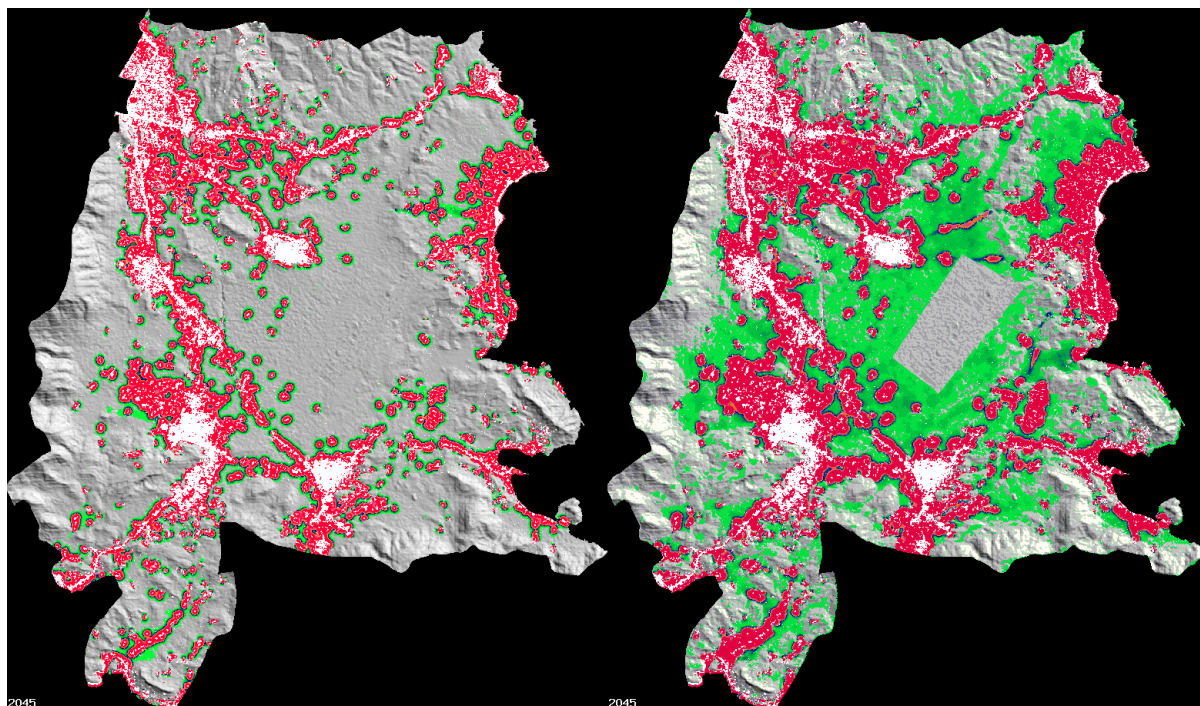




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΞΑΠΛΩΣΗΣ
ΑΣΤΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΥΨΕΛΟΕΙΔΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΩΝ:
Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΩΝ ΜΕΣΟΓΕΙΩΝ ΑΤΤΙΚΗΣ»**



Εκπόνηση:
Στέλιος Μαθιουλάκης

Επιβλέπων:
Γεώργιος Ν. Φώτης, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2015

Αφιερωμένη στους γονείς μου,

Στάυρο και Όλγα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί το τελευταίο κομμάτι μίας σκληρής προπτυχιακής ακαδημαϊκής πορείας και ως τέτοιο κατέχει ιδιαίτερη σημασία και αξία. Έτσι, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους όσους με στήριξαν στην προσπάθεια αυτή. Ευχαριστώ, καταρχάς, τον Αναπληρωτή Καθηγητή Γεώργιο Φώτη που μου εμπιστεύθηκε την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς επίσης και για την συνεχή του υποστήριξη καθ'όλη την διάρκεια αυτής. Επίσης, ευχαριστώ τον Δρ. Πολ Κολοκούση και τον Λέκτορα Κωνσταντίνο Καράντζαλο από το Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης για τις κρίσιμες συμβουλές τους κατά το στάδιο συλλογής των δεδομένων. Οφείλω να ευχαριστήσω τον φίλο και συμφοιτητή Νίκο Καμζέλα για την προθυμία που έδειξε στην αντιμετώπιση ζητημάτων που αφορούσαν στην διαχείριση των εικόνων κατά το αρχικό στάδιο προεπεξεργασίας των δεδομένων. Ευχαριστώ τον Luca Congedo, Μηχανικό Περιβάλλοντος, για το χρήσιμο plugin αυτόματης ταξινόμησης δορυφορικών εικόνων που έχει δημιουργήσει καθώς και για την βοήθεια που παρείχε στις όποιες τεχνικές δυσκολίες παρουσιάστηκαν κατά τη χρήση του. Τελευταία, αλλά εξίσου ιδιαίτερα ευχαριστώ τον κ. Keith Clarke, κύριο εμπνευστή και δημιουργό του μοντέλου αστικής ανάπτυξης SLEUTH το οποίο και διέθεσε ως ένα open-source πρόγραμμα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία μελετά το φαινόμενο της αστικής διάχυσης διαχρονικά καθώς αποτελεί ιδιαίτερα ενδιαφέρον αντικείμενο έρευνας εδώ και δεκαετίες, στην ερευνητική περιοχή της πολεοδομίας, της χωροταξίας, της γεωγραφίας και της χωρικής ανάλυσης. Κίνητρο για την ανάπτυξη και αστικών μοντέλων αποτέλεσε η ανάγκη για πρόβλεψη και εκτίμηση της δυναμικής της αστικής ανάπτυξης. Στο πλαίσιο αυτό, μέσω της συνδυαστικής χρήσης του μοντέλου αστικής ανάπτυξης SLEUTH, ενός Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών (ΓΣΠ) αλλά και μεθόδων ψηφιακής τηλεπισκόπησης, μοντελοποιήθηκε η αστική ανάπτυξη, με σκοπό να εκτιμηθούν οι μελλοντικές τάσεις εξάπλωσης του αστικού ιστού. Ως περιοχή μελέτης επιλέχθηκε η ευρύτερη περιοχή της Ανατολικής Αττικής και συγκεκριμένα οι δήμοι Παλλήνης, Ραφήνας-Πικερμίου, Σπατών-Αρτέμιδας, Μαρκοπούλου Μεσογαίας, Κρωπίας και Παιανίας. Οι δήμοι αυτοί είναι γνωστοί ως Μεσόγεια και τα όριά τους θεωρήθηκαν σύμφωνα με τους νέους κανονισμούς του σχεδίου Καλλικράτης που τέθηκε σε ισχύ το 2011. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν ιστορικά στιγμιότυπα σε εύρος ετών από το 1984 μέχρι το 2015, ως δεδομένα εισαγωγής στο μοντέλο. Στο πλαίσιο εφαρμογής του μοντέλου μελετήθηκε η επίδραση των δύο επικρατέστερων μεθόδων βαθμονόμησής του στο τελικό στάδιο πρόβλεψης. Παράλληλα, η συμβολή των ΓΣΠ, για την προεπεξεργασία και διαχείριση των πρωτογενών δεδομένων, όπως δορυφορικές εικόνες και ψηφιακά μοντέλα εδάφους, την μελέτη και ανάλυση των παρατηρούμενων προτύπων της αστικής ανάπτυξης αποδείχθηκε ιδιαίτερα σημαντική και απολύτως απαραίτητη αναδεικνύοντας τα οφέλη που μπορούν να αποκομιστούν με την συνδυαστική χρήση ενός ΓΣΠ και ενός μοντέλου αστικής ανάπτυξης, όπως είναι το SLEUTH.

Λέξεις Κλειδιά: Κυψελοειδή Αυτόματα, μοντέλο SLEUTH, αστική διάχυση, χωρική μοντελοποίηση, ΓΣΠ

ABSTRACT

This thesis reviews the effect of the urban sprawl phenomenon throughout history, given the fact that it is an intriguing subject in the research field of urban and regional planning, geography and spatial analysis. The driving force behind such scientific research endeavors is the need to forecast and assess the dynamics of urban expansion. In this frame, by combining the urban growth model SLEUTH, a Geographic Information System (GIS) and methods of digital remote sensing, the forecast and prediction of urban growth was made possible. As case study, the greater area of Eastern Attica was designated, which includes the municipalities of Pallini, Rafina-Pikermi, Spata-Artemida, Markopoulo Mesogeas, Koropi and Peania. This agglomeration of municipalities is known as Mesogia and their boundaries derived from the latest regulations of Kallikrates Project that came into force in 2011. For this cause, a variety of historical instances, covering the period between 1984 and 2015, were used as model input. During the application of the model, the effect of the two predominant calibration methods, on the outcome of the prediction phase, was examined. Additionally, the contribution of GIS to the preprocessing and managing of primordial data, such as satellite imagery and digital elevation models, was proven especially useful and definitely necessary, pointing out the benefits of such a concurrent use of a GIS and an urban growth model, such as SLEUTH.

Keywords: Cellular Automata, SLEUTH model, urban sprawl, spatial modeling, GIS

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	1
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	2
ABSTRACT.....	3
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	4
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	9
1. ΑΣΤΙΚΗ ΔΙΑΧΥΣΗ.....	13
1.1. Ιστορική Εξέλιξη.....	13
1.2. Αιτίες της Αστικής Διάχυσης.....	22
1.3. Τύποι Αστικής Διάχυσης.....	24
1.4. Επιπτώσεις της Αστικής Διάχυσης.....	26
2. ΜΟΝΤΕΛΑ ΑΣΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ.....	28
2.1. Χρησιμότητα των Αστικών Μοντέλων.....	29
2.2. Θεωρητικές Προσεγγίσεις των Αστικών Μοντέλων.....	30
2.3. Τεχνικές και Μέθοδοι Μοντελοποίησης.....	33
2.4. Κυψελοειδή Αυτόματα (Cellular Automata).....	34
2.4.1. Χαρακτηριστικά ενός κυψελοειδούς αυτομάτου.....	35
2.4.2. Το παιχνίδι της ζωής του Conway (Conway's game of life).....	37
2.5. Το Μοντέλο SLEUTH.....	39
3. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	43
3.1. Η Επιλογή της Περιοχής Μελέτης.....	43
3.2. Πληθυσμιακά Στοιχεία.....	45
4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ SLEUTH ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	47
4.1. Μεθοδολογία.....	47
4.2. Συλλογή Πρωτογενών Δεδομένων.....	50
4.2.1. Κλίση (Slope) - Σκίαση αναγλύφου (Hillshade).....	51
4.2.2. Οδικό δίκτυο (Transportation).....	55
4.2.3. Επίπεδο αστικής γης (Urban).....	57

4.2.4. Επίπεδο εξαιρουμένων περιοχών.....	60
4.3. Εγκατάσταση του Μοντέλου SLEUTH.....	61
4.4. Βαθμονόμηση κατά Lee-Sallee	61
4.4.1. Επιλογή παραμέτρων στο στάδιο coarse calibration	64
4.4.2. Επιλογή παραμέτρων στο στάδιο fine calibration	65
4.4.3. Επιλογή παραμέτρων στο στάδιο final calibration	66
4.4.4. Τελικό στάδιο βαθμονόμησης-derive coefficient values.....	67
4.5. Βαθμονόμηση κατά Optimum SLEUTH Metric (OSM).....	68
4.5.1. Επιλογή παραμέτρων στο στάδιο coarse calibration	68
4.5.2. Επιλογή παραμέτρων στο στάδιο fine calibration	69
4.5.3. Επιλογή παραμέτρων στο στάδιο final calibration	70
4.5.4. Τελικό στάδιο βαθμονόμησης-derive coefficient values.....	71
4.6. Σύγκριση των βαθμονομήσεων κατά Lee-Sallee και κατά OSM.....	72
4.7. Στάδιο Πρόγνωσης του Μοντέλου SLEUTH	75
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	79
6. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	83
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	84

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1-1: Περιοχές όπου εδράζονταν οι αρχαιότεροι πολιτισμοί.....	14
Εικόνα 1-2: Το μοντέλο των Park, Burgess και McKenzie.....	17
Εικόνα 1-3: Το μοντέλο του Hoyt	18
Εικόνα 1-4: Το μοντέλο των Harris και Ullman.....	19
Εικόνα 1-5: Πρότυπα αστικής διάχυσης.....	25
Εικόνα 2-1: Παράδειγμα μονοδιάστατου κυψελοειδούς αυτόματου και κανόνα μετάβασης .	35

Εικόνα 2-2: Γειτονιά Von Neumann και γειτονιά Moore.....	36
Εικόνα 2-3: Αυθαίρετο παράδειγμα εφαρμογής του game of life.....	38
Εικόνα 3-1: Η θέση της περιοχής μελέτης.....	43
Εικόνα 3-2: Σύγκριση αστικής γης Ανατολικής και δυτικής Αττικής, μέσα από δορυφορική εικόνα από Landsat 8 σε σύνθετο καναλιών 7-6-4.....	44
Εικόνα 3-3: Εξέλιξη πραγματικού πληθυσμού την περίοδο 1961-2011.....	46
Εικόνα 4-1: Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας της εργασίας.....	49
Εικόνα 4-2: Απαιτούμενα επίπεδα πληροφορίας εισόδου για το μοντέλο SLEUTH.....	51
Εικόνα 4-3: Σύγκριση των μεθόδων resampling, όπου φαίνονται με κόκκινο χρώμα τα pixel με τιμή κλίσης πάνω από 21%.....	53
Εικόνα 4-4: Επίπεδο κλίσεων έπειτα από bilinear resampling.....	54
Εικόνα 4-5: Επίπεδο σκίασης αναγλύφου.....	55
Εικόνα 4-6: Οδικό δίκτυο για τα έτη 1984 και 2015 μέσα από φωτοερμηνεία.....	56
Εικόνα 4-7: Εικόνα της περιοχής μελέτης το 1984 σε σύνθετο 4-3-2 (αριστερά) και το αποτέλεσμα της αυτόματης ταξινόμησης (δεξιά).....	57
Εικόνα 4-8: Εικόνα της περιοχής μελέτης το 1995 (αριστερά) και το αποτέλεσμα της αυτόματης ταξινόμησης (δεξιά).....	58
Εικόνα 4-9: Εικόνα της περιοχής μελέτης το 2003 (αριστερά) και το αποτέλεσμα της αυτόματης ταξινόμησης (δεξιά).....	59
Εικόνα 4-10: Εικόνα της περιοχής μελέτης το 2015 (αριστερά) και το αποτέλεσμα της αυτόματης ταξινόμησης (δεξιά).....	60
Εικόνα 4-11: Εξαιρούμενες περιοχές από την αστικοποίηση (άσπρο χρώμα).....	60
Εικόνα 4-12: Απόσπασμα του σεναρίου του fine calibration κατά Lee-Sallee.....	65
Εικόνα 4-13: Απόσπασμα του σεναρίου final calibration κατά Lee-Sallee.....	66
Εικόνα 4-14: Απόσπασμα του σεναρίου derive coefficient values κατά Lee-Sallee.....	67

Εικόνα 4-15: Απόσπασμα του σεναρίου fine calibration κατά OSM.....	69
Εικόνα 4-16: Απόσπασμα του σεναρίου final calibration κατά OSM.....	70
Εικόνα 4-17: Απόσπασμα του σεναρίου derive coefficient values κατά OSM.....	71
Εικόνα 4-18: Διαγράμματα συμπεριφοράς των παραμέτρων βαθμονόμησης κατά Lee-Sallee	74
Εικόνα 4-19: Διαγράμματα συμπεριφοράς των παραμέτρων βαθμονόμησης κατά OSM	75
Εικόνα 4-20: Αρχική αστική γη, τάση εξέλιξης το 2045 κατά Lee-Sallee και τάση εξέλιξης κατά OSM.....	77
Εικόνα 5-1: Περιοχές μελλοντικής αστικοποίησης με πιθανότητα πάνω από 60% κατά Lee- Sallee (αριστερά) και κατά OSM (δεξιά).....	80
Εικόνα 5-2: Τάσεις αστικοποίησης για το Κορωπί κατά Lee-Sallee (αριστερά) και κατά OSM (δεξιά)	81
Εικόνα 5-3: Τάσεις αστικοποίησης για τον Γέρακα, τα Γλυκά Νερά και την Παλλήνη κατά Lee-Sallee (αριστερά) και κατά OSM (δεξιά)	81
Εικόνα 5-4: Τάσεις αστικοποίησης για την Αρτέμιδα κατά Lee-Sallee (αριστερά) και κατά OSM (δεξιά).....	82

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1-1: Πληθυσμός Αμερικανικών πόλεων την περίοδο 1970-2010	20
Πίνακας 4-1: Αποτελέσματα του coarse calibration κατά Lee-Sallee.....	64
Πίνακας 4-2: Αποτελέσματα του fine calibration κατά Lee-Sallee.....	65
Πίνακας 4-3: Αποτελέσματα του final calibration κατά Lee-Sallee.....	66
Πίνακας 4-4: Απόσπασμα από το αρχείο avg.log κατά Lee-Sallee.....	67
Πίνακας 4-5: Τελικές παράμετροι της βαθμονόμησης κατά Lee-Sallee	68
Πίνακας 4-6: Αποτελέσματα του coarse calibration κατά OSM	69

Πίνακας 4-7: Αποτελέσματα του fine calibration κατά OSM	69
Πίνακας 4-8: Αποτελέσματα του final calibration κατά OSM	70
Πίνακας 4-9: Απόσπασμα από το αρχείο avg.log κατά OSM	71
Πίνακας 4-10: Τελικές παράμετροι της βαθμονόμησης κατά OSM.....	71
Πίνακας 4-11: Πλήθος pixel ανάλογα με την πιθανότητα αστικοποίησης για τις δύο προσομοιώσεις.....	78

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 4-1: Διάρκεια κάθε σταδίου βαθμονόμησης.....	72
--	----

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αστική διάχυση (urban sprawl), είναι αδιαμφισβήτητα ένα παγκόσμιο φαινόμενο που απασχολεί εδώ και αιώνες τον πλανήτη καθώς εκφράζει τις διαδικασίες και τα πρότυπα κατά τα οποία ο αστικός ιστός εξαπλώνεται, δημιουργώντας επιπτώσεις στο περιβάλλον, στην οικονομία και στην κοινωνία. Η διαχρονική αύξηση του πληθυσμού σε παγκόσμιο επίπεδο υποδηλώνει τον κρίσιμο μόνιμο αντίκτυπο της αυξανόμενης αστικής διάχυσης και καθιστά επιτακτική την ανάγκη διαχείρισης ανάλογων φαινομένων, τόσο για τη μελέτη των προτύπων της διάχυσης, όσο και για την πρόγνωση της μελλοντικής τους επίδρασης, την αξιολόγηση μελλοντικών σχεδίων και παρεμβάσεων στον χώρο καθώς και την αναγνώριση περιοχών φυσικού κάλλους που τίθενται σε κίνδυνο από την αστική διάχυση. Η αστική διάχυση προκαλεί αλληλεπιδράσεις στις παρακείμενες χρήσεις γης επηρεάζοντας ακολούθως και τις δραστηριότητες των ανθρώπων σε αυτές. Για παράδειγμα, η αγροτική γη αποτελεί ανταγωνιστική χρήση γης με την κατοικία καθώς παραδοσιακά αυτές οι δύο χρήσεις γης σπάνια απαντώνται σε παρακείμενες και όμορες εκτάσεις. Είναι γεγονός πως κάθε διαδικασία παρέμβασης στον χώρο απαιτεί την καταγραφή της υφιστάμενης κατάστασης η οποία αποτελεί τον “καμβά” πάνω στον οποίο σχεδιάζουμε και έπειτα την προβολή αυτής ώστε να προκύψουν μελλοντικές εικόνες μέσα από τις επιπτώσεις των τάσεων εξέλιξης που καταγράφονται. Η χρήση κατάλληλων μοντέλων για την προσομοίωση της αστικής διάχυσης είναι ένα από τα εργαλεία που μπορούν να αξιοποιηθούν αναφορικά με τη βιώσιμη διαχείρισή της και θεωρείται πλέον ως μια άμεση επέκταση της διαδικασίας λήψης αποφάσεων.

