορίζεται από την κατάσταση της κάθε κυψέλης αλλά και την κατάσταση των γειτονιών της. Ειδικότερα (εικόνα 6.4):

- Η Διαδικασία 1 προσπελαύνει κυψέλες που είναι σε κάποιον βαθμό αστικές και γειτνιάζουν με αστικές κυψέλες
- Η Διαδικασία 2 προσπελαύνει μη-αστικές κυψέλες που γειτνιάζουν με αστικές
- Η Διαδικασία 3 προσπελαύνει μη-αστικές κυψέλες που δεν γειτνιάζουν με αστικές περιοχές αλλά βρίσκονται σε συγκεκριμένη απόσταση από αυτές
- Η Διαδικασία 4 προσπελαύνει μη-αστικές κυψέλες που βρίσκονται σε σχετικά μεγάλη απόσταση από αστικές περιοχές



Εικόνα 6.4: Η προτεραιότητα εφαρμογής των τεσσάρων διαδικασιών του CA++

Τα ΚΑ είναι μια ενδεικνυόμενη τεχνική για την μοντελοποίηση της συνεχούς αστικής επέκτασης και είναι ιδιαίτερα αποδοτικά για την προσομοίωση των διαδικασιών της εντατικοποίησης, της επέκτασης των αστικών συνόρων και της γραμμικής επέκτασης. Οι διαδικασίες 1 και 2 επιτελούν την λειτουργία ενός απλού αστικού ΚΑ και προσπελαύνουν το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής μελέτης. Ο διαχωρισμός δε των διαδικασιών 1 και 2 επιτρέπει την ξεχωριστή διαμόρφωση τους και ειδικότερα την χρήση εκθετικής και γραμμικής συνάρτησης μετάβασης αντίστοιχα.

Το αδύνατο σημείο των ΚΑ εντοπίζεται στην αυθόρμητη αστική επέκταση σε περιοχές που είναι απομακρυσμένες από την αρχική αστική κάλυψη (leapfrog settlements). Για να αντιμετωπιστεί αυτό το κενό, το CaFe εφαρμόζει άλλες δυο διαδικασίες ανάπτυξης. Ειδικότερα, η διαδικασία 3 χρησιμοποιεί κατευθυνόμενα ΚΑ (Mantelas 2009) μεγάλης ακτίνας για να αστικοποιήσει κυψέλες υψηλής καταλληλότητας που βρίσκονται σε ορισμένη απόσταση από αστικές κυψέλες. Επιπλέον, το επίπεδο 4 εφαρμόζει δράση από απόσταση για να αστικοποιήσει ‘αυθόρμητα’ κυψέλες ιδιαίτερα υψηλής καταλληλότητας που βρίσκονται απομονωμένες από την κυρίως αστική κάλυψη.

Στο παρελθόν έχει προταθεί η συνδυαστική χρήση ΚΑ και Πολλαπλών Παραγόντων (Multi-Agents) υπό τον όρο Γεωγραφικά Συστήματα Αυτομάτων - Geographic Automata Systems (Torrens 2003, Torrens & Benenson 2005). Το CaFe εφαρμόζει μια παρόμοια μεθοδολογία στην διαδικασία 4 αλλά διαφοροποιείται καθώς προγραμματιστικά δεν εφαρμόζονται τεχνικές πρακτόρων αλλά κανόνες δράσης από απόσταση με παρόμοια συμπεριφορά. Ως εκ τούτου, τεχνικά το CaFe δεν εφαρμόζει Γεωγραφικά Συστήματα Αυτομάτων.

6.4.2 Δράση από Απόσταση

Οι διαδικασίες 1 και 2 προσπελαύνουν το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής μελέτης και κατά συνέπεια χωροθετούν το μεγαλύτερο μέρος της αστικής κάλυψης. Αντίθετα, οι διαδικασίες 3 και 4 προσπελαύνουν ένα μικρό συγκριτικά αριθμό κυψελών και χωροθετούν ένα μικρό ποσοστό της αστικής κάλυψης. Αυτό συμβαίνει επειδή στις διαδικασίες 3 και 4 ισχύουν ταυτόχρονα τα εξής:

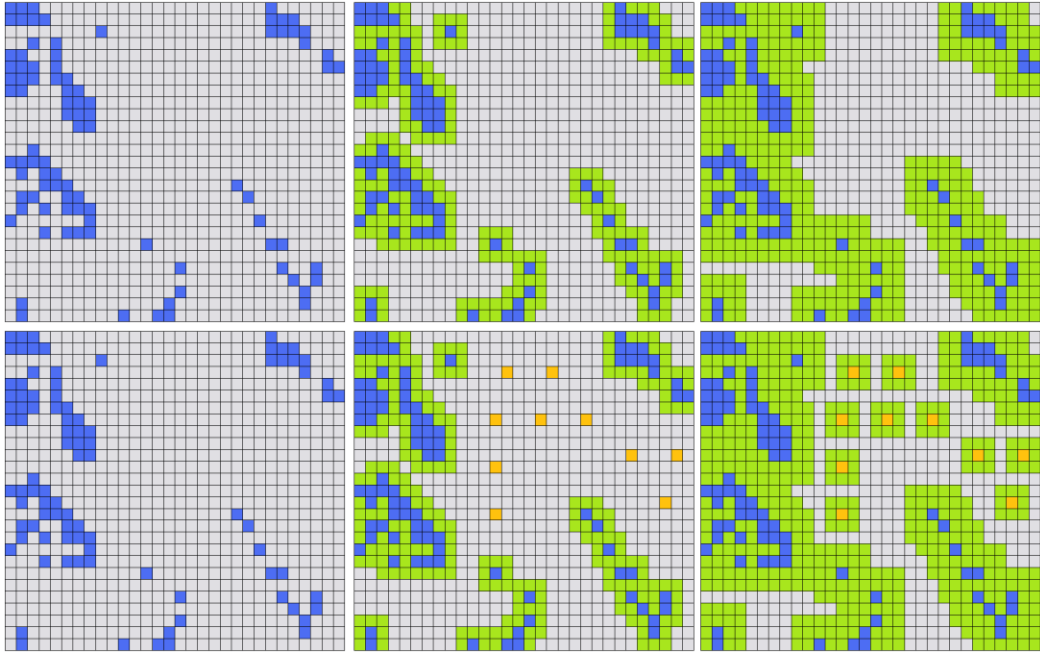
- Είναι ασύγχρονες
- Δρουν μόνο σε μη αστικές κυψέλες υπό την συνθήκη ότι δεν υπάρχουν γειτονικές αστικές κυψέλες σε απόσταση r
- Απαιτούν υψηλή καταλληλότητα

Έτσι, αν μια κυψέλη έχει αρκετά υψηλή καταλληλότητα για να αστικοποιηθεί από τις διαδικασίες 3 ή 4 τότε αυτομάτως τόσο η ίδια κυψέλη όσο και οι κυψέλες που βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη του r , δε δύνανται να προσπελαθούν από τις διαδικασίες 3 και 4 ακόμα και μέσα στο ίδιο επαναληπτικό βήμα. Στην πράξη, οι διαδικασίες 3 και 4 επιτελούν μια ιδιαίτερα σημαντική λειτουργία. Αυτή είναι να τροποποιούν τις αρχικές και συνοριακές συνθήκες και επιτρέπουν στις διαδικασίες 1 και 2 να προσπελάσουν απομακρυσμένες κυψέλες στο επόμενο βήμα. Η εικόνα 6.5 δίδει σχηματικά πως διαφοροποιείται χωρικά η δυνατότητα του μηχανισμού να προσπελαύνει τις κυψέλες εφαρμόζοντας μόνο τις διαδικασίες 1 και 2 ή και τις τέσσερις διαδικασίες μαζί. Για το παράδειγμα αυτό θεωρούμε ότι:

- Οι διαδικασίες 1 και 2 χρησιμοποιούν γειτονιά Moore ακτίνας 1

- Οι διαδικασίες 3 και 4 πυροδοτούνται μόνο αν η απόσταση από αστική κυψέλη είναι μεγαλύτερη του 3
- Αν μια κυψέλη προσπελαθεί, τότε θα αστικοποιηθεί σε κάποιο βαθμό.

Πρέπει να σημειωθεί ότι στο μοντέλο, η προσπέλαση δε συνεπάγεται απαραίτητα αστική ανάπτυξη, ενώ αντίθετα, η μη προσπέλαση συνεπάγεται απουσία αστικής ανάπτυξης.



Εικόνα 6.5: Με την ίδια αρχική κατάσταση (μπλε κελιά) αποτυπώνεται η δυνατότητα προσπέλασης της περιοχής μέσα σε δυο επαναληπτικά βήματα. Άνω εφαρμόζονται μόνο οι διαδικασίες 1 και 2 (πράσινα κελιά) ενώ κάτω εφαρμόζονται επιπλέον οι διαδικασίες 3 και 4 (πορτοκαλί κελιά)

6.4.3 Χαρακτηριστικά της Μετάδοσης του Σήματος της Αστικής Επέκτασης

Ο μηχανισμός CA++ προσπελαίνει μόνο τις δυναμικές κυψέλες ενώ επιστρέφει αύξουσες τιμές για κάθε κυψέλη. Αυτό σημαίνει ότι σε κάθε βήμα κάθε κυψέλη θα έχει τουλάχιστον την τιμή αστικής κάλυψης που είχε στο προηγούμενο βήμα ή μεγαλύτερη. Η μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει κάθε κυψέλη είναι το ανώτατο όριο που επιτρέπεται η αστική κάλυψη. Έτσι αν μια κυψέλη καλύπτεται κατά 20% από αρχαιολογικούς χώρους και 10% από προστατευόμενες δασικές περιοχές, τότε το ανώτατο όριο ορίζεται στο 70%.

Επίσης, ο μηχανισμός εισάγει χρονική καθυστέρηση στην ανάπτυξη των κυψελών. Ειδικότερα, για την διαδικασία 1, το ανώτατο όριο επιτρεπόμενης κάλυψης ορίζεται σαν ποσοστό της μέγιστης δυνατής εντατικοποίησης της αστικής κάλυψης. Για παράδειγμα, αν το ποσοστό αυτό οριστεί σε 20%, τότε μια κυψέλη που έχει την τιμή 0.8 μπορεί να αυξηθεί το πολύ κατά 0.04 ενώ μια κυψέλη με

τιμή 0.1 μπορεί να αυξηθεί ακόμα και κατά 0.18 μονάδες. Αυτό επιτρέπει στις κυψέλες με αραιή αστική κάλυψη να πυκνώνουν πιο γρήγορα σε σχέση με κυψέλες με πυκνή αστική κάλυψη. Αντίθετα, το κατώφλι των διαδικασιών 2,3 και 4, δηλαδή η μέγιστη αστική κάλυψη που μπορεί να αναπτύξει μια μη αστική κυψέλη σε ένα βήμα, ορίζεται ως απόλυτη τιμή.

Μια ιδιαιτερότητα του CA++ εντοπίζεται στην διαχείριση της πληροφορίας για την καταλληλότητα σε επίπεδο κυψέλης και σε επίπεδο γειτονιάς. Στα περισσότερα αστικά ΚΑ η επόμενη κατάσταση μιας κυψέλης καθορίζεται από:

- Την τρέχουσα αστική κάλυψη της κυψέλης
- Τις τοπικές παραμέτρους της ίδιας της κυψέλης ή στην περίπτωση του CaFe την καταλληλότητα της κυψέλης
- Από την αστική κάλυψη της γειτονιάς

Είναι σαφές ότι δε λαμβάνονται έτσι υπόψη τα χαρακτηριστικά των γειτονικών κυψελών. Η διαμόρφωση αυτή μπορεί να αποδειχθεί προβληματική για μια κυψέλη με υψηλή καταλληλότητα και χαμηλή αστική κάλυψη που περιβάλλεται από κυψέλες χαμηλής καταλληλότητας με μικρή αστική κάλυψη. Σε αυτήν την περίπτωση, η εξέλιξη της κεντρικής κυψέλης περιορίζεται από την μικρή αστική κάλυψη της γειτονιάς λόγω της χαμηλής καταλληλότητας της. Με άλλα λόγια, το σήμα της αστικής επέκτασης που μεταφέρουν τα ΚΑ φθίνει όταν διαδίδεται μέσα από κυψέλες χαμηλής καταλληλότητας.

Για αυτόν τον λόγο, στο CaFe όταν υπολογίζεται η επίδραση της γειτονιάς στην κεντρική κυψέλη, υπολογίζεται το σταθμισμένο άθροισμα του λόγου της αστικής κάλυψης προς την καταλληλότητα της κυψέλης – ενώ υπό κανονικές συνθήκες θα υπολογιζόταν το άθροισμα των τιμών της αστικής κάλυψης. Με αυτόν τον τρόπο, το σήμα της αστικής επέκτασης να μην φθίνει όταν διαδίδεται μέσα από κυψέλες χαμηλής καταλληλότητας, αλλά διατηρεί την αρχική πληροφορία και μπορεί να ενισχυθεί εκ νέου, όταν φτάσει σε κυψέλες υψηλής καταλληλότητας. Για παράδειγμα, έστω μια μη αστική κυψέλη με καταλληλότητα 100%, η γειτονιά της οποίας έχει μέση καταλληλότητα 20% και μέση αστική κάλυψη 15%. Αν η αστική κάλυψη της κεντρικής κυψέλης καθορισθεί μόνο από την αστική κάλυψη της γειτονιάς, τότε θα λάβει την τιμή 15%. Αν αντίθετα χρησιμοποιηθεί ο λόγος της αστικής κάλυψης προς την καταλληλότητα, τότε η κεντρική κυψέλη θα λάβει την τιμή 75%.

6.4.4 Πολυωνυμικός Τελεστής Εντατικοποίησης

Η καταλληλότητα είναι ένας δείκτης για την δυνατότητα κάθε κυψέλης να αστικοποιηθεί. Αντίθετα, αν χρησιμοποιηθεί ως φράγμα για την μέγιστη αστική κάλυψη που μπορεί να φέρει μια κυψέλη, αποδεικνύεται περιοριστική. Αριθμητικά, αυτό γίνεται όταν σε ένα σύστημα Mamdani η καταλληλότητα συνδέεται με άλλες μεταβλητές μέσω του λογικού τελεστή 'ΚΑΙ'. Παράλληλα όμως,

(η καταλληλότητα) είναι μια πληροφορία που δε πρέπει να αγνοηθεί στον καθορισμό του ρυθμού ανάπτυξης μιας ήδη αστικής κυψέλης, ειδικά προκαλείται τοπικά αυξημένο σφάλμα υπερεκτίμησης. Για αυτόν τον λόγο, η διαδικασία 1 του CA++ εφαρμόζει έναν πολυωνυμικό τελεστή συνεπαγωγής που παραπέμπει σε συστήματα Sugeno-Takagi. Ο τελεστής αυτός λαμβάνει υπόψη την καταλληλότητα προκειμένου να καθορίσει την εντατικοποίηση μιας ήδη αστικής κυψέλης, αλλά δεν την χρησιμοποιεί ως φράγμα. Έτσι επιτυγχάνεται μια αποδοτική ισορροπία μεταξύ των τοπικών σφαλμάτων υπερεκτίμησης και υποτίμησης.

Το λεκτικό συντακτικό των κανόνων που εφαρμόζουν τον τελεστή δε μεταβάλλεται. Η υπολογιστική διαφοροποίηση έγκειται στο στάδιο της συνεπαγωγής όπου χρησιμοποιείται ο εξής τελεστής:

$$\text{urban}_{\text{next}} = \text{urban}_{\text{current}}^{1-\text{CFF}} \quad (6.12)$$

όπου

- $\text{urban}_{\text{next}}$ είναι η έξοδος του κανόνα, δηλ. η επόμενη αστική κάλυψη της κυψέλης
- $\text{urban}_{\text{current}}$ είναι η τρέχουσα αστική κάλυψη της κυψέλης
- F είναι η πληρότητα της υπόθεσης του κανόνα (το αποτέλεσμα της συσσώρευσης) και
- CF η παράμετρος βεβαιότητας του κανόνα.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η υπόθεση των κανόνων της διαδικασίας 1 περιλαμβάνουν δυο ασαφή σύνολα, την καταλληλότητα της κεντρικής κυψέλης και την αστική κάλυψη της γειτονιάς. Επίσης ως τελεστής συσσώρευσης χρησιμοποιείται ο τελεστής γινόμενο. Δεδομένου ότι οι βαθμοί συμμετοχής, οι παράμετροι βεβαιότητας και το αποτέλεσμα του σταδίου της συσσώρευσης (βλ. ενότητα 3.3.3) ανήκουν στο $[0,1]$, ο πολυωνυμικός τελεστής συνεπαγωγής παρουσιάζει την εξής συμπεριφορά:

- Αν η υπόθεση του κανόνα δεν ικανοποιείται (συσσώρευση 0), τότε η αστική κάλυψη της κυψέλης δε μεταβάλλεται
- Αν η υπόθεση του κανόνα ικανοποιείται πλήρως (συσσώρευση 1), τότε η κυψέλη αστικοποιείται πλήρως
- Αν η υπόθεση του κανόνα ικανοποιείται μερικώς, τότε στην κυψέλη αποδίδεται μια τιμή αστικοποίησης που ανήκει στο $(m,1)$, όπου m η αρχική αστική κάλυψη της κυψέλης

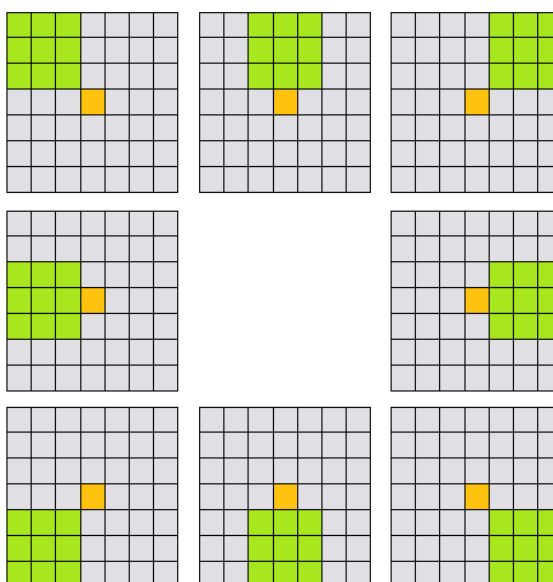
6.4.5 Κυψελοειδή Αυτόματα κατά Κατεύθυνση

Στην διαδικασία 3 εντοπίζεται άλλο ένα καινοτόμο χαρακτηριστικό του CaFe. Αυτό έγκειται στην χρήση ΚΑ που ορίζονται κατά κατεύθυνση. Προηγούμενη μελέτη (Mantelas 2009) έδειξε ότι τα

κατευθυνόμενα ΚΑ μπορεί να επιδείξουν διαφορετική συμπεριφορά και ειδικότερα πλέον ετερογενή σχήματα αστικής κάλυψης. Τα σχήματα αυτά ταιριάζουν καλύτερα σε σύνθετες μορφές αστικής κάλυψης και ιδιαίτερα όταν αποδίδονται με δεδομένα υψηλής χωρικής ανάλυσης. Η ίδια μελέτη ωστόσο, έδειξε ότι εν γένει η αποκλειστική χρήση κατευθυνόμενων ΚΑ δεν προσεγγίζει αριθμητικά την αστική κάλυψη εξίσου αποδοτικά με τα 'κλασσικά' ΚΑ.

Ο πολύ-επίπεδος μηχανισμός του CaFe επιτρέπει την χρήση ΚΑ κατά κατεύθυνση στο επίπεδο 3 και κλασσικών ΚΑ στα επίπεδα 1 και 2. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνονται τα σύνθετα χωρικά σχήματα των κατευθυνόμενων ΚΑ χωρίς ωστόσο να παρατηρούνται απώλειες στην αριθμητική ακρίβεια. Τα ΚΑ κατά κατεύθυνση που εφαρμόζονται στο CaFe αναζητούν για την μεγαλύτερη πληροφορία αστικής κάλυψης προς οχτώ κατευθύνσεις, οριζόντια κάθετα και διαγώνια. Η εικόνα 6.6 οπτικοποιεί τις κυψέλες που χρησιμοποιούνται σε ακτίνα 3 κυψελών. Ενώ η αντίστοιχη γειτονιά Moore ακτίνας 3 προσπελαύνει τις ίδιες ακριβώς κυψέλες, η διαφοροποίηση εντοπίζεται στην κανονικοποίηση των τιμών της αστικής κάλυψης.

Παραδείγματος χάρη, έστω μια γειτονιά Moore ακτίνας 3 στην οποία όλες οι κυψέλες έχουν καταλληλότητα 100% και επιπλέον υπάρχουν 3 πλήρως αστικές κυψέλες στο βόρειο-δυτικό τμήμα της. Σε αυτήν την περίπτωση τα ανισοτροπικά ΚΑ θα επιστρέψουν τιμή 33% ενώ τα ισοτροπικά 6%. Αντίθετα, αν όλες οι κυψέλες είναι αστικοποιημένες στον ίδιο βαθμό τότε δε παρατηρείται διαφορά μεταξύ των δυο κατηγοριών ΚΑ. Συνολικά τα ΚΑ κατά κατεύθυνση μας επιτρέπουν να μεταφέρουμε το ίδιο ισχυρό σήμα χρησιμοποιώντας μικρότερη γειτονιά. Αυτό αφενός περιορίζει την μεταφορά σφάλματος και αφετέρου παράγει λιγότερο ομοιογενή πρότυπα.



Εικόνα 6.6: Τα ΚΑ κατά κατεύθυνση χρησιμοποιούν το μέγιστο αστικό φορτίο που εντοπίζεται προς οχτώ κατευθύνσεις

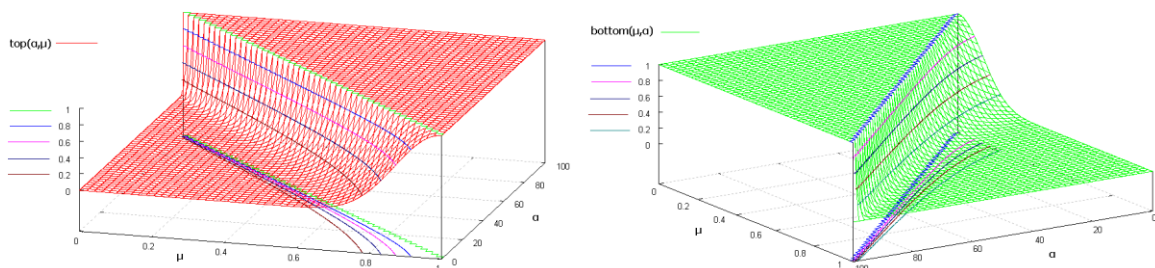
6.4.6 Λεκτικοί Προσδιορισμοί

Οι διαδικασίες 3 και 4 εκτελούν έναν βοηθητικό ρόλο στον CA++. Ο ρόλος αυτός είναι να αλλοιώσουν την αρχική κατάσταση της περιοχής υπό μελέτη και να δημιουργήσουν τις κατάλληλες συνθήκες προκειμένου τα επίπεδα 1 και 2 να προσπελάσουν απομακρυσμένες κυψέλες. Ως εκ τούτου, η εφαρμογή τους πρέπει να γίνεται σε περιορισμένο αριθμό κυψελών. Σε αντίθετη περίπτωση μπορεί να οδηγήσει στην καταστρατήγηση του μηχανισμού KA και την άμεση προσπέλαση και εσφαλμένη ανάπτυξη πολλών μη αστικών κυψελών στην περιοχή, επιφέροντας έτσι σημαντικό σφάλμα.

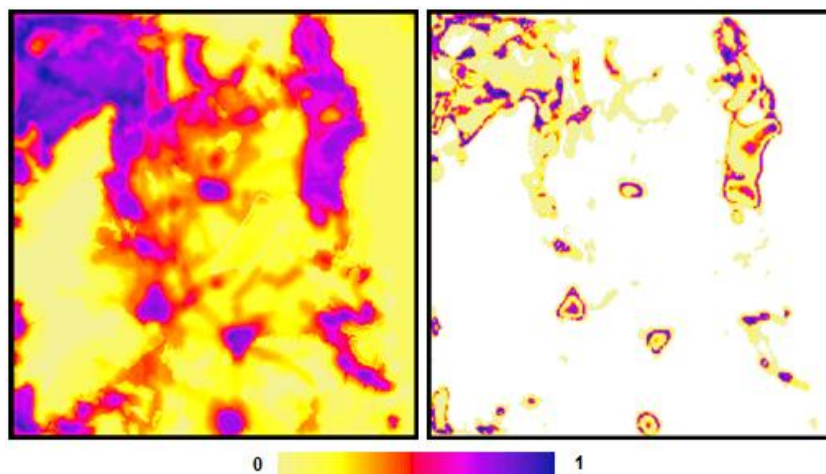
Για αυτόν τον λόγο οι διαδικασίες 3 και 4 εφαρμόζουν λεξιλογικούς προσδιορισμούς επί της καταλληλότητας με σκοπό να πυροδοτούνται μόνο σε κυψέλες με συγκριτικά υψηλή καταλληλότητα. Ειδικότερα, το CaFe εισάγει δυο εξειδικευμένους δισδιάστατους προσδιορισμούς που βασίζονται στην γενίκευση του προσδιορισμού ‘ακραία’ (Mantelas et al. 2007). Οι προσδιορισμοί ‘άνω α%’ (‘top a%’) και ‘κάτω α%’ (‘bottom a%’) παράγουν μια οικογένεια υποσυνόλων του αρχικού ασαφούς συνόλου ανάλογα με την τιμή της παραμέτρου a . Η αριθμητική έκφραση των προσδιορισμών δίδεται από τις εξισώσεις 6.13 και 6.14 και οπτικοποιείται στο γράφημα 6.3. Έτσι ο προσδιορισμός ‘άνω 10%’ (εικόνα 6.7) επιστρέφει με πλήρη συμμετοχή τις κυψέλες που έχουν συμμετοχή τουλάχιστον 0.9 στο αρχικό σύνολο ενώ φθίνει πολύ γρήγορα καθώς φθίνει η αρχική συμμετοχή. Ενδεικτικά, σε μια κυψέλη με αρχική συμμετοχή 0.7 αποδίδεται η νέα συμμετοχή 0.25 ενώ σε μια κυψέλη με αρχική συμμετοχή 0.5 αποδίδεται πρακτικά μηδενική νέα συμμετοχή

$$\begin{aligned} \text{άνω } \alpha\% &= 1 & \text{αν } \mu > 1 - a/100 \\ \text{άνω } \alpha\% &= \mu^{20(1-\mu - a/100)} & \text{αν } \mu < 1 - a/100 \end{aligned} \quad (6.13)$$

$$\begin{aligned} \text{κάτω } \alpha\% &= 1 & \text{αν } \mu < 1 - a/100 \\ \text{κάτω } \alpha\% &= \mu^{-20(1-\mu - a/100)} & \text{αν } \mu > 1 - a/100 \end{aligned} \quad (6.14)$$



Γράφημα 6.3: Οι προσδιορισμοί ‘άνω α%’ (αριστερά) και ‘κάτω α%’ (δεξιά)

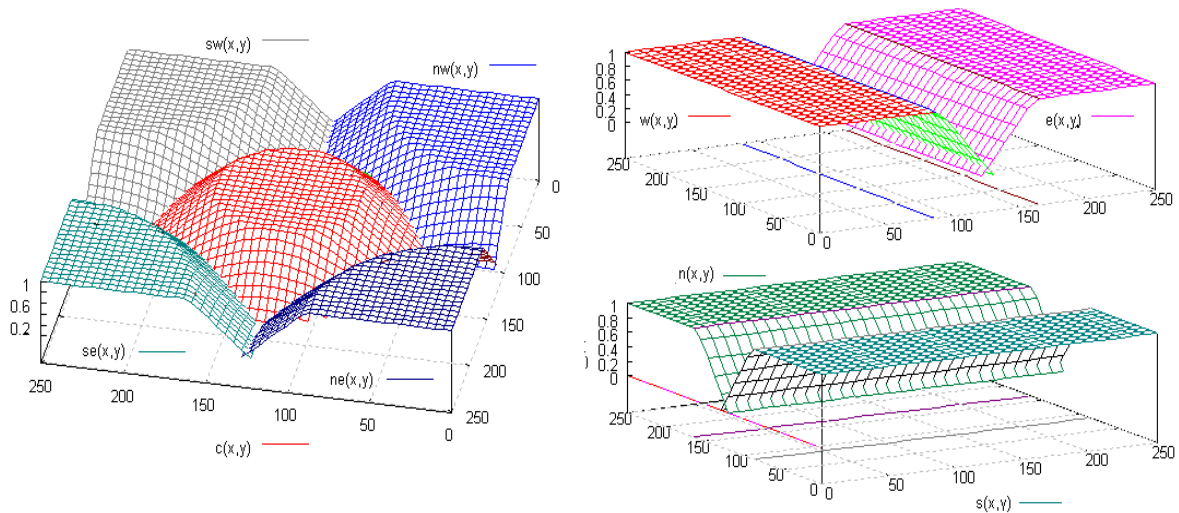


Εικόνα 6.7: Αναπαράσταση της επίδρασης του προσδιορισμού 'άνω 10%' στον χώρο, αριστερά το αρχικό ασαφές σύνολο και δεξιά το παραγόμενο

6.4.7 Χωρική και Χρονική Μεταβλητότητα της Συνάρτησης Μετάβασης

Ο μηχανισμός CA++ υποστηρίζει την εφαρμογή χωρικά και χρονικά μεταβαλλόμενων συναρτήσεων μετάβασης. Αυτό σημαίνει ότι ο ίδιος κανόνας μπορεί να παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά σε διαφορετικά βήματα του αλγορίθμου αλλά και σε διαφορετικές κυψέλες. Οι χρονικά μεταβαλλόμενες παράμετροι του συστήματος υπολογίζονται πριν από κάθε βήμα και ισχύουν καθολικά κατά την διάρκεια του βήματος. Οι χρονικές μεταβολές ωστόσο δε λαμβάνουν χώρα βάση των επαναληπτικών βημάτων αλλά βάση της θεώρησης του πραγματικού χρόνου (βλ. ενότητα 6.1.4). Αυτό σημαίνει ότι στα πλαίσια μιας συνεχούς θεώρησης του χρόνου μια ή περισσότερες παράμετροι μπορεί να μεταβάλλονται μέσα στο ίδιο επαναληπτικό βήμα.

Η χωρική μεταβλητότητα των κανόνων επιτυγχάνεται εκφράζοντας τις μεταβλητές παραμέτρους ως συνάρτηση μια δισδιάστατης ασαφούς μεταβλητής. Η μεταβλητή αυτή αποτελείται από εννέα ασαφή σύνολα (Βόρεια, Νότια, Ανατολικά, Δυτικά, Κεντρικά, Βόρειο-ανατολικά, Βόρειο-δυτικά, Νότιο-ανατολικά και Νότιο-δυτικά) και περιγράφει την σχετική θέση κάθε κυψέλης στην περιοχή μελέτης (γράφημα 6.4). Η χρήση χωρικά μεταβλητών παραμέτρων για τον καθορισμό της συμπεριφοράς του CA++ αποτελεί ουσιαστικά ένα ημίμετρο, το οποίο όμως βελτιώνει την συμπεριφορά του μοντέλου και περιορίζει το τοπικό σφάλμα. Προφανώς υπάρχουν συγκεκριμένοι λόγοι για τους οποίους δυο πανομοιότυπες κυψέλες (ίδια αστική κάλυψη και καταλληλότητα) παρουσιάζουν διαφορετική εξέλιξη. Λόγοι που δε σχετίζονται άμεσα με τις σχετικές θέσεις των κυψελών αλλά σχετίζονται με τα διάφορα χαρακτηριστικά που εντοπίζονται στις θέσεις αυτές. Συχνά όμως αποτυγχάνουμε να αντιληφθούμε τους λόγους αυτούς, εξαιτίας περιορισμένων ή και προβληματικών διαθέσιμων δεδομένων αλλά και εξαιτίας ανεπαρκούς μεθοδολογικής προσέγγισης. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ενδέχεται η σχετική θέση κάθε κυψέλης να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατο των παραμέτρων που παραλείπονται.



Γράφημα 6.4: Οι παραστάσεις των ασαφών συνόλων της διαδιάστατης ασαφούς χωρικής μεταβλητής, BA , BL , NA , NL και Κέντρο (αριστερά) και B , N , A και L (δεξιά)

6.4.8 Βαθμονόμηση του CA++

Η βαθμονόμηση του CaFe περιορίζεται στις παραμέτρους του CA++. Ειδικότερα, οι παράμετροι του CA++ που υπόκεινται σε βαθμονόμηση είναι:

- Η μέγιστη ποσοστιαία εντατικοποίηση (διεργασία 1) και τη μέγιστη απόλυτη αστικοποίηση (διεργασίες 2, 3 και 4)
- Οι ακτίνες των γειτονιών που χρησιμοποιούνται στις τέσσερις διεργασίες του CA++
- Η χρήση των λεκτικών προσδιορισμών ‘άνω’ και ‘κάτω’ και οι αντίστοιχες παράμετροι α
- Οι παράμετροι βεβαιότητας των κανόνων
- Η χωρική και χρονική μεταβλητότητα των παραπάνω παραμέτρων

Λόγω της εν γένει μη-αντιστρέψιμης φύσης των ΚΑ, η βαθμονόμηση συνήθως εκτελείται δια μέσου επαναληπτικών δοκιμών (Hagen-Znaker et al. 2005) για μια περίοδο στο παρελθόν, αν και έχουν παρουσιαστεί κάποιες εναλλακτικές προσεγγίσεις (Al-Ahmadi et al. 2008, Wu 2002). Η βαθμονόμηση του CaFe λαμβάνει χώρα εμπειρικά ‘τρέχοντας’ το μοντέλο για διαφορετικούς συνδυασμούς των παραμέτρων και αξιολογώντας τους ως προς την αριθμητική προσαρμογή των αντίστοιχων αποτελεσμάτων στην πραγματική αστική κάλυψη. Με αυτόν τον τρόπο, ο μηχανισμός CA++ προσαρμόζεται στα χαρακτηριστικά μιας συγκεκριμένης εφαρμογής αν και λόγω της εμπειρικής βαθμονόμησης που γίνεται, δε προσαρμόζεται απαραίτητα με τον βέλτιστο τρόπο.