Οι πρώτες προσπάθειες ανάπτυξης τέτοιων μοντέλων ήσαν άκαρπες καθότι τα εν λόγω μοντέλα ήταν μη ακριβή εξαιτίας των απλοϊκών παραδοχών που όριζαν στην προσπάθειά τους να μοντελοποιήσουν την πολυπλοκότητα των χωρικών διεργασιών που κινούν την αστική διάχυση. Παρά τις παλαιότερες αστοχίες στην αστική μοντελοποίηση, οι

τελευταίες δύο δεκαετίες έχουν χαρακτηριστεί από μια αναγέννηση σε αυτό τον τομέα, μέσα από μία πληθώρα μοντέλων που έχουν αναπτυχθεί κυρίως από ακαδημαϊκούς κύκλους, η οποία εκτός των άλλων σχετίζεται με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των υπολογιστών και τη διαθεσιμότητα χωρικών δεδομένων υψηλής ποιότητας. Τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν την περίοδο αυτή εμφανίζουν μεγάλες δυνατότητες στην αναπαράσταση και προσομοίωση της πολυπλοκότητας των δυναμικών διαδικασιών της αστικής διάχυσης και παρέχουν ένα επιπρόσθετο επίπεδο γνώσης και κατανόησης των χωρικών και χρονικών αλλαγών. Καθώς όμως η επιτυχία ενός μοντέλου εξαρτάται από την ικανότητά του να προσαρμοστεί στις τοπικές ιδιαιτερότητες και χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος που προσομοιώνει, η διαδικασία της βαθμονόμησης, δηλαδή της επιλογής του κατάλληλου συνδυασμού των παραμέτρων του μοντέλου, ώστε να μοντελοποιηθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια τα πραγματικά πρότυπα, είναι ίσως το σημαντικότερο στάδιο της όλης διαδικασίας.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εκτίμηση της αστικής διάχυσης μέσω ενός μοντέλου αστικής ανάπτυξης που βασίζεται στην θεωρία των κυψελοειδών αυτομάτων (cellular automata). Πιο συγκεκριμένα, η εργασία στοχεύει στην παρουσίαση και την εφαρμογή μιας μεθοδολογίας μέσω της συνδυαστικής χρήσης των αστικών μοντέλων και των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (ΓΣΠ), προκειμένου να μελετηθεί το φαινόμενο της αστικής διάχυσης με απώτερο στόχο τη μοντελοποίηση και πρόγνωση της δομής δυναμικών φαινομένων που εξελίσσονται χωρικά και χρονικά. Ως περιοχή μελέτης επιλέχθηκε η ευρύτερη περιοχή της Ανατολικής Αττικής, γνωστή με την ονομασία Μεσόγεια, για την οποία διερευνήθηκε το φαινόμενο της διάχυσης χρησιμοποιώντας ιστορικά δεδομένα από το 1984 έως το 2015. Έτσι, χρησιμοποιώντας ως έτος εκκίνησης το τελευταίο έτος της βαθμονόμησης (2015), το μοντέλο εκτελείται στη λειτουργία πρόγνωσης (predict), για μια περίοδο τριάντα ετών, δηλαδή έως το έτος 2045. Επιπρόσθετα, η εργασία στοχεύει στην παρουσίαση των δύο δημοφιλέστερων μεθόδων

βαθμονόμησης του μοντέλου, καθότι το ζήτημα της βέλτιστης μεθόδου βαθμονόμησης παραμένει αμφιλεγόμενο, χωρίς να επικρατεί μία μόνο αποδεκτή μέθοδος που επιφέρει βέλτιστα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, συγκρίνονται οι υπολογιστικοί χρόνοι για κάθε στάδιο της βαθμονόμησης (coarse, fine και final) καθώς και τα τελικά αποτελέσματα πρόβλεψης της διάχυσης ανάμεσα στις μεθόδους Lee-Sallee και Optimum SLEUTH Metric (OSM). Οι δύο μέθοδοι παρουσιάζονται και επεξηγούνται αναλυτικά σε επόμενα κεφάλαια.

Για τη μοντελοποίηση της διάχυσης γίνεται χρήση μιας κατηγορίας αστικών μοντέλων, τα οποία βασίζονται στην θεωρία των κυψελοειδών αυτομάτων και πιο συγκεκριμένα του μοντέλου αστικής ανάπτυξης SLEUTH. Το μοντέλο αυτό δημιουργήθηκε από τον καθηγητή Keith Clarke, αποτελεί λογισμικό “ανοιχτού κώδικα” (open-source) και μέχρι σήμερα έχει εφαρμοστεί σε πληθώρα αστικών περιοχών ανά τον κόσμο. Τα κυψελοειδή αυτόματα είναι κατά βάση μοντέλα που τα δομικά τους στοιχεία χαρακτηρίζονται από απλότητα, ωστόσο, η αλληλεπίδρασή αυτών των στοιχείων είναι ικανή να προσομοιώσει πολύπλοκα συστήματα. Βασίζονται, ακόμα, στην αντίληψη ότι οι χρήσεις γης είναι χωρικά αλληλοσυσχετιζόμενες κι ότι οι οποιοσδήποτε αλλαγές επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό τις όμορες σε σχέση με τις πιο απομακρυσμένες χρήσεις.

Ένας από τα βασικά στάδια της παρούσας εργασίας είναι καταρχάς η συλλογή των πρωτογενών δεδομένων, τα οποία κατόπιν κατάλληλης επεξεργασίας θα αποτελέσουν τα δεδομένα εισαγωγής στο μοντέλο αστικής ανάπτυξης SLEUTH. Για την επίτευξη του στόχου αυτού καθίσταται ιδιαίτερης σημασίας η συνδυαστική χρήση των ΓΣΠ, ως εργαλείων ενσωμάτωσης, επεξεργασίας και οπτικοποίησης των δεδομένων. Το απαιτητικότερο και πιο χρονοβόρο στάδιο της εργασίας ήταν το αρχικό, δηλαδή η εύρεση και συλλογή των πρωτογενών δεδομένων που απαιτούνται ως είσοδοι στο μοντέλο SLEUTH αλλά και η περαιτέρω επεξεργασία τους ώστε να συνάδουν με την μορφή που απαιτεί το μοντέλο.

Τα εξαγόμενα από το στάδιο της πρόγνωσης μπορούν να αποτελέσουν ένα χρήσιμο εργαλείο στο χωρικό σχεδιασμό, αφού αφενός υποδεικνύονται οι πιθανότερες θέσεις των υψηλότερων τάσεων της αστικής διάχυσης, ενώ ταυτόχρονα παρέχεται η δυνατότητα βιώσιμης διαχείρισής της, μέσω προληπτικών μέτρων που δύναται να ληφθούν γνωρίζοντας εκ των προτέρων τις τάσεις αυτές άρα και τις επιπτώσεις που θα έχουν στον χώρο. Παράλληλα, στα πλαίσια του χωροταξικού σχεδιασμού το μοντέλο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και για την αξιολόγηση σεναρίων, δηλαδή διακριτών μελλοντικών εικόνων οι οποίες έχουν στόχο να αναδείξουν ενδεχόμενες αδυναμίες και προβλήματα, επανατροφοδοτώντας την διαδικασία σχεδιασμού.

Η εργασία αποτελείται από έξι κεφάλαια. Το πρώτο κεφάλαιο αφορά την αστική διάχυση παρέχοντας γενικές πληροφορίες για την εξέλιξή της ως έννοια, το δεύτερο κεφάλαιο αφορά τα μοντέλα αστικής ανάπτυξης, το τρίτο κεφάλαιο περιγράφει την περιοχή μελέτης, το τέταρτο κεφάλαιο περιγράφει την εφαρμογή του μοντέλου στην περιοχή μελέτης και τα δύο τελευταία κεφάλαια αφορούν τα συμπεράσματα της εφαρμογής και προτάσεις για βελτίωσή του.

1. ΑΣΤΙΚΗ ΔΙΑΧΥΣΗ

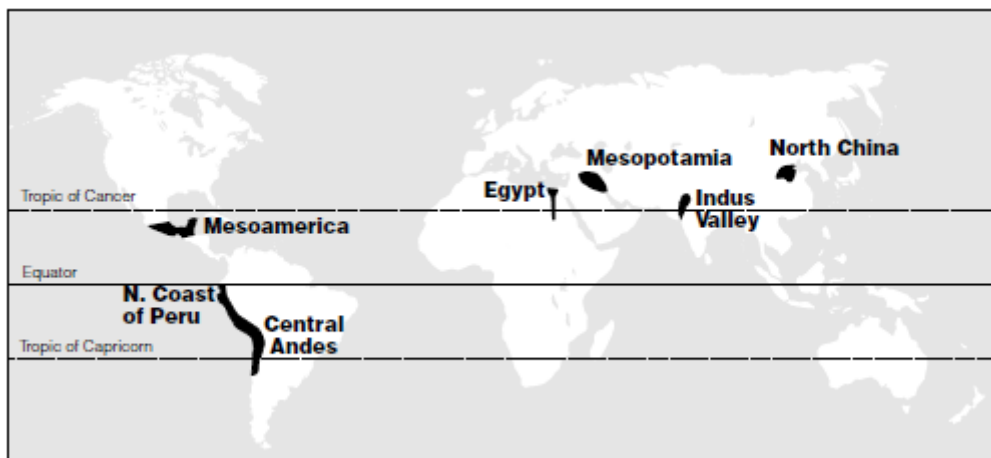
Η συγκεκριμένη ενότητα αφορά την αστική διάχυση ως διαχρονικό φαινόμενο και μελετάται βιβλιογραφικά η σημαντικότητα, τα είδη και οι επιπτώσεις του όπως αυτές έχουν καταγραφεί από διάφορους ερευνητές. Η πρώτη ενότητα αναφέρεται στην διαχρονική εξέλιξη του φαινομένου, από τα πρώτα δείγματα ανθρώπινης συνύπαρξης μέχρι τη σύγχρονη εποχή. Η δεύτερη ενότητα αφορά τις διάφορες αιτίες της αστικής διάχυσης. Η τρίτη ενότητα περιγράφει τα διάφορα είδη αστικής διάχυσης. Τέλος, η τέταρτη ενότητα αναφέρεται στις επιπτώσεις της διάχυσης στο περιβάλλον, τους φυσικούς πόρους, την κοινωνία και την οικονομία.

1.1. Ιστορική Εξέλιξη

Πριν αναφερθεί κανείς στο φαινόμενο της αστικής διάχυσης, είναι απαραίτητο να κάνει αναφορά στο φαινόμενο “πόλη” ως έννοια και οντότητα. Οι πόλεις από την ίδρυσή τους, παρουσιάζουν σταδιακή και αποσπασματική αλλαγή μέσω διαδικασιών μεγέθυνσης, προσθήκης ή κατεδάφισης. Αυτή η αλλαγή μπορεί να θεωρηθεί κατα κύριο λόγο επιφανειακή ενώ οι καταρχήν διαδικασίες που ορίζουν την αστικοποίηση και την γενική δομή μίας πόλης παραμένουν αναλλοίωτες. Ωστόσο, σε ορισμένες περιόδους, θεμελιωδώς διαφορετικές διαδικασίες αστικοποίησης έχουν έρθει στο φως, με αποτέλεσμα να επιταχύνεται ο ρυθμός αστικής αλλαγής και να αναπτύσσονται νέες, ευδιάκριτα διαφοροποιημένες, αστικές μορφές (Hall, 2005, σ. 25).

Πολλοί αστικοί γεωγράφοι και ιστορικοί έχουν υποστηρίξει ότι οι πόλεις που αναγνωρίζουμε στη δεκαετία του 1990 είναι το αποτέλεσμα μιας μακροχρόνιας εξελικτικής διαδικασίας, κατά την οποία οι οικισμοί του 15.000 π.Χ. εξελίχθηκαν σταδιακά σε σύνθετες πόλεις στα τέλη του 20^{ου} αιώνα (Hall, 2005, σ. 28). Με βάση αυτή την υπόθεση, ο Δοξιάδης διερεύνησε την συσχέτιση των αρχαίων Ελληνικών οικισμών, που έχουν ανασκαφεί ή έστω

έχουν βρεθεί ευρήματα ικανά να αποδείξουν την ύπαρξή τους, με σύγχρονες Ελληνικές πόλεις. Χαρακτηριστικά αναφέρει ότι στην Θάσο υπάρχει ακριβής συσχέτιση των αρχαίων οικισμών με αυτούς που απαντώνται σήμερα (Doxiadis, 1971). Από τότε που ο πρωτόγονος άνθρωπος εγκατέλειψε τη ζωή του περιπλανόμενου κυνηγού και συλλέκτη και σκέφτηκε να ασχοληθεί με την κτηνοτροφία στην αρχή και με την γεωργία αργότερα, βρέθηκε στην ανάγκη να «συνοικήσει» με άλλους ανθρώπους σε κάποιο συγκεκριμένο φυσικό χώρο, που ανάλογα με τις ικανότητες και δυνατότητές του μετέτρεπε σε ανθρωπογενή, δημιουργώντας έτσι τις πρώιμες μορφές οικισμού (Αραβαντινός, 2007, σ.36). Στην περίοδο μεταξύ 6000 και 4000 π.Χ. ορισμένες εφευρέσεις, όπως το άροτρο, ο τροχός, όταν χρησιμοποιήθηκαν σε περιοχές με ευνοϊκές για καλλιέργεια συνθήκες, τότε οι Νεολιθικοί πληθυσμοί (Εικόνα 1-1) μπόρεσαν να οργανωθούν σε κοινότητες και να εγκατασταθούν σε αυτές τις εύφορες περιοχές (Davis, 1955).



Εικόνα 1-1: Περιοχές όπου εδράζονταν οι αρχαιότεροι πολιτισμοί
 Πηγή: Yoffee, 2005, σ.63

Μετάπειτα εφευρέσεις, όπως η γραφή, η λογιστική, η χρήση του μπρούτζου και το ηλιακό ημερολόγιο, από το 3000 π.Χ. είχαν μεγάλη επιρροή σε περιοχές όπως η Αίγυπτος, η Μεσοποταμία και η Ινδία, τέτοια ώστε οι τότε οικισμοί να μπορούν να χαρακτηριστούν ως “πραγματικές” πόλεις, σύμφωνα με τον Davis (1955). Οι πρώτες πόλεις της Μεσοποταμίας

βρέθηκαν στις περιοχές γύρω από τον Τίγρη και τον Ευφράτη, εκ των οποίων η παλαιότερη είναι η πόλη Ουρ που από το 2300 έως το 2180 π.Χ. αποτέλεσε την πρωτεύουσα της αυτοκρατορίας των Σουμέριων (Pacione, 2009).

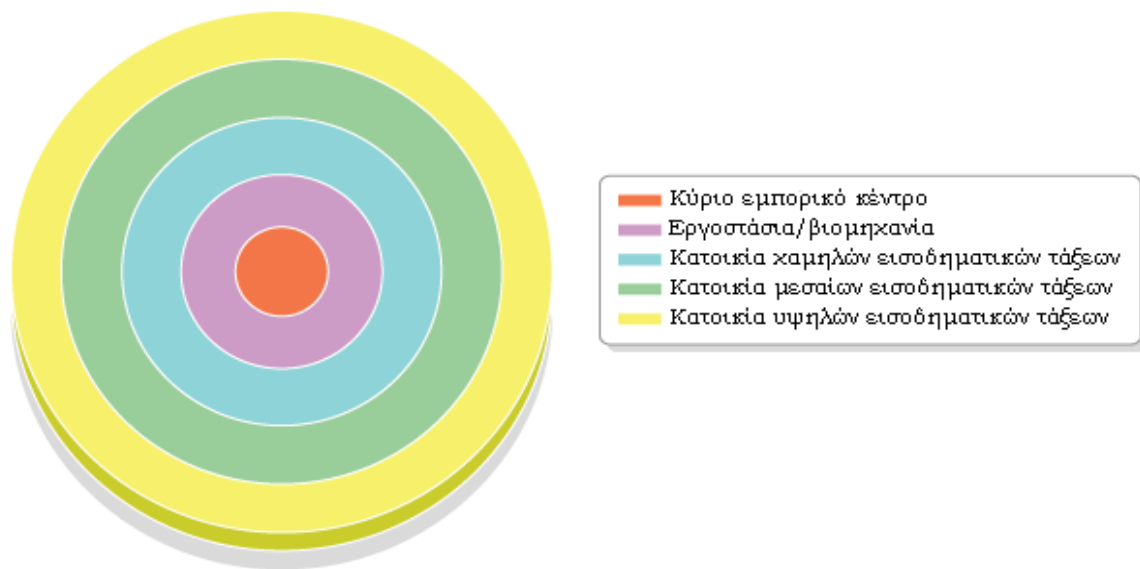
Περνώντας στις πόλεις της Αρχαίας Ελλάδας, χαρακτηριστικό τους είναι το μικρό μέγεθος, καθώς και ο μικρός αριθμός κατοίκων τον οποίο φιλοξενούσαν (περίπου δέκα χιλιάδες κατοίκους κατά μέσο όρο), γεγονός που ίσχυε ακόμα και για τις πιο σημαντικές πόλεις-κράτη όπως είναι η Αθήνα, η Κόρινθος και η Δήλος (Doxiades, 1964). Επίσης, ο Δοξιάδης (1964) αναφέρει ότι κυριάρχησαν δύο μορφές ανάπτυξης στις αρχαίες Ελληνικές πόλεις. Η πρώτη μορφή, αναφέρει, είναι μέσω της φυσικής ή μη προγραμματισμένης ανάπτυξης. Αυτή η μορφή απαντάται στις αρχαιότερες πόλεις που βρίσκονται στον ηπειρωτικό κορμό, με χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτό της Αθήνας. Η πόλη της Αθήνας αναπτύχθηκε γύρω από την Ακρόπολη η οποία αποτελούσε πυρήνα της. Η σταδιακή εξάπλωσή της περιμετρικά γύρω από την Ακρόπολη δημιούργησε έναν δεύτερο πυρήνα, την Αγορά, η οποία απέκτησε σταδιακά μεγαλύτερη σημασία έναντι της Ακρόπολης, ως μέρος πολιτικών, κοινωνικών και εμπορικών δραστηριοτήτων. Η δεύτερη μορφή που αναφέρει ο Δοξιάδης είναι το Ιπποδάμειο Σύστημα που πήρε την ονομασία του από τον εμπνευστή του, Ιππόδαμο τον Μιλήσιο. Πρόκειται ουσιαστικά για διάταξη σε σχήμα κανάβου που εξυπηρετούσε την απλότητα και την αποτελεσματικότητα. Νέες αποικίες, όπως στην Ιωνία, χτίστηκαν σύμφωνα με αυτό το σύστημα. Αξίζει να σημειωθεί πως ο όρος “πόλη-κράτος” δεν χρησιμοποιήθηκε μόνο από τους Έλληνες, αλλά συναντάται και στην αρχαία Ινδία, Κίνα και Μεσοποταμία (Yoffee, 2005).

Οι Ρωμαίοι ήταν αυτοί που κατάφεραν να αναδείξουν την πόλη ως χωρική οντότητα, με χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτό της Αρχαίας Ρώμης ως μεγαλύτερης πόλης στην Ρωμαϊκή Αυτοκρατορία (Davis, 1955). Σύμφωνα με τον Pacione (2009) οι Ρωμαίοι υιοθέτησαν το Ιπποδάμειο σύστημα και το εφήρμοσαν και σε περιοχές της Δυτικής Ευρώπης.

Πιο συγκεκριμένα, αναφέρει ότι η τυπική μορφή των Ρωμαϊκών πόλεων ήταν εγγεγραμμένη εντός ενός τετράγωνου ή παραλληλόγραμμου πλαισίου, μέσα στο οποίο υπήρχαν 2 κύριοι κάθετοι οδοί σε προσανατολισμό ανατολή-δύση και βορρά-νότο αντίστοιχα. Κοντά στην διασταύρωση των 2 παραπάνω οδών, υπήρχε το *forum* (αντίστοιχο της αρχαίας Αγοράς) και γύρω από αυτό υπήρχαν ο κεντρικός ναός, τα δημόσια λουτρά και το θέατρο. Μετά την πτώση της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας τον 4^ο αιώνα μ.Χ. ξεκινάει μία μακρά περίοδος γνωστή ως Μεσαιωνικά χρόνια, κατά την οποία η αστική ζωή και ανάπτυξη έφτασε στο ναδίρ (Pacione, 2009).

Φτάνοντας στις αρχές του 19^{ου} αιώνα και στην Βιομηχανική Επανάσταση παρατηρείται μία ραγδαία άνοδος της αστικοποίησης, δηλαδή του ποσοστού του πληθυσμού που ζει στην πόλη και όχι σε αγροτικές περιοχές και παράλληλα, να εμφανίζονται τα πρώτα έντονα σημάδια αστικής διάχυσης ως εκτόνωση αυτής της υψηλής συγκέντρωσης πληθυσμού στις πόλεις. Όπως τονίζει ο Davis (1955), από το 1861 ο εξωτερικός δακτύλιος της ευρύτερης περιοχής του Λονδίνου αναπτυσσόταν πιο γρήγορα από τον πυρήνα του. Έτσι, το νέο πρότυπο που υιοθέτησαν πόλεις της Δυτικής Ευρώπης και της Αμερικής ήταν αυτό της “βιομηχανικής” πόλης, στην οποία οι κοινωνικές ανισότητες είχαν άμεσο αντίκτυπο στην χωρική της διάταξη, η οποία εξύπηρετούσε πρωτίστως το κεφάλαιο (Pacione, 2009). Ειδικότερα στην Αμερική το φαινόμενο ήταν εντονότερο και στάθηκε αφορμή ώστε το τμήμα της αστικής κοινωνιολογίας του πανεπιστημίου του Σικάγου να διεξάγει έρευνα για την πόλη του Σικάγου, το οποίο ήταν τότε μία νέα πόλη που είχε επεκταθεί ραγδαία κυρίως λόγω της εκβιομηχάνησης (Hall, 2005). Μελετώντας την πόλη του Σικάγου, οι Park, Burgess και McKenzie (1925) κατέληξαν σε ένα προσεγγιστικό μοντέλο πόλης (Εικόνα 1-2) το οποίο αποσαφηνίζει την χωρική κατανομή των διαφορετικών κοινωνικών στρωμάτων με ιδιαίτερη απλότητα. Σύμφωνα με το μοντέλο των ομόκεντρων ζωνών, η κεντρική ζώνη φιλοξενεί την κύρια εμπορική δραστηριότητα της πόλης, έπειτα υπάρχει μία μεταβατική ζώνη όπου

κατοικούν οι ασθενέστερες οικονομικά κοινωνικές ομάδες παράλληλα με χρήσης όπως ελαφριά βιομηχανία και βιοτεχνία, στην συνέχεια η τρίτη ζώνη αφορά την εργατική τάξη και η τέταρτη περιοχές αμιγούς κατοικίας για σχετικά εύπορες οικογένειες όπου επικρατεί η μονοκατοικία και τέλος στην πιο απομακρυσμένη ζώνη κατοικεί η “ελίτ” της κοινωνίας που έχει την οικονομική δυνατότητα να διανύει μεγάλες αποστάσεις κάθε μέρα και να ζει σε προάστια (Bruegmann, 2005).



Εικόνα 1-2: Το μοντέλο των Park, Burgess και McKenzie

Πηγή: http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitesize/geography/urban_environments/urban_models_medcs_revl.shtml Τελευταία πρόσβαση 20/7/2015

Ωστόσο, παρά την ευρεία απήχηση του μοντέλου αυτού στον τρόπο που οι τότε πολεοδόμοι αντιμετώπιζαν τις πόλεις, το μοντέλο είχε αναμφίβολα ορισμένους περιορισμούς και περιπτώσεις πόλεων στις οποίες δεν επαληθεύονταν απόλυτα, για παράδειγμα πολλές πόλεις δεν είχαν μόνο ένα κύριο εμπορικό κέντρο ή ακόμα σε πολλές περιπτώσεις οι ζώνες δεν είχαν στην πραγματικότητα κοινωνική και οικονομική κατά συνέπεια ομοιογένεια (Bruegmann, 2005). Προσπαθώντας να αντιμετωπίσει αυτά τα μειονεκτήματα, ο Hoyt (1939), έπειτα από εκτεταμένη έρευνα των διαχρονικών αλλαγών των χρήσεων γης σε

σημαντικές πόλεις της Αμερικής, δημιούργησε ένα νέο και πιο σύνθετο μοντέλο (Εικόνα 1-3) στο οποίο η πόλη κατακερματίζεται σε τομείς (Bruegmann, 2005).

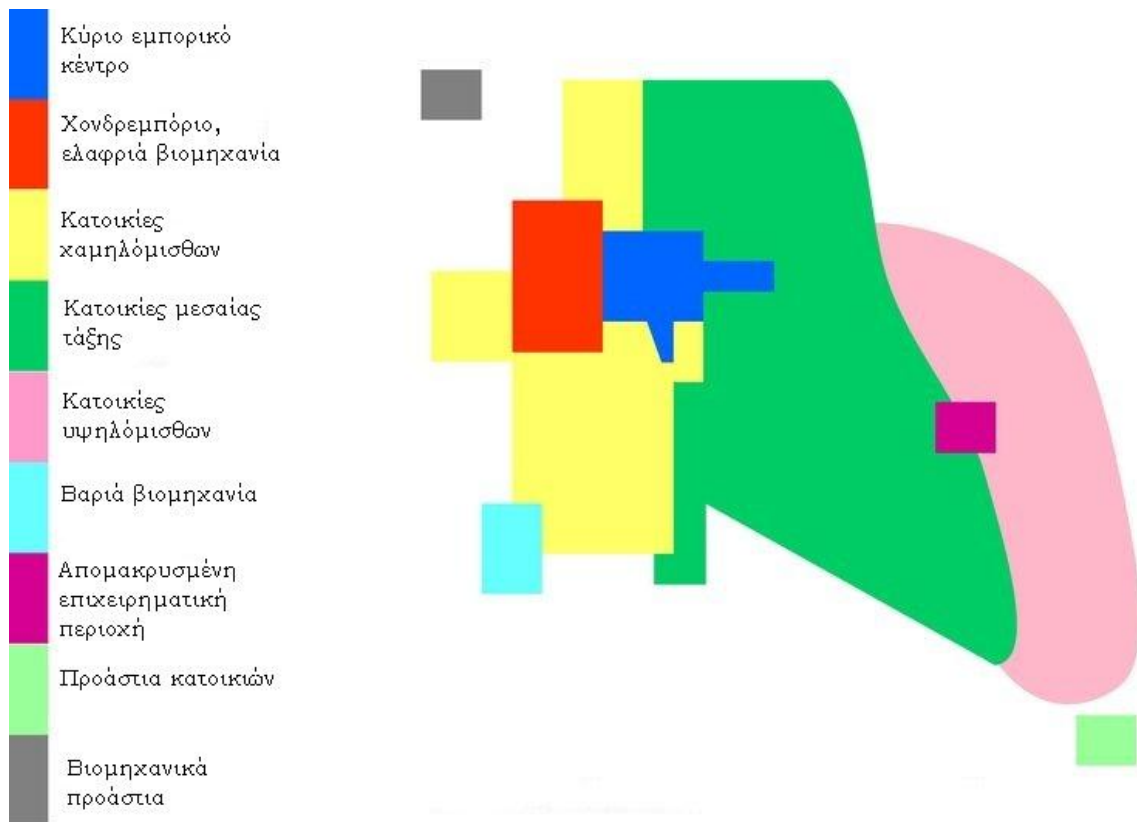


Εικόνα 1-3: Το μοντέλο του Hoyt

Πηγή: http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitesize/geography/urban_environments/urban_models_medcs_rev1.shtml Τελευταία πρόσβαση 20/7/2015

Μετά τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο, επιδιώκοντας να μοντελοποιήσουν τις νέες αλλαγές που παρατηρούνταν στην μορφή των τότε πόλεων, οι Harris και Ullman (1945) υποστήριξαν ότι τα μοτίβα των χρήσεων γης δεν εξαρτώνται από ένα μοναδικό κέντρο, όπως συνέβαινε στα προηγούμενα δύο μοντέλα που παρουσιάστηκαν, αλλά αναπτύσσονται γύρω από ορισμένους διακριτούς πυρήνες (Εικόνα 1-4). Ακόμη, στήριξαν το μοντέλο τους σε ορισμένους παράγοντες. Καταρχάς, παρατήρησαν ότι ορισμένες δραστηριότητες απαιτούν συγκεκριμένες παροχές όπως, για παράδειγμα, το λιανεμπόριο πρέπει να έχει μεγάλη προσβασιμότητα μέσα στην πόλη. Επιπλέον, παρόμοιες χρήσεις γης επωφελούνται όταν βρίσκονται συγκεντρωμένες σε ένα μέρος λόγω των οικονομιών κλίμακας. Αντίθετα, πολλές ανταγωνιστικές χρήσεις γης, όπως η βιομηχανία και η οικιστική ζώνη υψηλού εισοδήματος, οφείλουν να απέχουν μεγάλη απόσταση. Τέλος, ορισμένες χρήσεις γης δεν μπορούν να

παρέχουν την γαιοπρόσοδο των πιο επιθυμητών τοποθεσιών, για παράδειγμα οι κατοικίες χαμηλών εισοδημάτων δεν βρίσκονται συνήθως σε μεγάλο υψόμετρο με θέα.



Εικόνα 1-4: Το μοντέλο των Harris και Ullman

Πηγή: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b1/Ullman2.png> Τελευταία πρόσβαση 26/7/2015

Το 1933 ο Christaller (1933/1966) ανέπτυξε την θεωρία των κεντρικών τόπων ορίζοντας τον κεντρικό τόπο ως κάθε οικισμό που παρέχει αγαθά ή υπηρεσίες στην ενδοχώρα του. Μετέπειτα, ο Losch (1940/1954), ο οποίος σε αντίθεση με τον Christaller που ξεκίνησε την θεωρία του έχοντας κατά νου μία ιεραρχία για τους αστικούς οικισμούς ανάλογα με το εύρος της ενδοχώρας τους, στις οποίες ανέθεσε συγκεκριμένες λειτουργίες, ξεκίνησε από μία μοναδική οικονομική δραστηριότητα, συγκεκριμένα μία μικρή βιομηχανία ζυθοποιίας, και το πως μέσω της ζήτησης και της εμβέλειας αυτής της επιχείρησης, μπορεί να δημιουργηθεί ένα ευρύτερο βέλτιστο δίκτυο αγοράς, όπως αναφέρει ο King (1984). Ο King (1984) καταλήγει στο συμπέρασμα ότι παρ' όλο που η απόλυτη και αυστηρή εφαρμογή

της θεωρίας των κεντρικών τόπων σε χωροταξικές ή πολεοδομικές μελέτες δεν ήταν ιδιαίτερα επιτυχής, παρ'όλα αυτά η συγκεκριμένη θεωρία αποτέλεσε το έναυσμα για περαιτέρω έρευνα στους τομείς της γεωγραφίας, της κοινωνιολογίας και της οικονομίας και τα βασικά της στοιχεία μπορούν να αποτελέσουν ένα γενικότερο πλαίσιο αντιμετώπισης προβλημάτων χωρικού σχεδιασμού.

Από τις αρχές της δεκαετίας του 70', μπορούμε να πούμε με ασφάλεια ότι το φαινόμενο αστική διάχυση παίρνει σάρκα και οστά, καθότι εκείνη την εποχή οι τεχνολογικές εξελίξεις σε συγκοινωνίες, τηλεπικοινωνίες και δίκτυα ήταν ραγδαίες, επιτρέποντας στους ανθρώπους να κατοικούν σε περιοχές μακριά από τις μεγάλες και συμπαγείς πόλεις, χωρίς όμως να μειώνουν το βιοτικό τους επίπεδο και τις ανέσεις που τους παρείχε η πόλη. Έτσι, η αστική διάχυση είναι, κατά βάση, Αμερικανικό φαινόμενο χωρίς αυτό να σημαίνει ότι παρόμοιες διεργασίες, όπως η δημιουργία προαστίων, δεν συνέβησαν και σε Ευρωπαϊκές χώρες τα τελευταία χρόνια (Hamidi & Ewing, 2014). Μέσα από τον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1-1), είναι ξεκάθαρη η στροφή του πληθυσμού σε περιοχές εκτός του κυρίου αστικού ιστού, ήδη από τις αρχές του 1970.

Έτος	Περιαστικός πληθυσμός	Αστικός πληθυσμός	Δείκτης διάχυσης
1970	49,101,068	84,283,519	36.81
1980	69,967,436	84,680,392	45.24
1990	85,239,692	92,431,065	47.98
2000	101,295,542	102,952,391	49.59
2010	114,357,186	111,554,393	50.60

Πίνακας 1-1: Πληθυσμός Αμερικανικών πόλεων την περίοδο 1970-2010

Πηγή: Lopez 2014, σ.4

Παρ' όλο που τα τελευταία χρόνια οι πυρήνες των περισσότερων Ευρωπαϊκών πόλεων έχουν αλλάξει ελάχιστα, εντούτοις οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε αυτούς είναι τελείως διαφορετικές πλέον (Bruegmann, 2005). Κατά τον Bruegmann (2005), μόνο στη περιοχή του Παρισιού χάθηκαν κατά τη διάρκεια του '90 διακόσιες χιλιάδες θέσεις εργασίας, από τις οποίες ο εσωτερικός δακτύλιος των προαστίων κέρδισε μόλις τις είκοσι, ενώ οι εκατόν εξήντα χιλιάδες προστέθηκαν στον εξωτερικό. Παράλληλα, στις Ηνωμένες Πολιτείες έως το 2000 τα περισσότερα παραδοσιακά κέντρα των αμερικάνικων πόλεων στέγαζαν λιγότερο από το 10% των θέσεων εργασίας εντός της μητροπολιτικής περιοχής, ενώ πόλεις που κάποτε λειτουργούσαν αυτόνομα, βρέθηκαν να ανταγωνίζονται με άλλα κέντρα αστικών περιοχών. Τέτοια πρότυπα παρατηρήθηκαν στο Σαν Φρανσίσκο, στο Σαν Χοσέ, αλλά και στο Πολεοδομικό συγκρότημα του Ράντστατ, όπου το Άμστερνταμ, το Ρότερνταμ, η Ουτρέχτη και η Χάγη με τις κοινότητες δορυφόρους τους σχηματίζουν σήμερα έναν αστικοποιημένο δακτύλιο γύρω από μια λιγότερο ανεπτυγμένη "πράσινη καρδιά", σε μια περίεργη αντιστροφή του μοντέλου του Λονδίνου, όπου ο κεντρικός πυρήνας περιβάλλεται από την αντίστοιχη "πράσινη ζώνη". Αυτές οι διεργασίες έχουν ως αποτέλεσμα το γεγονός ότι οι διαφορές μεταξύ της πόλης και των προαστίων να μην είναι πλέον ξεκάθαρες και σαφείς καθώς τα προάστια γίνονται όλο και πιο ποικιλόμορφα (Bruegmann, 2005).