Αντίθετα με τον μηχανισμό CA++, το υπολογιστικό σύστημα που υπολογίζει την καταλληλότητα δεν υπόκειται σε βαθμονόμηση με εξαίρεση τους εμπειρικούς κανόνες που μπορεί να

προσθέσει ο χρήστης. Αυτό γίνεται διότι η βάση γνώσης για την καταλληλότητα εξάγεται από τα διαθέσιμα δεδομένα της κάθε εφαρμογής. Ως εκ τούτου, όσον αφορά το σύστημα υπολογισμού της καταλληλότητας όσο και τον μηχανισμό προσομοίωσης, προκειμένου το μεθοδολογικό πλαίσιο που περιγράφηκε στο παρόν κεφάλαιο να μετουσιωθεί σε ολοκληρωμένο μοντέλο ΑΣΕ, απαιτείται να τροφοδοτηθεί με δεδομένα. Το επόμενο κεφάλαιο περιγράφει την διαδικασία ανάπτυξης και αξιολόγησης του μοντέλου χρησιμοποιώντας πραγματικά δεδομένα για δυο διαφορετικές περιόδους.

Ανάπτυξη και Εφαρμογή του CaFe

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία ανάπτυξης και εφαρμογής του προτεινόμενου μοντέλου CaFe χρησιμοποιώντας δεδομένα που περιγράφουν πραγματικές συνθήκες με την πρώτη ενότητα να αναλύει την δομή του μοντέλου. Η δεύτερη ενότητα παρουσιάζει τα προπαρασκευαστικά στάδια της εφαρμογής και εστιάζεται στα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης, την συλλογή και προ-επεξεργασία των δεδομένων. Ακολούθως, οι ενότητες 3 και 4 περιγράφουν αντίστοιχα την δοκιμαστική ανάπτυξη του μοντέλου και την προσαρμογή του σε πραγματικές και γνωστές συνθήκες. Τέλος, οι ενότητες 5 και 6 εστιάζουν στην εφαρμογή του μοντέλου με σκοπό την εκτίμηση της μελλοντικής αστικής κάλυψης και τον υπολογισμό εναλλακτικών σεναρίων ανάπτυξης.

7.1 Η Δομή της Εφαρμογής του CaFe

Το CaFe όπως έχει μέχρι στιγμής περιγραφεί στα προηγούμενα κεφάλαια της παρούσης διατριβής αποτελεί ένα μεθοδολογικό πλαίσιο μοντελοποίησης της αστικής ανάπτυξης το οποίο προκειμένου να μετουσιωθεί σε μοντέλο ΑσΕ πρέπει να τροφοδοτηθεί με δεδομένα. Αυτό γίνεται διότι το CaFe 'χτίζεται' από την αρχή πάνω στα διαθέσιμα δεδομένα. Ως εκ τούτου, τόσο η αρχική ανάπτυξη του μοντέλου όσο και η εφαρμογή σε κάποια άλλη περιοχή απαιτούν την διαθεσιμότητα δεδομένων για κάποιες χρονικές στιγμές. Ειδικότερα, η εφαρμογή του μοντέλου ιδανικά απαιτεί δεδομένα για τουλάχιστον τρεις διαδοχικές χρονικές στιγμές t_i, k και γίνεται σε τρία στάδια:

- Ανάπτυξη
- Αποτίμηση
- Αναπροσαρμογή

Στο στάδιο της *ανάπτυξης*, το μοντέλο χτίζεται πάνω στα δεδομένα για την στιγμή t_1 και την στιγμή t_2 . Ειδικότερα, εξάγεται γνώση για την καταλληλότητα χρησιμοποιώντας τα δεδομένα για την t_1 και βαθμονομείται ο μηχανισμός ως προς τα δεδομένα αστικής κάλυψης για την t_2 . Στο στάδιο της *αποτίμησης*, η καταλληλότητα υπολογίζεται σύμφωνα με τα δεδομένα για την t_2 αλλά ο μηχανισμός προσομοίωσης εφαρμόζεται όπως διαμορφώθηκε στο προηγούμενο στάδιο με σκοπό να εκτιμήσει την *ex-post* αστική κάλυψη για την t_3 . Με αυτόν τον τρόπο αξιολογείται η αριθμητική προσαρμογή των αποτελεσμάτων του μοντέλου στην πραγματική αστική κάλυψη την t_3 .

Παράλληλα, εμμέσως εκτιμάται η δυνατότητα του μηχανισμού προσομοίωσης να προσομοιώνει την ΑσΕ για μια περίοδο χωρίς ωστόσο να τροφοδοτείται με δεδομένα για την ίδια αλλά για μια προγενέστερη περίοδο. Αυτό γίνεται διότι τα δεδομένα για την t_3 χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων αλλά όχι για την διαμόρφωση του μοντέλου ή την βαθμονόμηση του μηχανισμού προσομοίωσης. Στο στάδιο της *αναπροσαρμογής*, το μοντέλου βαθμονομείται εκ νέου για την περίοδο $t_1 - t_3$ και ακολούθως το CaFe μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παράγει *ex-ante* εκτιμήσεις για την μελλοντική αστική κάλυψη και να υπολογίσει διαφορετικά σενάρια ανάπτυξης.

Ενώ η εφαρμογή του μοντέλου εκτελείται σε τρία ξεχωριστά στάδια, υπάρχουν ορισμένες διαδικασίες οι οποίες είναι κοινές ανάμεσα σε ορισμένα από τα στάδια. Οι διαδικασίες αυτές είναι η εξαγωγή βάσης γνώσης για τον υπολογισμό της καταλληλότητας, η βαθμονόμηση του μηχανισμού προσομοίωσης και η αξιολόγηση της αριθμητικής προσαρμογής των αποτελεσμάτων που περιγράφονται στις επόμενες ενότητες.

7.1.1 Εξαγωγή Γνώσης για τον Υπολογισμό της Καταλληλότητας

Το στάδιο της ανάλυσης των δεδομένων είναι ιδιαίτερα απλό και σχετικά αυτοματοποιημένο. Αρχικά, τα δεδομένα που αναφέρονται στο σύνολο της περιοχής προσπελούνται από έναν πρόγραμμα που εφαρμόζει την μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στην ενότητα 6.2.2. Το πρόγραμμα αυτό επιστρέφει τα διαγράμματα της κατανομής της δεσμευμένης μέσης συχνότητας εμφάνισης της αστικής κάλυψης ως προς κάθε μεταβλητή για το σύνολο της περιοχής. Σε αυτό το σημείο, ο χρήστης εισάγει τους κανόνες που ορίζουν ποιες περιοχές δε δύνανται να αστικοποιηθούν και κατά συνέπεια θα εξαιρεθούν στη συνέχεια από το μοντέλο. Κατόπιν, εφαρμόζεται εκ νέου η ίδια μεθοδολογία και επιστρέφονται τα διαγράμματα κατανομής της δεσμευμένης μέσης συχνότητας εμφάνισης της αστικής κάλυψης ως προς κάθε μεταβλητή μόνο για το σύνολο των δυναμικών κυψελών της περιοχής μελέτης, για τις κυψέλες δηλαδή που δύνανται να μεταβάλουν την κατάσταση τους.

Δεδομένου ότι οι κανόνες του συστήματος υπολογισμού καταλληλότητας έχουν απλές υποθέσεις, η εξαγωγή κάθε κανόνα ανάγεται στον υπολογισμό της μορφής της συνάρτησης συμμετοχής / καταλληλότητας κάθε μεταβλητής και στον υπολογισμό της αντίστοιχης παραμέτρου βεβαιότητας (ΠΒ). Και τα δυο εξάγονται από τα διαγράμματα κατανομής της δεσμευμένης μέσης

συχνότητας εμφάνισης της αστικής κάλυψης. Δεδομένου ότι ως τελεστής συνεπαγωγής χρησιμοποιείται το γινόμενο, για κάθε μεταβλητή αναζητούμε μια συνεχή συνάρτηση $f(x)$ τέτοια ώστε:

- Το πεδίο ορισμού της να ταυτίζεται με το πεδίο ορισμού της αντίστοιχης συνάρτησης κατανομής
- Το σύνολο τιμών να είναι το $[0,1]$
- Πολλαπλασιασμένη επί ΠΒ να προσεγγίζει την συνάρτηση κατανομής

Αν επιπλέον θέσουμε την συνθήκη $\max(f(x))=1$ τότε προκύπτει ότι η ΠΒ ισούται με την μέγιστη τιμή της συνάρτησης κατανομής την οποία θέλουμε να προσεγγίσουμε. Υπό τις παραπάνω συνθήκες, η προσέγγιση της συνάρτησης κατανομής επιτυγχάνεται εύκολα, ακόμα και εμπειρικά παρεμβάλλοντας τοπικά γραμμικές, πολυωνμικές και εκθετικές συναρτήσεις. Ειδικότερα, η παρεμβολή γίνεται ανάμεσα σε ζεύγη σημείων που χαρακτηρίζονται ως ακρότατα (τοπικά ή ολικά) ή σημεία καμπής. Ειδικά για τις συναρτήσεις συμμετοχής των θεματικών επιπέδων που εκφράζουν απόσταση, ενδέχεται το πεδίο ορισμού να είναι υποσύνολο του πεδίου ορισμού της αντίστοιχης συνάρτησης κατανομής.

Αυτό γίνεται διότι μια παράμετρος ενδέχεται να έχει εμβέλεια επιρροής μικρότερη των συνολικών αποστάσεων που παρατηρούνται στην περιοχή μελέτης. Για παράδειγμα, υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός αστικών κυψελών που εντοπίζονται σε απόσταση 10-20 χλμ. από την ακτογραμμή. Η αστική κάλυψη ωστόσο των κυψελών αυτών κρίνεται ότι δεν οφείλεται στην απόσταση από την ακτογραμμή αλλά στην παρουσία άλλων παραμέτρων στις περιοχές αυτές. Ο καθορισμός της εμβέλειας των παραμέτρων αυτών, δηλαδή το πεδίο ορισμού των αντίστοιχων συναρτήσεων καταλληλότητας, γίνεται λαμβάνοντας υπόψη την μορφή, την ομαλότητα και τις πιθανές έκτροπες παρατηρήσεις⁹ των αρχικών διαγραμμάτων κατανομής της δεσμευμένης μέσης συχνότητας εμφάνισης της αστικής κάλυψης.

Τέλος, για τον υπολογισμό των μονοσύνολων (singletons), όπως στην περίπτωση των χρήσεων γης, η διαδικασία είναι ακόμα πιο απλή. Ουσιαστικά θεωρούμε ότι κάθε μονοσύνολο μπορεί να υποστηρίξει την αστική επέκταση με ΠΒ ίση με την αντίστοιχη μέση δεσμευμένη συχνότητα εμφάνισης της αστικής κάλυψης.

⁹ Παρατηρήσεις που αποκλίνουν σημαντικά το γενικό πρότυπο.

Με αυτόν τον τρόπο, για κάθε μεταβλητή εισόδου διαμορφώνεται ένας και μόνο κανόνας που υπολογίζει την καταλληλότητα προς αστικοποίηση για την συγκεκριμένη μεταβλητή. Αυτό γίνεται στο στάδιο της συνεπαγωγής¹⁰ του συστήματος. Ακολούθως, στο στάδιο της συγκέντρωσης με αποκλειστική χρήση του τελεστή Ευαίσθητο Άθροισμα (ΕΑ) υπολογίζεται η συνολική καταλληλότητα προς αστικοποίηση για κάθε κυψέλη της περιοχής. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, για τεχνικούς λόγους, το ΕΑ χρησιμοποιεί τον *δειγματικό συντελεστή γραμμικής συσχέτισης Pearson*¹¹.

7.1.2 Δείκτες Αριθμητικής Προσαρμογής των Αποτελεσμάτων

Για την βαθμονόμηση και την αξιολόγηση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν το μέσο σφάλμα χάρτη και οι δείκτες προσαρμογής Lee- Sallee και Kappa¹². Ο δείκτης Kappa ειδικότερα μπορεί να αναλυθεί σε γινόμενο δυο δεικτών, των K-Histogram και K-Location. Ο K-Histogram εστιάζεται στην χωρική επικάλυψη μεταξύ των δυο θεματικών επιπέδων που συγκρίνεται, ενώ ο K-Location εστιάζεται στην σύγκριση των τιμών των δυο επιπέδων σε κάθε κυψέλη.

Η μεγάλη πλειονότητα της βιβλιογραφίας που περιγράφει εφαρμογές μοντέλων ΑσΕ χρησιμοποιεί αποκλειστικά κάποιους από τους παραπάνω δείκτες αξιολόγησης των αποτελεσμάτων ή κάποιους παρεμφερείς δείκτες. Ως εκ τούτου, δημιουργείται η εντύπωση ότι οι τιμές των δεικτών απεικονίζουν τις δυνατότητες του μοντέλου στο σύνολό τους, ενώ στην πράξη απεικονίζουν την δυνατότητα του κάθε μοντέλου να προσομοιώσει την ΑσΕ στην συγκεκριμένη κάθε φορά περίπτωση μελέτης. Η παρερμηνεία αυτή έχει προκαλέσει την κριτική από την επιστημονική κοινότητα (Pontius & Malanson, 2005, Pontius et al, 2007) χωρίς ωστόσο να έχει επιδράσει ακόμα στον τρόπο με τον οποίο αξιολογούνται στην πράξη τα μοντέλα.

Η κριτική εντοπίζεται στο ότι οι συγκεκριμένοι δείκτες δε λαμβάνουν υπόψη την ποσοστιαία μεταβολή της αστικής κάλυψης παρά μόνο την τελική κάλυψη (Jasper, 2009). Κατά συνέπεια, τα αποτελέσματα της αξιολόγησης βασίζονται σε αρκετά μεγάλο βαθμό στην εκάστοτε συγκεκριμένη περιοχή και όχι αποκλειστικά στις δυνατότητες του μοντέλου που αξιολογείται. Έτσι μια εφαρμογή

¹⁰ Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3, τα βασικά στάδια ενός ασαφούς συστήματος είναι η συσσώρευση, η συνεπαγωγή και η συγκέντρωση.

¹¹ $R = S_{XY} / S_X S_Y$, όπου S_X και S_Y η διασπορά των μεταβλητών X και Y αντίστοιχα και S_{XY} η συνδιακύμανσή τους.

¹² Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα, ο δείκτης Lee- Sallee λαμβάνει τιμές στο διάστημα [0,1] με την τιμή 1 να υποδεικνύει πλήρη και τέλεια προσαρμογή ενώ ο δείκτης Kappa λαμβάνει τιμές στο διάστημα [-1,1]. Η τιμή 1 υποδεικνύει πλήρη ομοιότητα των επιπέδων και η τιμή -1 την απουσία οποιασδήποτε ομοιότητας ενώ η τιμή 0 αντιστοιχείται στην μέση τυχαία αναμενόμενη ομοιότητα.

σε περιοχή με μικρή μεταβολή αστικής κάλυψης θα επιστρέψει αυξημένες τιμές προσαρμογής σε σχέση με μια περιοχή με μεγάλη μεταβολή της αστικής κάλυψης – συχνά ανεξαρτήτως του μοντέλου που εφαρμόζεται.

Ενδεικτικά, ας θεωρήσουμε μια περιοχή που αριθμεί 1000 κυψέλες, 100 εκ των οποίων χαρακτηρίζονται αστικές την στιγμή t_1 . Έστω επιπλέον ότι μέχρι την στιγμή t_2 έχουν αστικοποιηθεί άλλες 20 κυψέλες. Χρησιμοποιώντας ως δείκτη την ακρίβεια του χρήστη έπεται ότι:

- Ένα μοντέλο που τοποθετεί και τις 20 αστικές κυψέλες σε λάθος θέσεις υποπίπτει σε απόλυτο σφάλμα 40 κυψελών (20 αστικές κυψέλες που κρίθηκαν ως μη αστικές και 20 κυψέλες μη-αστικές που κρίθηκαν ως αστικές) ενώ η ακρίβεια των αποτελεσμάτων ανέρχεται σε 96%
- Το ‘μηδενικό’ μοντέλο – η χρήση δηλαδή της αστικής κάλυψης για την στιγμή t_1 ως προσέγγιση για την αστική κάλυψη την στιγμή t_2 – επιτυγχάνει ακρίβεια της τάξης του 98%

Από το παραπάνω παράδειγμα καθίσταται σαφές ότι χρειάζονται δείκτες αξιολόγησης της συμπεριφοράς των μοντέλων ΑσΕ που να μπορούν εξάγουν καλύτερα και πλέον αντικειμενικά συμπεράσματα. Προς αυτήν την κατεύθυνση για την συμπεριφορά του μοντέλου, ενδείκνυται η συνδυασμένη σύγκριση (Pontius et al, 2007):

- Της ομοιότητας της πραγματικής αστικής κάλυψης στην αρχή και το τέλος της περιόδου και παράλληλα
- Της ομοιότητας της εκτίμησης του μοντέλου με την πραγματική αστική κάλυψη στο τέλος της περιόδου

Για αυτόν τον λόγο ορίζουμε και χρησιμοποιούμε επιπλέον ορισμένους νέους δείκτες οι οποίοι επιστρέφουν σημαντικά χαμηλότερες τιμές προσαρμογής και αποτελούν καλύτερη ένδειξη της συμπεριφοράς του μοντέλου. Οι δείκτες αυτοί είναι:

- Το μέσο σφάλμα του μοντέλου το οποίο ορίζεται ως το ηλικό του αριθμού των κυψελών που χωροθετήθηκαν εσφαλμένα διά του αριθμού των κυψελών που μεταβάλλει το μοντέλο
- Η ποσοστιαία μεταβολή των αρχικών δεικτών προσαρμογής (Lee- Sallee & Kappa) μεταξύ του ‘μηδενικού’ μοντέλου και του μοντέλου υπό αξιολόγηση που περιγράφει πόσο ‘καλύτερο’ αποδεικνύεται το μοντέλο σε σχέση με το μηδενικό
- Η πιστότητα του μοντέλου που ορίζεται ως η ποσοστιαία μεταβολή των συμπληρωμάτων των αρχικών δεικτών προσαρμογής (1-LeeSallee & 1-Kappa) μεταξύ του ‘μηδενικού’ μοντέλου και του μοντέλου υπό αξιολόγηση που περιγράφει την ομοιότητα της συμπεριφοράς του μοντέλου μας με το ‘απολύτως ακριβές μοντέλο’

Στην πράξη ωστόσο, πολύ πριν τον υπολογισμό των παραπάνω ή οποιωνδήποτε άλλων δεικτών, το μοντέλο πρέπει να τροφοδοτηθεί με δεδομένα. Στα πλαίσια της εφαρμογής που περιγράφεται στο

παρόν κεφάλαιο, αυτό απαιτεί την εκτέλεση ορισμένων προπαρασκευαστικών διεργασιών οι οποίες περιγράφονται στην επόμενη ενότητα.

7.2 Προπαρασκευαστικά Στάδια

Προκειμένου να εφαρμοστεί το προτεινόμενο μοντέλο χρειάζεται να εκτελεστούν ορισμένα προπαρασκευαστικά στάδια. Ειδικότερα, καθώς το μοντέλο χτίζεται πάνω στα διαθέσιμα δεδομένα, τα στάδια αυτά εστιάζονται στη συλλογή και προεπεξεργασία των δεδομένων αλλά και στην διαμόρφωση των τελικών μεταβλητών εισόδου του μοντέλου. Όσον αφορά την δοκιμαστική εφαρμογή/ανάπτυξη του CaFe που περιγράφεται στο παρόν κεφάλαιο, είναι σημαντικό η περιοχή μελέτης να αποτελεί μια ενδιαφέρουσα περίπτωση προς μελέτη.

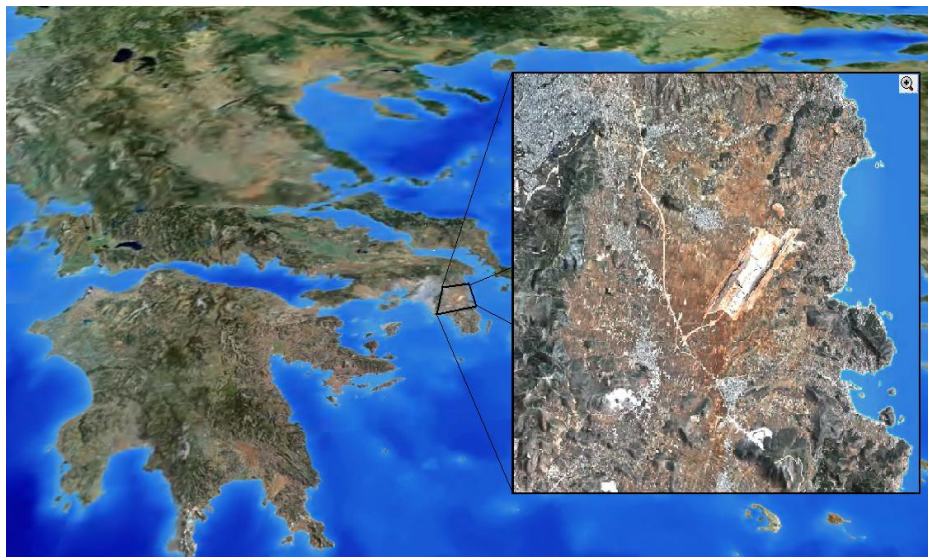
7.2.1 Η Περιοχή Μελέτης

Η περιοχή μελέτης είναι η ευρύτερη περιοχή των Μεσογείων στην Ανατολική Αττική (χάρτης 7.1), η οποία έχει έκταση 633.000 στρέμματα. Στην ορθογωνίου σχήματος περιοχή περιέχονται εξολοκλήρου 16 δήμοι και μερικώς άλλοι 23 (πίνακας 7.1). Σύμφωνα με τα την απογραφή του 2001, στην περιοχή διέμεναν πάνω από 800.000 κάτοικοι και υπήρχαν πάνω από 310.000 θέσεις εργασίας. Τα αντίστοιχα νούμερα για το 1996 είναι 550.000 και 200.000 αντίστοιχα σύμφωνα με μελέτη της Αττικό Μετρό¹³. Πρόκειται για μια ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα περιοχή ως προς την αστική ανάπτυξη για μια σειρά από λόγους.

Καταρχήν, η περιοχή βρίσκεται σε μια απόσταση 5 χλμ. ανατολικά από το ιστορικό κέντρο της Αθήνας αλλά ταυτόχρονα είναι αποκομμένη από τον κυρίως αστικό όγκο της πόλης λόγω της ιδιαίτερης γεωμορφολογίας και ειδικότερα του Υμηττού. Παράλληλα, από την ανατολή, η περιοχή μελέτης οριοθετείται από την ακτογραμμή ενώ τόσο προς τα Νότια όσο και προς τα Βόρεια δεν εντοπίζεται παρά ελάχιστη και αραιή αστική κάλυψη. Ως εκ τούτου η περιοχή μπορεί να θεωρηθεί σχετικά αυτόνομη από τις γειτονικές περιοχές, ως προς τα χωρικά πρότυπα με τα οποία εκφράζεται η αστική ανάπτυξη. Τα Μεσόγεια συνθέτουν ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον φυσικό μωσαϊκό που

¹³ <http://www.ametro.gr/>

καλύπτεται από μεγάλες εκτάσεις ελαιώνων και αμπελώνων αλλά και διάφορες αγροτικές καλλιέργειες ενώ συνδυάζει ποικίλες μικρο-κλιματικές συνθήκες (Symeonakis et al. 2008) σε μικρή απόσταση από το κέντρο της πόλης. Αυτός είναι ένας από τους λόγους για τους οποίους η περιοχή μελέτης έχει αναπτυχθεί ραγδαία με ρυθμούς μεγαλύτερους από ότι το σύνολο της Αττικής. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τα διαθέσιμα δεδομένα, το 1988 υπήρχαν μόλις 45 τ.χλμ. αστικής κάλυψης τα οποία έγιναν 75 το 2000 για να ανέλθουν σε 125 το 2007. Τα τελευταία είκοσι χρόνια η ποσοστιαία μεταβολή της αστικής κάλυψης στην περιοχή μελέτης αγγίζει το 200% ενώ για το σύνολο του νομού ης Αττικής είναι περίπου 29%.



Χάρτης 7.1: Η θέση της περιοχής μελέτης

Δήμος	%
Αγίας Παρασκευής	100
Αθηναίων	7
Ανθούσης	100
Αργυρουπόλεως	36
Αρτέμιδος	100
Βάρης	60
Βούλας	55
Βριλησίων	100
Βύρωνος	68
Γέρακα	100
Γλυκόν Νερών	100
Γλυφάδας	55
Ζωγράφου	86

Δήμος	%
Ηλιουπόλεως	41
Ηρακλείου	39
Καισαριανής	84
Καλυβίων Θορικού	23
Κερατέας	28
Κορωπίου	89
Κουβαρά	72
Μαρκοπούλου Μεσογαίας	100
Αμαρουσίου	80
Μελισσίων	41
Νέας Ιωνίας	19
Νέας Μάκρης	20
Νέας Πεντέλης	10

Δήμος	%
Νέου Ψυχικού	100
Παιανίας	100
Παλλήνης	100
Παπάγου	100
Πεντέλης	62
Πεύκης	25
Πικερμίου	100
Ραφήνας	100
Σπάτων	100
Φιλοθέης	95
Χαλανδρίου	100
Χολαργού	100
Ψυχικού	57

Πίνακας 7.1: Οι δήμοι στην περιοχή μελέτης και το ποσοστό της επιφάνειάς τους που ανήκει στην περιοχή μελέτης

Η αναπτυξιακή αυτή έκρηξη, ειδικά τα τελευταία 10 χρόνια, οφείλεται σε έναν μεγάλο βαθμό στα διάφορα έργα που τελέσθηκαν, μερικά εκ των οποίων στα πλαίσια της διοργάνωσης των Ολυμπιακών Αγώνων 'Αθήνα 2004'. Ανάμεσα σε αυτά, ιδιαίτερης σημασίας είναι η κατασκευή της Αττικής Οδού και του νέου διεθνούς αεροδρομίου και πρόσφατα η επέκταση των γραμμών του Αττικού Μετρό και του Προαστιακού σιδηρόδρομου. Επιπροσθέτως, η επέκταση της αστικής κάλυψης στην περιοχή παρουσιάζει ιδιαίτερα ανομοιογενή χωρικά πρότυπα ανάπτυξης - ειδικά σε σύγκριση με την υπόλοιπη Αττική. Για αυτούς τους λόγους, η ευρύτερη περιοχή των Μεσογείων αποτελεί μια ενδιαφέρουσα και περίπτωση για την εφαρμογή και αξιολόγηση του CaFe.

7.2.2 Αρχικά Δεδομένα

Προκειμένου να αναπτυχθεί το CaFe, απαιτούνται τουλάχιστον δεδομένα χρήσεων γης και το οδικό δίκτυο αλλά το μοντέλο αποδίδει καλύτερα εάν είναι διαθέσιμα περισσότερα δεδομένα. Για την περιοχή μελέτης τα διαθέσιμα δεδομένα είναι:

- Αστική Κάλυψη για τα έτη 1988, 2000 & 2007
- Οδικό δίκτυο για τα έτη 2004 & 2007
- Γραμμές & Σταθμούς Προαστιακού Σιδηρόδρομου και Μετρό για το έτος 2007
- Χρήσεις Γης – ταξινόμηση Corine για τα έτη 1990 και 2000
- Ακτογραμμή
- Προστατευόμενες Δασικές Περιοχές
- Ψηφιακό Μοντέλου Εδάφους

Τα δεδομένα αστικής κάλυψης (χάρτης 7.2) εξήχθησαν¹⁴ από δορυφορικές εικόνες LandSat διακριτικότητας 30X30μ. (Assimakopoulos et al. 2009), είναι σε ψηφιδωτή μορφή διακριτικότητας 30X30μ. ενώ η ακρίβειά τους εκτιμάται σε περίπου 95%. Αυτό σημαίνει ότι με δειγματοληψία in situ δεδομένων, εκτιμήθηκε ότι περίπου 5% της επιφάνειας αποδίδεται λαθεμένα. Το οδικό δίκτυο αποτελεί προϊόν της Infocharta Ε.Π.Ε¹⁵ και περιλαμβάνει επιπλέον πληροφορίες σχετικά με την

¹⁴ Τα δεδομένα αυτά δεν αποτελούν προϊόν της παρούσης διδακτορικής έρευνας αλλά διατέθηκαν δωρεάν από τους δημιουργούς τους για την ανάπτυξη του CaFe.

¹⁵ <http://www.infocharta.gr/>

κατηγοριοποίηση των δρόμων. Από την ίδια εταιρία διατέθηκαν τα δεδομένα των γραμμών και των σταθμών του Προαστιακού σιδηρόδρομου και του Μετρό, τα όρια των δήμων της περιοχής και η ακτογραμμή της ευρύτερης περιοχής (χάρτης 7.3α). Τα δεδομένα για τις προστατευόμενες δασικές περιοχές (χάρτης 7.3α) παράχθηκαν στα πλαίσια του προγράμματος Ciroci, ενώ το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (χάρτης 7.3β) ανάλυσης 90X90μ. διατίθεται δωρεάν στο κοινό από την NASA¹⁶. Τέλος, από την ΕΕΑ¹⁷ διατίθεται δωρεάν για ερευνητικούς σκοπούς η βάση δεδομένων χρήσεων γης Corine (χάρτης 7.4). Τα δεδομένα Corine είναι σε διανυσματική μορφή, ωστόσο βασίζονται σε ψηφιδωτά αρχεία 100X100μ.

Με αυτά τα δεδομένα, το μοντέλο διαμορφώθηκε ώστε να προσεγγίζει την αστική κάλυψη σύμφωνα με τα αντίστοιχα δεδομένα διακριτικότητας 30X30 και όχι σύμφωνα με την κατηγορία 1 του Corine, το οποίο σημαίνει ότι τα δεδομένα Corine χρησιμοποιούνται αποκλειστικά ως δεδομένα εισόδου. Ειδικότερα, τα δεδομένα Corine για το 1990 χρησιμοποιήθηκαν για το 1988 θεωρώντας αμελητέες τις μεταβολές την περίοδο 1988-1990 ενώ για το 2007 χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα Corine 2000 ανανεωμένα μόνο ως προς την αστική κάλυψη σύμφωνα με τα αντίστοιχα δεδομένα αστικής κάλυψης για το 2007. Επιπλέον, παρήχθησαν εκτιμήσεις για το οδικό δίκτυο (χάρτης 7.5) για το 2000 και το 1988. Για να γίνει αυτό αρχικά δημιουργήθηκαν αυτόματα κάποιες πρώτες εκτιμήσεις χρησιμοποιώντας το λογισμικό Erdas Imagine και δορυφορικές εικόνες Landsat για τα αντίστοιχα έτη ενώ ακολούθησε χειροκίνητη επεξεργασία των πρώτων εκτιμήσεων.

Εξαιτίας τεχνικών περιορισμών που εντοπίζονται στην μετατροπή των δεδομένων σε μορφή προσπελάσιμη από το CaFe, η περιοχή μελέτης πρέπει να αποτελείται το πολύ από 65.536 κυψέλες. Για αυτόν τον λόγο, η περιοχή μελέτης αναλύθηκε σε ένα ψηφιδωτό αρχείο 256X247 το οποίο περιέχει 63.232 κυψέλες ακμής 100μ. Ως εκ τούτου, όλα τα δεδομένα μετετράπησαν σε αντίστοιχη μορφή. Ειδικότερα, κατά την μετατροπή των επιπέδων αστικής κάλυψης χρησιμοποιήθηκε το φίλτρο αθροίσματος επιστρέφοντας έτσι τα τελικά επίπεδα αστικής κάλυψης απευθείας σε ασαφή μορφή (χάρτης 7.6).