Συμπερασματικά, μέσα από αυτή την ιστορική αναδρομή του φαινομένου είναι σαφές ότι ενώ οι πόλεις εξελίσσονται και αναπτύσσονται σε μέγεθος ως αποτέλεσμα των φυσικών διεργασιών εξέλιξης του ανθρώπινου είδους, εντούτοις όταν μιλάμε για αστική διάχυση, αυτό αποτελεί ένα σχετικά νέο φαινόμενο. Αυτή η ξαφνική και ραγδαία εξάπλωση του αστικού ιστού κυρίως στις Αμερικανικές πόλεις αποτελεί απόρροια πολλών παραγόντων που θα αναπτυχθούν σε επόμενη ενότητα. Η ιστορική αναδρομή, επιπρόσθετα, στοχεύει στην προσπάθεια ορισμού του αστικού χώρου ώστε να γίνεται εύκολα διακριτή σε σχέση με άλλες

παρακείμενες, καθότι η πληροφορία του αστικού χώρου αποτελεί απαραίτητο και σημαντικό δεδομένο εισόδου για ένα μοντέλο αστικής ανάπτυξης.

1.2. Αιτίες της Αστικής Διάχυσης

Πολλοί μελετητές έχουν απαριθμήσει τις αιτίες που προκαλούν το φαινόμενο της αστικής διάχυσης, χωρίς όμως να υπάρχει ομοφωνία για το αν αυτό αποτελεί κάτι θετικό ή αρνητικό για την ανθρωπότητα. Πρόκειται για ένα αμφιλεγόμενο ζήτημα που εγείρει έντονες συζητήσεις στην επιστημονική κοινότητα.

Κατά τον Bruegmann (2005), με την παραδοχή ότι η διάχυση γεννήθηκε στην Αμερική, μία από τις αιτίες της είναι το γεγονός ότι η ίδια η κουλτούρα των Αμερικάνων επιτάσσει να μένουν σε περιοχές εκτός του κύριου αστικού ιστού πιστεύοντας ότι οι περιοχές αμιγούς κατοικίας θα πρέπει να είναι μακριά από το κέντρο της πόλης. Στην συνείδηση των Αμερικάνων, τα προάστια είναι ένα καλό μέρος να ζεις, να κάνεις οικογένεια και να δουλεύεις, ενώ το μετροπολιτικό κέντρο αφορά δραστηριότητες όπως η αναψυχή και η κατανάλωση. Έτσι, προκύπτει η ανάγκη για απομάκρυνση από τον πυρήνα της πόλης και η γέννηση της διάχυσης.

Η αυξανόμενη χρήση του αυτοκινήτου θεωρείται μία από τις βασικές αιτίες της διάχυσης. Ταυτόχρονα, οι αυτοκινητόδρομοι καθώς και άλλα μέσα μεταφοράς έχουν αναπτυχθεί ταχύτατα. Έχοντας αυτές τις επιλογές, οι πολίτες πλέον μπορούν να ζουν άνετα σε προάστια. (Rui, 2013, σ.10). Ωστόσο, σε Ευρωπαϊκές χώρες, όπως η Βρετανία, η ανάπτυξη των δημόσιων μέσων μαζικής μεταφοράς ήταν πολύ πιο σημαντική στην διόγκωση του φαινομένου (Chin, 2002; Batty, Besussi & Chin 2003). Επιπλέον, αναφέρεται ότι στο Λονδίνο η ανάπτυξη των προαστίων ξεκίνησε με την επέκταση του σιδηροδρομικού δικτύου το 1860, ωθώντας μία ακτινική επέκταση του ιστού παράλληλα με τις σιδηροδρομικές

γραμμές. Ακόμη, στο Λονδίνο, τα κυκλικά μοτίβα επέκτασης ήταν αποτέλεσμα των νέων δρομολογιών των αστικών λεωφορείων.

Η Lawrence (2005) κάνει εκτεταμένη ανάλυση των επιπτώσεων που έχουν οι πολιτικές της κυβέρνησης μίας χώρας ή μίας πολιτείας στην μορφή του αστικού ιστού. Συγκεκριμένα, αναφέρει ότι μία σειρά από πολιτικές δημιούργησε τα κίνητρα και τις ευκαιρίες για ανάπτυξη νέων θυλάκων κατοικιών μακριά από τις κεντρικές πόλεις ενώ ταυτόχρονα σε πολλές περιπτώσεις δημιούργησε φραγμούς στην συμπαγή ανάπτυξη των πόλεων. Με την ίδρυση της Ομοσπονδιακής Διαχείρισης Στέγασης (Federal Housing Administration) υπήρξαν κίνητρα όπως η μεγαλύτερη περίοδος αποπληρωμής των υποθηκών και η ελάττωση των προκαταβολών στις αγορές νέων κατοικιών, καθώς και περιορισμοί όπως όροι δόμησης που δεν ήταν σύμφωνοι με αυτούς των κατοικιών εντός της πόλης, έκαναν την τότε μεσαία τάξη να επιλέγει σπίτια εκτός του μετροπολιτικού κέντρου.

Μία ακόμα αιτία της αστικής διάχυσης είναι, σύμφωνα με τον Torrens (2006), η αύξηση του πληθυσμού. Όπως υποστηρίζει, όταν ο αστικός πληθυσμός αυξάνεται, η πόλη αναγκαστικά πρέπει να επεκταθεί είτε οριζόντια είτε κατακόρυφα και μερικές φορές να επεκτείνονται τα όριά της εις βάρος των παρακείμενων αγροτικών περιοχών. Έτσι, σύμφωνα με τον Torrens (2006), η αύξηση του πληθυσμού οδηγεί σε διάχυση μέσα από απόλυτη αύξηση, αυξανόμενη αστικοποίηση, δηλαδή αύξηση του ποσοστού του πληθυσμού που ζει σε πόλεις, και αναδιοργάνωση της κατανομής και γεωμετρίας των κατοικιών, με την έννοια ότι τα σπίτια τείνουν να γίνονται μικρότερα αλλά περισσότερα.

Σαφέστατα, το Διαδίκτυο και οι νέες τεχνολογίες στον τομέα των τηλεπικοινωνιών έχουν συμβάλει στο φαινόμενο τις αστικής διάχυσης, δημιουργώντας ευνοϊκές συνθήκες παρέχοντας σε διάσπαρτα μέρη μίας πόλης, όπως είναι τα προάστια, την δυνατότητα να αναπτύσσουν λειτουργικές σχέσεις ανεξάρτητα της μεταξύ τους απόστασης (Rui, 2013).

Ο Bruegmann (2005), αναφέρει ότι η αστική διάχυση μπορεί να θεωρηθεί ως ένα παραπροϊόν του μη ελεγχόμενου καπιταλιστικού συστήματος διότι ο καπιταλισμός στηρίζεται στην ιδέα ότι η αγορά κινείται με μόνο στόχο το κέρδος, ανεξάρτητα με τις επιπτώσεις στην κοινωνία ή σε άλλους επενδυτές. Για παράδειγμα, οι περισσότεροι εργολάβοι, με στόχο να μεγιστοποιήσουν το κέρδος τους, επιλέγουν να σχεδιάζουν περιοχές με χαμηλή πυκνότητα κτιρίων, δηλαδή μονοκατοικίες έναντι πολυκατοικιών. Πολλοί αναλυτές υποστηρίζουν ότι αυτή η επιλογή παράγει μοτίβα τα οποία είναι αντιαισθητικά, μη βιώσιμα και μη φιλικά προς το περιβάλλον.

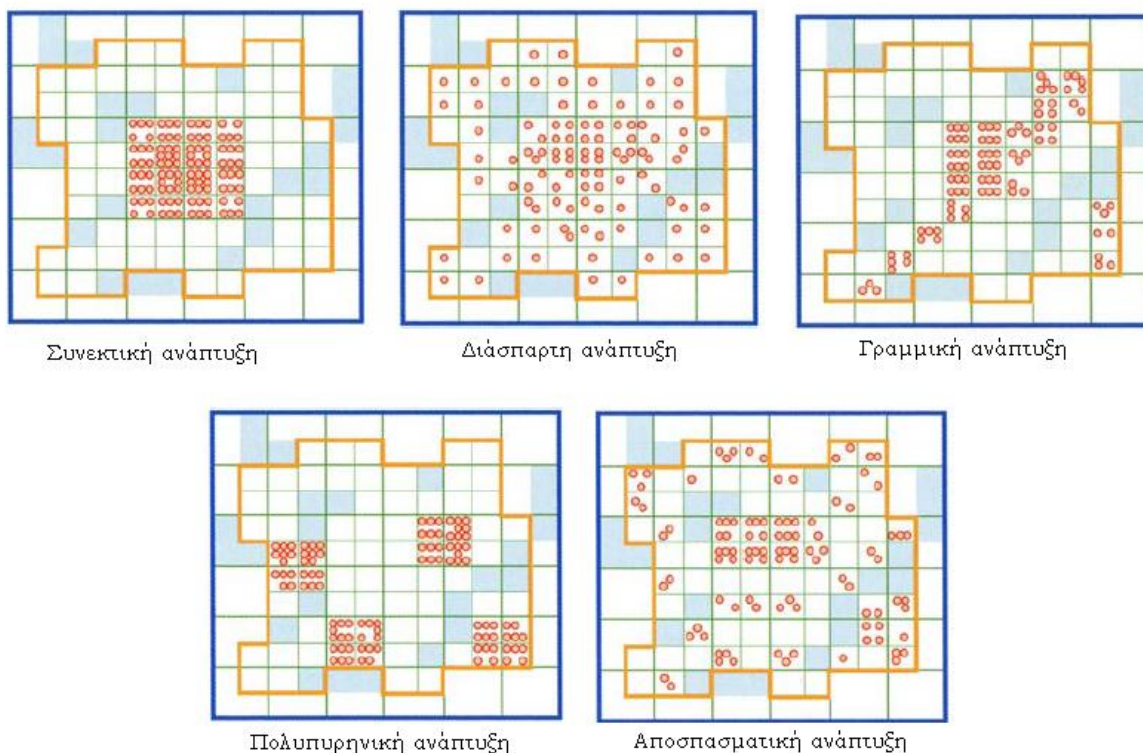
1.3. Τύποι Αστικής Διάχυσης

Η αστική διάχυση, σαν έννοια, είναι αρκετά δύσκολο να οριστεί και να αποδοθεί μονοσήμαντα και απόλυτα, κάτι που την καθιστά εξαιρετικά αμφιλεγόμενη. Χαρακτηριστικά οι Galster et al. (2001, σ. 681) αναφέρουν ότι η αστική διάχυση εξηγεί τα πάντα και τίποτα. Έτσι, οι μελετητές στην προσπάθειά τους να εντάξουν την αστική διάχυση σε ένα συγκεκριμένο θεωρητικό πλαίσιο, κατηγοριοποίησαν τους διάφορους τύπους διάχυσης που έχουν παρατηρηθεί. Οι Galster et al. (2001) αναφέρουν οκτώ εννοιολογικά και μορφολογικά διακριτές διαστάσεις χρήσεων γης που χαρακτηρίζουν την αστική διάχυση. Αυτές είναι η πυκνότητα, η συνέχεια, η συγκέντρωση, η ομοιομορφία, η κεντρικότητα, η πυρηνικότητα, ο συνδυασμός χρήσεων γης και η εγγύτητα που μπορούν να χαρακτηριστούν ως δείκτες διάχυσης σε συνδυασμό ή και μεμονωμένα. Στην συνέχεια τέσταρε αυτούς τους δείκτες πάνω σε 13 αστικές περιοχές της Αμερικής για να δει αν όντως αυτοί έχουν πραγματική εφαρμογή και συνάδουν με πραγματικά περιστατικά πόλεων.

Οι Camagni, Gibelli και Rigamonti (2002) μελετώντας τα προάστια του Μιλάνου, για την περίοδο 1981-1991, επιχείρησαν να καταγράψουν τα χαρακτηριστικά της αστικής ανάπτυξης. Κατέληξαν σε πέντε τύπους αστικής διάχυσης: την συμπληρωματική ανάπτυξη

(infilling), η οποία χαρακτηρίζεται από την προσθήκη νέας κτισμένης επιφάνειας σε ήδη υπάρχουσες αστικές εκτάσεις που είχαν μείνει κενές κατά την διάρκεια της ανάπτυξης, εξάπλωση (extension), η οποία πραγματοποιείται στις αμέσως γειτονικές αστικές παρυφές, γραμμική (linear), η οποία ακολουθεί τους βασικούς άξονες των μητροπολιτικών υποδομών οδικού δικτύου, διάχυση (sprawl), η οποία χαρακτηρίζει τα νέα διάσπαρτα τεμάχια και τα σχέδια μεγάλης κλίμακας (large-scale projects), τα οποία αφορούν στην ανάπτυξη μεγάλων τεμαχίων αξιοσημείωτου μεγέθους που όμως δεν εξαρτώνται από την ήδη υπάρχουσα κτισμένη επιφάνεια.

Βασίζόμενοι στην εργασία των Galster et al. (2001), οι Batty et al. (2003) μελέτησαν τις μορφές της αστικής διάχυσης. Ακολούθως παρατίθενται απλοποιημένοι αστικοί σχηματισμοί, οι οποίοι εικονογραφούν μερικές από τις δομές της αστικής διάχυσης και βασίζονται σε πρωτότυπα σχέδια των Galster et al. (2001) (Εικόνα 1-5).



Εικόνα 1-5: Πρότυπα αστικής διάχυσης

Πηγή: Batty et al. 2003, σ. 6

1.4. Επιπτώσεις της Αστικής Διάχυσης

Στην κλασική εποχή είχαν αναπτυχθεί θέσεις από φιλοσόφους, όπως ο Αριστοτέλης, ο Θουκυδίδης, ο Δημοσθένης, ο Πλάτωνας, ο Ιπποκράτης, ο Ιππόδαμος ο Μιλήσιος και ο Φαλέας ο Χαλκηδόνιος, υπέρ της προστασίας του περιβάλλοντος και της αισθητικής της πόλης. Κεντρικό στοιχείο των θέσεων αυτών αποτελούσε η φιλοσοφία του μέτρου και της πλαστικής πειθαρχίας της φύσης στο πλαίσιο της διαλεκτικής σχέσης αλληλεξάρτησης μεταξύ του περιβάλλοντος, του ανθρώπου και του χωροταξικού και πολεοδομικού σχεδιασμού (Γερασίμου, 2007, σ. 91). Σε αυτό το πλαίσιο, είναι σαφές ότι οι επιπτώσεις της μορφής μίας πόλης, άρα και του τρόπου που αυτή αναπτύσσεται ή διαχέεται άτακτα και χωρίς σχεδιασμό είναι απαραίτητο να μελετηθούν, να καταγραφούν και να αντιμετωπιστούν κυρίως στους τομείς της οικονομίας, της κοινωνίας και του περιβάλλοντος.

Στον τομέα της οικονομίας και της κοινωνίας, οι απόψεις δίστανται σχετικά με τις επιπτώσεις του φαινομένου, καθώς φαίνεται να έχει τόσο θετικές όσο και αρνητικές συνέπειες. Στις αρνητικές συνέπειες συγκαταλέγονται οικονομικές, αισθητικές και ψυχολογικές επιπτώσεις στους κατοίκους των μετροπολιτικών περιοχών (Barnes, Morgan, Roberge & Lowe, 2001). Κατά τους Barnes et al. (2001), οι οικονομικές επιπτώσεις περιλαμβάνουν υψηλότερους φόρους, υψηλότερα κόστη υποδομών, αρνητικές δημοσιονομικές επιπτώσεις στους τοπικούς οργανισμούς αυτοδιοίκησης και μείωση της παραγωγικότητας του εργατικού δυναμικού. Συνεχίζουν λέγοντας ότι σε ψυχολογικό επίπεδο, η διάχυση προκαλεί απώλεια της αίσθησης ότι ο καθένας αποτελεί μέρος της τοπικής κοινωνίας, προκαλώντας αποξένωση ενώ σε επίπεδο αισθητικής η διάχυση επιφέρει αντιαισθητικά και μονότονα τοπία στα προάστια. Παράλληλα, αυξάνεται η κυκλοφοριακή συμφόρηση, οι χρόνοι μετακίνησης καθώς και η επιθετικότητα στην συμπεριφορά οδήγησης.

Στον τομέα του περιβάλλοντος και των φυσικών πόρων, οι επιπτώσεις του φαινομένου είναι σχεδόν ολοκληρωτικά αρνητικές. Οι παρακάτω επιπτώσεις αναλύονται από

τους Barnes et al. (2001). Καταρχάς, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της αστικής διάχυσης γίνονται αισθητές σε τοπική, περιφερειακή, εθνική αλλά και παγκόσμια κλίμακα. Σε παγκόσμια κλίμακα, για παράδειγμα, η ανάγκη για χρήση του αυτοκινήτου σε καθημερινή βάση από τους κατοίκους των προαστίων, κυρίως προς τους χώρους εργασίας τους, οδηγεί σφραγιστικά σε αύξηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, που αποδεδειγμένα αποτελεί μία από τις βασικές αιτίες όξυνσης του φαινομένου της τρύπας του όζοντος. Αυτή η ρύπανση λόγω των εκπομπών του αυτοκινήτου απειλεί τη δημόσια υγεία, την αγροτική παραγωγή και τα οικοσυστήματα. Η άτακτη αστική ανάπτυξη καταπατάει εκτάσεις γης που αποτελούν καταφύγιο πανίδας, αλλοιώνοντας το τοπίο και χωρίζοντας τις άλλοτε ενιαίες εκτάσεις που φιλοξενούσαν πληθυσμούς πανίδας και χλωρίδας. Η φωτορύπανση και ηχορύπανση των προαστίων οδηγεί πολλά είδη πανίδας σε μετανάστευση από το φυσικό τους περιβάλλον.

Σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις παρατηρούνται και στους φυσικούς πόρους και στα φυσικά διαθέσιμα. Φυσικοί πόροι όπως η αγροτική γη, τα δάση, τα ορυκτά υλικά και οι υδατικοί πόροι τίθενται σε κίνδυνο (Ewing, 1997). Ειδικά όσοι πόροι είναι μη ανανεώσιμοι θα πρέπει να ιφίστανται βιώσιμη διαχείριση και όχι διασπάθιση. Η μελέτη των Van Metre, Mahler και Furlong (2000) πάνω σε 10 υδατικά αποθέματα σε διάφορες μετροπόλεις των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής δείχνει την μεταβολή των επιπέδων πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων, οι οποίοι αυξήθηκαν στην διάρκεια των ετών αστικής ανάπτυξης στις περιοχές μελέτης.

Συμπερασματικά, παρά την κίνηση στους δρόμους κατά τις ώρες αιχμής και τους μεγάλους χρόνους μετακίνησης καθημερινά από τα προάστια προς τις περιοχές εργασίας των πολιτών, η εγκατάσταση σε προάστια παραμένει ως στόχος για πολλούς κατοίκους πόλεων που θεωρούν την ζωή σε αυτά ως πιο ποιοτική. Μέχρι να αλλάξει αυτή η αντίληψη και οι συνθήκες διαβίωσης στον πυρήνα των πόλεων βελτιωθούν, η διάχυση θα συνεχίσει να υφίσταται (Barnes et al., 2001).

2. MONTEΛΑ ΑΣΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

Η αστική διάχυση αποτελούσε πάντα ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον ερευνητικό αντικείμενο, κυρίως στον τομέα της γεωγραφίας. Η ανάγκη για πρόβλεψη, μοντελοποίηση και προσομοίωση των διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα κατά την εξέλιξη μίας πόλης, οδήγησε σε ανάπτυξη και εξέλιξη υπολογιστικών μεθόδων μοντελοποίησης αυτών των μοτίβων. Ο Batty (2009, σ. 51) ορίζει τα μοντέλα αστικής ανάπτυξης (urban growth models) ως αναπαράσταση των διαδικασιών και λειτουργιών που παράγουν τις αστικές δομές σε όρους χρήσης γης, πληθυσμού, εργασίας και μεταφορών, συνήθως μέσω προγραμμάτων σε ηλεκτρονικό υπολογιστή που δίνουν την δυνατότητα να τεσταριστούν θεωρίες χωρικής ανάλυσης έναντι δεδομένων εισόδου και να προκύψουν προβλέψεις μελλοντικών εικόνων. Παράλληλα, ο Batty (2009, σ. 51) ορίζει την αστική μοντελοποίηση ως τη χρήση κατάλληλης θεωρίας και την μετάφραση αυτής σε μαθηματικό μοντέλο, την ανάπτυξη σχετικού λογισμικού και εισόδου δεδομένων στο μοντέλο έτσι ώστε να υποστεί βαθμονόμηση και αξιολόγηση πριν την φάση της πρόβλεψης. Πρέπει να αποσαφηνιστεί ότι τα μοντέλα αστικής ανάπτυξης δεν έχουν σχέση με τα παλαιότερα αστικά μοντέλα (urban form models), όπως είναι για παράδειγμα το μοντέλο του Hoyt που έχει ήδη αναφερθεί. Τα πρώτα έχουν κύριο στόχο την πρόβλεψη της μελλοντικής εξάπλωσης αστικών περιοχών ενώ τα τελευταία στοχεύουν στην απλουστευμένη αναπαράσταση της δομής της πόλης.

Η πρώτη ενότητα αυτού του κεφαλαίου αναφέρεται σε στην χρησιμότητα των αστικών μοντέλων, η δεύτερη στις θεωρητικές προσεγγίσεις που κρύβονται πίσω από την σύλληψη και τον σχεδιασμό των μοντέλων, η τρίτη αναφέρεται σε τεχνικές και μεθόδους μοντελοποίησης, η τέταρτη περιγράφει αναλυτικά την τεχνική των κυψελοειδών αυτομάτων και η τελευταία ενότητα αφορά το μοντέλο SLEUTH.

2.1. Χρησιμότητα των Αστικών Μοντέλων

Η χρησιμότητα και ο ρόλος των μοντέλων αστικής ανάπτυξης έγκειται στο γεγονός ότι αποτελούν ένα μέσο το οποίο επιτρέπει τον πειραματισμό με τη θεωρία και να ενισχυθεί η κατανόηση, η οποία μπορεί και να προηγείται της πρόβλεψης των διαφόρων καταστάσεων, που δεν έχουν ακόμα πραγματοποιηθεί, όπως για παράδειγμα στο μέλλον. Αυτός ο ρόλος του πειραματισμού επιτυγχάνεται μέσω ενός περιβάλλοντος, κατά τι διαφορετικού από αυτό των εργαστηριακών επιστημών, όπου η διαχείριση των παραπάνω φαινομένων είναι ελεγχόμενη, καθιστώντας τα υπολογιστικά περιβάλλοντα τον κατεξοχήν χώρο εφαρμογής των αστικών μοντέλων (Batty, 2009). Το γεγονός ότι κατά τους Batty και Longley (1994) η πόλη αποτελεί ένα εξαιρετικά πολύπλοκο σύστημα στο οποίο επιχειρήσαν πρώτοι να εφαρμόσουν τις αρχές της κλασματικής γεωμετρίας, όπως αναπτύχθηκαν από τον Mandelbrot, δείχνει ότι τα μοντέλα αστικής ανάπτυξης είναι απαραίτητα εργαλεία που μπορούν να απλουστεύσουν αυτή την πολυπλοκότητα κρατώντας όμως υψηλά επίπεδα εμπιστοσύνης στις μελλοντικές εικόνες που παράγουν.

Τα εν λόγω μοντέλα έχουν σημαντικό ρόλο σε διαδικασίες χωρικού σχεδιασμού και λήψης αποφάσεων. Σε αυτό το πλαίσιο, τα μοντέλα μπορούν να αναδείξουν επιπτώσεις μελλοντικών εικόνων και σεναρίων οι οποίες μπορούν να ανατροφοδοτήσουν στις αρχικές πολιτικές ώστε να συνάδουν με τους τελικούς στόχους, δημιουργώντας έτσι μία κυκλική διαδικασία ανάδρασης στην φάση του σχεδιασμού (Berglund, 2014). Γενικά, τα μοντέλα αυτά επιτρέπουν την καλύτερη κατανόηση των δυναμικών μίας πόλης, επιτρέπουν τον εικονικό πειραματισμό προσδιορίζοντας τις πιθανές επιπτώσεις νέων υποδομών, τεχνολογιών ή πολιτικών και τέλος ευνοούν διαδικασίες συμμετοχικού σχεδιασμού (Berglund, 2014).

Η χρησιμότητα, τόσο των αποτελεσμάτων, όσο και της γνώσης που παράγει ένα μοντέλο είναι εξίσου σημαντική με τη συνέπειά τους ως προς την πραγματικότητα. Έτσι, μπορεί αφενός να εκτιμήσει τη μελλοντική εξέλιξη ενός συστήματος και αφετέρου να

αποκαλύπτει τη δομή και τους μηχανισμούς του. Η χρησιμότητα δε των αστικών μοντέλων δεν εξαντλείται στην παραγωγή μεμονωμένων εκτιμήσεων-εικόνων για το μέλλον, αλλά ο ουσιαστικός τους ρόλος εντοπίζεται κυρίως στην αξιολόγηση διαφορετικών εξωγενών παρεμβάσεων και στην εκτίμηση της επίδρασής τους, καθοδηγώντας και προλαμβάνοντας, προκειμένου να προετοιμάσει τις πόλεις για τις μελλοντικές εξελίξεις ώστε να καθοδηγεί και όχι να αντιδρά εκ των υστέρων (Μαντέλας, 2011, σ. 9-10).

2.2. Θεωρητικές Προσεγγίσεις των Αστικών Μοντέλων

Πριν ξεκινήσουν στην πράξη να εφαρμόζονται τα μοντέλα αστικής ανάπτυξης, πρώτα έπρεπε να δημιουργηθεί και να αποσαφηνιστεί το θεωρητικό τους υπόβαθρο και πλαίσιο. Δηλαδή, οι κανόνες και οι παραδοχές που είναι αναγκαίες έτσι ώστε να απλουστευθεί η πολυπλοκότητα του συστήματος που ονομάζεται πόλη και να μπορέσει, έτσι, να μοντελοποιηθεί. Σε αυτό το πλαίσιο, η Liu (2008) σκιαγραφεί και κατηγοριοποιεί τις θεωρητικές προσεγγίσεις ως εξής:

- Η Αστική Οικολογική προσέγγιση (Urban Ecological Approach) βασίζεται στην αντίληψη ότι η ανθρώπινη συμπεριφορά καθορίζεται από συγκεκριμένες οικολογικές-βιολογικές αρχές, όπως ο ανταγωνισμός, η επιλογή, η διαδοχή και η κυριαρχία. Όπως και στα οικοσυστήματα, οι πιο εύπορες κοινωνικές ομάδες θα καταλαμβάνουν τις πιο ευνοϊκές τοποθεσίες για εγκατάσταση μέσα σε ένα αστικό περιβάλλον. Με βάση αυτή την προσέγγιση αναπτύχθηκαν τα μοντέλα των Burgess, Hoyt, Harris και Ullman που αναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο.
- Η Κοινωνικο-φυσική προσέγγιση (Social Physical Approach) βασίζεται στη θεώρηση της ανθρώπινης αλληλεπίδρασης στον χώρο, η οποία αναπτύχθηκε σε άμεση συσχέτιση με την επιστήμη της φυσικής. Πιο συγκεκριμένα, πιστεύει ότι ο νόμος της παγκόσμιας έλξης του Νεύτωνα μπορεί να γενικευτεί και σε κοινωνικό επίπεδο και να ορίζει τους κανόνες

με τους οποίους ένας άνθρωπος αλληλεπιδρά στο κοινωνικό σύνολο. Έτσι, το μοντέλο βαρήτητας ορίζει ότι οι αλλαγές πάνω σε θέματα κατοικίας ή εργασίας είναι ανάλογες της “μάζας” του κινήτρου για αλλαγή και αντιστρόφως ανάλογες του κόστους μετακίνησης. Το μοντέλο αυτό είχε ευρεία εφαρμογή σε μελέτες μετανάστευσης, δικτύων οικισμών και πόλεων την δεκαετία του 60'. Παρόλο που η Κοινωνικο-φυσική προσέγγιση εφαρμόστηκε ευρέως στα μοντέλα αστικής ανάπτυξης, εντούτοις παρουσίασε σαφείς περιορισμούς, καθώς απέτυχε να εξηγήσει τη διαδικασία που ωθεί τα άτομα να επιλέγουν μια συγκεκριμένη διαδρομή προς την εργασία, ενώ τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν υπό αυτή την προσέγγιση έδωσαν βαρύτητα στη συμπεριφορά των ομάδων αντί των ατόμων μεμονωμένα και δεν ασχολήθηκαν με σημαντικούς, αλλά μη ποσοτικούς παράγοντες.

- Σύμφωνα με την Νεοκλασική προσέγγιση (Neoclassical Approach), η διαδικασία της αστικής ανάπτυξης είναι ένα οικονομικό φαινόμενο, το οποίο καθοδηγείται από τους μηχανισμούς της αγοράς και τις φυσικές διεργασίες του ανταγωνισμού μεταξύ των διαφόρων οικονομικών δραστηριοτήτων και των κοινωνικών ομάδων εντός μιας αστικής περιοχής. Σύμφωνα με την οικονομική θεωρία του ισοζυγίου, ο διαμοιρασμός της αστικής γης στους διάφορους κατοίκους τόσο σε επίπεδο ποσότητας αλλά και τοποθεσίας, ελέγχεται από σχέσεις προσφοράς και ζήτησης που υπακούουν στην αρχή του ορθολογισμού. Έτσι, κάτω από μία σειρά περιοριστικών παραδοχών, ένα τυπικό μοντέλο αστικής οικονομίας αντικατοπτρίζει τα κόστη μετακίνησης και τα ενοίκια γης, στην μορφή που αποκτά η πόλη. Εξαιτίας του ότι τα μοντέλα της προσέγγισης αυτής αδιαφόρησαν για τον αντίκτυπο της ανθρώπινης συμπεριφοράς στο θέμα της αστικής ανάπτυξης και των διαδικασιών των προτύπων, η προσέγγιση αυτή τέθηκε υπό έντονη αμφισβήτηση από τους θεωρητικούς της συμπεριφορικής προσέγγισης και τους ανθρωπιστές.

- Η Προσέγγιση συμπεριφοράς (Behavioral Approach) έπεται ως κριτική των προηγούμενων θεωριών, συγκεκριμένα της οικολογικής και της νεοκλασικής, και εστιάζει στα κίνητρα που κρύβονται πίσω από την συμπεριφορά των ατόμων, στον τρόπο με τον οποίο τα άτομα αναζητούν και μαθαίνουν το αστικό τους περιβάλλον καθώς και στις διαδικασίες που οδηγούν σε ατομικές αποφάσεις. Ωστόσο, όπως και η κοινωνικο-φυσική προσέγγιση, η προσέγγιση συμπεριφοράς εξαιτίας της έμφασης στην συμπεριφορά των ατόμων μεμονωμένα, δέχτηκε πυρά από πολλές κατευθύνσεις στα τέλη της δεκαετίας του 70'.
- Η Συστημική προσέγγιση (Systems Approach) χρησιμοποιήθηκε καταρχήν στην αστική μοντελοποίηση το '60 και βασίστηκε στις έννοιες της Γενικής Θεωρίας των Συστημάτων σύμφωνα με την οποία όλα τα στοιχεία του συστήματος είναι συνδεδεμένα, αλληλένδετα και συνδέονται με το περιβάλλον του συστήματος. Επίσης, αλληλεπιδρούν μεταξύ τους μέσω των κοινωνικών, οικονομικών και χωρικών μηχανισμών, καθώς και με τα στοιχεία στο περιβάλλον. Η σημασία κάθε στοιχείου δεν εξαρτάται από το ίδιο, αλλά από τις σχέσεις του με τα υπόλοιπα και είναι τελικά οι σύνδεσμοι μεταξύ των διαφόρων στοιχείων που αποφασίζουν την εξέλιξή του και επιτρέπουν με αυτό τον τρόπο τη διαδικασία της αλλαγής εντός του συστήματος. Η αδυναμία αυτής της προσέγγισης έγκειται στο γεγονός ότι για να γίνουν τα μοντέλα πιο χρηστικά, κάποια εστίαζαν σε μικρά μέρη του συστήματος και όχι σε όλο το σύστημα ως ενιαία οντότητα ή άλλα χρησιμοποιούσαν απλοποιημένους μαθηματικούς τύπους για να παρουσιάσουν πολύπλοκες σχέσεις μεταξύ των μερών του συστήματος.

2.3. Τεχνικές και Μέθοδοι Μοντελοποίησης

Στο πλαίσιο ανάπτυξης μοντέλων αστικής ανάπτυξης, έχουν χρησιμοποιηθεί ποικίλες υπολογιστικές τεχνικές ως βάση για την σχεδίασή και την λειτουργία τους. Οι τεχνικές αυτές δεν είναι άμεσα διακριτές και πολλές φορές αλληλοκαλύπτονται και βασίζονται σε κοινές παραδοχές. Παρακάτω αναφέρονται συνοπτικά μερικά από τα είδη μοντέλων.

Καταρχάς, σχεδόν όλα τα μοντέλα εμπεριέχουν κάποιον μαθηματικό μηχανισμό, αλλά η κατηγορία των μαθηματικών-στατιστικών μοντέλων βασίζονται σε εξισώσεις που στοχεύουν στο να φτάσουν σε κάποια ισορροπία (Rui, 2013; Parker, Manson, Janssen, Hoffmann & Deadman, 2002). Μερικά μαθηματικά-στατιστικά μοντέλα είναι το MEPLAN και το TRANUS (Rui, 2013). Μία άλλη τεχνική που χρησιμοποιείται ως υπόβαθρο μοντέλων είναι αυτή της μικροπροσομοίωσης (micro-simulation) που όπως φανερώνει το όνομά της είναι μία τεχνική που εστιάζει σε επίπεδο ατόμου. Σύμφωνα με τους Waddell και Ulfarsson (2004), αρχικά τα μοντέλα μικροπροσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν ως συνδυασμός μοντέλων διακριτών επιλογών και κανόνων μετάβασης ώστε να προβλέπει μετακινήσεις στην εργασία και στην επιλογή κατοικίας.

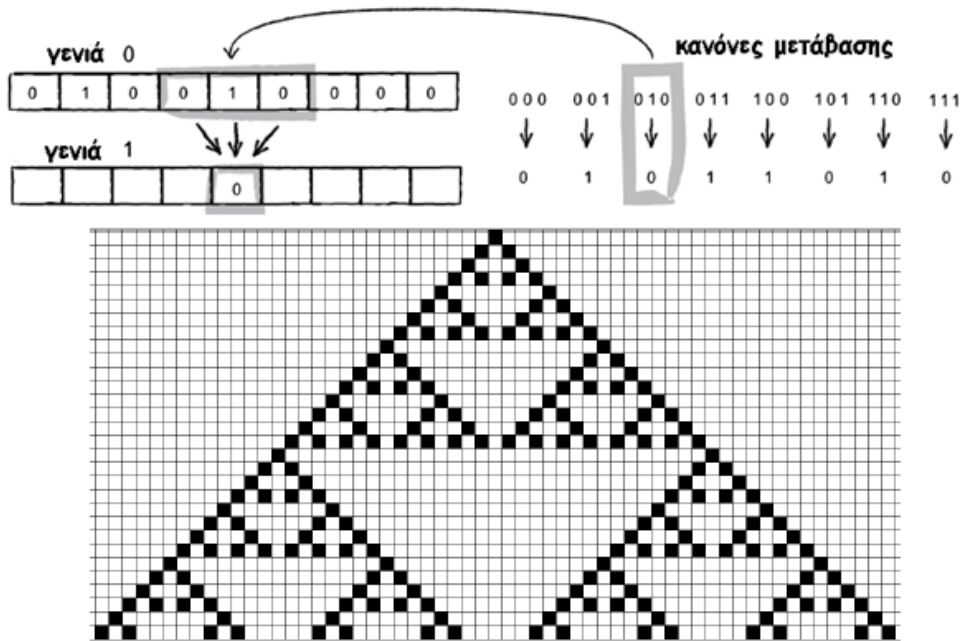
Μία ευρέως διαδεδομένη τεχνική είναι αυτή των πρακτόρων και συστημάτων πολλαπλών πρακτόρων (Agent based models & Multi-Agent Systems). Ένα μοντέλο πρακτόρων αποτελείται στην ουσία από πράκτορες ή αντικείμενα ή άτομα τα οποία μέσω συγκεκριμένων κανόνων, που προκύπτουν μέσα από παρατήρηση, εμπειρία ή δεδομένα, αλληλεπιδρούν (Rui, 2013). Στην βάση τους μοιάζουν αρκετά με τα μοντέλα μικροπροσομοίωσης αλλά διαφέρουν στο γεγονός ότι δύο πράκτορες που ανήκουν στην ίδια κατηγορία ατόμων μπορεί να λάβουν διαφορετικές αποφάσεις, άρα έχουν μεγαλύτερη αυτονομία σε σχέση με τα μοντέλα μικροπροσομοίωσης (Μαντέλας, 2011). Η μέθοδος που αποτελεί τον πυρήνα της παρούσας εργασίας, καθώς είναι αυτή που χρησιμοποιεί το μοντέλο που εφαρμόστηκε δηλαδή το SLEUTH, είναι αυτή των κυψελοειδών αυτομάτων για την

οποία γίνεται ξεχωριστή και εκτεταμένη μνεία στην επόμενη ενότητα. Η βασική διαφορά των μοντέλων πρακτόρων και των κυψελοειδών αυτομάτων είναι ότι στα πρώτα, τα κελιά μπορούν να μεταφερθούν και να κινούνται ελεύθερα στην γειτονιά τους ενώ στα κυψελοειδή αυτόματα, το κάθε κελί έχει συγκεκριμένες και μη μεταβλητές συντεταγμένες μέσα στον κάναβο (Torrens, 2003).