Ακολούθως, υπολογίστηκαν αποστάσεις από την ακτογραμμή, τους σταθμούς του Μετρό και του Προαστιακού Σιδηρόδρομου και τους ανισόπεδους κόμβους του οδικού δικτύου (χάρτης 7.7). Επιπλέον, το ψηφιακό μοντέλο εδάφους μετατράπηκε σε αρχείο με κελιά 100X100 από το οποίο

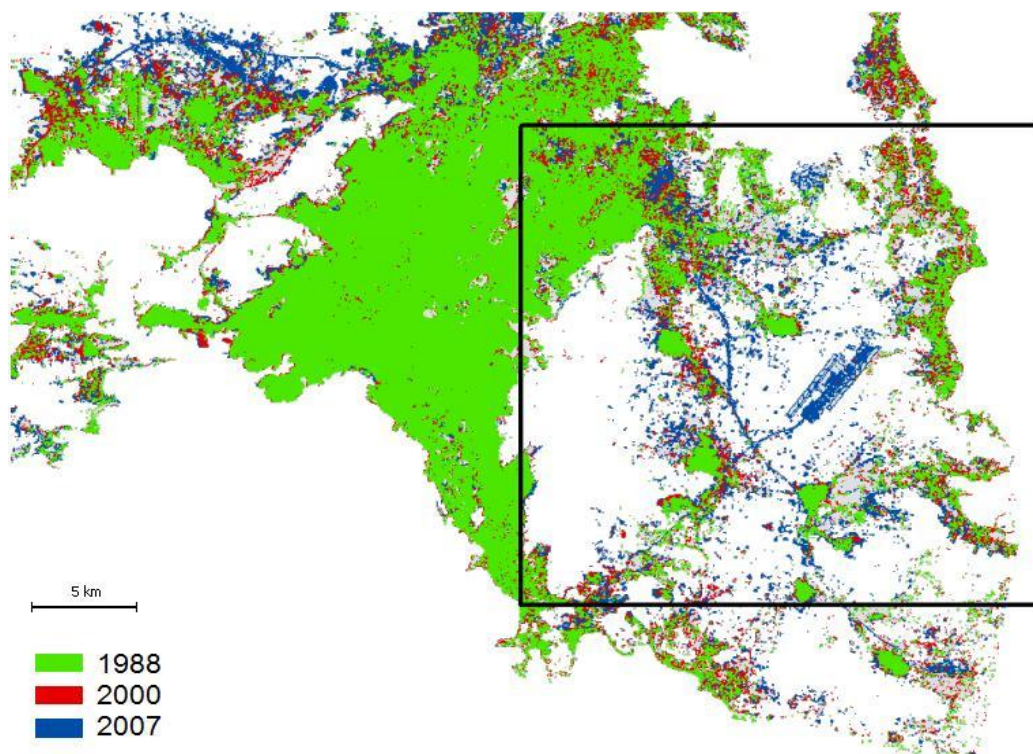
¹⁶ <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>

¹⁷ <http://www.eea.europa.eu/themes/landuse/clc-download>

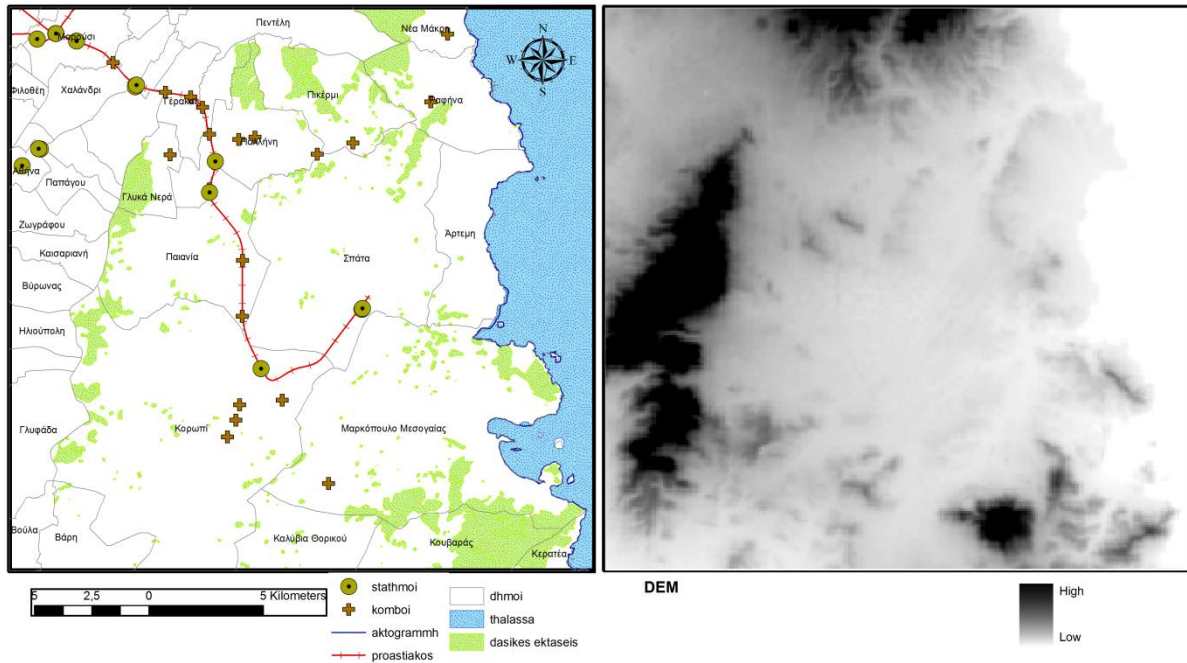
παράχθηκαν οι κλίσεις επιφανείας (χάρτης 7.7). Επιπλέον εξήχθησαν ψηφιδωτά αρχεία με κελιά 100X100μ. που περιέχουν πληροφορία σχετικά με την ευκλείδεια απόσταση και την πυκνότητα τόσο για το πρωτεύον (χάρτης 7.8) όσο και για το δευτερεύον οδικό δίκτυο (χάρτης 7.9). Τα παραπάνω θεματικά επίπεδα εξήχθησαν μέσω της εργαλειοθήκης του λογισμικού ArcMap και ειδικότερα μέσω των συναρτήσεων Euclidian-distance και Line-Density του Spatial-Analyst. Τέλος, όλη η πληροφορία που αναφέρεται σε κάθε συγκεκριμένη χρονική στιγμή ενσωματώθηκε σε ένα συνδυασμένο ψηφιδωτό αρχείο που καλύπτει όλη την περιοχή μελέτης.

Το μοντέλο προσαρμόζεται πλήρως στα διαθέσιμα δεδομένα για την περιοχή μελέτης, όμως υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός επιπλέον δεδομένων που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και βελτιώσουν την συμπεριφορά του μοντέλου και κατά συνέπεια τα αποτελέσματα. Ατυχώς, τέτοια δεδομένα δεν ήταν διαθέσιμα για το σύνολο της περιοχής μελέτης ή για τα έτη στα οποία αναφέρονται τα δεδομένα που τελικώς χρησιμοποιήθηκαν. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να διαχωριστούν σε δυο κατηγορίες:

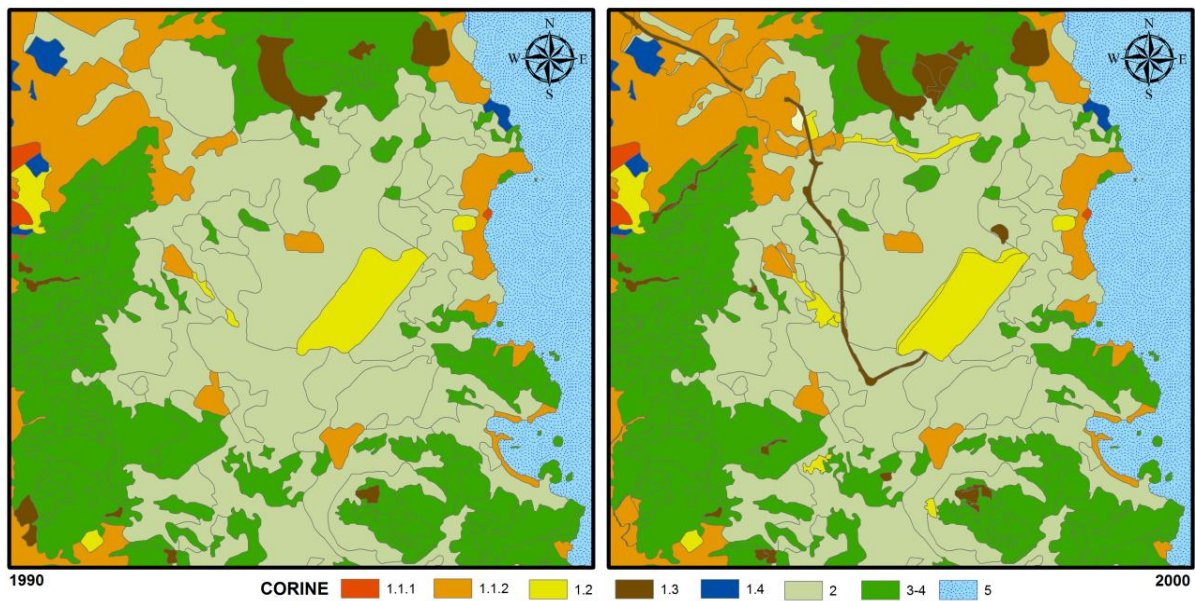
- Παράγοντες που αποκλείουν την ΑσΕ, όπως αρχαιολογικοί χώροι, προστατευόμενες φυσικές περιοχές, κλπ.
- Παράγοντες που επηρεάζουν την εμφάνιση της ΑσΕ, όπως ανάμεσα σε άλλα δείκτες προσβασιμότητας σε μέσα μαζικών μεταφορών, σχέδιο πόλης, συντελεστές δόμησης, αξίες γης και ακινήτων, πληθυσμό και θέσεις εργασίας, γενικότερο κοινωνικοοικονομικό προφίλ, πληροφορίες για τα κτίρια, υποδομές ύδρευσης/άδρευσης κ.α.



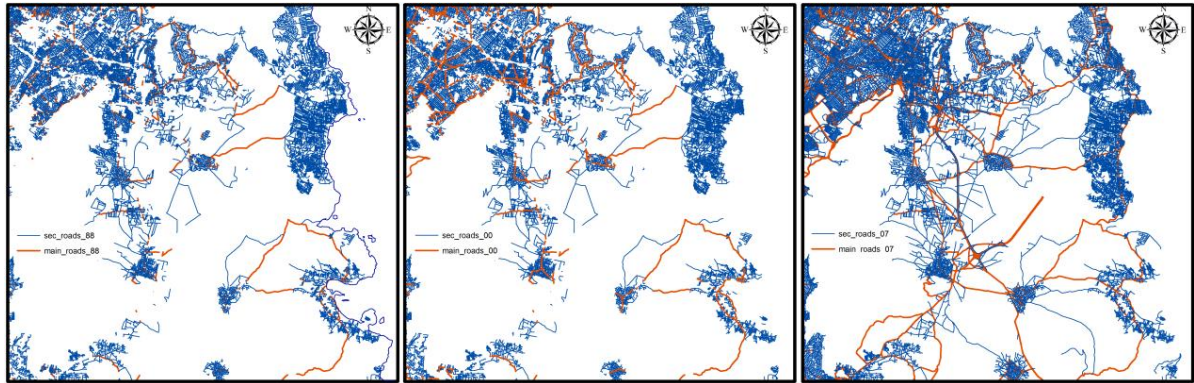
Χάρτης 7.2: Η εξέλιξη της αστικής κάλυψης στην Αττική και την περιοχή μελέτης



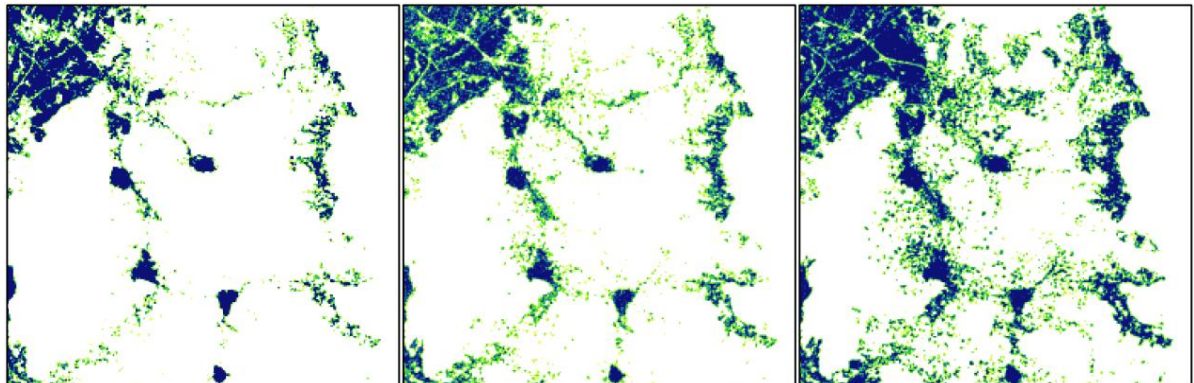
Χάρτης 7.3: Οι δήμοι, η ακτογραμμή, οι προστατευόμενες δασικές περιοχές, η γραμμή και οι σταθμοί του Προαστιακού σιδηρόδρομου και του Μετρό και οι ανισόπεδοι κόμβοι (αριστερά) και το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (δεξιά)



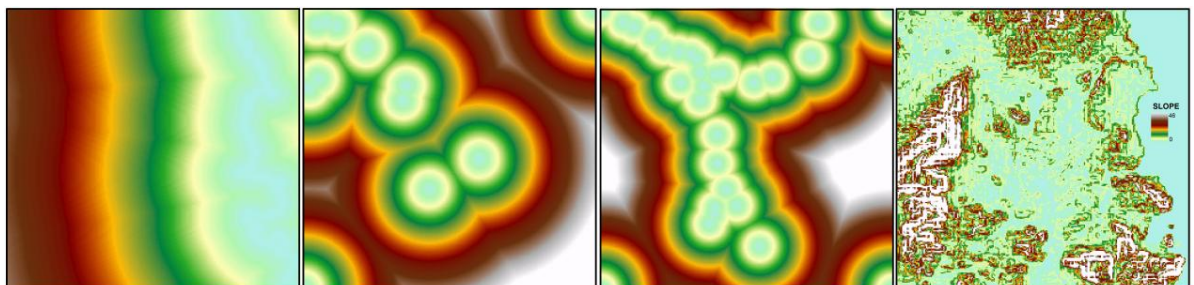
Χάρτης 7.4: Χρήσεις γης βάση ταξινόμησης Corine για το 1990 (αριστερά) και το 2000 (δεξιά)



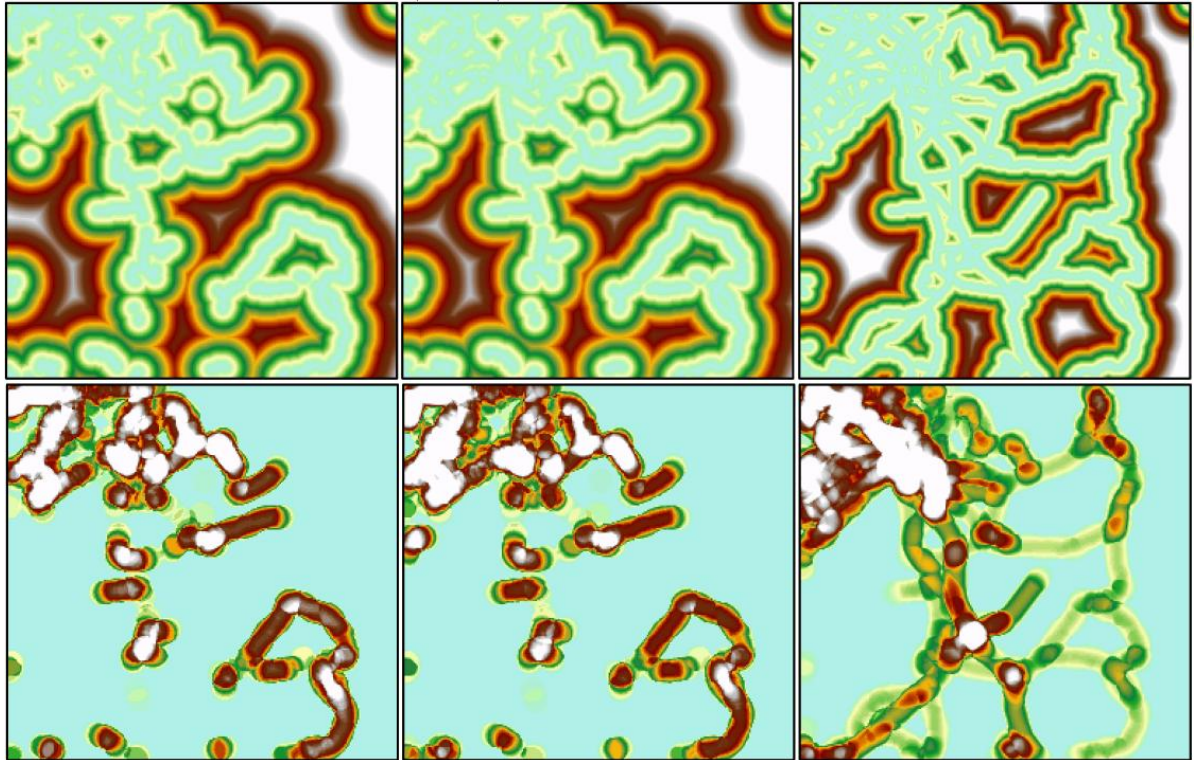
Χάρτης 7.5: Το πρωτεύον (κόκκινο) και δευτερεύον (μπλε) οδικό δίκτυο για το 1988 (αριστερά), 2000 (κέντρο) και 2007 (δεξιά)



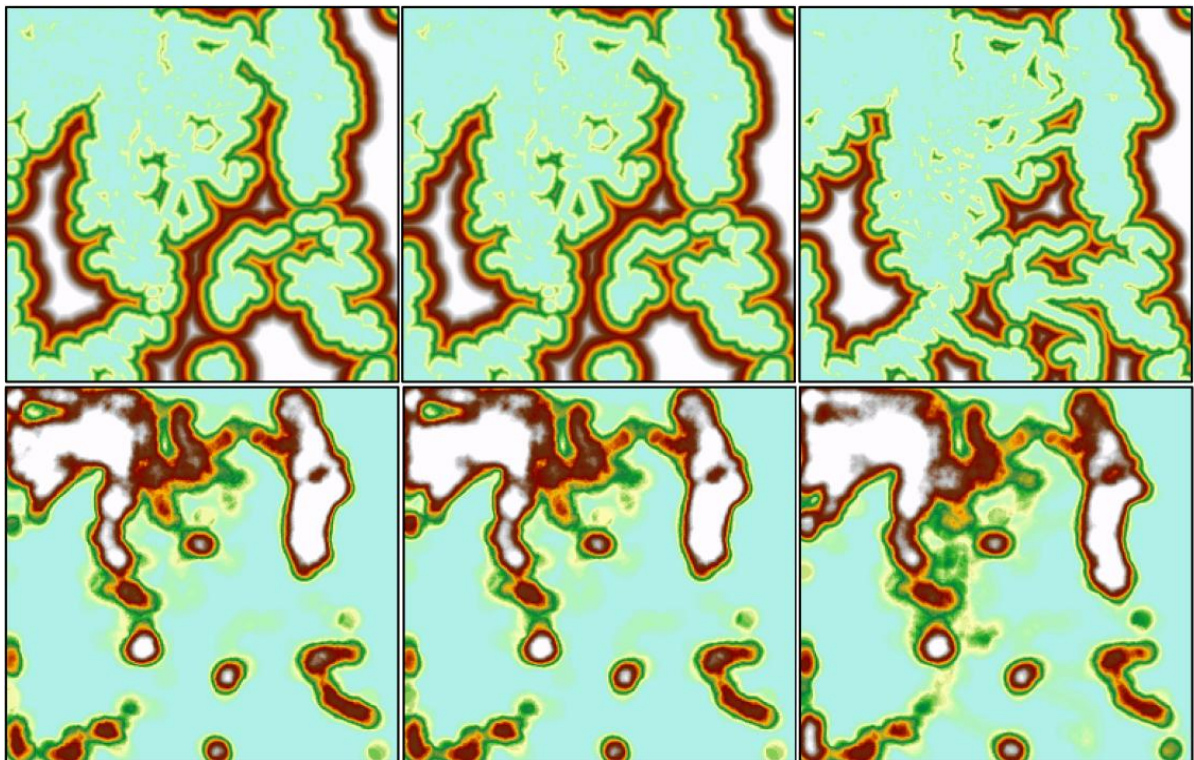
Χάρτης 7.6: Η ασαφοποιημένη αστική κάλυψη για το 1988 (αριστερά), το 2000 (κέντρο) και το 2007 (δεξιά)



Χάρτης 7.7: (από αριστερά προς τα δεξιά) απόσταση από την ακτογραμμή, τους σταθμούς επιβίβασης, τους ανισόπεδους κόμβους και κλίσεις επιφανείας



Χάρτης 7.8: Απόσταση (άνω) και πυκνότητα (κάτω) για το πρωτεύον οδικό δίκτυο για το 1988 (αριστερά), το 2000 (κέντρο) και το 2007 (δεξιά)



Χάρτης 7.9: Απόσταση (άνω) και πυκνότητα (κάτω) για το δευτερεύον οδικό δίκτυο για το 1988 (αριστερά), το 2000 (κέντρο) και το 2007 (δεξιά)

7.3 Ανάπτυξη του CaFe

Στο στάδιο της ανάπτυξης του CaFe, το μεθοδολογικό πλαίσιο μοντελοποίησης που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, τροφοδοτείται με δεδομένα για το 1988 με σκοπό να εκτιμήσει την αστική κάλυψη του 2000. Αυτό λαμβάνει χώρα σε δύο επιμέρους βήματα. Στο πρώτο βήμα αναλύονται τα δεδομένα με σκοπό να εκτιμηθεί η δεσμευμένη συχνότητα εμφάνισης της αστικής κάλυψης ως προς κάθε μεταβλητή εισόδου και να εξαχθεί η αντίστοιχη συνάρτηση συμμετοχής/καταλληλότητας. Τέλος, στο δεύτερο βήμα, ο μηχανισμός CA++ βαθμονομείται με σκοπό να προσομοιώσει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο την ΑσΕ στην περίοδο 1988-2000.

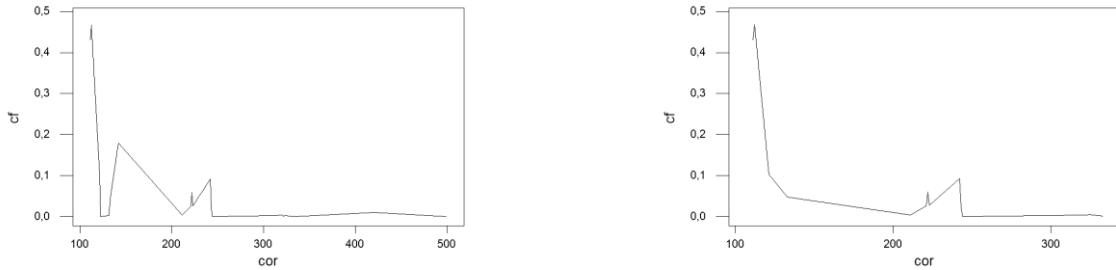
7.3.1 Υπολογισμός Καταλληλότητας

Αρχικά αναλύεται όλη η περιοχή μελέτης προκειμένου να εξαχθούν τα διαγράμματα συχνότητας εμφάνισης της αστικής κάλυψης ως προς κάθε μεμονωμένη μεταβλητή εισόδου που αναφέρεται στο 1988 και ορίζονται οι κανόνες εξαίρεσης. Ειδικότερα, εξαιρέθηκαν οι προστατευόμενες δασικές εκτάσεις και οι περιοχές με κλίσεις επιφανείας μεγαλύτερες των 20 μοιρών. Παράλληλα, εξαιρέθηκαν οι περιοχές που χαρακτηρίζονται ως υγρές ζώνες, θαλάσσιες επιφάνειες ή δάση, δηλαδή οι κατηγορίες Corine 4 και 5 και η υποκατηγορία 3.1 αντίστοιχα. Τέλος, εξαιρέθηκαν οι περιοχές που χαρακτηρίζονται ως δάση και ημι-φυσικές περιοχές, μη αρδεύσιμη-αρόσιμη γη και γεωργό-δασικές περιοχές, δηλαδή η κατηγορία Corine 3 και οι υποκατηγορίες 2.1.1 και 2.4.4 αντίστοιχα.

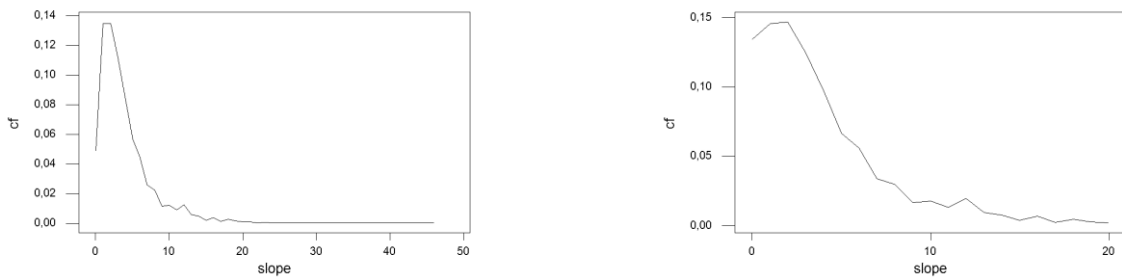
Η εφαρμογή των κανόνων εξαίρεσης επέφερε σημαντικές μεταβολές στην κατανομή της συχνότητας εμφάνισης κυρίως για τις μεταβλητές βάση των οποίων ορίστηκαν οι κανόνες εξαίρεσης. Έτσι, σημαντικά διαφοροποιημένα παρουσιάζονται τα διαγράμματα για το σύνολο της περιοχής και για τις δυναμικές κυψέλες όσον αφορά τις χρήσεις γης (γράφημα 7.1) και τις κλίσεις επιφανείας (γράφημα 7.2). Διαφορές εντοπίζονται ως προς το εύρος των πεδίων ορισμού και των συνόλων τιμών - αλλά όχι ως προς την γενική μορφή των διαγραμμάτων - για τις κατανομές σε σχέση με την απόσταση από την ακτογραμμή (γράφημα 7.3) αλλά και από το πρωτεύον (γράφημα 7.4) και δευτερεύον οδικό δίκτυο (γράφημα 7.5).

Από τα γραφήματα συχνότητας εμφάνισης που αναφέρονται στις δυναμικές περιοχές, εφαρμόζοντας την μεθοδολογία που περιγράφεται στην ενότητα 6.2.2 εξάγονται οι συναρτήσεις συμμετοχής καταλληλότητας για κάθε μεταβλητή εισόδου. Ο πίνακας 7.2 δείχνει τις ΠΒ για κάθε μονοσύνολο των χρήσεων γης ενώ οι συναρτήσεις συμμετοχής που υπολογίστηκαν για τις συνεχείς μεταβλητές και οι αντίστοιχες ΠΒ δίδονται στον πίνακα 7.3. Με αυτόν τον τρόπο διαμορφώνεται ένας και μόνο κανόνας που καθορίζει την καταλληλότητα προς αστικοποίηση για κάθε μεταβλητή (χάρτης 7.10 & 7.11) ως αποτέλεσμα του σταδίου της συνεπαγωγής του συστήματος. Ακολούθως, στο στάδιο της συγκέντρωσης, με αποκλειστική χρήση του τελεστή Ευαίσθητο Άθροισμα (EA)

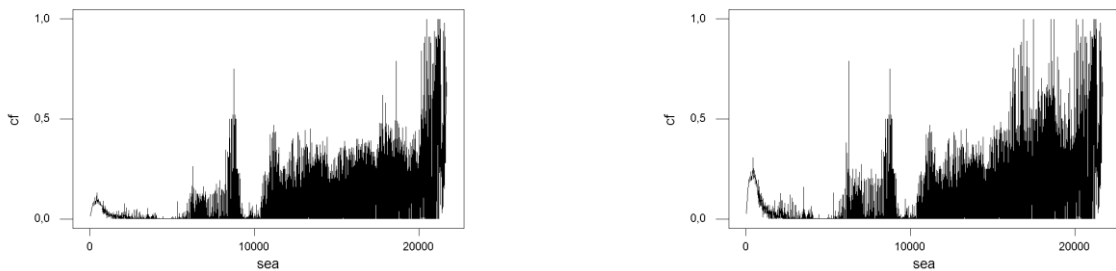
υπολογίζεται η συνολική καταλληλότητα προς αστικοποίηση για κάθε κυψέλη της περιοχής (χάρτης 7.12).



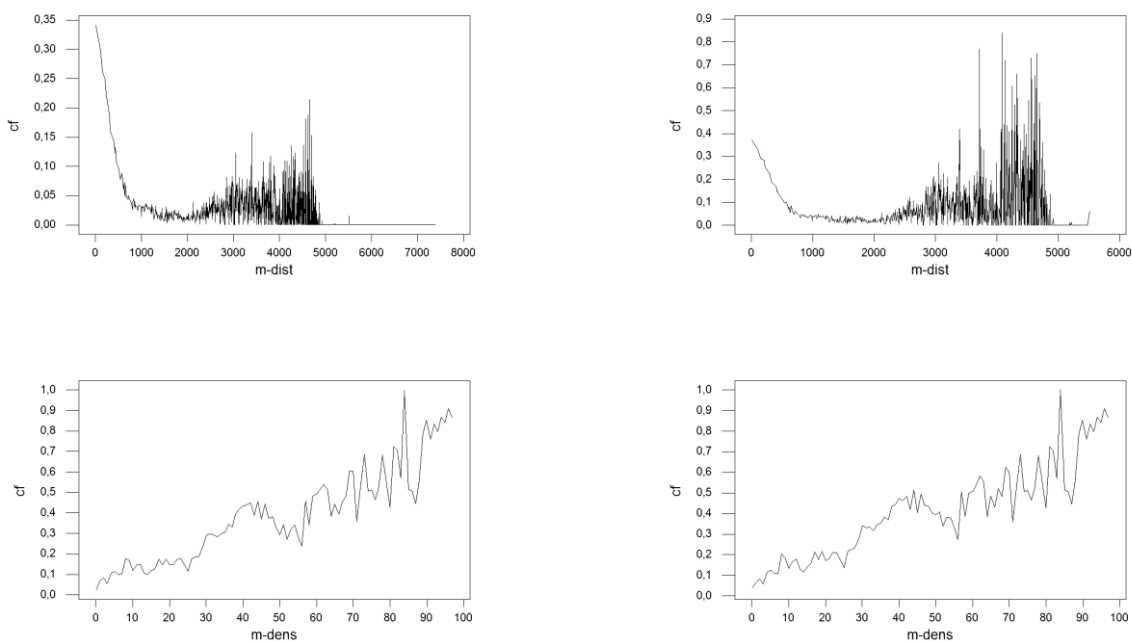
Γράφημα 7.1: Η συχνότητα εμφάνισης Αστικής Κάλυψης ανά κατηγορία Corine για το σύνολο της περιοχής (αριστερά) και τις δυναμικές περιοχές (δεξιά) για το 1988



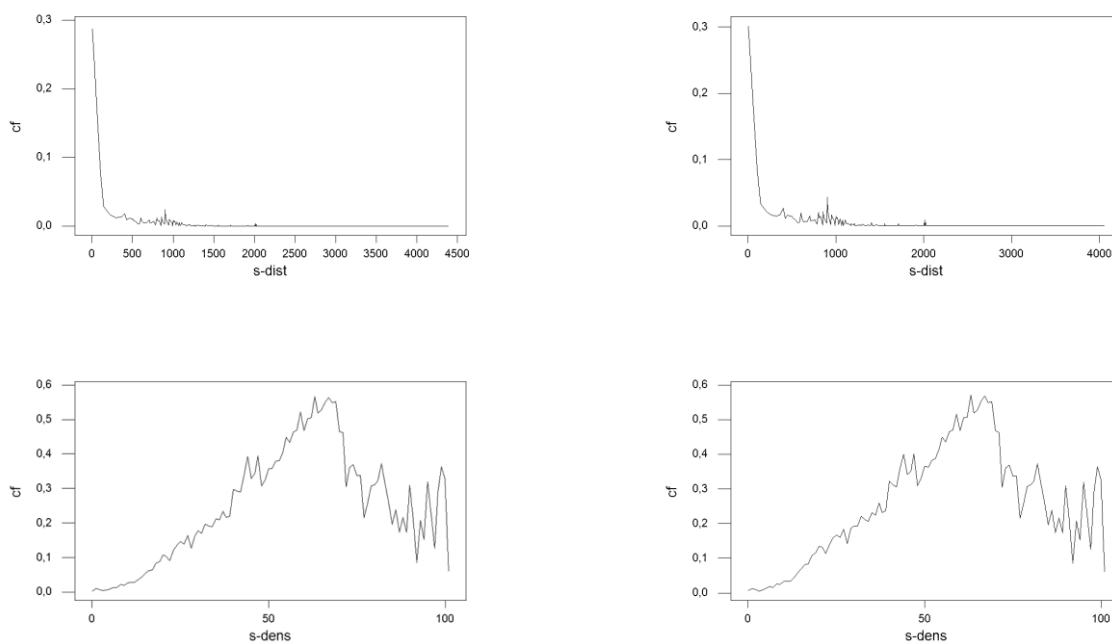
Γράφημα 7.2: Η συχνότητα εμφάνισης Αστικής Κάλυψης ανά κλίσεις επιφανείας για το σύνολο της περιοχής (αριστερά) και τις δυναμικές περιοχές (δεξιά) για το 1988



Γράφημα 7.3: Η συχνότητα εμφάνισης Αστικής Κάλυψης ανά απόσταση από την ακτογραμμή για το σύνολο της περιοχής (αριστερά) και τις δυναμικές περιοχές (δεξιά) για το 1988



Γράφημα 7.4: Η συχνότητα εμφάνισης Αστικής Κάλυψης ανά απόσταση (άνω) και πυκνότητα (κάτω) για το πρωτεύον οδικό δίκτυο για το σύνολο της περιοχής (αριστερά) και τις δυναμικές περιοχές (δεξιά) για το 1988



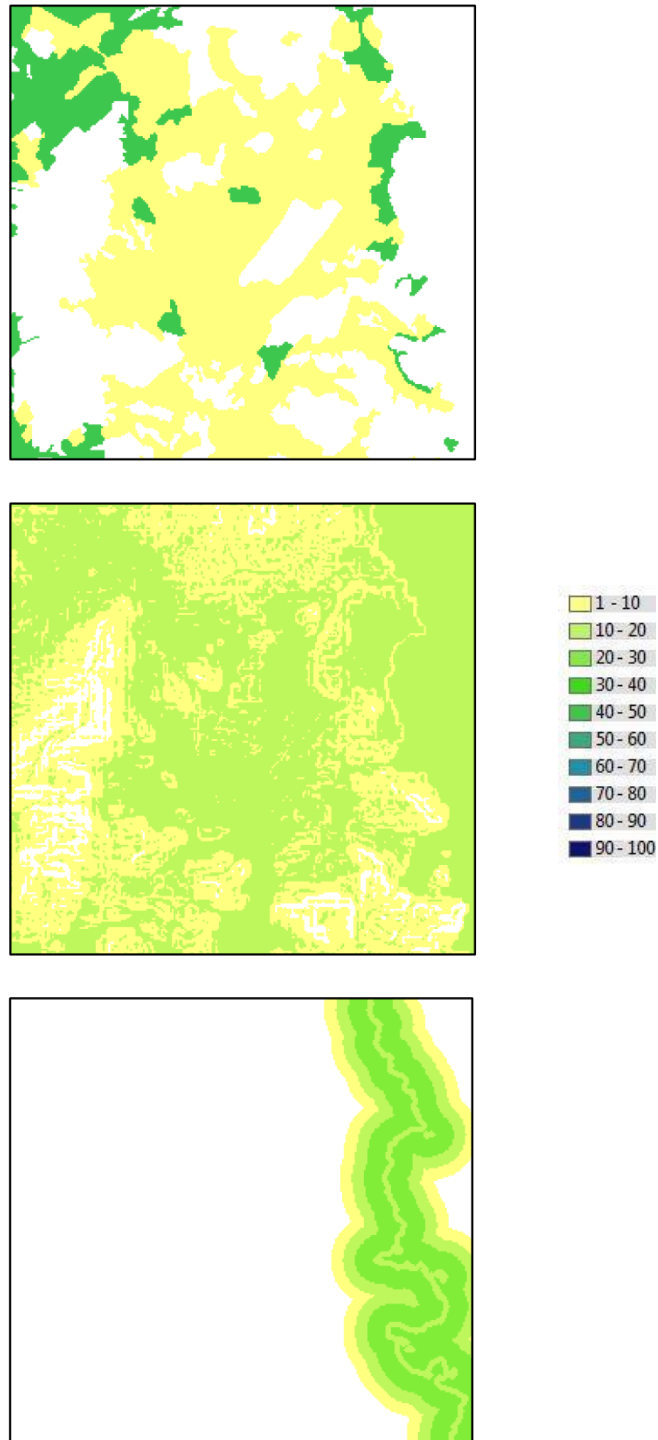
Γράφημα 7.5: Η συχνότητα εμφάνισης Αστικής Κάλυψης ανά απόσταση (άνω) και ανά πυκνότητα (κάτω) για το δευτερεύον οδικό δίκτυο για το σύνολο της περιοχής (αριστερά) και τις δυναμικές περιοχές (δεξιά) για το 1988