2.4. Κυψελοειδή Αυτόματα (Cellular Automata)

Ο Batty (2009, σ. 51) ορίζει τα κυψελοειδή αυτόματα ως μία κατηγορία αποκλειστικά χωρικών μοντέλων, που συνήθως δομούνται σε έναν διδιάστατο κάναβο, όπου το κάθε κελί του αντιπροσωπεύει μία χρήση γης και οι διαδικασίες αλλαγής εξαρτώνται από την “γειτονιά” του κάθε κελιού. Τα κυψελοειδή αυτόματα αναπτύχθηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 40’ από τους Ulam και Von Neumann (Sante, Garcia, Miranda & Crecente, 2010). Ο Sipper (1997) αναφέρει ότι οι Ulam και Von Neumann είχαν ως κίνητρο την αυστηρή μαθηματικοποίηση και προσομοίωση των αυτο-εξελισσόμενων των βιολογικών διεργασιών που παρατηρούνται στη φύση. Με άλλα λόγια, προσπάθησαν να απλουστεύσουν την πολυπλοκότητα των κανόνων αναπαραγωγής και να τους αναγάγουν σε λογικούς κανόνες. Ένας σημαντικός επιστήμονας που βοήθησε στην ανάπτυξη και διάδοση των κυψελοειδών αυτομάτων είναι ο Wolfram, ο οποίος υποστήριξε ότι τα φυσικά φαινόμενα, αν και πολύπλοκα, αποτελούνται από απλά και μη σύνθετα μέρη, έτσι εφαρμόζοντας την θεωρία των κυψελοειδών αυτομάτων, τα οποία επίσης αποτελούνται από απλά μέρη (δηλαδή τα κελιά), μπορούμε να μοντελοποιήσουμε σε κάποιο βαθμό τα φυσικά φαινόμενα (Wolfram, 1984). Ο Wolfram (1983) επίσης όρισε την πιο απλοϊκή μορφή ενός κυψελοειδούς αυτομάτου (elementary cellular automaton), δηλαδή μία μονοδιάστατη γραμμή από κελιά, τα οποία μπορούσαν να λάβουν την τιμή 0 ή 1, η γειτονιά τους θεωρήθηκε το αμέσως

προηγούμενο και το αμέσως επόμενο κελί, και πάνω σε αυτή τη διάταξη πειραματίστηκε θέτοντας διάφορους κανόνες μετάβασης που οδηγούσαν σε ποικίλα μοτίβα (Εικόνα 2-1).



Εικόνα 2-1: Παράδειγμα μονοδιάστατου κυψελοειδούς αυτόματου και κανόνα μετάβασης

Πηγή: Shiffman, 2012, σ. 328

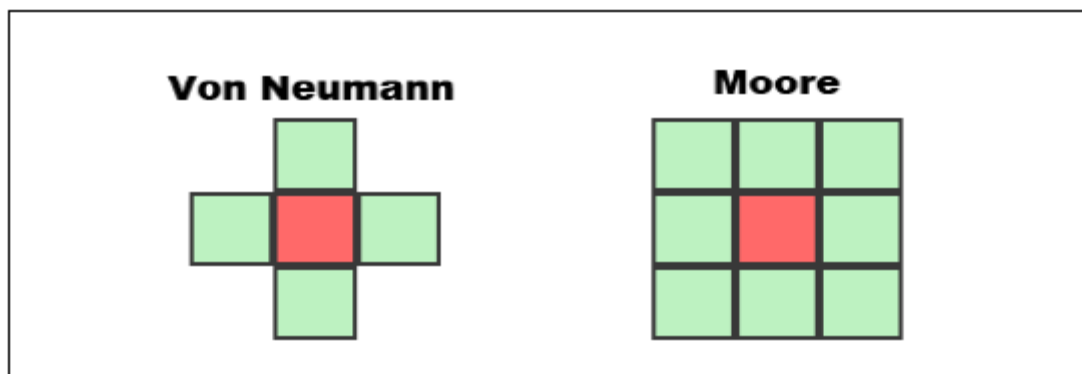
Ήταν προφανές ότι η θεωρία των κυψελοειδών αυτομάτων θα μπορούσε να έχει μεγάλη απήχηση στον τομέα της γεωγραφίας σε εφαρμογές αστικών μοντέλων, όπως πρώτα διαπίστωσε και πρότεινε στην επιστημονική κοινότητα ο Tobler (1979). Λίγα χρόνια αργότερα η Couclelis (1985), εμπνευσμένη από το έργο του Tobler, εισήγαγε την θεωρία διακριτών συστημάτων ως προσέγγιση των μοντέλων αστικής ανάπτυξης, θέτοντας τα θεμέλια για μία νέα εποχή με πληθώρα υπολογιστικών εφαρμογών πάνω στα αστικά μοντέλα.

2.4.1. Χαρακτηριστικά ενός κυψελοειδούς αυτομάτου

Τα περισσότερα αστικά μοντέλα, παρά τις διαφορές τους, δεν παύουν να στηρίζονται πάνω στην φιλοσοφία και θεωρία των κυψελοειδών αυτομάτων. Κατά βάση, τα κυψελοειδή

αυτόματα έχουν ορισμένα χαρακτηριστικά που τα περιγράφουν και αποτελούν τα δομικά στοιχεία λειτουργίας τους. Σύμφωνα με την Liu (2008, σ. 28), ένα τυπικό κυψελοειδές αυτόματο αποτελείται από τα εξής χαρακτηριστικά:

- Το κύτταρο ή κελί (cell), το οποίο αποτελεί την βασική χωρική μονάδα σε ένα κανάβο. Η πιο συνηθισμένη μορφή είναι αυτή του διδιάστατου ψηφιδωτού ή κανάβου στην μοντελοποίηση τις αστικής ανάπτυξης και της αλλαγής των χρήσεων γης. Άλλες μορφές που μπορούν να εμφανιστούν είναι αυτές των κυψελών που αποτελούνται από εξάγωνα, αντί για τετράγωνα που ισχύουν στην περίπτωση του κανάβου, ή ακόμα και τριδιάστατες διατάξεις όπου η τρίτη διάσταση μπορεί να αναπαριστά το ύψος των κτιρίων του αστικού μοντέλου.
- Την κατάσταση (state), που αφορά την κατάσταση που μπορεί να έχει το κάθε κελί, ο οποίος μπορεί να αντιπροσωπεύεται από μία τιμή, όπως στο μονοδιάστατο αυτόματο του Wolfram. Στα αστικά μοντέλα, συνήθως το κάθε κελί δέχεται και ένα αντίστοιχο χρώμα ανάλογα με την χρήση γης που αντιπροσωπεύει.
- Την γειτονιά (neighborhood), που είναι ουσιαστικά το σύνολο των κελιών με το οποίο το κάθε μεμονωμένο κελί αλληλεπιδρά. Στον διδιάστατο χώρο, υπάρχουν δύο τύποι γειτονιάς, η γειτονιά Von Neumann και η γειτονιά Moore (Εικόνα 2-2).



Εικόνα 2-2: Γειτονιά Von Neumann και γειτονιά Moore

Πηγή: Σταυράκου, 2014, σ. 50

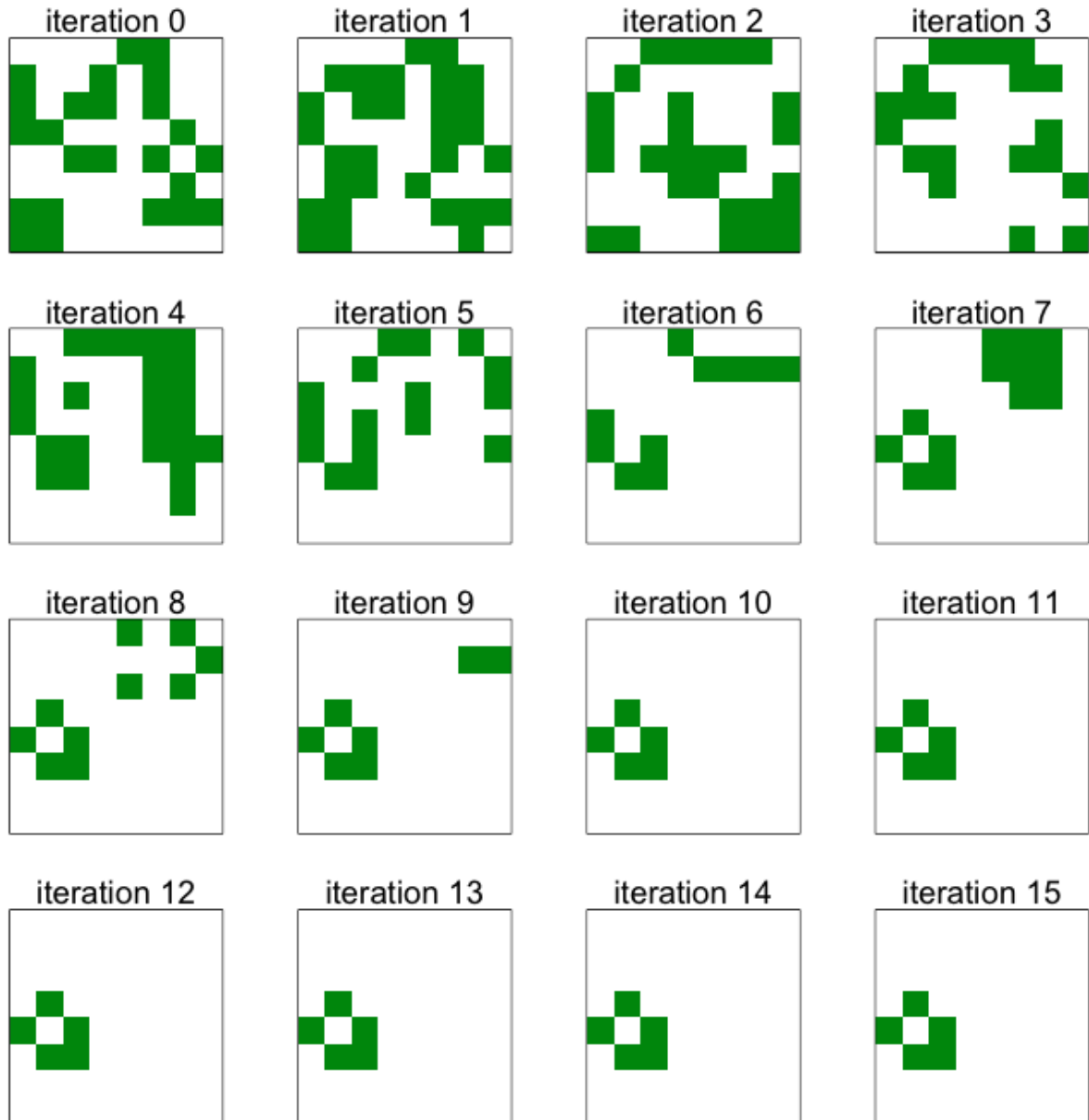
- Τους κανόνες μετάβασης (transition rule), οι οποίοι ορίζουν πως το κάθε κελί αλλάζει σε συνάρτηση με την τωρινή του κατάσταση και την κατάσταση των γειτονικών κελιών. Οι κανόνες μετάβασης είναι συνήθως ομοιόμορφοι για όλα τα κελιά του συστήματος και εφαρμόζονται ταυτόχρονα.
- Τον χρόνο (time), με την έννοια ότι κάθε μετάβαση αντιπροσωπεύει το πέρας συγκεκριμένου χρόνου, για παράδειγμα ένα έτος ανά μετάβαση.

2.4.2. Το παιχνίδι της ζωής του Conway (Conway's game of life)

Η πρώτη σημαντική εφαρμογή μοντέλου κυψελοειδών αυτομάτων ήταν το παιχνίδι της ζωής του Conway (Gardner, 1970). Πρόκειται για ένα παιχνίδι ουσιαστικά σε διδιάστατο κάναβο όπου η γειτονιά του κάθε κελιού ορίζεται κατά Moore. Οι κανόνες μετάβασης είναι απλούστατοι, σε αντίθεση με αυτούς του Von Neumann, καθότι ο Conway ήθελε να πετύχει συμπεριφορές παρόμοιες με αυτές που παρατηρούνται στην πραγματική ζωή με όσο το δυνατόν πιο απλούς κανόνες (Shiffman, 2012). Κατά τον Gardner (1970), οι κανόνες μετάβασης είναι:

- Ο κανόνας επιβίωσης, σύμφωνα με τον οποίο, κάθε ενεργό ή “ζωντανό” κελί που έχει δύο ή τρία ενεργά κελιά εντός της γειτονιάς του, παραμένει ενεργό και στην επόμενη γενιά
- Ο κανόνας θανάτου, σύμφωνα με τον οποίο, κάθε ενεργό κελί με τέσσερις ή παραπάνω ενεργούς γείτονες γίνεται ανενεργό στην επόμενη γενιά, λόγω υπερπληθυσμού. Επίσης, κάθε ενεργό κελί με ένα μόνο ή κανένα ενεργό γειτονικό κελί θα γίνει ανενεργό στην επόμενη γενιά λόγω απομόνωσης.
- Ο κανόνας γεννησης, σύμφωνα με τον οποίο εάν ένα ανενεργό κελί που έχει στην γειτονιά του ακριβώς 3 ενεργά κελιά, θα γίνει και αυτό ενεργό την επόμενη γενιά

Με βάση τους κανόνες μετάβασης του game of life, στην Εικόνα 2-3 φαίνεται ένα αυθαίρετο παράδειγμα εφαρμογής του αλγορίθμου το οποίο καταλήγει σε αδράνεια μετά από την δέκατη επανάληψη.



Εικόνα 2-3: Αυθαίρετο παράδειγμα εφαρμογής του game of life

Πηγή: <https://bmscblog.files.wordpress.com/2013/05/life-blog-image-2.png> Τελευταία πρόσβαση 7/10/2015

Ο Conway επέλεξε τους κανόνες του μετά από προσεκτική μελέτη, ώστε να ικανοποιούν τα ακόλουθα τρία κριτήρια, με στόχο η συμπεριφορά του μοντέλου να μην είναι προβλεψιμη (Gardner, 1970):

- να μην υπάρχει αρχικό πρότυπο για το οποίο να υπάρχει έστω και μια μικρή απόδειξη ότι ο πληθυσμός μπορεί να αναπτυχθεί χωρίς όρια.
- να μην υπάρχουν αρχικά πρότυπα που προφανώς αναπτύσσονται χωρίς όρια.
- να υπάρχουν απλά αρχικά πρότυπα, τα οποία μεγαλώνουν και αλλάζουν για μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο, πριν “πεθάνουν”, εξαιτίας υπερπληθυσμού ή απομόνωσης ή με το να βρεθούν σε μια σταθερή κατάσταση η οποία δεν αλλάζει περαιτέρω ή να εισέλθουν σε μια φάση κατά την οποία επαναλαμβάνουν έναν ακατάπαυστο κύκλο δύο ή τριών περιόδων.

Ο Bays (1987) μελέτησε τους πιθανούς τρόπους με τους οποίους το παιχνίδι της ζωής θα μπορούσε να μεταφερθεί στις τρεις διαστάσεις και υπό ποιους κανόνες μετάβασης θα προγραμματιζόταν.

2.5. Το Μοντέλο SLEUTH

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο SLEUTH για την προσομοίωση της αστικής ανάπτυξης της περιοχής των Μεσογείων Αττικής. Το μοντέλο αυτό κατέχει υψηλή θέση στην παγκόσμια κατάταξη μοντέλων αστικής ανάπτυξης και είναι ευρέως διαδεδομένο. Το μοντέλο είναι βασισμένο στα κυψελοειδή αυτόματα και αναπτύχθηκε από τους Clarke, Hoppen και Gaydos (1997) σε συνεργασία με την Γεωλογική Υπηρεσία των Ηνωμένων Πολιτειών (USGS) και την NASA και εφαρμόστηκε για την πρόβλεψη της αστικής ανάπτυξης των παραλίων του Σαν Φρανσίσκο. Πρόκειται για ένα λογισμικό ανοιχτού κώδικα (open-source) γραμμένο στην γλώσσα προγραμματισμού C, που είναι

διαθέσιμο πλέον μέσω της ιστοσελίδας του Project Gigaopolis (<http://www.ncgia.ucsb.edu/projects/gig/> Τελευταία πρόσβαση 4/8/2015). Οι κανόνες μετάβασης του SLEUTH είναι πιο σύνθετοι από ένα απλο κυψελοειδές αυτόματο (Clarke et al., 1997) και αποτελείται στη ουσία από δύο υπομοντέλα, το πρώτο αφορά την πρόβλεψη της αστικής διάχυσης (Urban Growth Model-UGM) και το δεύτερο που ονομάζεται Deltatron χρησιμοποιείται προαιρετικά για την μοντελοποίηση των διαφόρων χρήσεων γης πέρα από την αστική (Dietzel & Clarke, 2004). Το όνομά του προέρχεται από το σετ δεδομένων εισαγωγής που απαιτείται για την σωστή λειτουργία του, δηλαδή τις κλίσεις εδάφους της περιοχής μελέτης (Slope), τις χρήσεις γης (Land-use), τις εξαιρούμενες περιοχές από την αστική ανάπτυξη (Excluded), τις αστικές περιοχές (Urban), το οδικό δίκτυο (Transportation) και την σκίαση αναγλύφου (Hillshade) (Liu, 2008). Η πληροφορία του αναγλύφου είναι απαραίτητη έτσι ώστε να είναι γνωστές οι περιοχές με ήπιο ανάγλυφο, άρα ευνοϊκές και καταλληλότερες για αστικοποίηση ενώ η σκίαση του αναγλύφου είναι προαιρετική και χρησιμοποιείται για λόγους οπτικοποίησης (Dietzel & Clarke, 2004). Το επίπεδο των χρήσεων γης απαιτεί τουλάχιστον δύο διαφορετικά χρονικά στιγμιότυπα για να λειτουργήσει το μοντέλο Deltatron, όπως και δύο είναι τα χρονικά στιγμιότυπα του οδικού δικτύου που απαιτούνται για το μοντέλο αστικής ανάπτυξης (Dietzel & Clarke, 2004). Όπως αναφέρουν οι Dietzel και Clarke (2004), το επίπεδο των εξαιρούμενων περιοχών από την αστική ανάπτυξη επιτρέπει στον χρήστη να θέσει περιορισμούς όμως το πιο σημαντικό επίπεδο πληροφορίας είναι αυτό της αστικής γης, το οποίο απαιτεί τέσσερα διαφορετικά χρονικά στιγμιότυπα τα οποία είναι κρίσιμα για το στάδιο της βαθμονόμησης του μοντέλου (calibration) και λειτουργούν ως σημεία ελέγχου.