ΠΒ%	111	112	121	133	211	221	222	223	242	243	244	321	323	324	333
1988	43	47	10	5	0	3	6	3	9	2	0	0	0	0	0

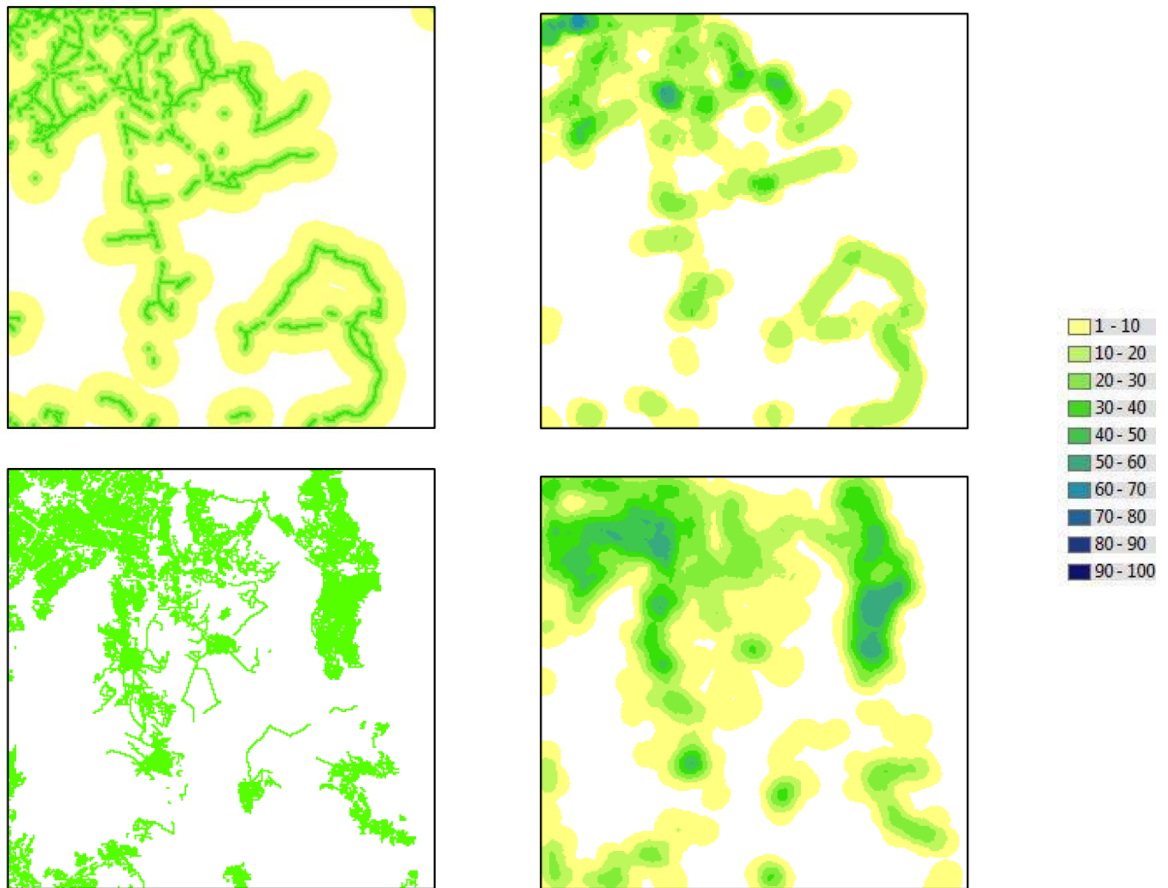
Πίνακας 7.2: Η καταλληλότητα προς αστικοποίηση για κάθε μονοσύνολο των χρήσεων γης βάση Corine για το 1988

Μεταβλητή	Συνάρτηση Συμμετοχής Καταλληλότητας 1988	ΠΒ
Κλίσεις Επιφανείας	$\mu(\chi) = \begin{cases} 1 & \text{αν } \chi \in [0,2] \\ (11-\chi)/9 & \text{αν } \chi \in (2,8) \\ (21-\chi)/39 & \text{αν } \chi \in [8,21] \end{cases} \quad (7.1)$	0,13
Απόσταση από Ακτογραμμή	$\mu(\chi) = \begin{cases} (\chi + 1750)/1250 & \text{αν } \chi \in [0,500] \\ [(2500 - \chi)/2000] & \text{αν } \chi \in (500,2500) \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (7.2)$	0,30
Απόσταση από Πρωτεύον Οδικό Δίκτυο	$\mu(\chi) = \begin{cases} \exp(-\chi / 360) & \text{αν } \chi \in [0,3000] \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (7.3)$	0,33
Πυκνότητα Πρωτεύοντος Οδικού Δικτύου	$\mu(\chi) = \begin{cases} \chi / 70 & \text{αν } \chi \leq \alpha \\ 1 & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (7.4)$	0,70
Απόσταση από Δευτερεύον Οδικό Δίκτυο	$\mu(\chi) = \begin{cases} \exp(-\chi / 80) & \text{αν } \chi \in [0,2000] \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (7.5)$	0,26
Πυκνότητα Δευτερεύοντος Οδικού Δικτύου	$\mu(\chi) = \begin{cases} \chi / 70 & \text{αν } \chi \leq \alpha \\ 1 & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (7.6)$	0,55

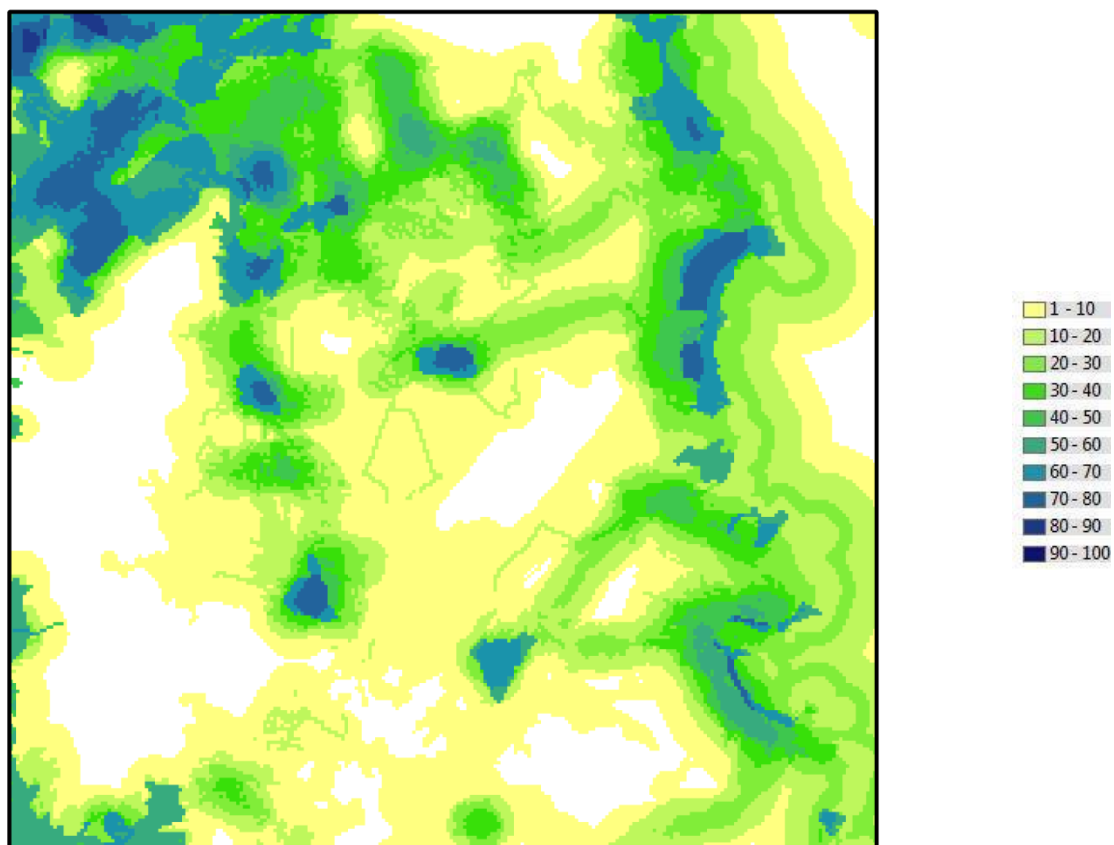
Πίνακας 7.3: Οι συναρτήσεις καταλληλότητας των μεταβλητών εισόδου και οι τιμές των αντίστοιχων Παραμέτρων Βεβαιότητας για το 1988



Χάρτης 7.10: Καταλληλότητα βάση χρήσεων γης (άνω), κλίσεων επιφανείας (κέντρο) και απόστασης από την ακτογραμμή (κάτω) για το 1988



Χάρτης 7.11: Καταλληλότητα βάση απόστασης (αριστερά) και πυκνότητας (δεξιά) για το πρωτεύον (άνω) και το δευτερεύον (κάτω) οδικό δίκτυο για το 1988



Χάρτης 7.12: Συγκεντρωτική καταλληλότητα προς αστικοποίηση για το 1988

7.3.2 Βαθμονόμηση του Μηχανισμού CA⁺⁺

Η βαθμονόμηση του CaFe εκτελείται χειροκίνητα με διαδοχικές δοκιμές και εκτιμήσεις σφάλματος (trial & error) προκειμένου να επιλεγούν οι βέλτιστες τιμές ορισμένων παραμέτρων. Ειδικότερα, το κατώφλι της διεργασίας 1, δηλαδή ο ρυθμός με τον οποίο μια ήδη αστική κυψέλη μπορεί να εντεινεί την αστική της κάλυψη σε ένα βήμα, μεταβάλλεται συνεχώς στον χρόνο από την αρχική τιμή 0.4 στην τελική τιμή 0.1. Το κατώφλι των επιπέδων 2,3 και 4, δηλαδή η μέγιστη αστική κάλυψη που μπορεί να αναπτύξει μια μη αστική κυψέλη σε ένα βήμα, μεταβάλλεται επίσης συνεχώς ως προς τον χρόνο αλλά αντίθετα με το ποσοστιαίο κατώφλι, λαμβάνει αρχικά την τιμή 0.1 για να καταλήξει στην τιμή 0.5.

Οι διεργασίες 1 και 2 που εφαρμόζουν την κλασική λειτουργία των ΚΑ χρησιμοποιούν γειτονιές Moore ακτίνας 1, δηλαδή λαμβάνουν υπόψη την αστική κάλυψη στις οχτώ άμεσα γειτονικές κυψέλες. Η διεργασία 3 προσπελαύνει τις μη αστικές κυψέλες που βρίσκονται σε μικρή απόσταση από αστικές κυψέλες και χρησιμοποιεί ΚΑ κατά κατεύθυνση φθίνουσας ακτίνας ως προς τον χρόνο. Ειδικότερα, ενώ αρχικά η ακτίνα λαμβάνει την τιμή 12, φθίνει σταδιακά προς την τιμή 6.

Η ίδια διαμόρφωση υιοθετείται και για την διεργασία 4. Ειδικότερα, αν στην γειτονιά που ορίζει η διεργασία 3 δεν εντοπίζεται αστική κάλυψη, τότε εκτελείται το επίπεδο 4. Το γεγονός ότι η ακτίνα της γειτονιάς των διεργασιών 3 και 4 είναι φθίνουσα ως προς τον χρόνο επιτρέπει στο μοντέλο να εφαρμόζει τα ίδια χωρικά πρότυπα ανάπτυξης σε διαδοχικά μικρότερες κλίμακες. Ουσιαστικά αυτό σημαίνει ότι όσο περνάει ο χρόνος τα επίπεδα 3 και 4 μπορούν να εφαρμοσθούν ανάμεσα σε κυψέλες τις οποίες τα ίδια επίπεδα αστικοποίησαν στα πρώτα βήματα του αλγορίθμου, βελτιώνοντας έτσι περαιτέρω την προσπέλαση των κυψελών.

Επιπλέον, η απόσταση από αστική κάλυψη που απαιτείται προκειμένου να πυροδοτηθούν οι κανόνες των διεργασιών 3 και 4 μεταβάλλονται τόσο στον χρόνο, όσο και στον χώρο. Έτσι νότιο-ανατολικά, νότιο-δυτικά και κεντρικά η απόσταση αυτή αρχικά λαμβάνει την τιμή 4 και φθίνει προς την τιμή 2 ενώ στην υπόλοιπη περιοχή έχει σταθερά την τιμή 4. Με αυτόν τον τρόπο το μοντέλο καθιστά πλέον ευέλικτα τα επίπεδα 3 και 4 σε αυτές τις περιοχές όπου παρατηρείται ένας μεγάλος αριθμός μικρών αστικών πυρήνων σε μικρή απόσταση από την κυρίως αστική κάλυψη.

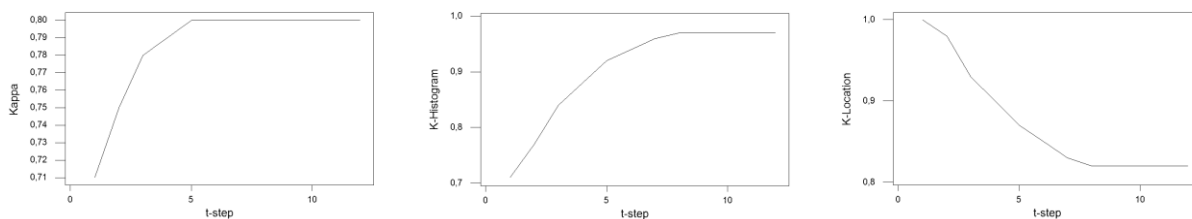
Παράλληλα, οι διεργασίες 3 και 4 κάνουν χρήση του τελεστή 'άνω α%'. Ειδικότερα, η παράμετρος α της διεργασίας 3 λαμβάνει αρχικά την τιμή 30% και αυξάνει προς την τιμή 80%. Η παράμετρος α της διεργασίας 4 αρχικά λαμβάνει επίσης την τιμή 40% για να αυξηθεί προσεγγίζοντας την τιμή 90% στο πέραςμα του χρόνου. Τέλος, οι παράμετροι βεβαιότητας των κανόνων για όλα τα επίπεδα καθορίστηκαν στην τιμή 1.

7.3.3 Αποτελέσματα του Μοντέλου

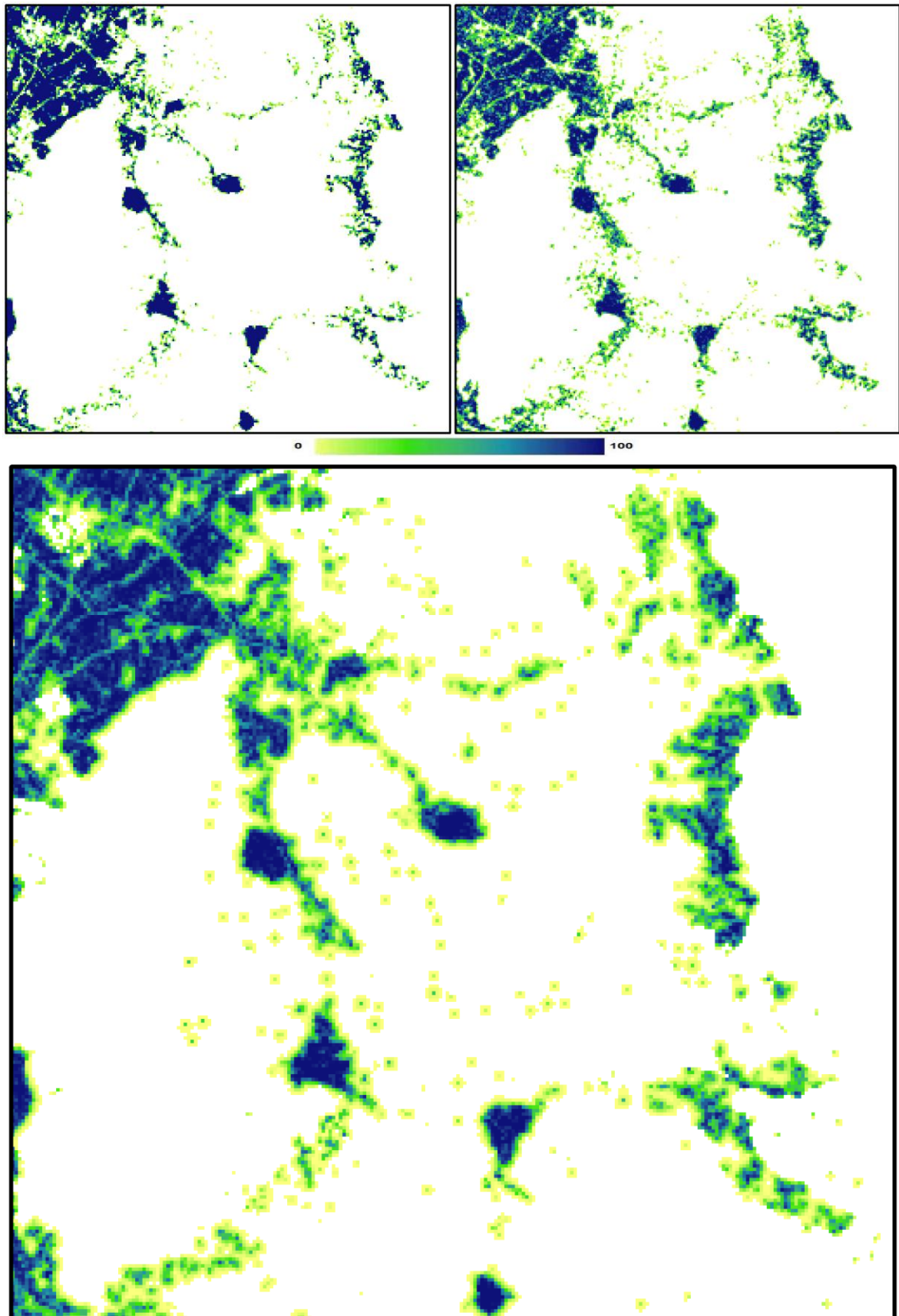
Το CaFe βαθμονομήθηκε στην περίοδο 1988-2000 κατά την οποία η αστική κάλυψη αυξάνεται κατά 66% και οι αριθμητικοί δείκτες (πίνακας 7.4, γράφημα 7.6) υποδεικνύουν ότι τα αποτελέσματα του μοντέλου προσεγγίζουν ικανοποιητικά την πραγματική αστική κάλυψη του 2000 βάση του 1988 (χάρτης 7.13). Ειδικότερα, το μέσο σφάλμα της αστικής κάλυψης υπολογίζεται σε 3.1% ενώ οι δείκτες Lee-Sallee και Kappa λαμβάνουν τις τιμές 0.72 και 0.82 αντίστοιχα. Ωστόσο, από τους νέους δείκτες αξιολόγησης που προτάθηκαν, καθίσταται σαφές ότι περίπου μια στις τρεις κυψέλες χωροθετείται λαθεμένα (Σφάλμα Μοντέλου).

Δείκτης	1988-2000
Απόλυτη Μεταβολή ΑσΕ	3.000
Ποσοστιαία Μεταβολή ΑσΕ	66%
Απόλυτο σφάλμα	927
Σφάλμα Χάρτη	3.1%
Σφάλμα Μοντέλου	30.9%
LS μηδενικού μοντέλου	0.61
LS CaFe	0.72
Ποσοστιαία Μεταβολή LS	18%
Πιστότητα LS	28%
K μηδενικού μοντέλου	0.74
K CaFe	0.82
Ποσοστιαία Μεταβολή K	11%
Πιστότητα K	31%

Πίνακας 7.4: Οι τιμές των δεικτών αριθμητικής προσαρμογής για την εκτίμηση της πραγματικής αστικής κάλυψης για το έτος 2000 με βάση την αστική κάλυψη για το έτος 1988



Γράφημα 7.6: Η μεταβολή του δείκτη Kappa (αριστερά), του K-Histogram (κέντρο) και του K-Location (δεξιά) ως προς τα επαναληπτικά βήματα του μηχανισμού προσομοίωσης για την περίοδο 1988-2000



Χάρτης 7.13: Η αστική κάλυψη για το 1988 (άνω αριστερά) και το 2000 (άνω δεξιά) και η εκτίμηση του μοντέλου για την αστική κάλυψη για το έτος 2000 με βάση την αστική κάλυψη για το έτος 1988 (κάτω)

7.4 Αποτίμηση του Μοντέλου

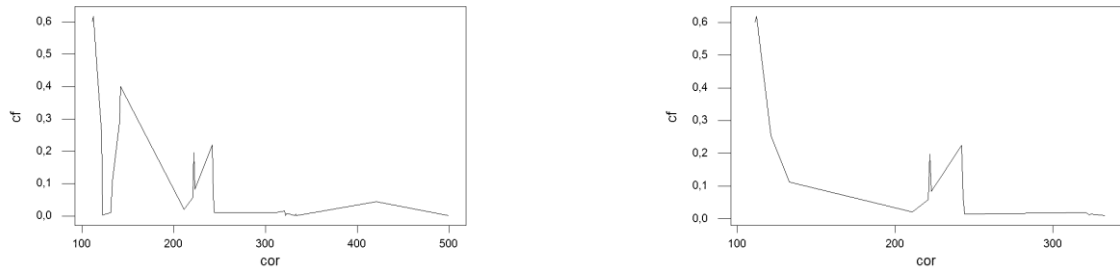
Το CaFe βαθμονομήθηκε με δεδομένα από την περίοδο 1988-2000 και εφαρμόστηκε δοκιμαστικά με την ίδια διαμόρφωση – δηλαδή χωρίς βαθμονόμηση εκ νέου – με δεδομένα για το 2000 προκειμένου να εκτιμήσει *ex-post* την αστική κάλυψη του 2007 και με σκοπό να αποτιμηθεί η ικανότητά του να προσομοιώνει ρεαλιστικά την ΑσΕ. Οι δυο αυτές περιόδους διαφέρουν σημαντικά ως προς την διάρκεια, εν τούτοις εμφανίζουν το ίδιο ποσοστό αστικής επέκτασης. Ειδικότερα, η αστική κάλυψη αυξήθηκε κατά 66% τόσο την περίοδο 1988-2000 όσο και την περίοδο 2000-2007. Επιπλέον, μεταξύ 2000 και 2007 η αστική επέκταση που έλαβε χώρα στην περιοχή μελέτης παρουσιάζει αρκετά πιο ανομοιογενή χωρικά πρότυπα ανάπτυξης ενώ παρατηρούνται και σημαντικά μεγαλύτερες μεταβολές στο οδικό δίκτυο το οποίο παίζει καθοριστικό ρόλο στην διαμόρφωση της αστικής επέκτασης.

7.4.1 Υπολογισμός Καταλληλότητας

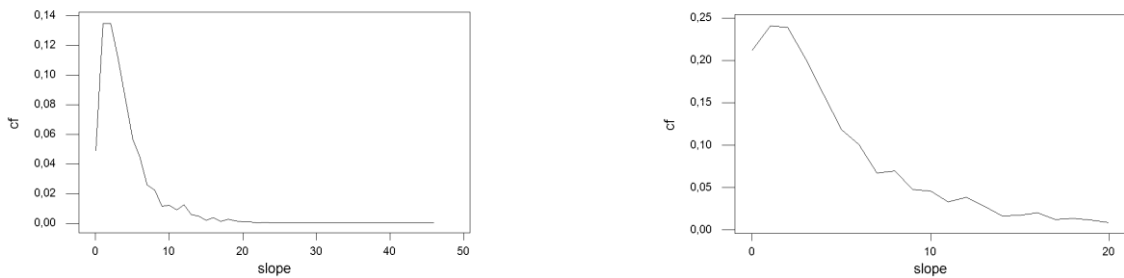
Προκειμένου να υπολογισθεί η καταλληλότητα για το έτος 2000 επαναλήφθηκε η ίδια διαδικασία. Σε αυτή την περίπτωση, ορισμένες χρήσεις γης που εξαιρέθηκαν στην προηγούμενη εφαρμογή από την διαδικασία της ΑσΕ, περιλήφθησαν στις δυναμικές περιοχές αν και με μικρή καταλληλότητα. Αυτές οι χρήσεις γης είναι τα δάση και ημι-φυσικές περιοχές, η μη αρδύσιμη-αρόσιμη γη και οι γεωργό-δασικές περιοχές, δηλαδή η κατηγορία Corine 3 και οι υποκατηγορίες 2.1.1 και 2.4.4 αντίστοιχα.

Επιπλέον, στην εφαρμογή για την περίοδο 2000-2007 χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα για την Αττική Οδό και το Αττικό Μετρό παρά το γεγονός δεν είχαν παραδοθεί στο κοινό κατά το έτος 2000. Ο σχεδιασμός τους ωστόσο, είχε αρχίσει και δημοσιοποιηθεί αρκετά νωρίτερα από το 2000 ενώ τα έργα δόθηκαν στο κοινό σύντομα μετά το 2000. Για αυτόν τον λόγο και υπό την θεώρηση ότι η ‘αγορά’ μπορεί να αντιδράσει προκαταβολικά των ερεθισμάτων για τα οποία κατέχει γνώση, τα δεδομένα αυτά λαμβάνονται υπόψη για τον υπολογισμό της καταλληλότητας για το έτος 2000.

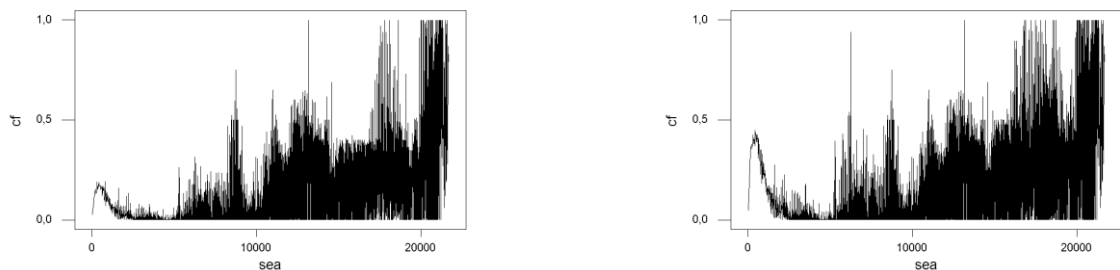
Από τα γραφήματα συχνότητας εμφάνισης (γράφημα 7.7-7.13) που αναφέρονται στις δυναμικές περιοχές, εξάγονται οι συναρτήσεις συμμετοχής καταλληλότητας για κάθε μεταβλητή εισόδου. Ειδικότερα, ο πίνακας 7.5 δείχνει τις ΠΒ για κάθε μονοσύνολο των χρήσεων γης ενώ οι συναρτήσεις συμμετοχής που υπολογίστηκαν για τις συνεχείς μεταβλητές και οι αντίστοιχες ΠΒ δίδονται στον πίνακα 7.6. Με αυτόν τον τρόπο διαμορφώνεται ένας και μόνο κανόνας που καθορίζει την καταλληλότητα προς αστικοποίηση για κάθε μεταβλητή (χάρτης 7.14, 7.15 & 7.16) ως αποτέλεσμα του σταδίου της συνεπαγωγής του συστήματος. Ακολούθως, υπολογίζεται η συνολική καταλληλότητα προς αστικοποίηση της περιοχής (χάρτης 7.17) η οποία είναι σημαντικά γνησίως μεγαλύτερη από την καταλληλότητα για το 1988 σε κάθε κυψέλη της περιοχής.



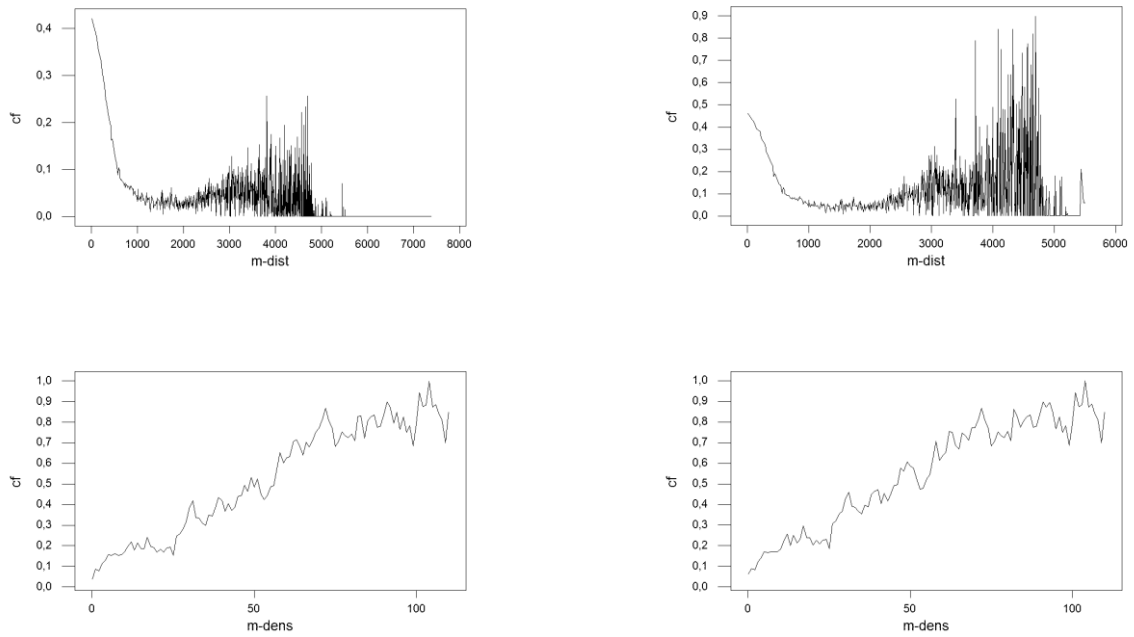
Γράφημα 7.7: Η συχνότητα εμφάνισης Αστικής Κάλυψης ανά κατηγορία Corine για το σύνολο της περιοχής (αριστερά) και τις δυναμικές περιοχές (δεξιά) για το 2000



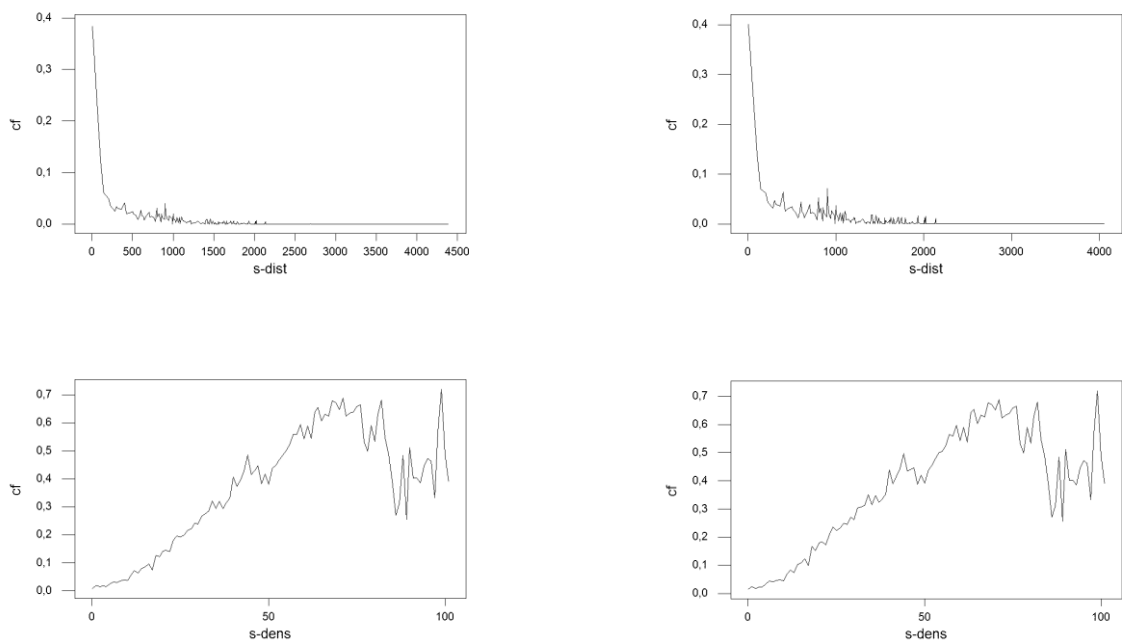
Γράφημα 7.8: Η συχνότητα εμφάνισης Αστικής Κάλυψης ανά κλίσεις επιφανείας για το σύνολο της περιοχής (αριστερά) και τις δυναμικές περιοχές (δεξιά) για το 2000



Γράφημα 7.9: Η συχνότητα εμφάνισης Αστικής Κάλυψης ανά απόσταση από την ακτογραμμή για το σύνολο της περιοχής (αριστερά) και τις δυναμικές περιοχές (δεξιά) για το 2000