Η ικανότητα ενός μοντέλου να προβλέψει με ικανοποιητική ακρίβεια την αστική ανάπτυξη, είναι άμεση συνάρτηση της σωστής και πετυχημένης βαθμονόμησης (Clarke et al., 1996). Κατά την φάση της βαθμονόμησης, επιχειρείται να βρεθεί ο βέλτιστος συνδυασμός

μεταξύ των πέντε παραμέτρων του μοντέλου, δηλαδή της διάχυσης (diffusion), της αναπαραγωγής (breed), της διάδοσης (spread), της αντίστασης στην κλίση του εδάφους (slope resistance) και την οδική βαρύτητα (road gravity), μέσα από τον οποίο περιγράφεται και μοντελοποιείται βέλτιστα η “διαδρομή” μεταξύ των παλαιότερων δεδομένων εισόδου και των νεότερων δεδομένων εισόδου (Clarke et al., 1997). Ο αλγόριθμος που περιορίζει το εύρος των παραμέτρων, ώστε να βρεθεί ο καλύτερος δυνατός συνδυασμός τους, αποτελεί μια περιοχή διαρκούς συζήτησης μεταξύ των χρηστών, χωρίς να έχει συμφωνηθεί κάποιος “ορθός” τρόπος έως τώρα, ενώ υπάρχουν διαφορετικές προσεγγίσεις που περιλαμβάνουν, είτε την ταξινόμηση όλων των δεικτών εξίσου, είτε δίνοντας βάρος σε κάποιους δείκτες, είτε ακόμα και μόνο σε έναν. Γεγονός υπό διερεύνηση αποτελεί επίσης η επιλογή του αριθμού των αποτελεσμάτων που επηρεάζουν την επιλογή του εύρους των παραμέτρων με προτάσεις που αφορούν τις 5, 10 ή ακόμα και 50 καλύτερες. Με την σειρά τους οι πέντε παράμετροι επηρεάζουν τέσσερις τύπους ανάπτυξης που ορίζει το μοντέλο, δηλαδή την αυθόρμητη ανάπτυξη (spontaneous growth) η οποία προάγει την ανάπτυξη σε περιοχές με κατάλληλη κλίση και ελέγχεται από την παράμετρο διάχυση, την διαχέουσα ανάπτυξη και δημιουργία νέων κέντρων ανάπτυξης (diffusive growth and creation of new growth centers), την οργανική (organic growth) η οποία προσομοιώνει την ανάπτυξη των προαστίων και των κενών περιοχών εντός της πόλης και τέλος η επηρεαζόμενη από το οδικό δίκτυο (road influenced growth) η οποία εκφράζει την τάση για αστικοποίηση κοντά σε περιοχές με προσβασιμότητα (Silva & Clarke, 2002).

Εκτός από αυτό το σετ ειδών ανάπτυξης, το μοντέλο έχει την δυνατότητα της αυτοτροποποίησης και αναπροσαρμογής σε περιπτώσεις όπου παρατηρείται εξαιρετικά ταχεία αστική ανάπτυξη ή στην αντίθετη περίπτωση, καθόλου ανάπτυξη, τότε στην πρώτη περίπτωση το μοντέλο πολλαπλασιάζει τις παραμέτρους με μία τιμή μεγαλύτερη της μονάδας ενώ στην δεύτερη με μία τιμή μικρότερη της μονάδας (Silva & Clarke, 2002). Οι Silva και

Clarke (2002) επίσης σημειώνουν ότι χωρίς αυτούς τους κανόνες αυτοτροποποίησης το μοντέλο θα παρήγαγε μόνο γραμμική ή εκθετική ανάπτυξη.

Μετά την αρχική εφαρμογή του SLEUTH στη ακτή του Σαν Φρανσίσκο, ακολούθησε πληθώρα εφαρμογών σε περιοχές της Αμερικής όπως στην περιοχή της Βαλτιμόρης-Ουάσινγκτον (Jantz, Goetz & Shelley, 2003), στην βορειοδυτική Φλόριντα (Donoso, 2008) και στο Φοίνιξ (Berling-Wolff & Wu, 2004). Μέχρι σήμερα έχουν δημοσιευθεί τέσσερα review-papers για το SLEUTH (Clarke, Gazulis, Dietzel & Goldstein, 2007; Clarke, 2008a; Clarke, 2008b; Chaudhuri & Clarke, 2013). Η τελευταία έκδοση του SLEUTH ονομάζεται SLEUTH-3r παρουσιάστηκε από τους Jantz, Goetz, Donato και Claggett (2010) θέλοντας να αντιμετωπίσουν αδυναμίες της προηγούμενης έκδοσης όπως είναι η μη αποδοτική διαχείριση των πόρων μνήμης από το σύστημα που εκτελεί το μοντέλο και η αδυναμία του μοντέλου να λάβει υπόψην περιοχές που είναι πιο πιθανό να αστικοποιηθούν. Έτσι, η νέα έκδοση έχει ως κύρια χαρακτηριστικά την αποδοτικότερη αξιοποίηση των υπολογιστικών πόρων του συστήματος και την ικανότητα να συμπεριλαμβάνει οικονομικούς, πολιτιστικούς και παράγοντες πολιτικής κατά το στάδιο πρόβλεψης (Jantz et al. 2010).

3. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας είναι η ευρύτερη περιοχή των Μεσογείων Ανατολικής Αττικής (Εικόνα 3-1) που περιλαμβάνει τους δήμους Παλλήνης, Ραφήνας-Πικερμίου, Σπατών-Αρτέμιδος, Μαρκοπούλου Μεσογαίας, Κρωπίας και Παιανίας των οποίων τα όρια καθορίζονται σύμφωνα με το σχέδιο Καλλικράτης και έχουν συνολική έκταση 390918 στρέμματα. Ακολουθούν πληροφορίες για την επιλογή της περιοχής μελέτης και πληθυσμιακά στοιχεία.

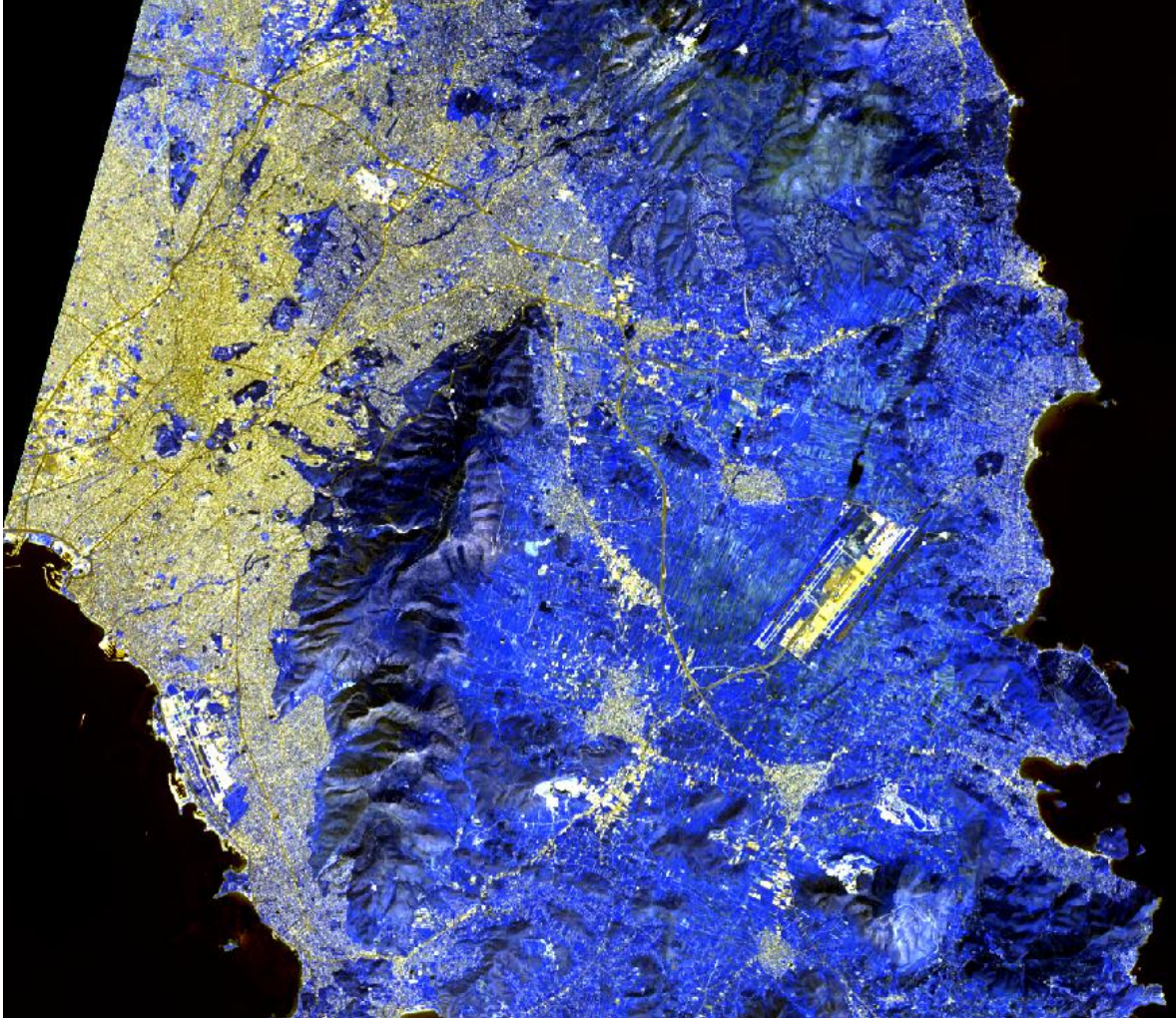


Εικόνα 3-1: Η θέση της περιοχής μελέτης

3.1. Η Επιλογή της Περιοχής Μελέτης

Παρατηρώντας κανείς την περιφέρεια Αττικής, μέσα από μία εικόνα δορυφόρου, είναι άμεσα αντιληπτό ότι το λεκανοπέδιο Αττικής αποτελεί έναν χώρο πλήρως οικιστικά κορεσμένο, ενώ ανατολικά του όρους Υμηττού παρατηρείται ένα τελείως διαφορετικό τοπίο με αντίθετα αστικά μοτίβα (Εικόνα 3-2). Σε αυτό το πλαίσιο, η περιοχή της Ανατολικής

Αττικής αποτελεί ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα περιοχή μελέτης της αστικής διάχυσης, καθώς διαθέτει ελεύθερους χώρους στους οποίους μπορούν οι αστικοί πυρήνες των δήμων υπό μελέτη να επεκταθούν.



Εικόνα 3-2: Σύγκριση αστικής γης Ανατολικής και δυτικής Αττικής, μέσα από δορυφορική εικόνα από Landsat 8 σε σύνθετο καναλιών 7-6-4

Από τους ολυμπιακούς αγώνες του 2004 και έπειτα, τα ολυμπιακά έργα, η Αττική οδός, ο διεθνής αερολιμένας στα Σπάτα, τα έργα υποδομής όπως το δίκτυο μετρό, η περιφερειακή Υμηττού και ο προαστιακός σιδηρόδρομος και οι πολυάριθμες αθλητικές εγκαταστάσεις αποτελούν έργα που έχουν αλλάξει την αστική μορφή των Μεσογείων,

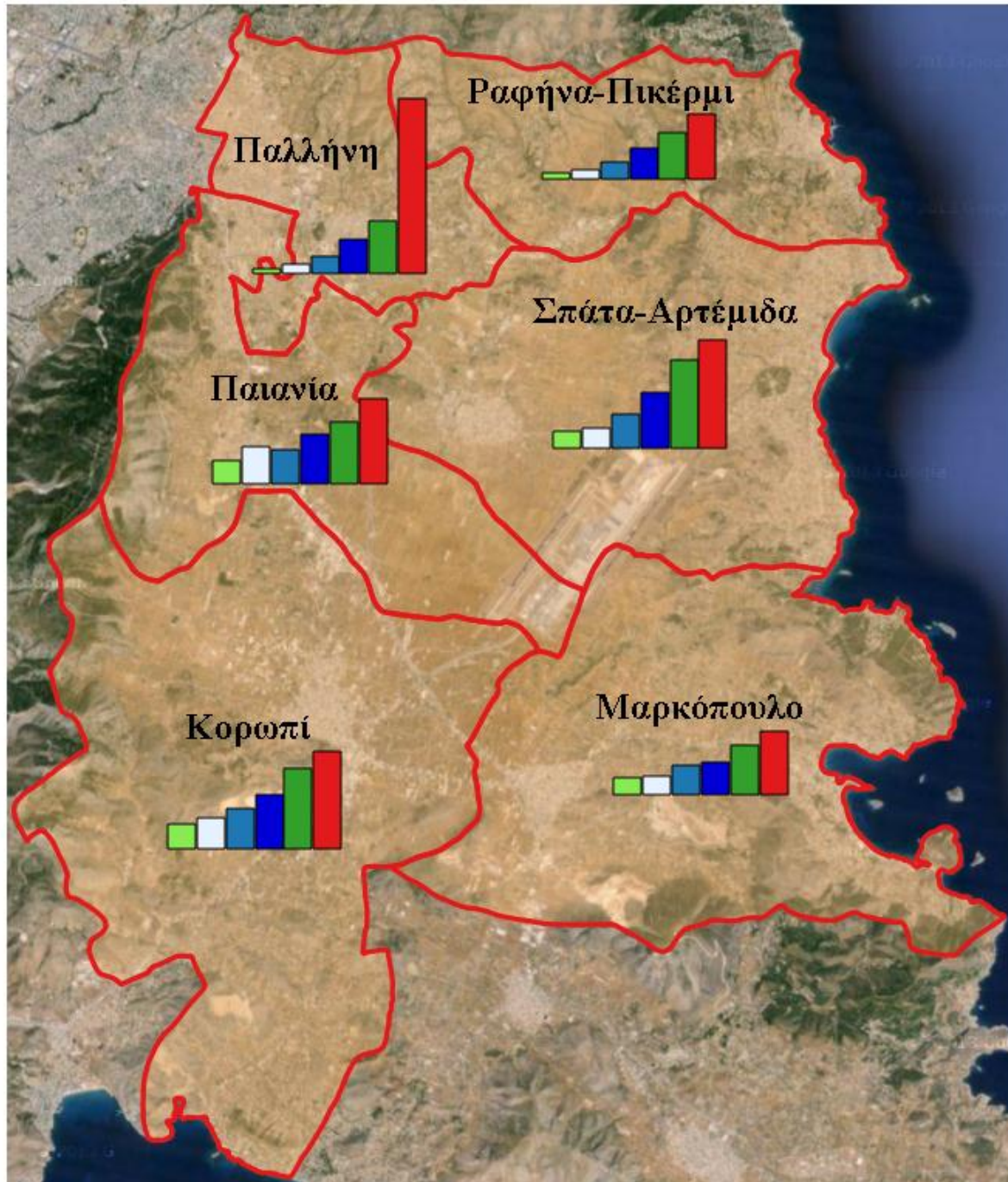
δίνοντας όλο και περισσότερα κίνητρα για εγκατάσταση στους δήμους της Ανατολικής Αττικής.

3.2. Πληθυσμιακά Στοιχεία

Τα διαχρονικά πληθυσμιακά στοιχεία για τους δήμους της Ανατολικής Αττικής (Εικόνα 3-3) αντικατοπτρίζουν, όπως είναι φυσικό, και την οικιστική ανάπτυξη που έχει παρατηρηθεί τις τελευταίες δεκαετίες. Στο διαγράμμα που ακολουθεί, για τις απογραφές πριν το 2011, ο δήμος Παιανίας περιλαμβάνει και τον πληθυσμό των Γλυκών Νερών ενώ για τους δήμους Ραφήνας-Πικερμίου και Σπάτων-Αρτέμιδας, τα δεδομένα αθροίστηκαν για τους επιμέρους, μέχρι πρότινος, δήμους.

Το Ρυθμιστικό Σχέδιο Αθήνας (ΡΣΑ) του 1965 είχε ως χώρο αναφοράς το λεκανοπέδιο Αθήνας και το Θριάσιο Πεδίο, εξαιρώντας τα Μεσόγεια επειδή εκείνη την εποχή θεωρήθηκαν ότι δεν ανήκουν στην ευρύτερη πρωτεύουσα άρα δεν εντάχθηκαν στη μελέτη (Αραβαντινός, 2007). Πιθανόν, να υπήρχε τότε η αντίληψη ότι θα μπορούσαν τα Μεσόγεια να μείνουν μία αμιγής γεωργική περιοχή με κάποια παραδοσιακά χωριά (Αραβαντινός, 2007), κάτι που τελικά δεν συνέβη όπως αποδεικνύεται και από τα πληθυσμιακά δεδομένα που ξεπερνούν κατά πολύ την κλίμακα μεγέθους ενός μικρού οικισμού.

Μέσα από την Εικόνα 3-3 είναι άμεσα αντιληπτό το πόσο ραγδαία εξελίσσονται οι πληθυσμοί των δήμων Μεσογείων. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση του δήμου Παλλήνης που από τους 16679 κατοίκους το 2001, έφτασε τους 54415 το 2011. Ομοίως, όλοι οι υπόλοιποι δήμοι παρουσιάζουν ανοδική πορεία στον πραγματικό τους πληθυσμό, με μόνη εξαίρεση τον δήμο Παιανίας, ο οποίος είχε μειωμένο πληθυσμό μεταξύ των ετών 1971-1981 όμως μετέπειτα παρουσιάζει και αυτός ανοδική πορεία.