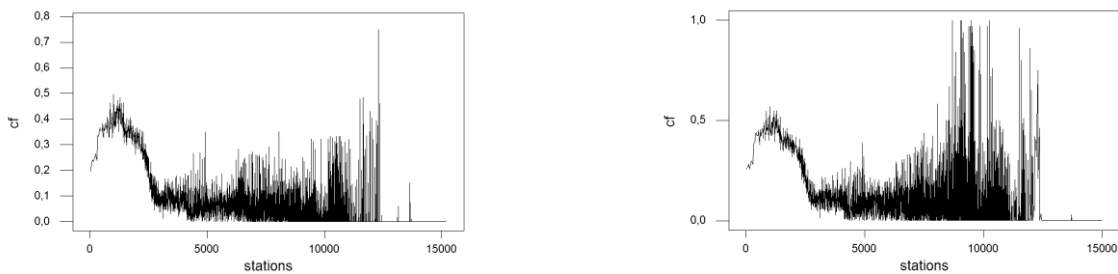
Γράφημα 7.10: Η συχνότητα εμφάνισης Αστικής Κάλυψης ανά απόσταση (άνω) και πυκνότητα (κάτω) για το πρωτεύον οδικό δίκτυο για το σύνολο της περιοχής (αριστερά) και τις δυναμικές περιοχές (δεξιά) για το 2000



Γράφημα 7.11: Η συχνότητα εμφάνισης Αστικής Κάλυψης ανά απόσταση (άνω) και ανά πυκνότητα (κάτω) για το δευτερεύον οδικό δίκτυο για το σύνολο της περιοχής (αριστερά) και τις δυναμικές περιοχές (δεξιά) για το 2000



Γράφημα 7.12: Η συχνότητα εμφάνισης Αστικής Κάλυψης ανά απόσταση από ανισόπεδους κόμβους για το σύνολο της περιοχής (αριστερά) και τις δυναμικές περιοχές (δεξιά) για το 2000



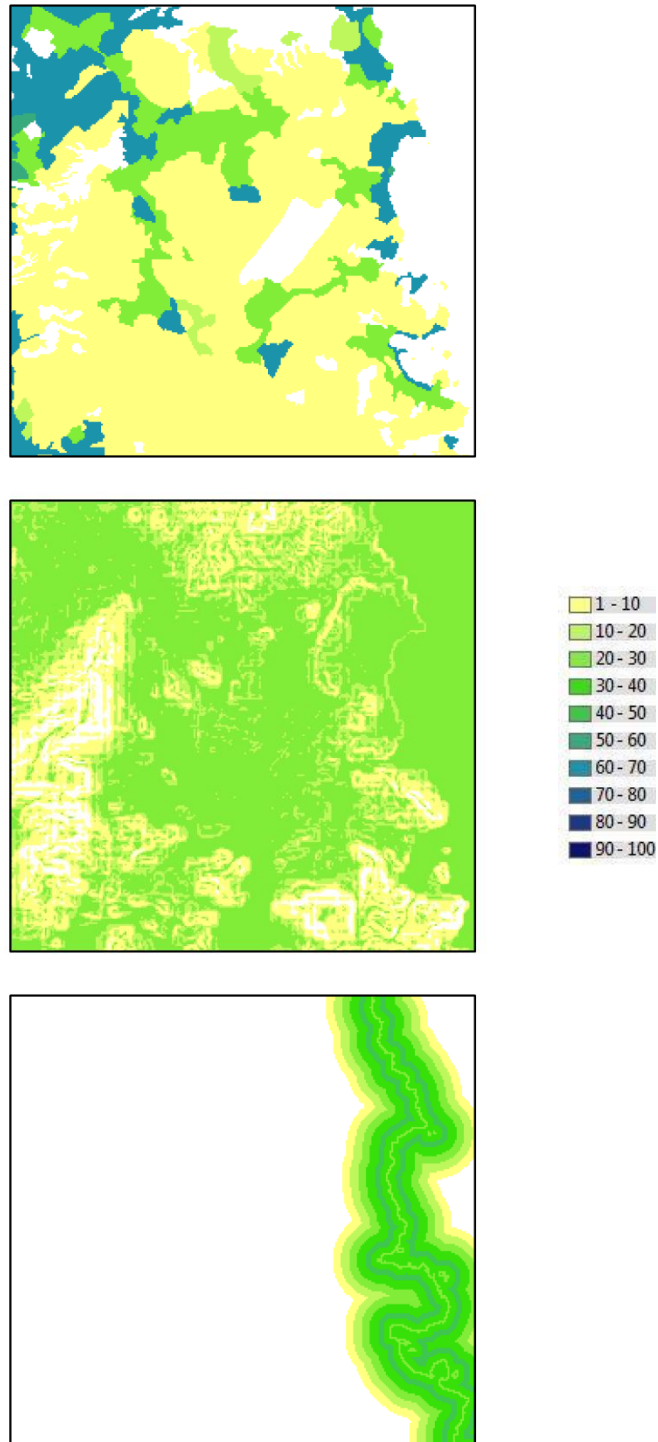
Γράφημα 7.13: Η συχνότητα εμφάνισης Αστικής Κάλυψης ανά απόσταση από σταθμούς Μετρό για το σύνολο της περιοχής (αριστερά) και τις δυναμικές περιοχές (δεξιά) για το 2000

ΠΒ%	111	112	121	133	211	221	222	223	242	243	244	321	323	324	333
2000	60	62	25	11	2	6	20	9	22	6	1	2	1	1	1

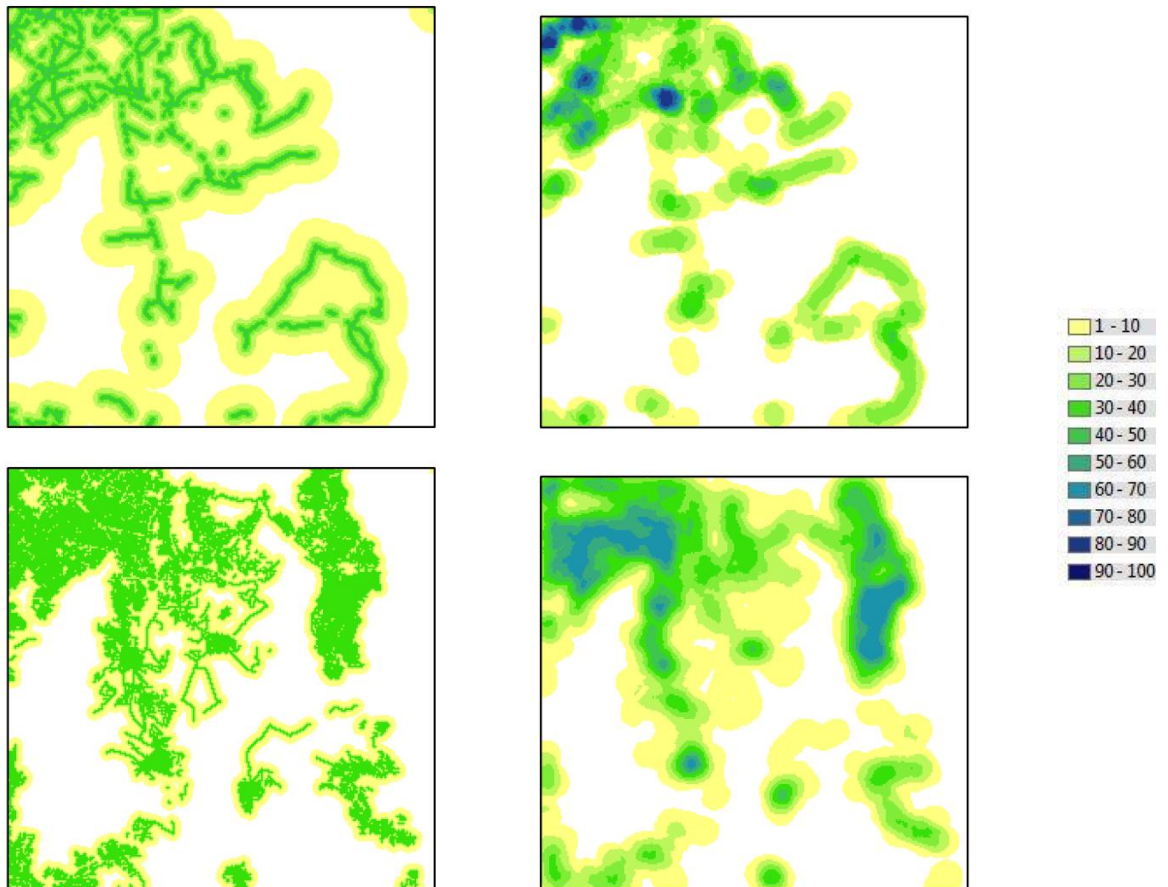
Πίνακας 7.5: Η καταλληλότητα προς αστικοποίηση για κάθε μονοσύνολο των χρήσεων γης βάση Corine για το 2000

Μεταβλητή	Συνάρτηση Συμμετοχής Καταλληλότητας 2000	ΠΒ
Κλίσεις Επιφανείας	$\mu(\chi) = \begin{cases} 1 & \text{αν } \chi \in [0,2] \\ (11-\chi)/9 & \text{αν } \chi \in (2,8) \\ (21-\chi)/39 & \text{αν } \chi \in [8,21] \end{cases} \quad (7.7)$	0,25
Απόσταση από Ακτογραμμή	$\mu(\chi) = \begin{cases} (\chi+1750)/1250 & \text{αν } \chi \in [0,500] \\ [(2500-\chi)/2000] & \text{αν } \chi \in (500,2500) \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (7.8)$	0,45
Απόσταση από Σταθμούς	$\mu(\chi) = \begin{cases} [(\chi+500)/1500]^{0.5} & \text{αν } \chi \in [0,1000] \\ (2500-\chi)/1500 & \text{αν } \chi \in (1000,2500) \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (7.9)$	0,58
Απόσταση από Κόμβους	$\mu(\chi) = \begin{cases} 1 & \text{αν } \chi \in [0,500] \\ [(2500-\chi)/2000]^{0.66} & \text{αν } \chi \in (500,2500) \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (7.10)$	0,30
Απόσταση από Πρωτεύον Οδικό Δίκτυο	$\mu(\chi) = \begin{cases} \exp(-\chi/360) & \text{αν } \chi \in [0,3000] \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (7.11)$	0,45
Πυκνότητα Πρωτεύοντος Οδικού Δικτύου	$\mu(\chi) = \begin{cases} \chi/100 & \text{αν } \chi \leq \alpha \\ 1 & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (7.12)$	0,9
Απόσταση από Δευτερεύον Οδικό Δίκτυο	$\mu(\chi) = \begin{cases} \exp(-\chi/100) & \text{αν } \chi \in [0,2000] \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (7.13)$	0,4
Πυκνότητα Δευτερεύοντος Οδικού Δικτύου	$\mu(\chi) = \begin{cases} \chi/80 & \text{αν } \chi \leq \alpha \\ 1 & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (7.14)$	0,7

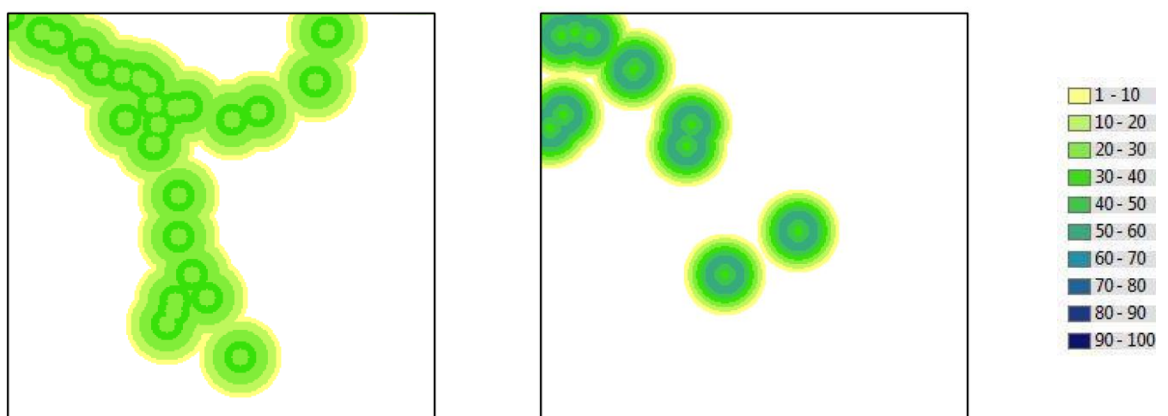
Πίνακας 7.6: Οι συναρτήσεις καταλληλότητας των μεταβλητών εισόδου και οι τιμές των αντίστοιχων Παραμέτρων Βεβαιότητας για το 2000



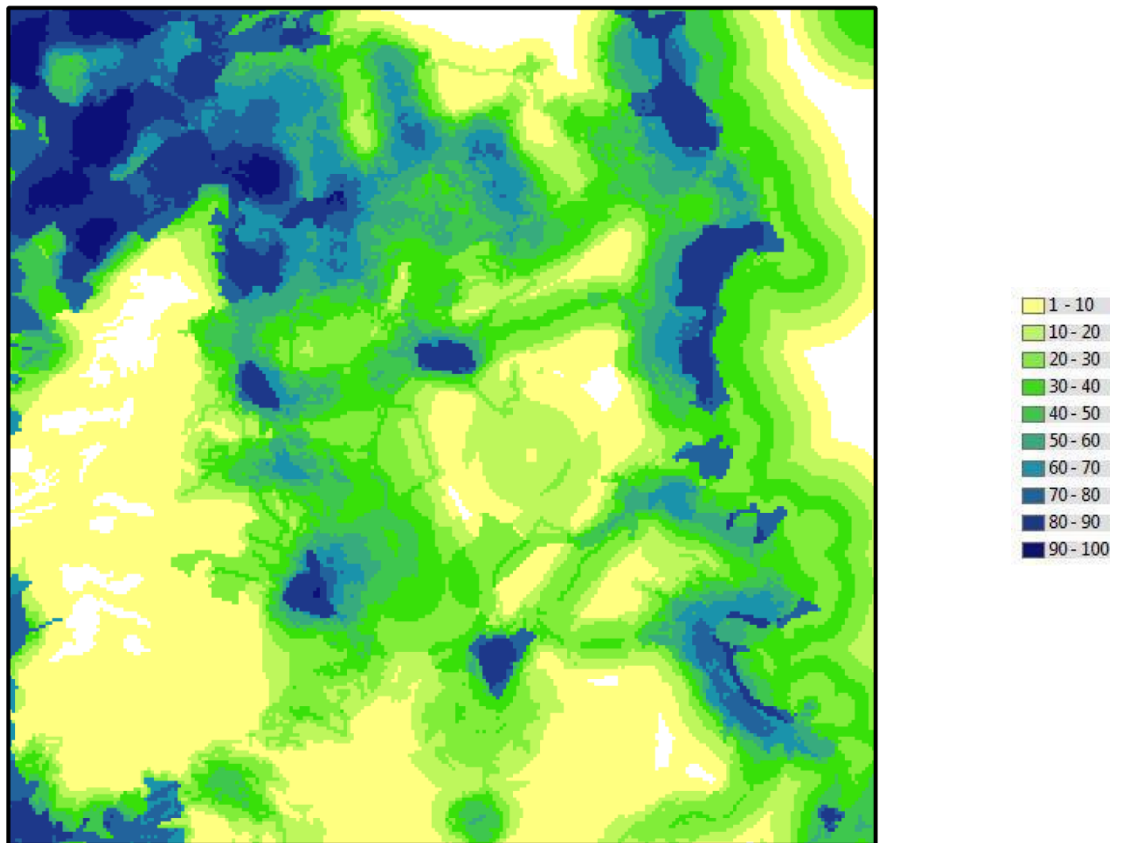
Χάρτης 7.14: Καταλληλότητα βάση χρήσεων γης (άνω), κλίσεων επιφανείας (κέντρο) και απόστασης από την ακτογραμμή (κάτω) για το 2000



Χάρτης 7.15: Καταλληλότητα βάση απόστασης (αριστερά) και πυκνότητας (δεξιά) για το πρωτεύον (άνω) και το δευτερεύον (κάτω) οδικό δίκτυο για το 2000



Χάρτης 7.16: Καταλληλότητα βάση απόστασης από ανισόπεδους κόμβους (αριστερά) και σταθμούς του Μετρό (δεξιά) για το 2000



Χάρτης 7.17: Συγκεντρωτική καταλληλότητα προς αστικοποίηση για το 2000

7.4.2 Αποτελέσματα του Μοντέλου

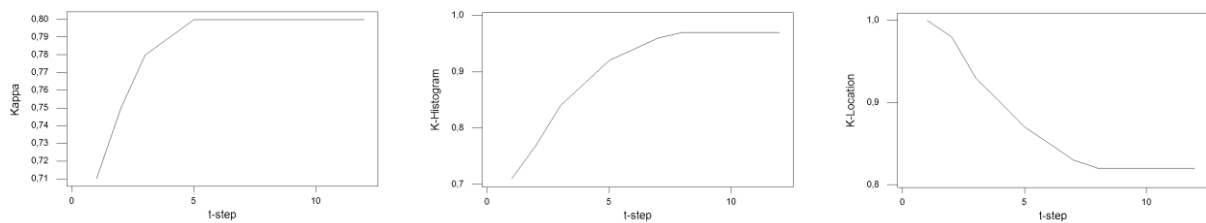
Εφαρμόζοντας το CaFe όπως διαμορφώθηκε με την βαθμονόμηση στην περίοδο 1988-2000 προκειμένου να προσομοιώσει την περίοδο 2000-2007, το μοντέλο εφαρμόζεται για να χωροθετήσει το ίδιο ποσοστό επί της αρχικής κάλυψης – το οποίο όμως αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη απόλυτη μεταβολή – σε μια μικρότερης διάρκειας περίοδο. Ανεξαρτήτως διάρκειας ωστόσο, είναι αδύνατο δυο διαδοχικές περιόδους να είναι πανομοιότυπες και ως προς την ποσοστιαία αλλά και την απόλυτη ανάπτυξη μαζί. Για αυτόν τον λόγο θεωρούμε τις περιόδους 1988-2000 και 2000-2007 συγκρίσιμες ως προς την αστική ανάπτυξη στα πλαίσια της εφαρμογής του μοντέλου, κρατώντας ωστόσο υπόψη τις ποιοτικές διαφοροποιήσεις μεταξύ τους.

Υπό την παραπάνω θεώρηση, το μοντέλο αποδίδει εξίσου ικανοποιητικά για την περίοδο 2000-2007 (πίνακας 7.7). Αναλυτικότερα το μέσο σφάλμα αστικής κάλυψης υπολογίζεται στο 5,4% ενώ οι δείκτες Lee-Sallee και Kappa λαμβάνουν τις τιμές 0.72 και 0.80 αντίστοιχα (όταν για την περίοδο βαθμονόμησης οι τιμές ήταν 3.1%, 0.72 και 0.82 αντίστοιχα). Αντίστοιχες με την περίοδο 1988-2000 είναι και οι τιμές των νέων δεικτών προσαρμογής, οι οποίοι υποδεικνύουν ότι το μοντέλο είναι σε θέση να αποτυπώσει με ακρίβεια το 65% της πραγματικής αστικής επέκτασης. Ποσοστό το οποίο είναι απολύτως αποδεκτό δεδομένης της πολυπλοκότητας αλλά και της εγγενούς ετερογένειας και στοχαστικότητας που χαρακτηρίζουν το φαινόμενο της αστικής επέκτασης.

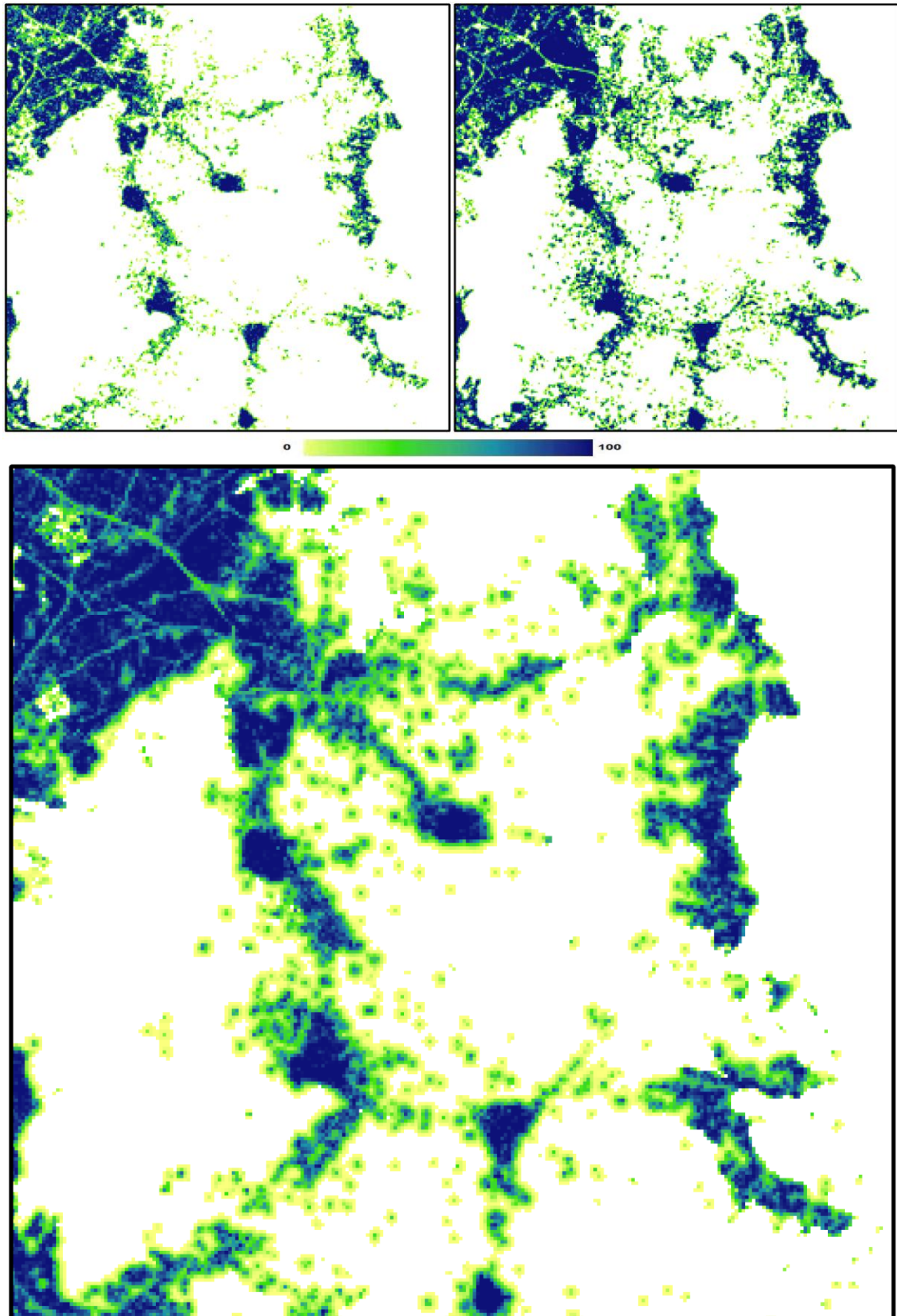
Μια ακόμη ομοιότητα μεταξύ της συμπεριφοράς του μοντέλου για την περίοδο 1988-2000 και την περίοδο 2000-2007 εντοπίζεται στην εξέλιξη των τιμών των δεικτών K, K-Histogram και K-Location ως προς τα επαναληπτικά βήματα του μηχανισμού προσομοίωσης (γράφημα 7.14). Ενώ ο δείκτης K λαμβάνει την μέγιστη τιμή στο πέμπτο βήμα των KA και την διατηρεί μέχρι τον τερματισμό της προσομοίωσης, οι K-Histogram και K-Location εξακολουθούν να μεταβάλλονται και στα επόμενα βήματα. Ειδικότερα, K-Histogram αυξάνει ενώ ο K-Location φθίνει. Αυτό υποδηλώνει ότι από το πέμπτο βήμα και μετά το μοντέλο χωροθετεί τις νέες αστικές κυψέλες στην περιοχή με μεγαλύτερη συχνότητα εσφαλμένα παρά σωστά αλλά παράλληλα προσεγγίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια την ένταση της αστικής κάλυψης στις κυψέλες που έχουν ήδη χαρακτηριστεί αστικές.

Δείκτης	2000-2007
Απόλυτη Μεταβολή ΑσΕ	5.000
Ποσοστιαία Μεταβολή ΑσΕ	66%
Απόλυτο σφάλμα	1724
Σφάλμα Χάρτη	5.4%
Σφάλμα Μοντέλου	34.4%
LS μηδενικού μοντέλου	0.60
LS CaFe	0.72
Ποσοστιαία Μεταβολή LS	20%
Πιστότητα LS	30%
K μηδενικού μοντέλου	0.71
K CaFe	0.80
Ποσοστιαία Μεταβολή K	13%
Πιστότητα K	31%

Πίνακας 7.7: Οι τιμές των δεικτών αριθμητικής προσαρμογής για την εκτίμηση της πραγματικής αστικής κάλυψης για το έτος 2007 με βάση την αστική κάλυψη για το έτος 2000



Γράφημα 7.14: Η μεταβολή του δείκτη Kappa (αριστερά), του K-Histogram (κέντρο) και του K-Location (δεξιά) ως προς τα επαναληπτικά βήματα του μηχανισμού προσομοίωσης για την περίοδο 2000-2007



Χάρτης 7.18: Η αστική κάλυψη για το 2000 (άνω αριστερά) και το 2007 (άνω δεξιά) και η εκτίμηση του μοντέλου για την αστική κάλυψη για το έτος 2007 με βάση την αστική κάλυψη για το έτος 2000 (κάτω)

7.5 Αναπροσαρμογή του Μοντέλου

Το CaFe δομήθηκε και βαθμονομήθηκε με δεδομένα για την περίοδο 1988-2000 και εφαρμόστηκε με την ίδια διαμόρφωση για την περίοδο 2000-2007 επιτυγχάνοντας ικανοποιητική αριθμητική ακρίβεια και στις δυο περιόδους. Αυτό υποδεικνύει ότι το μοντέλο μπορεί να βαθμονομηθεί σε μια περίοδο A και να χρησιμοποιηθεί για την ρεαλιστική προσομοίωση της ΑσΕ στην συγκεκριμένη περιοχή μελέτης σε μια διαδοχική περίοδο B υπό την προϋπόθεση ότι η ποιοτική μεταβολή των χωρικών προτύπων της ΑσΕ μεταξύ των περιόδων A και B μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

Η προϋπόθεση αυτή δεν είναι ούτε επαρκής ούτε πλήρης όσον αφορά την συμπεριφορά του μοντέλου κατά την περίοδο B. Αντίθετα, η μη κάλυψη της δε συνεπάγεται ότι το μοντέλο δε θα εκτιμήσει με ακρίβεια της ΑσΕ για την περίοδο B. Στην πράξη, αποτελεί απλά μια ένδειξη ότι το μοντέλο θα συμπεριφερθεί με παρόμοιο τρόπο για την περίοδο B όπως και για την περίοδο A. Σύμφωνα με τα παραπάνω, προκειμένου να το μοντέλο να εκτιμήσει όσο το δυνατόν καλύτερα την ΑσΕ για μια μελλοντική περίοδο ενδείκνυται πρώτα να αναπροσαρμοσθεί σε μια περίοδο A με την μέγιστη δυνατή διάρκεια.

7.5.1 Υπολογισμός Καταλληλότητας και Βαθμονόμηση του Μοντέλου

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, η μέγιστη περίοδος είναι η 1988-2007. Ως εκ τούτου χρειάζεται:

- να υπολογισθεί η καταλληλότητα για το 1988 και
- να βαθμονομηθεί εκ νέου ο μηχανισμός προσομοίωσης στο σύνολο της περιόδου.

Όσον αφορά το πρώτο, η καταλληλότητα για το 1988 έχει ήδη υπολογισθεί στα πλαίσια της ανάπτυξης του μοντέλου για την περίοδο 1988-2000 (ενότητα 6.3.1) και κατά συνέπεια δεν απαιτείται να υπολογισθεί εκ νέου. Όσον αφορά το δεύτερο, η εμπειρική βαθμονόμηση του μηχανισμού προσομοίωσης για το διάστημα 1988-2007 επέστρεψε τις ίδιες τιμές των λειτουργικών παραμέτρων με την βαθμονόμηση για το διάστημα 1988-2000. Παρά το γεγονός ότι αυτό είναι σε κάποιο βαθμό λογικό και αναμενόμενο, ενδέχεται μια αυτοματοποιημένη διαδικασία βαθμονόμησης να επέστρεφε διαφορετικές τιμές.

7.5.2 Αποτελέσματα του Μοντέλου

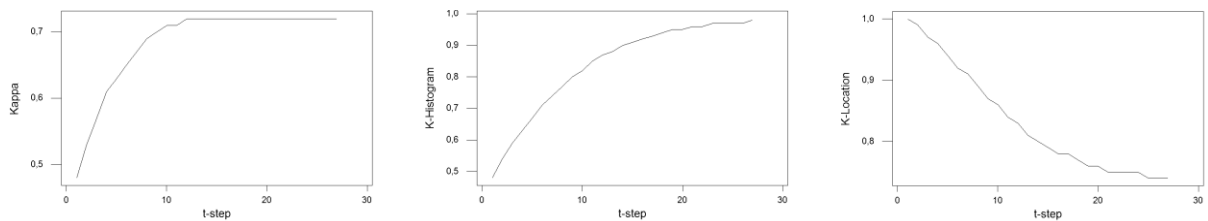
Εφαρμόζοντας το CaFe για την περίοδο 1988-2007, το μοντέλο καλείται να χωροθετήσει 8.000 αστικές κυψέλες ή 80.000 στρέμματα νέας αστικής κάλυψης όταν η αρχική αστική κάλυψη είναι 40.000 στρέμματα. Αυτό αντιστοιχεί σε ένα ποσοστό αύξησης επί της αρχικής κάλυψης 200% το οποίο χωροθετείται με ικανοποιητική αριθμητική ακρίβεια από το μοντέλο (πίνακας 7.8, γράφημα

7.15). Αναλυτικότερα το μέσο σφάλμα αστικής κάλυψης υπολογίζεται στο 8,5% ενώ οι δείκτες Lee-Sallee και Kappa λαμβάνουν τις τιμές 0.63 και 0.72 αντίστοιχα (όταν για την περίοδο 1988-2000 οι αντίστοιχες τιμές ήταν 3.1%, 0.72 και 0.82). Αυτό σημαίνει ότι τα αποτελέσματα του μοντέλου (χάρτης 7.19) δεν είναι τόσο κοντά στην πραγματικότητα όσο για την περίοδο 1988-2000 κάτι αναμενόμενο δεδομένου ότι την περίοδο 1988-2007 παρατηρείται τριπλάσια ποσοστιαία μεταβολή της ΑσΕ.

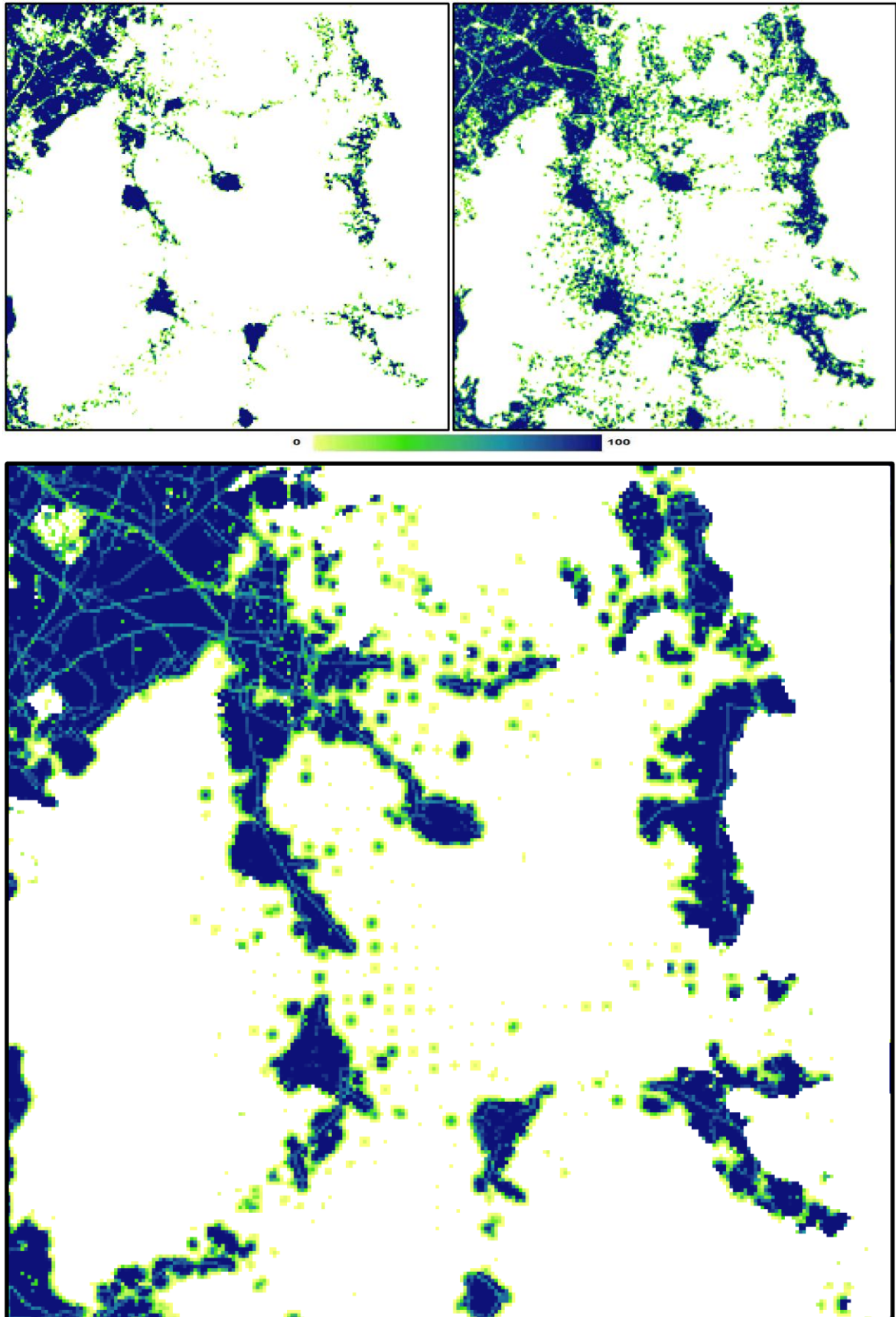
Επιπλέον, το σφάλμα μοντέλου κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα με την εφαρμογή του μοντέλου τόσο στην περίοδο 1988-2000 όσο και στην περίοδο 2000-2007, γεγονός που υποδεικνύει ότι το μοντέλο είναι σε θέση να αποτυπώσει με ακρίβεια το 65% της πραγματικής αστικής επέκτασης. Κάτι που ενισχύει τις θετικές εντυπώσεις όσον αφορά την συμπεριφορά του CaFe, είναι οι τιμές της πιστότητας των δεικτών LS και K που εμφανίζονται σημαντικά αυξημένες σε σχέση με τις προηγούμενες εφαρμογές. Αυτό υποδεικνύει ότι το CaFe επιτυγχάνει πάνω από το 55% της μέγιστης δυνατής ακρίβειας ενός μοντέλου που εφαρμόζεται για την συγκεκριμένη περιοχή και περίοδο (Πιστότητα LS και K).

Δείκτης	1988-2007
Απόλυτη Μεταβολή ΑσΕ	8.000
Ποσοστιαία Μεταβολή ΑσΕ	200%
Απόλυτο σφάλμα	2733
Σφάλμα Χάρτη	8.5%
Σφάλμα Μοντέλου	34.1%
LS μηδενικού μοντέλου	0.36
LS CaFe	0.63
Ποσοστιαία Μεταβολή LS	62%
Πιστότητα LS	57%
K μηδενικού μοντέλου	0.48
K CaFe	0.72
Ποσοστιαία Μεταβολή K	71%
Πιστότητα K	54%

Πίνακας 7.8: Οι τιμές των δεικτών αριθμητικής προσαρμογής για την εκτίμηση της πραγματικής αστικής κάλυψης για το έτος 2007 με βάση την αστική κάλυψη για το έτος 1988



Γράφημα 7.15: Η μεταβολή του δείκτη Kappa (αριστερά), του K-Histogram (κέντρο) και του K-Location (δεξιά) ως προς τα επαναληπτικά βήματα του μηχανισμού προσομοίωσης για την περίοδο 1988-2007



Χάρτης 7.19: Η αστική κάλυψη για το 2000 (άνω αριστερά) και το 2007 (άνω δεξιά) και η εκτίμηση του μοντέλου για την αστική κάλυψη για το έτος 2007 με βάση την αστική κάλυψη για το έτος 2000 (κάτω)

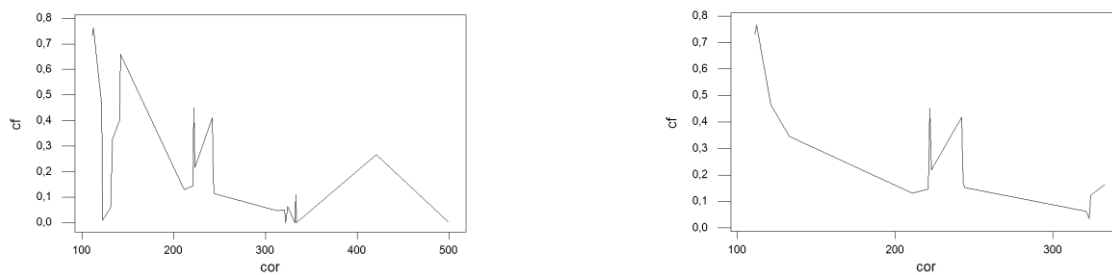
7.6 Προσομοίωση της Μελλοντικής Αστικής Επέκτασης

Με δεδομένα τα χαρακτηριστικά της πρώτης δοκιμαστικής εφαρμογής του CaFe (ανάπτυξη/βαθμονόμηση για την περίοδο 1988-2000 και αξιολόγηση για την περίοδο 2000-2007), μετά την δόμηση του μοντέλου στα δεδομένα για την περίοδο 1988-2007 είναι εφικτό να εκτιμηθούν *ex-ante* εναλλακτικά σενάρια αστικής επέκτασης για το μέλλον. Ειδικότερα, αν τα σενάρια αυτά αφορούν μια περίοδο διάρκειας έως και είκοσι ετών κατά την οποία η ποσοστιαία αύξηση της αστικής κάλυψης δεν υπερβαίνει το 200%, τότε αναμένεται η προσομοίωση της ΑσΕ στα σενάρια αυτά να είναι ρεαλιστική με την προσομοίωση της ΑσΕ για την περίοδο 1988-2007. Η προσομοίωση εναλλακτικών σεναρίων ανάγεται σε δυο στάδια στα οποία χρειάζεται:

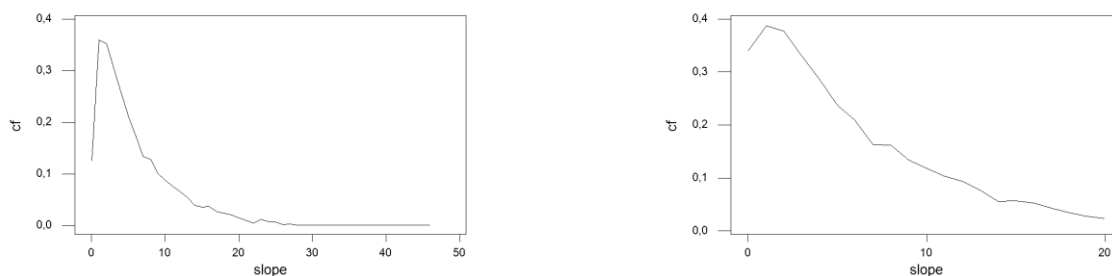
- να υπολογιστεί η καταλληλότητα για το έτος 2007 και
- να εισαχθούν στο μοντέλο οι θεωρήσεις/υποθέσεις που γίνονται στα διαφορετικά εναλλακτικά σενάρια.

7.6.1 Υπολογισμός Καταλληλότητας

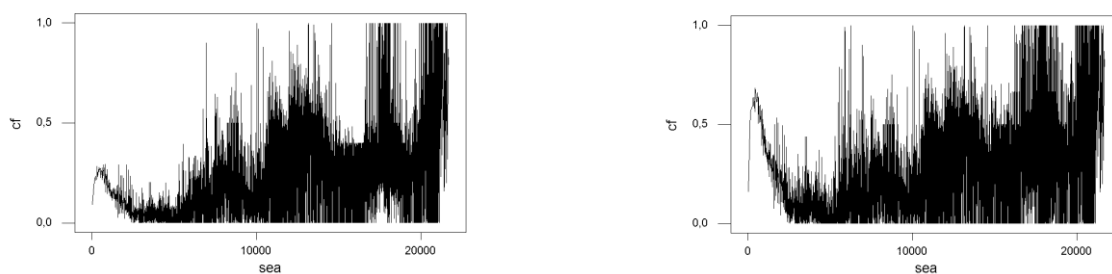
Προκειμένου να υπολογισθεί καταλληλότητα για το έτος 2007, αρχικά ορίστηκαν οι κανόνες εξαίρεσης οι οποίοι ταυτίζονται με τους αντίστοιχους κανόνες εξαίρεσης για το 2000. Ακολούθως, εξήχθησαν τα γραφήματα συχνότητας εμφάνισης (γράφημα 7.16-7.22) που αναφέρονται στις δυναμικές περιοχές και εκτιμήθηκαν οι συναρτήσεις συμμετοχής καταλληλότητας για κάθε μεταβλητή εισόδου. Ειδικότερα, ο πίνακας 7.9 δείχνει τις ΠΒ για κάθε μονοσύνολο των χρήσεων γης ενώ οι συναρτήσεις συμμετοχής που υπολογίστηκαν για τις συνεχείς μεταβλητές και οι αντίστοιχες ΠΒ δίδονται στον πίνακα 7.10. Με αυτόν τον τρόπο διαμορφώνεται ένας και μόνο κανόνας που καθορίζει την καταλληλότητα προς αστικοποίηση για κάθε μεταβλητή (χάρτης 7.20, 7.21 & 7.22) ως αποτέλεσμα του σταδίου της συνεπαγωγής του συστήματος. Τέλος, υπολογίζεται η συνολική καταλληλότητα προς αστικοποίηση της περιοχής (χάρτης 7.23) η οποία αναμενόμενα είναι σημαντικά και γνησίως μεγαλύτερη τόσο σε σχέση με την καταλληλότητα του 1988 όσο και με την καταλληλότητα του 2000.



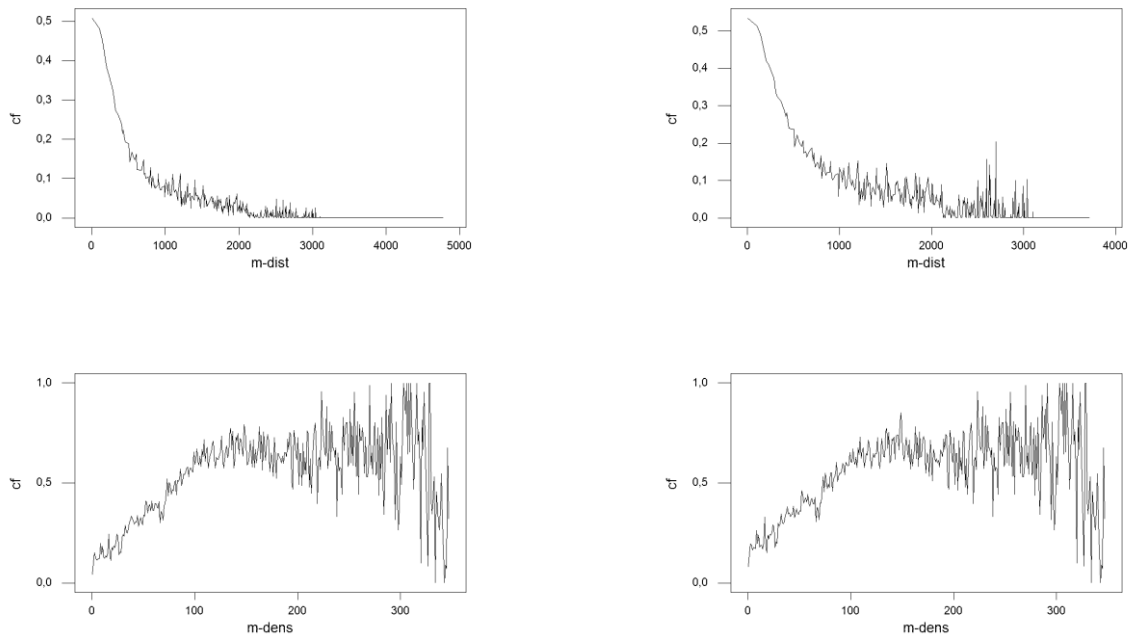
Γράφημα 7.16: Η συχνότητα εμφάνισης Αστικής Κάλυψης ανά κατηγορία Corine για το σύνολο της περιοχής (αριστερά) και τις δυναμικές περιοχές (δεξιά) για το 2007



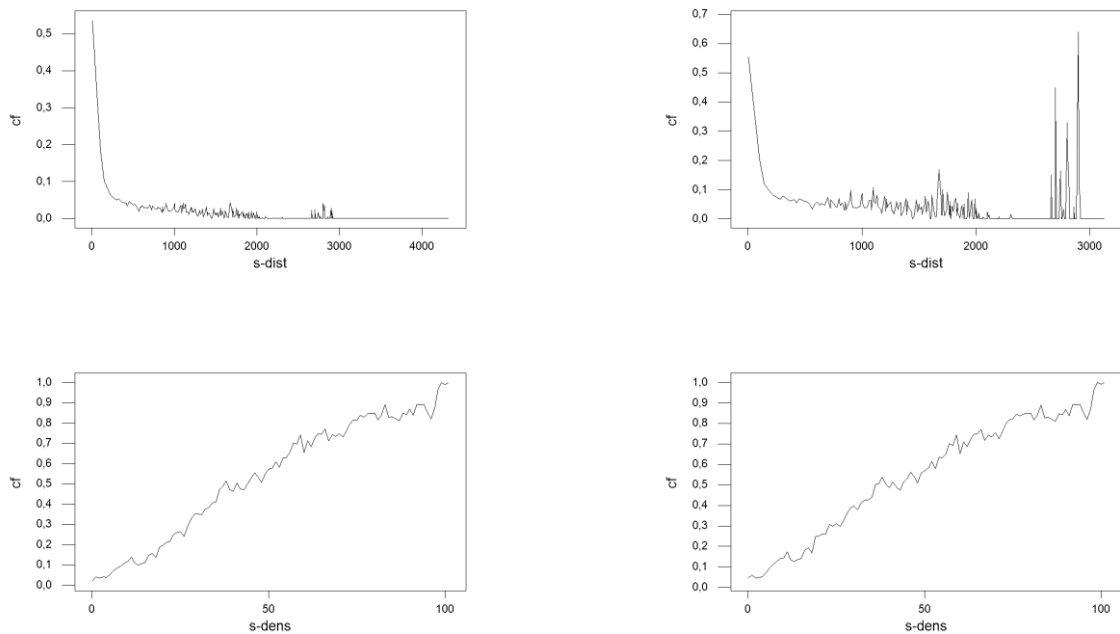
Γράφημα 7.17: Η συχνότητα εμφάνισης Αστικής Κάλυψης ανά κλίσεις επιφανείας για το σύνολο της περιοχής (αριστερά) και τις δυναμικές περιοχές (δεξιά) για το 2007



Γράφημα 7.18: Η συχνότητα εμφάνισης Αστικής Κάλυψης ανά απόσταση από την ακτογραμμή για το σύνολο της περιοχής (αριστερά) και τις δυναμικές περιοχές (δεξιά) για το 2007



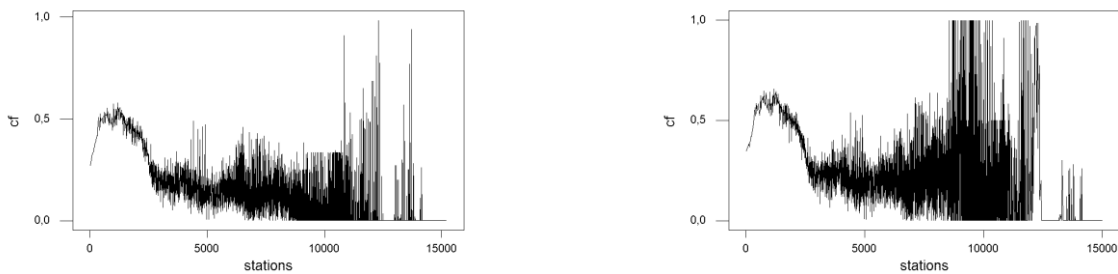
Γράφημα 7.19: Η συχνότητα εμφάνισης Αστικής Κάλυψης ανά απόσταση (άνω) και πυκνότητα (κάτω) για το πρωτεύον οδικό δίκτυο για το σύνολο της περιοχής (αριστερά) και τις δυναμικές περιοχές (δεξιά) για το 2007



Γράφημα 7.20: Η συχνότητα εμφάνισης Αστικής Κάλυψης ανά απόσταση (άνω) και ανά πυκνότητα (κάτω) για το δευτερεύον οδικό δίκτυο για το σύνολο της περιοχής (αριστερά) και τις δυναμικές περιοχές (δεξιά) για το 2007



Γράφημα 7.21: Η συχνότητα εμφάνισης Αστικής Κάλυψης ανά απόσταση από ανισόπεδους κόμβους για το σύνολο της περιοχής (αριστερά) και τις δυναμικές περιοχές (δεξιά) για το 2007



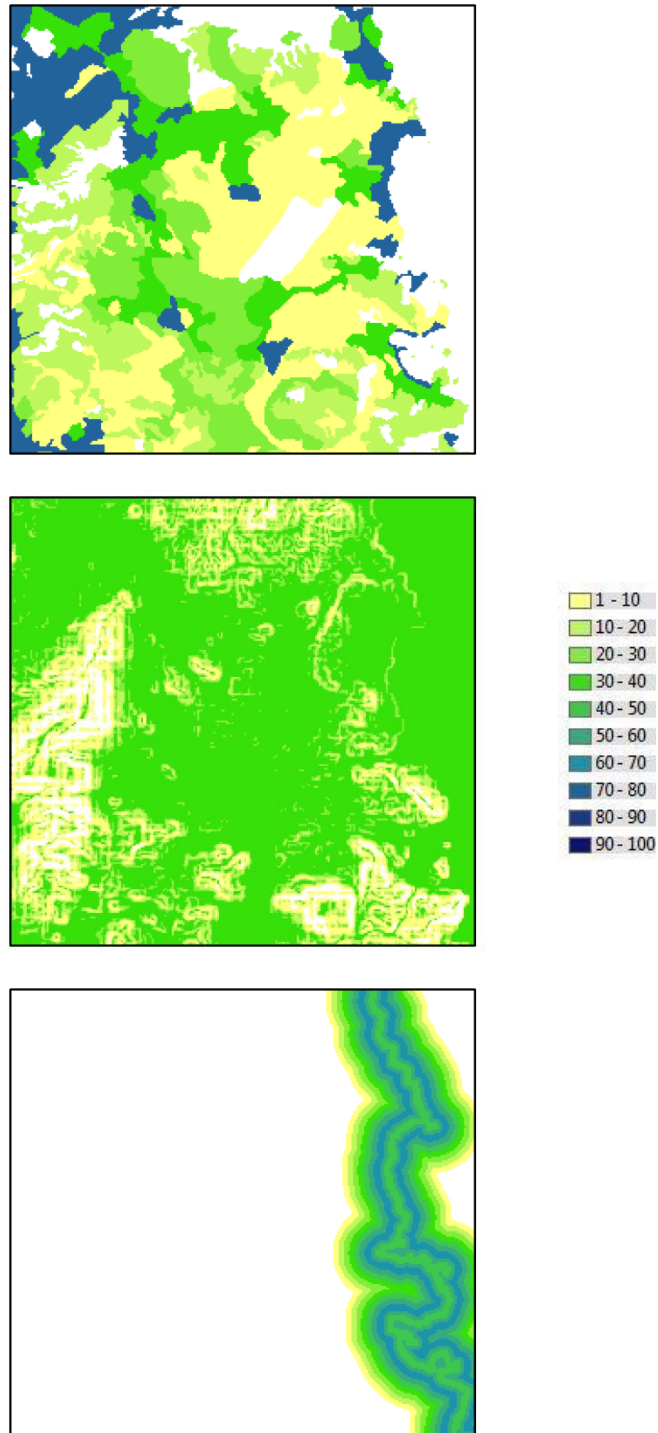
Γράφημα 7.22: Η συχνότητα εμφάνισης Αστικής Κάλυψης ανά απόσταση από σταθμούς Μετρό για το σύνολο της περιοχής (αριστερά) και τις δυναμικές περιοχές (δεξιά) για το 2007

ΠΒ%	111	112	121	133	211	221	222	223	242	243	244	321	323	324	333
2007	73	76	46	35	13	15	45	22	42	17	16	6	4	12	16

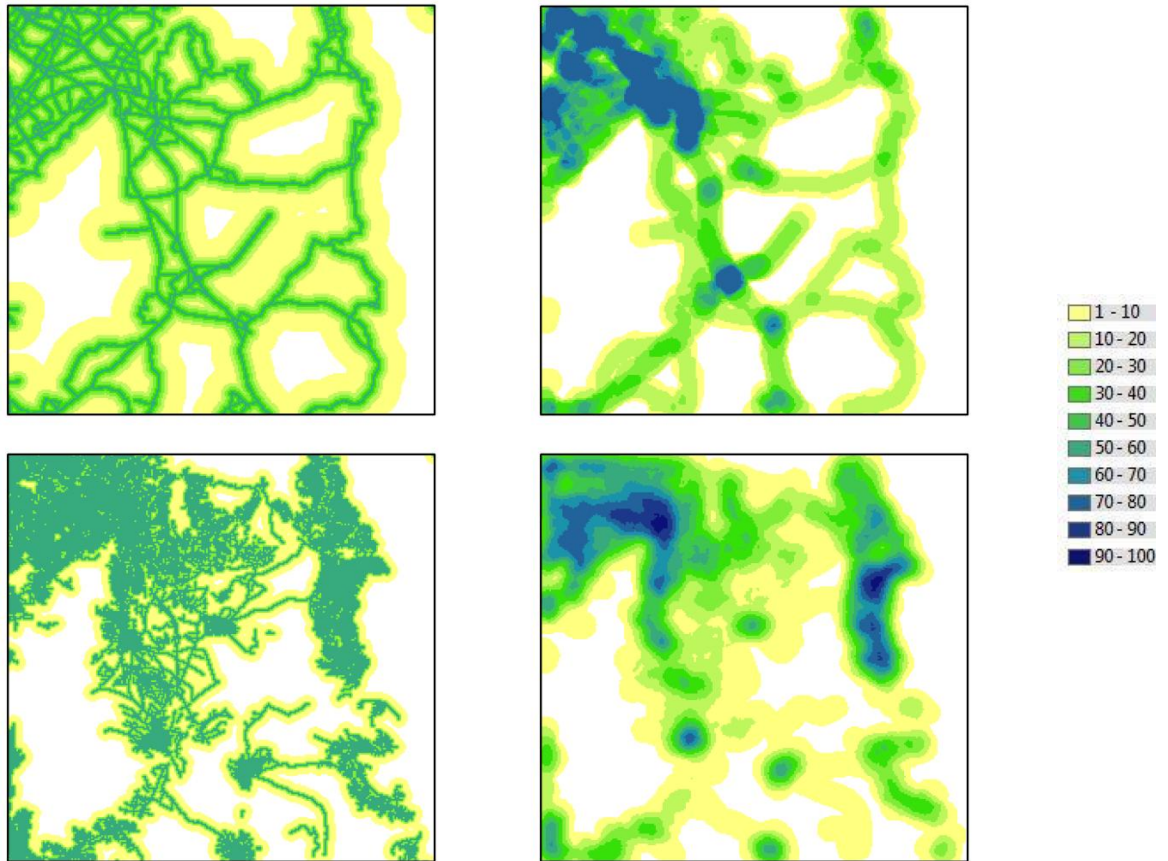
Πίνακας 7.9: Η καταλληλότητα προς αστικοποίηση για κάθε μονοσύνολο των χρήσεων γης βάση Corine για το 2007

Μεταβλητή	Συνάρτηση Συμμετοχής Καταλληλότητας 2007	ΠΒ
Κλίσεις Επιφανείας	$\mu(\chi) = \begin{cases} 1 & \text{αν } \chi \in [0,2] \\ (11-\chi)/9 & \text{αν } \chi \in (2,8) \\ (21-\chi)/39 & \text{αν } \chi \in [8,21] \end{cases} \quad (7.15)$	0,40
Απόσταση από Ακτογραμμή	$\mu(\chi) = \begin{cases} (\chi+1750)/1250 & \text{αν } \chi \in [0,500] \\ [(2500-\chi)/2000] & \text{αν } \chi \in (500,2500) \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (7.16)$	0,68
Απόσταση από Σταθμούς	$\mu(\chi) = \begin{cases} [(\chi+500)/1500]^{0.5} & \text{αν } \chi \in [0,1000] \\ (2500-\chi)/1500 & \text{αν } \chi \in (1000,2500) \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (7.17)$	0,68
Απόσταση από Κόμβους	$\mu(\chi) = \begin{cases} 1 & \text{αν } \chi \in [0,500] \\ [(2500-\chi)/2000]^{0.66} & \text{αν } \chi \in (500,2500) \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (7.18)$	0,54
Απόσταση από Πρωτεύον Οδικό Δίκτυο	$\mu(\chi) = \begin{cases} \exp(-\chi/360) & \text{αν } \chi \in [0,3000] \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (7.19)$	0,53
Πυκνότητα Πρωτεύοντος Οδικού Δικτύου	$\mu(\chi) = \begin{cases} \chi/150 & \text{αν } \chi \leq \alpha \\ 1 & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (7.20)$	0,75
Απόσταση από Δευτερεύον Οδικό Δίκτυο	$\mu(\chi) = \begin{cases} \exp(-\chi/110) & \text{αν } \chi \in [0,2000] \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (7.21)$	0,55
Πυκνότητα Δευτερεύοντος Οδικού Δικτύου	$\mu(\chi) = \begin{cases} \chi/100 & \text{αν } \chi \leq \alpha \\ 1 & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (7.22)$	0,95

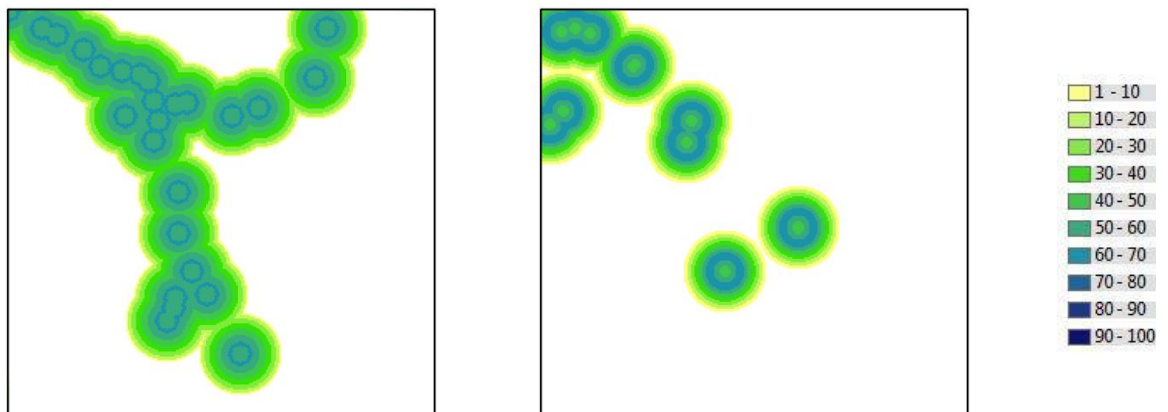
Πίνακας 7.10: Οι συναρτήσεις καταλληλότητας των μεταβλητών εισόδου και οι τιμές των αντίστοιχων Παραμέτρων Βεβαιότητας για το 2007



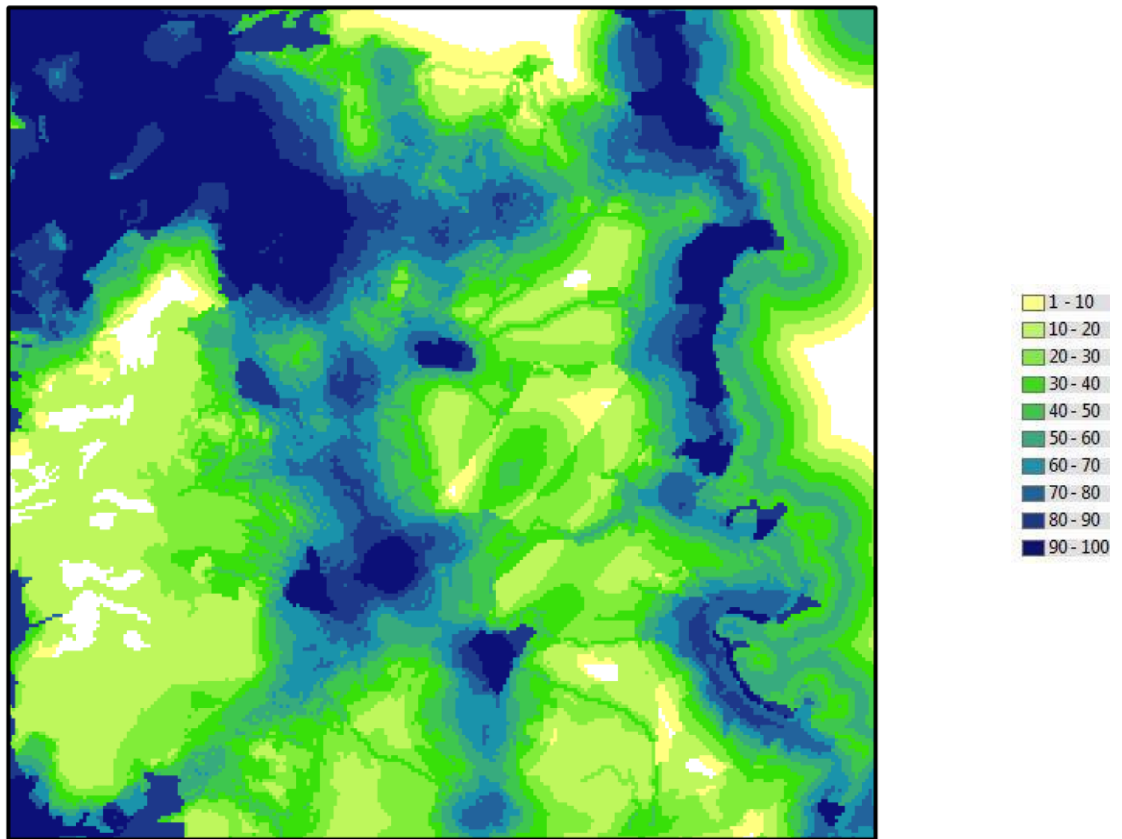
Χάρτης 7.20: Καταλληλότητα βάση χρήσεων γης (άνω), κλίσεων επιφανείας (κέντρο) και απόστασης από την ακτογραμμή (κάτω) για το 2007



Χάρτης 7.21: Καταλληλότητα βάση απόστασης (αριστερά) και πυκνότητας (δεξιά) για το πρωτεύον (άνω) και το δευτερεύον (κάτω) οδικό δίκτυο για το 2007



Χάρτης 7.22: Καταλληλότητα βάση απόστασης από ανισόπεδους κόμβους (αριστερά) και σταθμούς του Μετρό (δεξιά) για το 2007



Χάρτης 7.23: Συγκεντρωτική καταλληλότητα προς αστικοποίηση για το 2007

7.6.2 Εναλλακτικά Σενάρια Ανάπτυξης

Στα προηγούμενα στάδια, το CaFe δομήθηκε και αξιολογήθηκε οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι μοντέλο μπορεί να προσομοιώσει ρεαλιστικά την ΑσΕ και με ικανοποιητική αριθμητική ακρίβεια. Κατόπιν το μοντέλο αναπροσαρμόστηκε στην ευρύτερη περίοδο 1988-2007 με σκοπό να εκτιμήσει την μελλοντική ΑσΕ. Ειδικότερα, το μοντέλο μπορεί να υπολογίσει έναν αριθμό από εναλλακτικά σενάρια ΑσΕ κάνοντας διαφορετικές συνδυαστικές θεωρήσεις και υποθέσεις σχετικά με:

- τον εξωγενή (ως προς το μοντέλο) βαθμό της ΑσΕ
- την εξωγενή παρέμβαση στις αρχικές συνθήκες στην περιοχή μελέτης

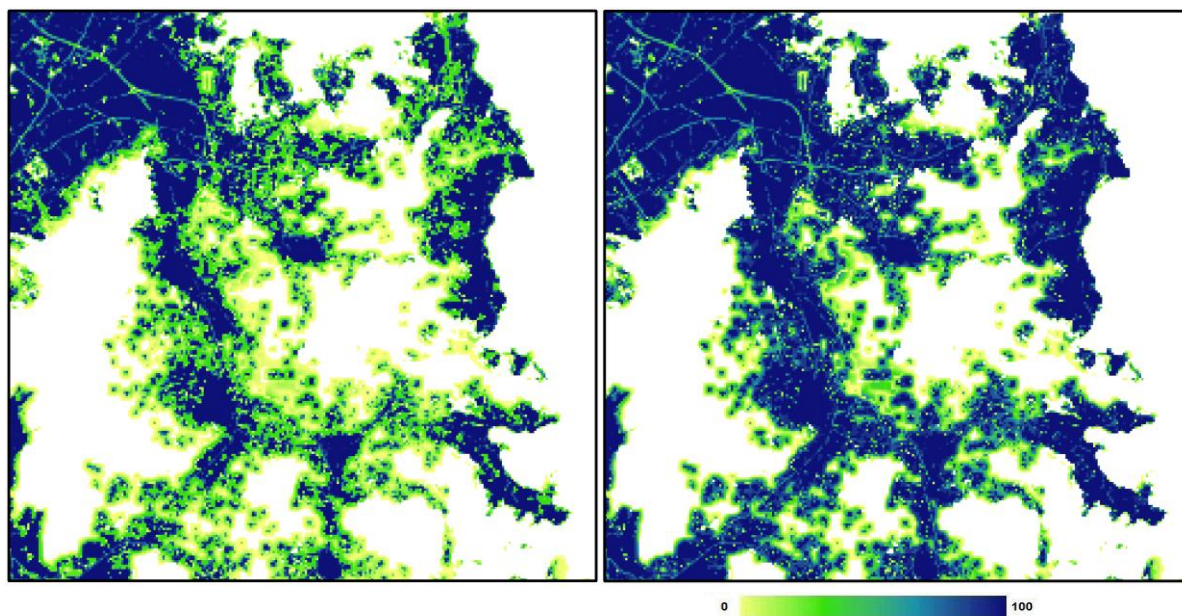
Στην πράξη, αυτό σημαίνει ότι το μοντέλο μπορεί να εκτιμήσει την επίδραση που μπορεί να έχουν στην αστική κάλυψη της περιοχής διαφορετικοί ρυθμοί ανάπτυξης σε συνδυασμό με διαφορετικές παρεμβάσεις στην περιοχή μελέτης. Οι παρεμβάσεις αυτές ωστόσο, είναι απαραίτητο να εκφράζονται με όρους των διαθέσιμων δεδομένων εισόδου και αναλύονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- άμεση επέμβαση στην αστική κάλυψη, δηλαδή ανάπτυξη νέων αστικών περιοχών ή τοπική μετατροπή της χρήσης γης από αστική σε μη αστική
- μεταβολή των κανόνων εξαιρέσης, δηλαδή θέσπιση μέτρων προστασίας για ορισμένες περιοχές ή αποχαρακτηρισμό αυτών
- μεταβολή των παραμέτρων που διαμορφώνουν την καταλληλότητα όπως μεταβολή των υποδομών της περιοχής

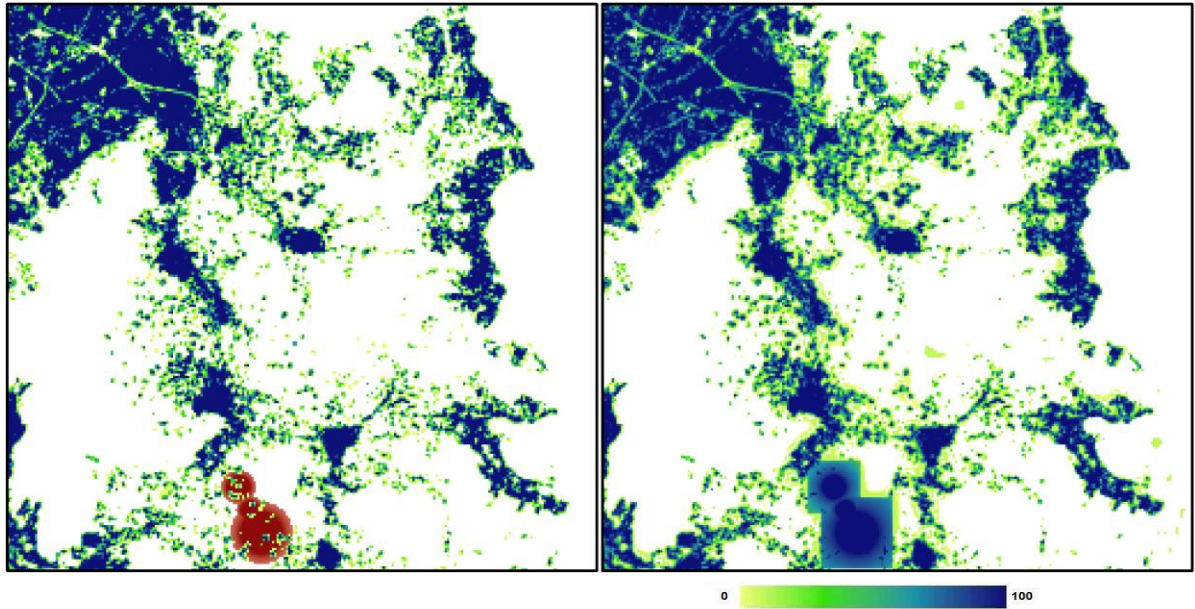
Σύμφωνα με τα παραπάνω υπολογίστηκαν έξι συνολικά διαφορετικά σενάρια για την ΑσΕ στην περιοχή μελέτης:

- Σενάριο Α - ήπια ανάπτυξη που αντιστοιχεί σε 50.000 στρέμματα αστικής κάλυψης ή ανάπτυξη 40% χωρίς άλλη παρέμβαση (χάρτης 7.24α)
- Σενάριο Β - έντονη ανάπτυξη που αντιστοιχεί σε 100.000 στρέμματα αστικής κάλυψης ή ανάπτυξη 80% χωρίς άλλη παρέμβαση (χάρτης 7.24β)
- Σενάριο Γ - ήπια ανάπτυξη και δημιουργία νέου αστικού πυρήνα στην περιοχή (χάρτης 7.25)
- Σενάριο Δ - ήπια ανάπτυξη και μεταφορά του αεροδρομίου εκτός περιοχής (χάρτης 7.26)
- Σενάριο Ε - ήπια ανάπτυξη και χαρακτηρισμό των αμπελώνων και των ελαιώνων της περιοχής ως προστατευόμενες (χάρτης 7.27)
- Σενάριο ΣΤ - ήπια ανάπτυξη και δημιουργία νέων κεντρικών δρόμων καθώς και επέκταση του Αττικό Μετρό (χάρτης 7.28)

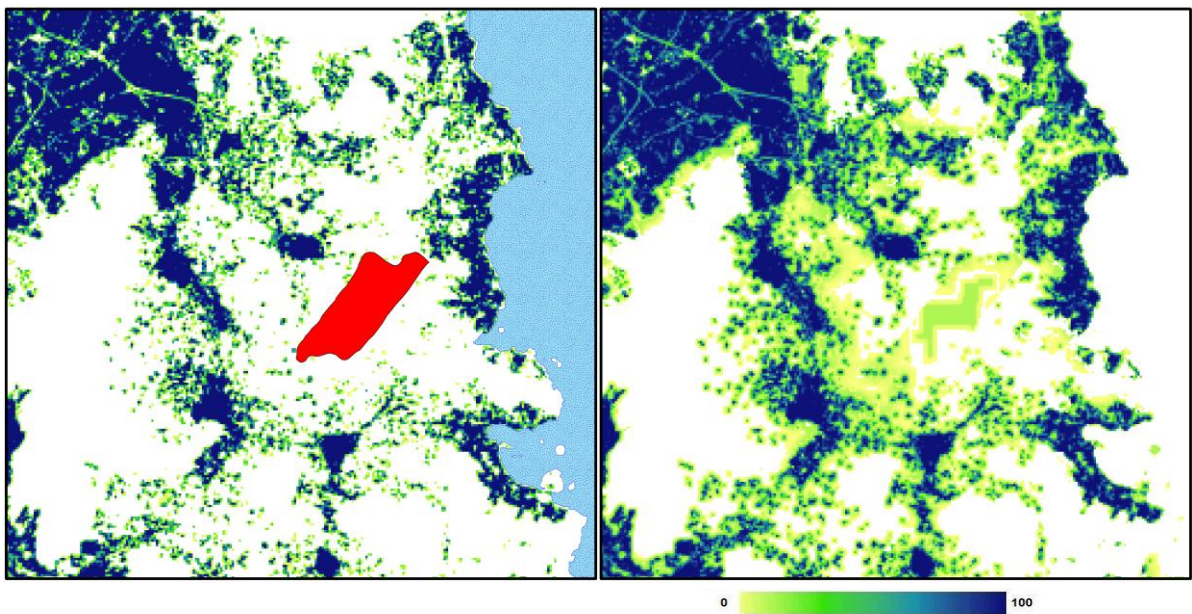
Η εφαρμογή του μοντέλου στα πλαίσια του αστικού σχεδιασμού δεν στοχεύει στην απεικόνιση του μέλλοντος αλλά στην αξιολόγηση των πιθανών επεμβάσεων που θα οδηγήσουν το μέλλον σε μια επιθυμητή κατάσταση. Ως εκ τούτου, η ρεαλιστική εφαρμογή του CaFe, όπως και οποιουδήποτε μοντέλου ΑσΕ, πρέπει να λάβει υπόψη πληροφορίες για πιθανές πραγματικές επεμβάσεις στην περιοχή μελέτης. Η εφαρμογή του CaFe στη περιοχή μελέτης ωστόσο, είχε σαν στόχο την ανάπτυξη και αξιολόγηση του μοντέλου. Κατά συνέπεια, τα εναλλακτικά σενάρια για την ΑσΕ που υπολογίσθηκαν απεικονίζουν διαφορετικές πιθανές καταστάσεις της αστικής κάλυψης αλλά δεν αποσκοπούν στην εξαγωγή συμπερασμάτων για την ΑσΕ στην περιοχή μελέτης. Αντίθετα αποσκοπούν στην εκτίμηση των δυνατοτήτων του μοντέλου και στην εξαγωγή συμπερασμάτων τόσο σχετικά με προτερήματα του μοντέλου και την συνεισφορά του στο πεδίο των μοντέλων ΑσΕ όσο και με τα μειονεκτήματά του και την δυνητική του εξέλιξη που περιγράφονται στο επόμενο κεφάλαιο.



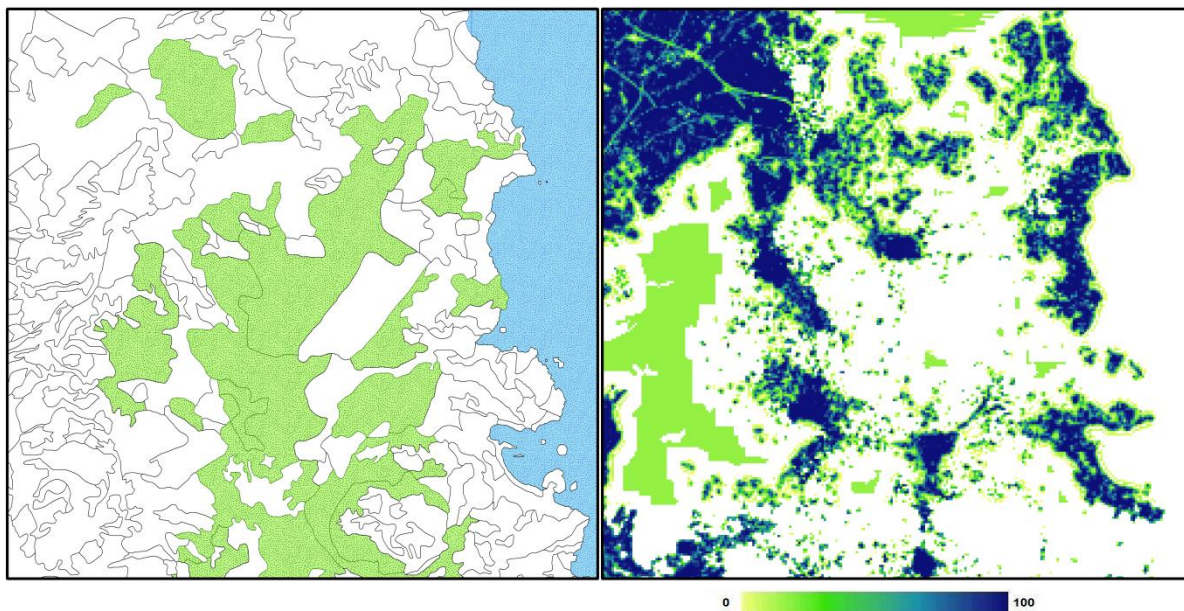
Χάρτης 7.24: Το σενάριο A υποθέτει αύξηση της αστικής κάλυψης κατά 40% (αριστερά) ενώ το σενάριο B αύξηση της αστικής κάλυψης κατά 80% (δεξιά)



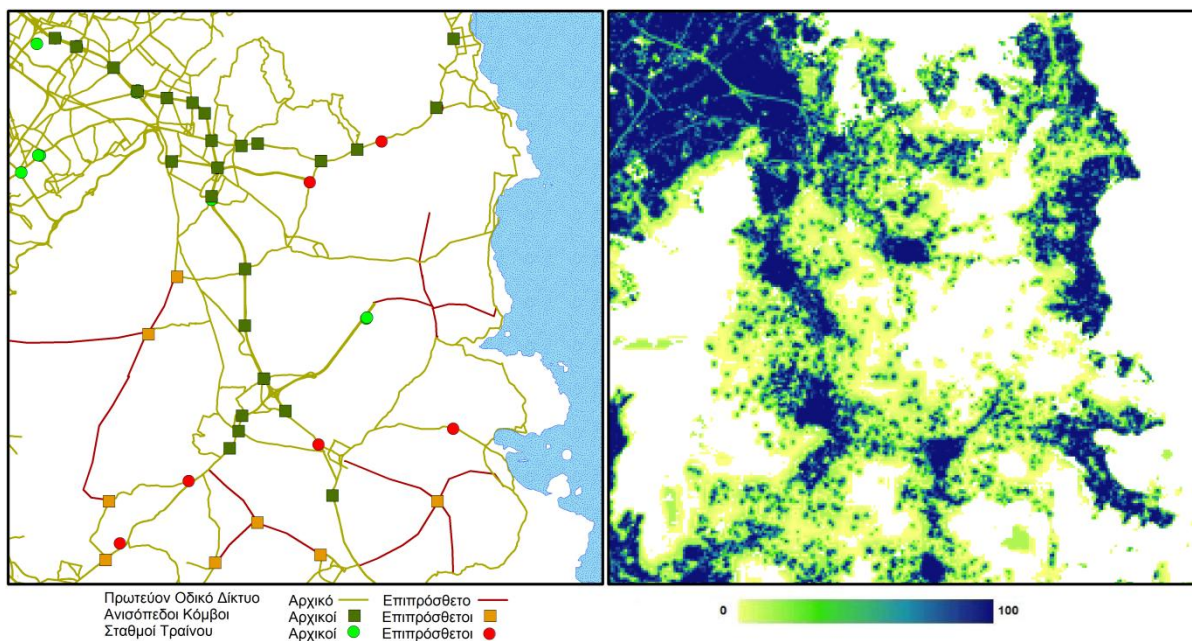
Χάρτης 7.25: Η υπόθεση της εξωγενούς ανάπτυξης οικισμού στο νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης το 2007 (αριστερά) περιορίζει σε μεγάλο βαθμό την ανάπτυξη άλλων περιοχών (δεξιά) στο σενάριο Γ



Χάρτης 7.26: Η υπόθεση της μεταφοράς του αεροδρομίου εκτός περιοχής μελέτης το 2007 (αριστερά) επιτρέπει την μέτρια ανάπτυξη στην εν λόγω περιοχή και στα σύνορα αυτής χωρίς ωστόσο να επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις υπόλοιπες περιοχές (δεξιά) στο σενάριο Δ



Χάρτης 7.27: Η υπόθεση της θέσπισης μέτρων για την προστασία παραδοσιακών αμπελώνων και ελαιώνων στην περιοχή μελέτης το 2007 (αριστερά) στρέφει την αστική επέκταση στον Υμηττό (δεξιά) στο σενάριο E



Χάρτης 7.28: Η υπόθεση της επέκτασης του πρωτεύοντος οδικού δικτύου και του Αττικού Μετρό το 2007 (αριστερά) στρέφει την αστική επέκταση στις περιοχές όπου γίνονται τα αναπτυξιακά έργα (δεξιά) στο σενάριο ST

Συμπεράσματα

Η παρούσα διατριβή προτείνει μια προσέγγιση μοντελοποίησης της ΑσΕ η οποία εφαρμόζει τεχνικές Κυψελοειδών Αυτομάτων στα πλαίσια της Λογικής της Ασάφειας. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε εφαρμόζει καινοτόμα τεχνικά χαρακτηριστικά τα οποία αποσκοπούν στο να αντιμετωπίσουν ορισμένες εγγενείς αδυναμίες των αστικών ΚΑ και να συνεισφέρουν στο ευρύτερο πλαίσιο της μοντελοποίησης της ΑσΕ. Σύμφωνα με τους δείκτες αριθμητικής προσαρμογής που υπολογίστηκαν στα διάφορα στάδια της υπολογιστικής εφαρμογής του μοντέλου, το CaFe είναι σε θέση να προσομοιώσει με ικανοποιητική αριθμητική ακρίβεια της ΑσΕ και να υπολογίσει εναλλακτικά σενάρια ανάπτυξης.

8.1 Συνεισφορά του CaFe

Το CaFe συνδυάζει τα πλεονεκτήματα προγενέστερων μοντέλων που εφαρμόζουν τεχνικές ασαφών ΚΑ περιορίζοντας ωστόσο ορισμένα από τα μειονεκτήματά τους. Ειδικότερα, το CaFe σχεδιάστηκε και εξελίχθηκε έτσι ώστε να:

- μην χρησιμοποιεί κάποιο συγκεκριμένο θεωρητικό πλαίσιο για την μοντελοποίηση της αστικής ανάπτυξης και κατά συνέπεια να μην απαιτεί συγκεκριμένο αριθμό μεταβλητών, συγκεκριμένες μεταβλητές ή συνδυασμούς μεταβλητών
- είναι εύκολα μεταφέρσιμο και εφαρμόσιμο σε διαφορετικές περιοχές
- προσαρμόζεται σε διαφορετικά σύνολα δεδομένων διαφορετικής χωρικής κλίμακας
- εφαρμόζει παράλληλη σύνδεση μεταξύ των μεταβλητών εισόδου και κατά συνέπεια να επιτρέπει την προσθαφαίρεση δεδομένων χωρίς βλάβη της γενικής βάσης γνώσης

- συνδυάζει εμπειρική γνώση και γνώση καθοδηγούμενη από τα δεδομένα και να παρέχει ορατές συσχετίσεις μεταξύ των μεταβλητών εισόδου και των τελικών αποτελεσμάτων

8.1.1 Συνεισφορά του CaFe στον χώρο των Αστικών Κυψελοειδών Αυτομάτων

Το μεθοδολογικό πλαίσιο μοντελοποίησης CaFe σχεδιάστηκε πάνω σε τρεις βασικούς άξονες: να είναι *ρεαλιστικό*, *ανοιχτό* και *εύχρηστο*. *Ρεαλιστικό* σημαίνει να μπορεί να εκτιμήσει την δυνητική κατάσταση της μελλοντικής αστικής κάλυψης αλλά και να προσομοιώνει με ικανοποιητική ακρίβεια τα υποκείμενα χωρικά πρότυπα της αστικής επέκτασης. Για την επίτευξη του στόχου αυτού εφαρμόζονται εξειδικευμένα ΚΑ στα πλαίσια της ΛΑ.

Τα ΚΑ είναι ενδεδειγμένες τεχνικές για την μοντελοποίηση της αστικής επέκτασης και καλύπτουν της διαδικασίες της εντατικοποίησης (*intensification*), της επέκτασης των αστικών συνόρων (*edge expansion*) και της αστικοποίησης κατά μήκος γραμμικών αξόνων (*linear corridor*). Αδυνατούν ωστόσο εκ φύσεως να συλλάβουν την αυθόρμητη αστική ανάπτυξη σε απομακρυσμένες περιοχές (*leapfrog settlement*). Αυτό το κενό αντιμετωπίζεται σε έναν μεγάλο βαθμό από την εισαγωγή ΚΑ κατά κατεύθυνση και από κανόνες ψευδο-πρακτόρων οι οποίοι εφαρμόζουν “*δράση από απόσταση*”. Παράλληλα, το CaFe προτείνει ένα πλαίσιο για την θεώρηση του πραγματικού χρόνου στην διαδικασία της προσομοίωσης.

Σε σχέση με τα ασαφή αστικά ΚΑ, το CaFe εφαρμόζει μια πληρέστερη ασαφή άλγεβρα και υποστηρίζει ένα μεγάλο πλήθος τελεστών με σκοπό να αξιοποιήσει όσο το δυνατόν καλύτερα τα οφέλη της Λογικής της Ασάφειας στην διαχείριση της γνώσης. Επιπλέον, το μοντέλο συνδυάζει τα παραπάνω σε ένα πλαίσιο μοντελοποίησης το οποίο μπορεί να προσομοιώσει την ΑΣΕ με αριθμητική ακρίβεια που είναι εφάμιλλη των δυαδικών (μη-ασαφών) αστικών ΚΑ.

Ο όρος *ανοιχτό* περιλαμβάνει δυο γενικές ιδιότητες και αναφέρεται αφενός στην ορατή για τον χρήστη ροή εργασιών και την σύνδεση μεταξύ μεταβλητών εισόδου και εξόδου και αφετέρου στην δυνατότητα του χρήστη να παρέμβει και να τροποποιήσει εύκολα τους μηχανισμούς του μοντέλου. Το CaFe περιγράφει τις καταστάσεις και τις συσχετίσεις με απλό και κατανοητό τρόπο διευκολύνοντας έτσι την κατανόηση των προτύπων μεταβολής της αστικής κάλυψης και την αξιοποίηση της γνώσης. Επιπλέον, επιτρέπει στον χρήστη να ενσωματώσει εμπειρική γνώση αλλά και να αξιολογήσει άμεσα και εύκολα εναλλακτικές τακτικές. Παράλληλα, το CaFe δίδει στον χρήστη τη δυνατότητα να μεταβάλει τις αρχικές συνθήκες του συστήματος και να αποτυπώσει την επίδρασή τους στην συνολική ΑΣΕ. Κατά συνέπεια, το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογίσει εναλλακτικά σενάρια και να αξιολογήσει παρεμβάσεις στα πλαίσια του αστικού σχεδιασμού.

Μεγάλη έμφαση έχει δοθεί στην *ευχρηστία* και *προσαρμοστικότητα* του μοντέλου. Τα περισσότερα αστικά μοντέλα υιοθετούν κάποιο συγκεκριμένο θεωρητικό υπόβαθρο και απαιτούν την

ικανοποίηση συγκεκριμένων συνθηκών για την εφαρμογή τους. Ειδικότερα, απαιτούνται συγκεκριμένες μεταβλητές εισόδου ενώ συχνά υφίστανται περιορισμοί ως προς την χωρική κλίμακα και την ποιότητα των δεδομένων. Το CaFe αντίθετα, δεν προϋποθέτει συγκεκριμένα δεδομένα αλλά δομείται πάνω στο σύνολο των διαθέσιμων δεδομένων. Αυτό δε σημαίνει ότι τα αποτελέσματα του μοντέλου έχουν την ίδια ακρίβεια είτε υπάρχουν πολλά δεδομένα είτε λίγα. Απλά ότι μπορεί να μεταφερθεί σε κάποια άλλη περιοχή χωρίς να απαιτεί τα ίδια ακριβώς δεδομένα. Έτσι θα αξιολογήσει το πλεόνασμα της πληροφορίας αν του δοθούν περισσότερα δεδομένα αλλά θα λειτουργήσει ακόμα και με λιγότερα δεδομένα.

Παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζουν και κάποια άλλα μοντέλα, όπως το Urbansim (Waddell 2004), τα οποία αποτελούνται από έναν αριθμό υποσυστημάτων μοντελοποίησης ενώ παρέχουν τη δυνατότητα στον χρήστη να απενεργοποιήσουν κάποια από αυτά στην περίπτωση που δεν υπάρχουν διαθέσιμα τα απαραίτητα δεδομένα. Η διαφορά έγκειται στο ότι το προτεινόμενο μοντέλο 'χτίζεται' εξολοκλήρου πάνω στα διαθέσιμα δεδομένα κάθε εφαρμογής ενώ επιπλέον διατηρεί τη δυνατότητα προσθήκης ή αφαίρεσης δεδομένων χωρίς να επηρεάζει τον πυρήνα της Βάσης Γνώσης.

Το προτεινόμενο μοντέλο εφαρμόζει μια παράλληλη σύνδεση μεταξύ των μεταβλητών εισόδου, η οποία τελείται με την χρήση ενός νέου ασαφούς τελεστή, ο οποίος λαμβάνει υπόψη την στατιστική συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών. Αυτό επιτρέπει την διαχείριση της γνώσης με κατάλληλο τρόπο ώστε να μπορούν να προστεθούν ή να αφαιρεθούν μεταβλητές χωρίς αυτό να επηρεάζει την γνώση για τις υπόλοιπες μεταβλητές. Επιπλέον, η μεταβολή στον αριθμό των μεταβλητών εισόδου δεν επηρεάζει την γνώση για τις υπόλοιπες μεταβλητές. Αυτό επιτρέπει την μεταφορά γνώσης για μεμονωμένες μεταβλητές σε κάποια άλλη παρόμοια περιοχή. Παράλληλα, επιτρέπει την χρήση δεδομένων που δε καλύπτουν όλο τον χώρο ή όλη την χρονική περίοδο μιας μελέτης. Η δυνατότητα αυτή επιτυγχάνεται από την δομή του μοντέλου γενικότερα αλλά και από τις συγκεκριμένες τεχνικές που εφαρμόζονται.

Επιπλέον, το μοντέλο προτείνει μια εναλλακτική διαχείριση της γνώσης. Συγκεκριμένα, όλες οι μεταβλητές εισόδου χρησιμοποιούνται για να υπολογισθεί ένα εσωτερικό θεματικό επίπεδο, η 'καταλληλότητα προς αστικοποίηση' το οποίο είναι η μοναδική είσοδος του μηχανισμού προσομοίωσης ΚΑ. Αυτό επιφέρει δυο σημαντικά πλεονεκτήματα. Αφενός αποσυνδέει το μέγεθος των γειτονιών που χρησιμοποιούνται από την έκταση της χωρικής επίδρασης των μεγεθών στην περιοχή μελέτης και αφετέρου οδηγεί σε συγκριτικά απλούστερης μορφής κανόνες, καθιστώντας την διαδικασία της βαθμονόμησης πλέον εύκολη.

8.1.2 Καινοτόμα Τεχνικά Χαρακτηριστικά του CaFe

Το CaFe χρησιμοποιεί βάση γνώσης σε μορφή κανόνων οι οποίοι μπορεί να είναι χώρο-χρονικά μεταβαλλόμενοι, εμπειρικοί ή εξαγόμενοι εκ των δεδομένων. Οι κανόνες αυτοί δε βασίζονται σε

κάποιο θεωρητικό πλαίσιο ούτε εκφράζονται σαν ένα σύνολο εξισώσεων ευθύς εξαρχής. Συνεπώς, η βάση γνώσης μπορεί να αναπαράγει καλύτερα την πραγματικότητα επιτρέποντας στον χρήστη να υπερβεί πιθανές ελλείψεις δεδομένων – που επιφέρουν έλλειψη γνώσης. Αυτό γίνεται εισάγοντας εξωγενή γνώση προσαρμοσμένη στο μοντέλο διαμέσου εμπειρικών προτύπων ομοιότητας. Η δυνατότητα αυτή βελτιώνεται από το γεγονός ότι το μοντέλο και τα αποτελέσματα περιγράφονται με όρους κοινής γλώσσας στα πλαίσια της ΛΑ, κάτι που καθιστά το μοντέλο φιλικό και εύχρηστο.

Το CaFe εισαγάγει και χρησιμοποιεί το ευαίσθητο άθροισμα, έναν νέο ασαφή τελεστή που εφαρμόζει μια δυναμική παράλληλη συνδεσμολογία μεταξύ των διαφορετικών μεταβλητών εισόδου λαμβάνοντας υπόψη τη μεταξύ τους στατιστική συσχέτιση. Ως αποτέλεσμα δεν απαιτούνται συγκεκριμένες μεταβλητές εισόδου ενώ υποστηρίζεται μια μορφή βάσης γνώσης που μπορεί εύκολα να επεκταθεί ή να περιορισθεί. Για την προσομοίωση της αστικής επέκτασης χρησιμοποιούνται εξελιγμένες τεχνικές κυψελοειδών αυτομάτων που ενσωματώνουν χώρο-χρονικές συναρτήσεις μετάβασης με μεταβλητή ακτίνα και υποστηρίζουν δράση από απόσταση. Αναλυτικά, τα καινοτόμα χαρακτηριστικά που εισαγάγει το CaFe είναι:

- Θεώρηση του πραγματικού χρόνου βάση της αστικής κάλυψης
- Χωρικοί κανόνες μέσω της χρήσης μιας 2D ασαφούς χωρικής μεταβλητής
- Χρονικά μεταβαλλόμενοι κανόνες
- Εξειδικευμένους ασαφείς προσδιορισμούς
- Τον τελεστή ‘*ευαίσθητο άθροισμα*’ ο οποίος λαμβάνει υπόψη τη στατιστική συσχέτιση μεταξύ μεταβλητών και επιτρέπει την παράλληλη σύνδεση μεταξύ τους
- Επεκταμένα Κυψελοειδή Αυτόματα (CA++) που χρησιμοποιούν
 - χώρο-χρονικά μεταβαλλόμενες συναρτήσεις μετάβασης
 - πολυωνυμικό πρότυπο για την κάθετη επέκταση και γραμμικό πρότυπο για την οριζόντια επέκταση
 - Κυψελοειδή Αυτόματα κατά Κατεύθυνση και
 - κανόνες ψευδο-πρακτόρων

8.2 Μελλοντική Εργασία

Το CaFe είναι ένα λειτουργικό μοντέλο, ωστόσο απέχει πολύ από το να χαρακτηριστεί ολοκληρωμένο ή έτοιμο να εφαρμοστεί. Αντίθετα υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός από στοιχεία και

χαρακτηριστικά του που χρήζουν περαιτέρω μελέτης και ανάπτυξης. Καταρχήν είναι ιδιαίτερα σημαντικό να εξακριβωθεί κατά πόσο τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την πρώτη υπολογιστική εφαρμογή είναι γενικά ή αποδίδονται στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περιοχής ή/και της περιόδου της δοκιμής. Πρέπει να αξιολογηθεί η δυνατότητα του CaFe να προσομοιώσει την ΑσΕ σε διαφορετικές συνθήκες όπως ενδεικτικά:

- η περιοχή μελέτης να περιλαμβάνει ολόκληρη την μητροπολιτική περιοχή της Αθήνας ή κάποιας άλλης πόλης
- οι περίοδοι δοκιμής να χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη ή μικρότερη διάρκεια και αντίστοιχα μικρότερη ή μεγαλύτερη ποσοστιαία ανάπτυξη
- τα δεδομένα να περιλαμβάνουν περισσότερες μεταβλητές και να σχετίζονται πλέον ισχυρά με παραμέτρους που καθορίζονται στα πλαίσια του αστικού σχεδιασμού αλλά και να αναφέρονται σε περισσότερα χρονικά σημεία.

Μέσα από τις εφαρμογές αυτές, δημιουργείται επιπλέον η δυνατότητα να απαντηθούν τα ερευνητικά ερωτήματα που αφήνει αναπάντητα το μοντέλο στην μορφή που προτείνεται στην παρούσα διατριβή και να εξελιχθεί περαιτέρω το μεθοδολογικό πλαίσιο μοντελοποίησης CaFe.

8.2.1 Ανοιχτά Ερευνητικά Ερωτήματα

Το CaFe περιορίζει ορισμένα από τα μειονεκτήματα των αστικών ΚΑ αλλά αδυνατεί στην παρούσα μορφή να αντιμετωπίσει ορισμένα άλλα. Ειδικότερα, δεν υπάρχει ακόμα κάποιο σαφές μεθοδολογικό πλαίσιο για την βαθμονόμηση των αστικών ΚΑ η οποία συνήθως, όπως και στην εφαρμογή που περιγράφεται στη παρούσα διατριβή, εκτελείται εμπειρικά ή με αναλυτικές μεθόδους. Παράλληλα, ο καθορισμός των γειτονιών δε στοιχειοθετείται από κάποιο θεωρητικό ή πρακτικό πλαίσιο ενώ δεν είναι σαφής ο τρόπος με τον οποίο διαφορετικές διαμορφώσεις των γειτονιών μπορεί να επηρεάσουν την αποτύπωση των χωρικών σχέσεων. Επιπλέον, ενώ το CaFe προτείνει ένα πλαίσιο για την θεώρηση του πραγματικού χρόνου στα αστικά ΚΑ, η παρούσα μορφή του μοντέλου δεν έχει μελετήσει τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να ενταχθεί στο μοντέλο η διάρκεια ορισμένων διαδικασιών, όπως η δημιουργία ενός νέου δρόμου, η ανάπτυξη μιας μη αστικής κυψέλης ή η δημιουργία ενός χώρου αστικού πρασίνου.

8.2.2 Δυνητική Εξέλιξη του CaFe

Η μελλοντική εξέλιξη του μοντέλου μπορεί να κινηθεί προς τρεις διαφορετικές αλλά μη αλληλοαποκλειόμενες κατευθύνσεις. Η πρώτη κατεύθυνση αφορά την βελτίωση και εξέλιξη του τεχνικού και μαθηματικού υποβάθρου του CaFe και περιλαμβάνει:

- την μοντελοποίηση της χρονικής διάρκειας των διαδικασιών
- τον σχεδιασμό εργαλείων για την εξαγωγή και εφαρμογή στοχαστικής βάσης γνώσης που αποτυπώνει πλέον ρεαλιστικά την διαδικασία λήψης αποφάσεων των κατοίκων και περιλαμβάνει και την θεώρηση των γειτονιών
- την ανάπτυξη ενός σαφέστερου πλαισίου για την εξαγωγή των συναρτήσεων καταλληλότητας το οποίο ενδέχεται να κάνει χρήση νευρωνικών δικτύων ή θεωρίας βελτιστοποίησης

Η δεύτερη κατεύθυνση εστιάζει στην απλοποίηση της υπολογιστικής εφαρμογής του μοντέλου και ειδικότερα στην αυτοματοποιημένη ή υποβοηθούμενη δόμηση του μοντέλου στα πλαίσια ενός Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών. Η τρίτη κατεύθυνση αφορά στην επέκταση της χρηστικότητας του μοντέλου και ειδικότερα στην αναπροσαρμογή του CaFe έτσι ώστε να μπορεί να μοντελοποιήσει την μεταβολή των χρήσεων γης γενικότερα και να παράγει επιπλέον εκτιμήσεις για τον πληθυσμό και τις θέσεις εργασίας κάθε κυψέλης.

Τέλος, μια ακόμα πιθανή εξέλιξη θα μπορούσε να αποτελέσει η εφαρμογή μιας διαδικτυακής προσέγγισης για την εξαγωγή γνώσης από τα προσωπικά εμπειρικά μοντέλα βάση των οποίων οι κάτοικοι μιας περιοχής επιλέγουν την κατοικία τους (Bishr & Mantelas 2008). Προηγούμενες προσεγγίσεις έχουν χρησιμοποιήσει ερωτηματολόγια, συνεντεύξεις και ομάδες συζήτησης για να κατανοήσουν την συμπεριφορά των κατοίκων μιας περιοχής στην αστική ανάπτυξη (Luo & Sen 2004, Otoo et al. 2006), αλλά περιλαμβάνουν ένα μικρό τμήμα του πληθυσμού και για μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Αντίθετα, μια διαδικτυακή προσέγγιση στα πλαίσια του Web2 και της εθελοντικής γεωγραφικής πληροφορίας μπορεί να παρέχει πρόσβαση σε ένα πολύ μεγαλύτερο αριθμό κατοίκων σε συνεχή χρόνο.

Βιβλιογραφία

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Βλαχάβας Ι., Κεφαλάς Π., Βασιλιάδης Ν., Ρεφανίδης Ι., Κοκκόρας Φ., Σακελαρίου Η., 2002, 'Τεχνητή Νοημοσύνη', Εκδόσεις Γαρταγάνης, Θεσσαλονίκη
- Μαντέλας Λ., Πραστάκος Π., Χατζηχρήστος Θ., 2008, 'Μοντελοποίηση Αστικής Επέκτασης χρησιμοποιώντας Κυψελοειδή Αυτόματα και Εξελιγμένα Ασαφή Συστήματα', 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο HellasGI, Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών – Περιβάλλον και Ανάπτυξη, Αθήνα, Ελλάδα
- Μαντέλας Λ., Πραστάκος Π., Χατζηχρήστος Θ., 2010, 'Προσομοίωση της Αστικής Επέκτασης χρησιμοποιώντας το CaFe', 6ο Πανελλήνιο Συνέδριο HellasGI, Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών, Αθήνα, Ελλάδα *(η εργασία έχει γίνει δεκτή προς παρουσίαση)*
- Κομνηνός Ν., 1986, 'Θεωρία της Αστικότητας II - Αστικός Προγραμματισμός και Κοινωνική Ρύθμιση', Σύγχρονα Θέματα - Αθήνα
- Κουτσόπουλος Κ., 2002, 'Γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών και ανάλυση χώρου', Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα
- Χατζηχρήστος Θ., 2001, 'Τα ΓΣΠ και η Λογική της Ασάφειας στην Ανάλυση του Χώρου', Εκπαιδευτικές σημειώσεις, ΕΜΠ, Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

- Abraham J. E., 1998, 'A review of the MEPLAN modelling framework from a perspective of urban economics, University of Calgary, Department of Civil Engineering Research Report No.CE982, http://www.ucalgary.ca/~jabraham/MEPLAN_and_Urban_Economics.PDF
- Ahmadzadeh M., Petrou M., 2001, 'An Expert System With Uncertain Rules Based on Dempster-Shafer Theory', IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS, Sydney, Australia,
- Alberti M., Waddell P., 2000, 'An integrated urban development and ecological simulation model', Integrated Assessment , vol.1, p.215–227
- Al-Ahmadi K., See L., Heppenstall A., Hogg J., 2008, 'Calibration of a fuzzy cellular automata model of urban dynamics in Saudi Arabia', Ecological Complexity – Environmental micro-simulation: From data approximation to theory assessment, vol.6, no.2, p.80-101
- Al-Kheder S., Wang J., Shan J., 2008, 'Fuzzy inference guided cellular automata urban-growth modelling using multitemporal satellite images', International Journal of Geographical Information Science, iFirst, p.1-23
- Agarwal Ch., Green M. G., Grove M. J., Evans T. P., Schweik M. Ch., 2000, 'A Review and Assessment of Land-Use Change Models: Dynamics of Space, Time, and Human Choice', 4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling, Banff, Canada
- Arijit L., Nikhil R. P., Jyotirmoy D., 2006, 'Land Cover Classification Using Fuzzy Rules and Aggregation of Contextual Information Through Evidence Theory', IEEE transactions on geoscience and remote sensing, vol.44, no.6, p.1633-1641
- Ashley M., Jankowski P., 2005, 'Fuzzy Modeling with Spatial Information for Geographic Problems: Spatial Decision Making Using Fuzzy GIS', p.275-298, Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- Assimakopoulos, D., Petrakis, M., Chrysoulakis, N., Stathopoulou, M., Karvounis, G., C. Cartalis, 2009, Olympic Games in Athens: using earth observation for the assessment of changes and impacts for the natural and built environment. Annual Dragon 2 Symposium, Barcelona,Spain, June 22 – 26
- Barredo J., Kasanko M., McCormick N., Lavalle C., 2003, 'Modeling dynamic spatial processes: Simulation of urban future scenarios through cellular automata', Landscape and Urban Planning, vol.64, p.145-160

- Barredo J. I., Demicheli L., Lavalle C., Kasanko M., McCormick N., 2004, 'Modelling future urban scenarios in developing countries: an application case study in Lagos, Nigeria', *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol.1 no.1, p.65 – 84
- Batty M., 1997, 'Cellular automata and urban form: A primer', *Journal of the American Planning Association*, vol.63, no.2, p.266-274
- Bejaoui L., Bidard Y., Pinet F., Salehi M., Schneiderd M., 2007, 'Logical consistency for vague spatiotemporal objects and relations', *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Enschede, NLD
- Benenson I., Aronovich S., Noam S., 2001, 'OBEUS: Object-Based Environment for Urban Simulations', *Proceedings of the 6th International Conference on GeoComputation.*, University of Queensland, Brisbane, Australia, p. 1-10
- Benenson I., Kharbash V., 2006, 'Geographic Automata Systems and the OBEUS Software for their Implementation', *Complex Artificial Environments*, Springer Berlin Heidelberg, p.137-153
- Benyoussef A., Boccara N., Chakib H., Ez-Zahraouy H., 2001, *Chinese Journal of Physics*, vol.39, no.5., p.428-440
- Berling-Wolff S., Wu J., 2004, 'Modeling urban landscape dynamics: A review', *Ecological Research*, vol.19, p.119–129
- Betel H., Flocchini P., 2009, 'On the Asymptotic Behavior of Fuzzy Cellular Automata', *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 15th International Workshop on Cellular Automata and Discrete Complex Systems, vol.252, p.23-40
- Bishr M., Mantelas L., 2008, 'A trust and reputation model for filtering and classifying knowledge about urban growth', *GeoJournal*, vol.72. no.3-4, p. 229-237
- Blecic I., Cecchini A., Prastacos P., Trunfio G.A., Verigos E., 2004, 'Modeling Urban Dynamics with Cellular Automata: A Model of the City of Heraclion', *7th AGILE Conference on Geographic Information Science*, University of Crete Press, Heraklion, Greece
- Bone C., Dragicevic S., Roberts A., 2006, 'A fuzzy-constrained cellular automata model of forest insect infestation', *Ecological Modelling*, vol.192, no.1-2, p.107-125
- Burns A., 1976, 'Hippodamus and the Planned City', *Historia*, vol.25, no.4, p.414-428
- Campbell H. S., 1998, 'Urban Land Use: Residential Patterns and Change', *The Virtual Geography Department Project*, The University of Texas, Austin
- Caponetto R., Lavorgna M., Occhipinti L., Rizzoto G., 1998, 'Fuzzy Cellular System: Characteristics and Architecture, Fuzzy hardware : architectures and applications', *Kluwer Academic Publishers*, p.295-308

- Carlsson C., Fuller R., 2001, 'Optimization under fuzzy if then rules', *Fuzzy Sets and Systems*, vol.119, no.1, p.111-120
- Carr M. H., Zwick P. D., 2007, 'Smart Land-Use Analysis - The LUCIS model - Land Use Identification Strategy', ESRI Press
- Carvalho J. P., Carola M., Tome J. A. B., 2006, 'Using Rule-based Fuzzy Cognitive Maps to Model Dynamic Cell Behavior in Voronoi Based Cellular Automata', *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, p.1687-1694
- Castellano G., Fanelli A. M., Mencar C., 2003, 'Design and application of hybrid intelligent systems, Design of transparent mamdani fuzzy inference systems', p. 468-476, IOS Press, Amsterdam,
- Cecchini A., Rizzi P., 2001, 'Is Urban Gaming Simulation Useful?', *Simulation Gaming*, vol.32, no.4, p.507-521
- Chang Vh., Zhang Y., Dong Y., 2006, 'Application of fuzzy logic in the classical cellular automata model', *Journal of Applied Mathematics. & Computing*, vol.20, no.1-2, p.433-443
- Chen M.Y., Linkens D.A., 2004, 'Rule-base self-generation and simplification for data-driven fuzzy models', *Fuzzy Sets and Systems*, vol.142, p.243-265
- Cheng J., Masser, I., 2003, 'Understanding Urban Growth System: Theories and Methods', 8th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management, Sendai City, Japan
- Chrysoulakis N., Kamarianakis Y., Farsari Y., Diamandakis M., Prastacos P., 2004, 'Combining Satellite And Socioeconomic Data For Land Use Models Estimation', *EARSeL Workshop on Remote Sensing for Developing Countries*, Cairo
- Clarke K. C., Hoppen S., Gaydos L., 1997, 'A Self-Modifying Cellular Automaton Model of Historical Urbanization in the San Francisco Bay Area', *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 24, p.247-261
- Clarke K. C., Gaydos L. J., 1998, 'Loose-coupling a cellular automaton model and GIS: long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore', *International Journal of Geographical Information Sciences*, vol.12, p.699-714, - εντός (Liu 2009)
- Corgne S., Hubert-Moy L., Dezert J., Mercier G., 2003, 'Land Cover Change Prediction With A New Theory Of Plausible And Paradoxical Reasoning', 6th International Conference of Information Fusion, Cairnes, Queensland, Australia
- Cox E., 1994, 'The fuzzy system handbook', Academic Press, Inc., Boston, MA

- Deng M., 2008, 'An Anisotropic Model for Spatial Processes', *Geographical Analysis*, vol.40, p.26-51
- Dietzel Ch., Clarke K. C., 2004, 'Replication of Spatio-Temporal Land Use Patterns at three Levels of Aggregation by an Urban Cellular Automata', *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 3305, p. 523-532
- Dietzel Ch., Herold M., Hemphill J. J., Clarke K. C. , 2005, 'Spatio-temporal dynamics in California's Central Valley: Empirical links to urban theory', *International Journal of Geographical Information Science*, vol.19, no. 2, p.175-195
- Dietzel Ch., Oguz H., Hemphill J. J., Clarke K. C., Gazulis N., 2005, 'Diffusion and Coalescence of the Houston Metropolitan Area: Evidence Supporting a New Urban Theory', *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol.32, p.231-246
- Dragicevic S., 2004, 'Coupling Fuzzy Sets Theory and GIS-based Cellular Automata for Land-Use Change Modeling', *Fuzzy Information - IEEE Annual Meeting of the Processing NAFIPS'04*, Banff, Canada, vol.1, p.203-207
- Dragicevic S., 2005, 'Fuzzy Modeling with Spatial Information for Geographic Problems: Multi-Dimensional Interpolations with Fuzzy Sets', *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, p.143-158
- Dragicevic S., Marceau D. J., 2000, 'An application of fuzzy logic reasoning for GIS temporal modeling of dynamic processes', *Fuzzy Sets and Systems*, vol.113, p.69-80
- Dragicevic S., Marceau D. J., 2001, 'A fuzzy set approach for modeling time in GIS', *Geographical Information Science*, vol.14, no.3, p.225-245
- Engelen G., 1988, 'The theory of self-organization and modeling complex urban systems', *European Journal of Operational Research*, vol.37, no.1, p.42-57
- Engelen G., Lavalle C., Barredo J. I., van der Meulen M., White R., 2007, 'The Moland modelling framework for urban and regional land-use dynamics', *Modelling Land-Use Change*, Springer, p.297-319.
- Fisher P., Cheng T., Wood J., 2007, 'Higher order vagueness in Geographical Information: Empirical Geographical Population of Type n Fuzzy Sets', *GeoInformatica*, vol.11, no.3, p.311-330
- Fisher P., Wood J., Cheng T., 2004, 'Where is Helvellyn? Fuzziness of multi-scale landscape morphometry', *Transactions of the Institute of British Geographers*, vol. 29, no.1, p.106-128
- Fonte C. C., Lodwick W. A., 2005, 'Fuzzy Modeling with Spatial Information for Geographic Problems: Modelling the Fuzzy Spatial Extent of Geographical Entities', *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, p.121-142

- Forrester J.W., 1969, 'Urban Dynamics', Cambridge, MA (MIT Press) – (εντός Haase & Schwarz 2009)
- Ganguly N., Sikdar B. K., Deutsch A., Canright J., Chaudhuri P. P., 2003, 'A survey on cellular automata', Technical Report, Centre for High Performance Computing, Dresden University of Technology
- Ganter B., Wille R., 1998, 'Formal Concept Analysis – Mathematical Foundations', Springer-Verlag, Berlin
- Gardner M., 1970, 'Mathematical Games - The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "life"', Scientific American, p.120-123
- Gelman A., 2006, 'The Boxer, the Wrestler, and the Coin Flip: A Paradox of Robust Bayesian Inference and Belief Functions', The American Statistician, vol.60, no.2, p.146-150
- Gobron S., Chiba N., 1999, '3D surface cellular automata and their applications', The Journal of Visualization and Computer Animation, vol.10, no.3, p.143-158
- Guesgen H. W., 2005, 'Fuzzy Modeling with Spatial Information for Geographic Problems: Fuzzy Reasoning about Geographic Regions', Springer-Verlag Berlin Heidelberg, p.1-14
- Haase D., Schwarz N., 2009, 'Simulation Models on Human–Nature Interactions in Urban Landscapes: A Review Including Spatial Economics, System Dynamics, Cellular Automata and Agent-based Approaches', Living Rev. Landscape Res., 3, (2009), 2. [Online Article]: cited [2/2010], <http://www.livingreviews.org/lrlr-2009-2>
- Hagen-Zanker A., Van Loon J., Straatman B., De Nijs T., Engelen G., 2005, 'An Evaluation Framework for the Calibration and Validation of Integrated Land Use Models Featuring Cellular Automata', 14th European Colloquium on Theoretical and Quantitative Geography, Tomar, Portugal
- Hagoort M., Geertman S., Ottens H., 2008, 'Spatial Externalities, Neighborhood Rules And CA Land-Use Modelling', The Annals of Regional Science, vol.42, no.1, p.39-56
- Handy S., 2005, 'Smart Growth and the Transportation–Land Use Connection: what does the research tell us?', International Regional Science Review, vol.28, no.2, p.146-167
- Hatzichristos T., Potamias J., 2004, 'Defuzzification operators for geographic data of nominal scale', Geoinformatics Conference - Gavle, Sweden
- Heikkila E. J., Shen T.Y., Yang K.Z., 2002, 'Fuzzy Urban Sets Theory and Application to Desakota Regions in China', Environment & Planning B: Planning and Design, vol. 29, p.239-254

- Henning H., 2003, 'A fuzzy logic approach to urban land-use mapping', ScanGIS'2003 - The 9th Scandinavian Research Conference on Geographical Information Science, Espoo, Finland Helsinki University of Technology 2003, p.41-56
- Henning S. H., 2008, 'Quantifying and analyzing neighborhood characteristics supporting urban land-use modeling', Springer - Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, p.283-299
- Herold M., Goldstein N. C., Clarke K. C., 2002, 'The spatiotemporal form of urban growth: measurement, analysis and modeling', Remote Sensing of Environment, vol.86, p.286-302
- Herzig A., 2008, 'A GIS-based Module for the Multiobjective Optimization of Areal Resource Allocation', 11th AGILE International Conference on Geographic Information Science, University of Girona, Spain
- Itami M. R., 1994, 'Simulating spatial dynamics: cellular automata theory, Landscape and Urban Planning', vol.30, p.27-47
- Jasper V., 2009, 'Assessing the Accuracy of Changes in Spatial Explicit Land Use Change Models', 12th AGILE International Conference on Geographic Information Science 2009, Hannover, Germany
- Joss B. N., Hall R. G., Sidders D. M., Keddy T. J., 2008, 'Fuzzy-logic modeling of land suitability for hybrid poplar across the Prairie Provinces of Canada', Environmental Monitoring and Assessment, vol. 141, no.1-3, p.79-96
- Kalogirou S., 2002, 'Expert systems and GIS: an application of land suitability evaluation', Computers, Environment and Urban Systems, vol.26, p.89-112
- Kim J., Kang Y., Hong S. Park S., 2006, 'Extraction of Spatial Rules Using a Decision Tree Method: A Case Study in Urban Growth Modeling', KES, p.203-211
- Kirschfink H., Lieven K., 1999, 'Basic Tools for Fuzzy Modeling', Tutorial on Intelligent Traffic Management Models in Helsinki,
- Klopotek M.A., Wierzchon S.T., 2000, 'Empirical Models for the Dempster-Shafer Theory', Belief Functions in Business Decisions, p.62-112,
- Klosterman E. R., 1999, 'The What if? Collaborative Support System', Environment and Planning, B: Planning and Design, vol.26, p.393-408
- Kollias V. J., Kalivas D. P., Yassoglou N. J., 1999, 'Mapping the soil resources of a recent alluvial plain in Greece using fuzzy sets in a GIS environment, European Journal of Soil Science, vol50, p.261-273
- Koomen E., Stillwell J., 2007, 'Modelling Land-Use change', The GeoJournal Library, p.1-22

- Kratochwil S., Benedikt J., 2005, 'Fuzzy Modeling with Spatial Information for Geographic Problems: Talking Space – A Social & Fuzzy Logical GIS Perspective On Modelling Spatial Dynamics', Springer-Verlag Berlin Heidelberg, p.159-284
- Krawczyk R.J., 2003, 'Architectural Interpretation of Cellular Automata', NKS 2003, Boston,
- Kuhlman T., Tabeau A., Gaaf A., Tongeren F., Dekkers J., 2005, 'Linking models in land use simulation: Application of the Land Use Scanner to changes in agricultural area', 45th Congress of the European Regional Science Association, Vrije Universiteit, Amsterdam
- Laha A., Pal N. R., Das J., 2006, 'Land Cover Classification Using Fuzzy Rules and Aggregation of Contextual Information Through Evidence Theory', IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing, vol.44, no.6, p.1633-1641
- Liu C.L, 1987, 'Elements of Discrete Mathematics', McGraw-Hill Inc,
- Liu Y., 2009, 'Modeling Urban Development with Geographical Information Systems and Cellular Automata', CRC PressTaylor & Francis Group
- Liu Y., Phinn S.R., 2001, 'Developing a Cellular Automaton Model of Urban Growth Incorporating Fuzzy Set Approaches', 6th International Conference on GeoComputation, University of Queensland, Brisbane, Australia,
- Liu Y., Phinn S.R., 2003, 'Modeling Urban Development With Cellular Automata Incorporating Fuzzy-Set Approaches', Computers, Environment and Urban Systems, vol.27, p.637-658
- Liu Z., George R., 2005, 'Fuzzy Modeling with Spatial Information for Geographic Problems: Mining Weather Data Using Fuzzy Cluster Analysis', Springer-Verlag Berlin Heidelberg, p.105-120
- Lowry I. S., 1964, 'A Model of Metropolis', Rm-4035-RC, Rand Corporation, Santa Monica, CA
- Lu J., Shu-Cherng F., 2001, 'Solving nonlinear optimization problems with fuzzy relation equation constraints', Fuzzy Sets and Systems, vol.119, p.1-20
- Luo X., Sen J., 2004, 'Cross-border Urban Growth: the Case of Jiangyin Economic Development Zone in Jingjiang', 15th Biennial Conference on the Asian Studies Association of Australia, Canberra
- Maes Ch., Shlosman S B., 1991, 'Ergodicity of probabilistic cellular automata: a constructive criterion', Communications in Mathematical Physics, vol.135, p.233-251
- Malczewski J., 2004, 'GIS-Based Land-Use Suitability Analysis: A Critical Overview', Progress in Planning, vol.62, p.3-65
- Malpica J. A., Alonso M. C., Sanz M. A., 2007, 'Dempster–Shafer Theory In Geographic Information Systems: A Survey', Expert Systems with Applications, vol.32, p.47-55

- Mamdani E. H., 1976, 'Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis', 6th international symposium on Multiple-valued logic - Logan, Utah, United States, p.196-202
- Mamei M., Roli A., Zambonelli F., 2003, 'Dissipative Cellular Automata As Minimalist Distributed Systems: A Study On Emergent Behaviors', IEEE Eleventh Euromicro Conference on Parallel, Distributed and Network-Based Processing, Genova, Italia
- Mantelas L., 2009, 'Urban Geometry: Utilizing Geometrical Attributes of Urban Shape', 12th AGILE International Conference on Geographic Information Science, Hannover, Germany
- Mantelas L., Hatzichristos Th., Prastacos P., 2007, 'A Fuzzy Cellular Automata Based Shell for Modeling Urban Growth – A Pilot Application in Mesogia Area', 10th AGILE International Conference on Geographic Information Science, Aalborg University, Denmark
- Mantelas L., Hatzichristos Th., Prastacos P., 2010, 'A Fuzzy Cellular Automata Modeling Approach – Accessing Urban Growth Dynamics in Linguistic Terms', ICCSA 2010, Part I, Lecture Notes on Computer Science 6016, Springer-Verlag Berlin Heidelberg , p. 140–151
- Mantelas L., Prastacos P., Hatzichristos Th., 2008, 'Modeling Urban Growth using Fuzzy Cellular Automata', 11th AGILE International Conference on Geographic Information Science, Girona, Spain
- Mantelas L., Prastacos P., Hatzichristos Th., Koutsopoulos K., 2010b, 'Using Fuzzy Cellular Automata to Access and Simulate Urban Growth', *GeoJournal*, *online first*
- Mantelas L., Prastacos P., Hatzichristos Th., Koutsopoulos K., 2011, 'A Linguistic Approach to Model Urban Growth', *International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems, Analysing, Modelling and Visualizing Spatial Environmental Data*, vol.3 no. 1-2
- Marshall A. (editor), 2007, 'The state of world population 2007 - Unleashing the Potential of Urban Growth', UNFPA - 2007
- Matsakis P., Nikitenko D., 2005, 'Fuzzy Modeling with Spatial Information for Geographic Problems: Combined Extraction of Directional and Topological Relationship Information from 2D Concave Objects', Springer-Verlag Berlin Heidelberg, p.15-40
- Meadows D., Randers J., Meadows D., 2005, 'Limits to Growth: The 30-year update', Bath Press - EarthScan
- Miller J. H., 2004, 'Tobler's First Law and Spatial Analysis', *Annals of the Association of American Geographers*, vol.94, no.2 p.284-289
- Miranda V, Monteiro C., 1999, 'Fuzzy Inference Applied to Spatial Load Forecasting', Power Tech '99 Conference, Budapest, Hungary

- Moraga C., 2004, 'Metasemantics to refine fuzzy if-then rules', 34th International Symposium on Multiple-Valued Logic (ISMVL'04)
- Mraz M., Zimic N., 1999, Intelligent bush fire spread prediction using fuzzy cellular automata, *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, vol.7, p.203-207,
- Mraz M., Zimic N., Lapanja I., Bajec I., 2000, 'Fuzzy Cellular Automata: From Theory To Applications', 12th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence, p.320-323
- Mulianat I., Hariadi Y., 2004, 'Urban Area Development in Stochastic Cellular Automata', *Urban/Regional EconWPA*
- Nedeljkovic I., 2006, 'Image classification based on fuzzy logic', *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Commission VI*, vol.34, pp.1-6, Part XXX.
- Ness G. D., Low M. M., 2000, 'Five Cities: Modeling Asian Urban Population-Environment Dynamics', Oxford University Press, p.43-67,
- Neumann, J., 1948, 'The General and Logical Theory of Automata', *Hixon Symposium on Cerebral Mechanisms in Behavior*, California Institute of Technology
- Ostrov D N, 1997, 'Continuous valued cellular automata for nonlinear wave equations', *Complex Systems*, vol.10 (1196), p.91-119
- Otoo E. A., Whyatt D. J., Ite U. E., 2006, 'Quantifying Urban Growth in Accra Metropolitan Area(Ama), Ghana and Exploring Causal Mechanisms', *England Promoting Land Administration and Good Governance*, 5th FIG Regional Conference Accra, Ghana
- Packard N. H., Wolfram S., 1985, 'Two-Dimensional Cellular Automata', *Journal of Statistical Physics*, vol.32, no.5/6, p.901-946
- Paden R., 2001, 'The two professions of Hippodamus of Miletus', *Philosophy and Geography*, vol.4, no.1 , p.25-48
- Parker D. C., Manson S. M., Janssen M. A., Hoffmann M. J., Deadman P., 2002, 'Multi-Agent Systems for the Simulation of Land-Use and Land-Cover Change: A Review', *Annals of the Association of American Geographers*, vol93, no.2 p.314-337
- Petry F. E., Robinson V. B., Cobb M. A., 2005, 'Fuzzy Modeling with Spatial Information for Geographic Problems', Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- Pontius G. R., Malanson J., 2005, 'Comparison of the structure and accuracy of two land change models', *International Journal of Geographical Information Science*, vol.19, vo.2, p.243-265

- Pontius R. G. Jr., Boersma W., Castella J. C., Clarke K., Nijs T., Dietzel Ch., Duan Z., Fotsing E., Goldstein N., Kok K., Koomen E., Lippitt C. D., McConnell W., Soo A. M., 2007, 'Comparing the input, output, and validation maps for several models of land change', *Annals of Regional Science*, vol.42, p.11-37
- Prastacos P., 1985, 'Urban development models for the San Francisco Region; from PLUM to POLIS', *Transportation Research Record*, 1046, p.37-44
- Prastacos P., 1986, 'An Integrated Land Use - Transportation Model for the San Francisco Region: 1. Design and Mathematical Structure', *Environment and Planning A*, vol.18, no.3, p.307-322
- Prastacos P., 1986, 'An Integrated Land Use - Transportation Model for the San Francisco Region: 2. Empirical Estimation', *Environment and Planning A*, vol.18, no.3, p.511-528
- Reich R. M., Czaplewski R. L., Bechtold W., 1994, 'Spatial cross-correlation of undisturbed, natural shortleaf pine stands in northern Georgia', *Forest Science*, vol.40, p.314-328
- Sanders P., Sanders F., 2004, 'Spatial urban dynamics. A vision on the future of urban dynamics: Forrester revisited', 22nd International System Dynamics Conference, Oxford, England
- Sasikala K. R., Petrou M., 2001, 'Generalised Fuzzy Aggregation in Estimating the Risk of Desertification of a Burned Forest', *Fuzzy Sets and Systems*, vol.118, no.1, p.121-137
- Setnes M., Babuska R., Verbruggen H. B., 1998a, 'Transparent Fuzzy Modeling', *Human & Computer Studies*, vol.49, p.159-179
- Setnes M., Babuska R., Verbruggen H. B., 1998b, 'Rule-Based Modeling: Precision and Transparency', *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics – Part C: Applications and Reviews*, vol.28, p.165-169
- Shafer G., 1990, 'Perspectives on the Theory and Practice of Belief Functions', *International Journal of Approximate Reasoning*, vol.3, p.1-40
- Silva E. A., Clarke C. K., 2005, 'Complexity, Emergence and Cellular Urban Models: Lessons Learned from Applying Sleuth to Two Portuguese Metropolitan Areas', *European Planning Studies*, vol.13, no.1, p.93-116
- Sklar F. H., Costanza R., 1991, 'The development of dynamic spatial models for landscape ecology: A review and prognosis', *Quantitative Methods in Landscape Ecology*, Springer-Verlag, New York, p.239-288
- Stefanakis E., Vazirgiannis M., Sellis T., 1996, 'Spatial Decision Making Based on Fuzzy Set Methodologies', *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, XVIII ISPRS Congress, Vienna*

- Stocks C. E., Wise S., 2000, 'The Role of GIS in Environmental Modelling', *Geographical & Environmental Modelling*, vol.4, no.2, p.219-235
- Stumme G., 2002, 'Conceptual Structures: Integration and Interfaces - Formal Concept Analysis on its Way from Mathematics to Computer Science', Springer Berlin / Heidelberg, p.2-19
- Sugeno M., Kang G., 1986, 'Structure Identification of Fuzzy Model', *Fuzzy Sets and Systems*, vol.28, p.329-346
- Symeonakis E., Karathanasis N., Fyrbyb S., Gatsisa I. , 'Mapping post Olympics urban use change in the periphery of Athens using multi-temporal pixel based and segmentation techniques', *The international Archives of the Photogrammetry, Remote sensing and spatial information sciences*, vol. XXXVII, part B7, Beijing 2008
- Syphard A. D., Clarke K. C., Franklin J., 2005, 'Using a cellular automaton model to forecast the effects of urban growth on habitat pattern in southern California', *Ecological Complexity*, vol2, p.85–203
- Takagi T., Sugeno M., 1985, 'Fuzzy Identification on Systems and its Applications to Modeling and Control', *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybern.*, vol.15, p.116-132
- Takemura C. M., Cesar R. Jr., Bloch I., 2005, 'Fuzzy Modeling and Evaluation of the Spatial Relation "Along" in Progress in Pattern Recognition', *Image Analysis and Applications*, vol.3773, p.837-848
- Thomas R. W., uggett R. J., 1980, 'Modelling in geography: a mathematical approach', New Hersey: Barnes & Noble Books.
- Tobler W., 1970, 'A computer movie simulating urban growth in the Detroit region', *Economic Geography*, vol.46, p.234.240
- Tobler W., 1979, 'Cellular Geography', *Philosophy in Geography*, S. Gale & G. Olsson, eds., Dordrecht, Netherlands, Reidel, p.379-386
- Torrens, P. M., 2003, 'Automata Based Models of Urban Systems', *Advanced Spatial Analysis*, ch.4, p.61-79
- Torrens P.M., Benenson I., 2005, 'Geographic Automata Systems', *Geographical Information Science*, vol. 19, no.4, p.385–412
- Vancheri A., Giordano P., Andrey D., Albeverio S., 2004, 'A Model for Urban Growth Processes with Continuum State Cellular Automata and related Differential Equations', <http://ssrn.com/abstract=633969>

- Vichiensan V., Sato K., Miyamoto K., Kitazume K., 2003, 'Introduction of land use model to improve travel demand forecasting in a metropolitan area: a case of Transus application to Sapporo', *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, vol.5, October, p.2863-2871
- Vilet J., White R., Dragicevic S., 2008, 'Modeling urban growth using a variable grid cellular automaton', *Computers, Environment and Urban Systems*, vol.33, no.1, p.35-43
- Verburg P., Soepboer W., Veldkamp A., Limpiada R., Espaldon V., Mastura S., 2002, 'Modeling the Spatial Dynamics of Regional Land Use: The CLUE-S Model', *Environmental Management*, vol.30, no 3, p.391-405
- von Thunen J. H., 1826, 'Der Isolierte Staat' (Μετάφραση στα Αγγλικά από Wartenberg C. M., 1966, ' von Thunen's Isolated State', Oxford: Pergamon Press) – εντός (Liu 2009)
- Waddell P., 2004, 'Introduction To Urban Simulation: Design And Development Of Operational Models', *Handbook in Transport, Transport Geography and Spatial Systems*, Pergamon Press
- Webster Ch., Wu F., 2001, 'Coarse, Spatial Pricing and Self-organising Cities', *Urban Studies*, vol.38, no.11, p.2037-2054
- Wegener M., 1985, 'The Dortmund housing market model: a Monte Carlo simulation of a regional housing market', *Microeconomic Models of Housing Markets, Lecture Notes in Economic and Mathematical Systems*, Berlin: Springer Verlag, vol.239, p.144-191
- White R., Engelen G., 1993, 'Cellular automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land-use', *Environment and Planning A*, vol.25, p.75-99 – εντός .liu 2009
- White R., Engelen G., Uljee I., Lavallo C., Ehrlich D., 2000, 'Developing an Urban Land Use Simulator for European Cities', 5th EC GIS Workshop: GIS of Tomorrow, p.179-190
- Witlox F., Derudder B., 2005, 'Spatial Decision-Making Using Fuzzy Decision Tables: Theory, Application and Limitations', *Fuzzy Modeling with Spatial Information for Geographic Problems*, p.253-274
- Wolfram S., 1984, 'Cellular Automata as Models of Complexity', *Nature*, vol.311, p.419-424
- Wolfram S., 1984b, 'Computation Theory of Cellular Automata', *Communications in Mathematical Physics*, vol.96, p.15-57
- Wolfram S., 1984c, 'Computer Software in Science and Mathematics', *Scientific American*, September, p.188-203
- Wolfram S., 1984d, 'Universality and complexity in cellular automata', *Physica D*, vol.10, p.1-35
- Wolfram S., 2002, 'A new kind of science', Wolfram Media

- Wu F., 1996, 'A Linguistic Cellular Automata Simulation Approach for Sustainable Land Development in a Fast Growing Region', *Computer, Environment and Urban Systems*, vol.20, no.6, p.367-387
- Wu F., 1998, 'Simulating Urban Encroachment on Rural Land with Fuzzy-Logic-Controlled Cellular Automata in a Geographical Information System', *Journal of Environmental Management*, vol.53, p.293-308
- Wu F., 2002, 'Calibration of Stochastic Cellular Automata: the Application to Rural-Urban Land Conversions', *Geographical Information Science*, vol.16, no.8, p.795-818
- Yacoub S. El., 2008, 'A mathematical method for control problems on cellular automata models', *International Journal of Systems Science*, vol.39, no.5, p.529-538
- Yeh A. G.O., Li X., 2003, 'Error Propagation and Model Uncertainties of Cellular Automata in Urban Simulation with GIS', 7th International Conference on GeoComputation University of Southampton, United Kingdom
- Zadeh L. A., 1965, 'Fuzzy Sets', *Information and Control*, no.8, p.338-353
- Zadeh L. A., 1975, 'Fuzzy Logic and Approximate reasoning', *Synthese*, vol.30, p.407-428
- Zadeh L. A., 1977, 'Linguistic Characterization of Preference Relations as Basis for Choice in Social Systems', *Erkenntnis*, vol.11, p.383-410
- Zadeh L. A., 1986, 'A Simple View of the Dempster-Shafer Theory of Evidence and its Implication for the Rule of Combination', *AI Magazine*, vol.7, no.2, p.85-90
- Zadeh L. A., 1993, 'Fuzzy Logic', *Journal of Intelligent Information Systems*, vol.2, p.309-310
- Zadeh A. L., 2006, 'Generalized Theory of Uncertainty (GTU)', *Principal Concepts and Ideas Advances in Soft Computing*, p.3-4
- Zuse K., 1967, 'Rechnender Raum', *Elektronische Datenverarbeitung*, vol.8 - p.336-344
- Zuse K., 1970, 'Calculating Space', Cambridge, Mass

Σύνδεσμοι Ιστοσελίδων

Web5.1 www.riks.nl

Web6.1 <http://www.jcasim.de/>

Web6.2 <http://www.renard.org/alife/english/logicellgb.html>

Web6.3 <http://www.fourmilab.ch/cellab/>

Web6.4 <http://www.mathworks.com/products/fuzzylogic/>

Web6.5 <http://www.ortech-engr.com/fuzzy/fzyclips.html>

Web6.6 <http://www.dataengine.de/english/sp/index.htm>

Web6.7 <http://www.bloodshed.net/>

Web6.8 <http://www.mingw.org/>