	Παλλήνη	Ραφήνα-Πικέρμι	Σπάτα-Αρτέμιδα	Μαρκόπουλο	Κορωπί	Παιανία
■ 1961	1909	2350	5629	5341	8029	7431
□ 1971	3190	2936	6425	5945	9716	11827
■ 1981	5475	5503	10647	9388	12893	10832
■ 1991	10908	9904	17281	10499	16813	15540
■ 2001	16679	14840	27594	15608	25325	19636
■ 2011	54415	20266	33821	20040	30307	26668

Εικόνα 3-3: Εξέλιξη πραγματικού πληθυσμού την περίοδο 1961-2011

Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ

4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ SLEUTH ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Αυτό το κεφάλαιο περιγράφει όλη την διαδικασία εφαρμογής του μοντέλου SLEUTH στην περιοχή των Μεσογείων, όπως αυτή παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα. Καταρχάς, αναλύεται η μεθοδολογική προσέγγιση, η διαδικασία συλλογής των δεδομένων εισόδου που απαιτεί το μοντέλο, από διάφορες πηγές, καθώς και οι μετέπειτα ενέργειες κατά το στάδιο της βαθμονόμησης και πρόβλεψης του μοντέλου.

4.1. Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που εφαρμόζεται σε αυτή την εργασία διαφέρει αρκετά ως προς την παραδοσιακή προσέγγιση πρόγνωσης της αστικής διάχυσης σε μία περιοχή μελέτης. Συγκεκριμένα, οι τυπικές εφαρμογές στην διεθνή βιβλιογραφία εστιάζουν στην μελέτη και τον σχολιασμό του σεναρίου πρόγνωσης καταλήγοντας σε ορισμένα συμπεράσματα. Στην παρούσα εργασία, η μεθοδολογική προσέγγιση εξετάζει δύο μεθόδους βαθμονόμησης, άρα δύο διαφορετικά διακριτά σενάρια πρόγνωσης. Συγκρίνοντας στο τέλος τα δύο σενάρια και τις μεθόδους βαθμονόμησης προκύπτουν ποιοτικές και ποσοτικές διαφορές των δύο μεθόδων που αναλύονται σε επόμενα κεφάλαια..

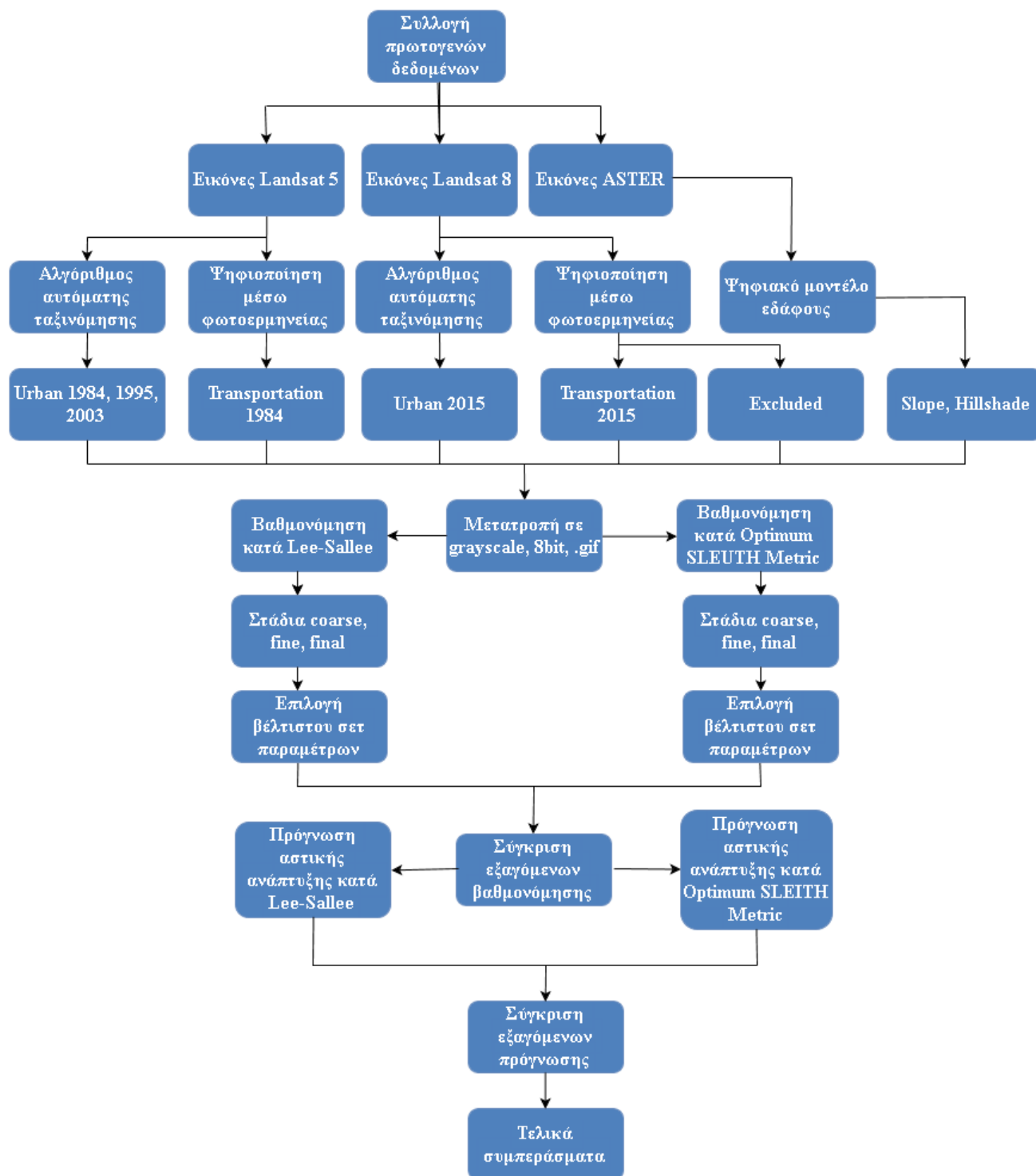
Όπως φαίνεται στο διάγραμμα ροής της Εικόνας 4-1, πρώτο στάδιο της διαδικασίας είναι η συλλογή των πρωτογενών δεδομένων. Τα πρωτογενή δεδομένα αντλήθηκαν από πηγές ανοιχτών δεδομένων στο Διαδίκτυο. Στην ουσία πρόκειται για δορυφορικές εικόνες για τα έτη 1984, 1995, 2003 και 2015 από τα οποία με μεθόδους ψηφιακής τηλεπισκόπησης προκύπτουν τα κατάλληλα επίπεδα πληροφορίας που απαιτεί το SLEUTH ως δεδομένα εισόδου. Η μέθοδος αυτόματης ταξινόμησης εικόνας χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο spectral angle mapping ο οποίος υπολογίζει την φασματική ομοιότητα μεταξύ του δείγματος που επιλέγει ο χρήστης και των υπόλοιπων pixel της εικόνας (Kruse et al., 1993). Σε αυτή την περίπτωση μιλάμε για μία χαρακτηριστική αστική περιοχή η οποία επιλέγεται για να

υπολογιστεί η φασματική υπογραφή με βάση την οποία θα ταξινομηθεί αυτόματα η εικόνα σε αστικά και μη αστικά pixel. Για την σκίαση του αναγλύφου, ως προσανατολισμός της φωτεινής πηγής επιλέχθηκε ο βορειο-δυτικός διότι έχει αποδειχθεί εμπειρικά ότι έτσι ο άνθρωπος ερμηνεύει καλύτερα τους ορεινούς σχηματισμούς, δηλαδή με αυτόν τον τρόπο ο χρήστης ερμηνεύει την φωτοσκίαση με τρόπο που οι κοιλότητες και οι κορυφογραμμές του αναγλύφου να ερμηνεύονται ορθά (Νάκος, 2011).

Στην συνέχεια, εκτελείται η βαθμονόμηση του μοντέλου με τις μεθόδους Lee-Salle και Optimum SLEUTH Metric. Στην πρώτη μέθοδο, τα αποτελέσματα ταξινομούνται κατά τον χωρικό δείκτη Lee-Sallee ο οποίος ορίζεται ως το αποτέλεσμα της τομής προς την ένωση των εικόνων που προκύπτουν από προσομοίωση και των πραγματικών εικόνων αστικής γης που παρέχει ο χρήστης (Clarke, Hoppen & Gaydos, 1996). Η δεύτερη μέθοδος είναι χρησιμοποιεί τον δείκτη Optimum SLEUTH Metric ο οποίος δημοσιεύτηκε από τους Dietzel και Clarke (2007) και χρησιμοποιεί επτά από τους δεκατρείς δείκτες που παράγει το SLEUTH όταν δεν χρησιμοποιείται το μοντέλο Deltatron, ενώ χρησιμοποιεί οκτώ στην αντίθετη περίπτωση. Οι δείκτες που επέλεξαν είναι οι compare, population, edges, clusters, slope, X-mean και Y-mean ενώ απέρριψαν τον δείκτη Lee-Sallee διότι ήταν αβέβαιο ότι παράγει μοναδικά αποτελέσματα σε σχέση με τους άλλους δείκτες. Όλοι οι δείκτες έχουν τιμές από 0 έως 1 ενώ ο τελικός βέλτιστος δείκτης (OSM) είναι το γινόμενο των εφτά επικρατέστερων δεικτών (Dietzel & Clarke, 2007). Η βαθμονόμηση γίνεται σε στάδια (coarse, fine, final) μέσα από τα οποία τα εύρη των παραμέτρων σταδιακά συγκλίνουν προς τις βέλτιστες τιμές που προσαρμόζονται καλύτερα στα δεδομένα εισόδου. Σε επόμενες ενότητες αναλύονται τα αποτελέσματα των βαθμονομήσεων για κάθε στάδιο.

Τέλος, χρησιμοποιώντας τα εξαγόμενα των βαθμονομήσεων, δηλαδή τα δύο σετ βέλτιστων παραμέτρων περνάμε στην φάση πρόγνωσης του μοντέλου με χρονικό ορίζοντα το έτος 2045. Παρατηρώντας και συγκρίνοντας τους χάρτες πιθανότητας, που αποτελούν τα

εξαγόμενα της φάσης πρόγνωσης, διακρίνονται οι τάσεις αστικοποίησης για την περιοχή μελέτης καθώς και οι ποιοτικές και ποσοτικές διαφορές των μεθόδων βαθμονόμησης.



Εικόνα 4-1: Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας της εργασίας

4.2. Συλλογή Πρωτογενών Δεδομένων

Το μοντέλο SLEUTH απαιτεί ορισμένα δεδομένα εισόδου προκειμένου να προβλέψει την αστική διάχυση μίας περιοχής. Αυτά, όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι η κλίση (Slope), οι χρήσεις γης (Land-use), οι εξαιρούμενες περιοχές από την αστικοποίηση (Excluded), η αστική γη (Urban), το οδικό δίκτυο (Transportation) και τέλος η σκίαση αναγλύφου (Hillshade). Τα δεδομένα των χρήσεων γης, της αστικής γης και του οδικού δικτύου είναι ιστορικά, δηλαδή αναφέρονται σε συγκεκριμένα έτη αναφοράς του παρελθόντος, ενώ τα στοιχεία των κλίσεων, της σκίασης αναγλύφου, και των εξαιρουμένων περιοχών, παραμένουν σταθερά (Εικόνα 4-2). Στην παρούσα εργασία δεν χρησιμοποιείται το μοντέλο Deltatron που μοντελοποιεί τις διάφορες χρήσεις γης πέρα από την αστική, άρα το επίπεδο των χρήσεων γης δεν απαιτείται.

Για την επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων, ήταν απαραίτητη η χρήση ενός ΓΣΠ. Επιλέχθηκε το QGIS (έκδοση 2.8.1) διότι αποτελεί open-source λογισμικό και διατίθεται ελεύθερα, είναι εύχρηστο και με φιλικό προς τον χρήστη περιβάλλον. Με το QGIS γίνεται δυνατή η επεξεργασία, οπτικοποίηση και μορφοποίηση των απαιτούμενων επιπέδων πληροφορίας. Τα τελικά δεδομένα εισαγωγής πριν αρχίσει η εκτέλεση του μοντέλου θα πρέπει να έχουν την μορφή εικόνας σε format .gif, να έχουν την ίδια ακριβώς ανάλυση-διάσταση και να είναι 8bit, δηλαδή σε τόνους του γκρι όπου το κάθε εικονοστοιχείο (pixel) να έχει τιμές από 0 έως 255. Για αυτόν το σκοπό χρησιμοποιήθηκε επίσης το λογισμικό Photoshop (έκδοση 7.0). Τα δεδομένα υπέστησαν επαναπροβολή στο σύστημα ΕΓΣΑ 87' μέσα από το QGIS και απομόνωση της περιοχής μελέτης από τις δορυφορικές εικόνες. Σε ακόλουθες υποενότητες αναπτύσσονται τα δεδομένα εισαγωγής που χρησιμοποιήθηκαν.

Αστική γη (Urban)	<ul style="list-style-type: none"> Απαιτούνται τουλάχιστον 4 επίπεδα πληροφορίας από 4 διαφορετικές χρονικές στιγμές
Χρήσεις γης (Land-use)	<ul style="list-style-type: none"> Προαιρετικό επίπεδο, σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί απαιτούνται 2 τουλάχιστον επίπεδα όπου το πρώτο και το τελευταίο να ταυτίζονται χρονικά με το πρώτο και το τελευταίο επίπεδο της αστικής γης
Οδικό δίκτυο (Transportation)	<ul style="list-style-type: none"> Απαιτούνται τουλάχιστον 2 επίπεδα, όπου το πρώτο και το τελευταίο να ταυτίζονται χρονικά με το πρώτο και το τελευταίο επίπεδο της αστικής γης
Εξαιρούμενες περιοχές (Excluded)	<ul style="list-style-type: none"> Απαιτείται ένα επίπεδο πληροφορίας με εξαιρούμενες περιοχές ανεξάρτητα από την χρονική περίοδο
Κλίση (Slope)	<ul style="list-style-type: none"> Απαιτείται ένα επίπεδο πληροφορίας που περιέχει τις κλίσεις του εδάφους ανεξάρτητα από την χρονική περίοδο
Σκίαση αναγλύφου (Hillshade)	<ul style="list-style-type: none"> Προαιρετικό επίπεδο, μόνο για λόγους οπτικοποίησης

Εικόνα 4-2: Απαιτούμενα επίπεδα πληροφορίας εισόδου για το μοντέλο SLEUTH

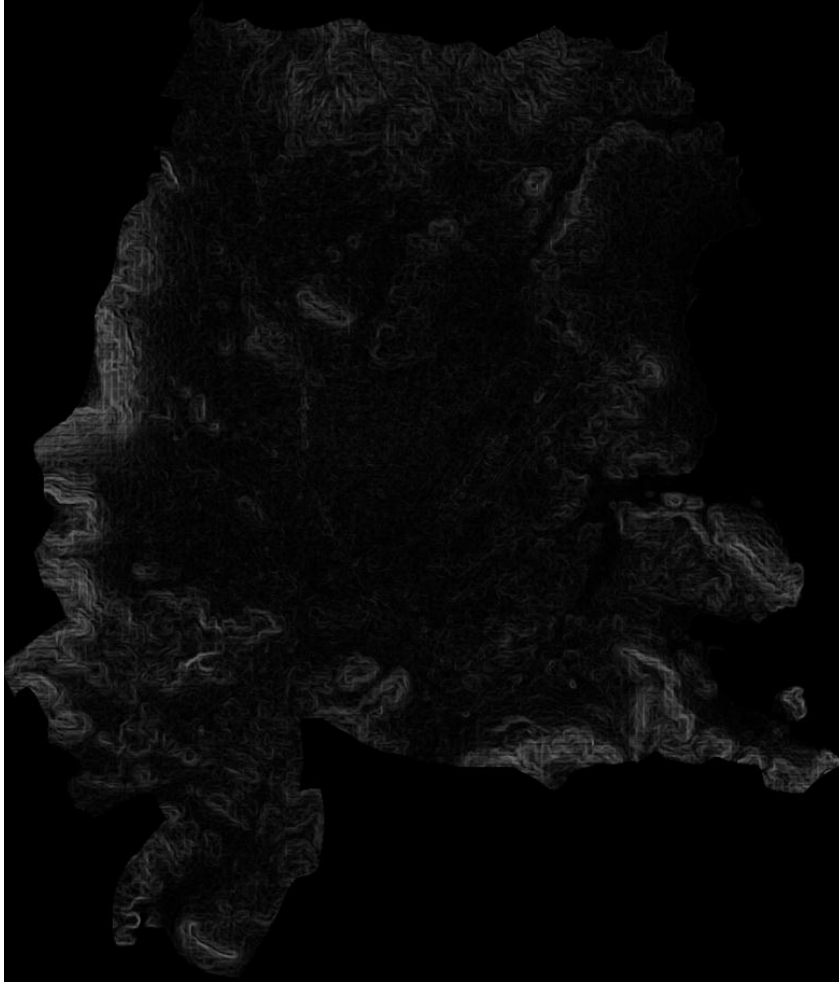
4.2.1. Κλίση (Slope) - Σκίαση αναγλύφου (Hillshade)

Τόσο η κλίση όσο και η σκίαση αναγλύφου εξήχθησαν από το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM) του δορυφόρου ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) που είναι διαθέσιμο μέσω της διαδικτυακής εφαρμογής earth explorer (earthexplorer.usgs.gov) της USGS. Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους έχει ανάλυση pixel περίπου 30μ και κάθε pixel του έχει ως τιμή το υψόμετρο του εδάφους με αναφορά το επίπεδο της θάλασσας.

Για την εξαγωγή του επιπέδου κλίσεων μέσα από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, έπρεπε πρώτα να γίνει η επαναπροβολή του (Warp-Reproject) στο ΕΓΣΑ 87' που χρησιμοποιεί την εγκάρσια μερκατορική προβολή σε μέτρα ενώ τα δεδομένα του προσφέρει ο ASTER είναι στο σύστημα WGS 84' το οποίο είναι ένα γεωκεντρικό σύστημα συντεταγμένων σε γεωγραφικό μήκος και πλάτος. Έπειτα, με την εργαλειοθήκη του QGIS για ψηφιακά μοντέλα εδάφους, έγινε η εξαγωγή του επιπέδου των κλίσεων με κάθε pixel να έχει την ακέραια τιμή της κλίσης επί τοις εκατό (%) και όχι σε βαθμούς, όπως ορίζουν οι κανόνες του μοντέλου. Επίσης, το εύρος τιμών των pixel για το επίπεδο των κλίσεων οφείλει να είναι από 0 έως 100, οπότε για όσες τιμές βρέθηκαν πάνω από 100 έγινε επαναταξινόμησή τους (Reclassification). Τέλος, επειδή η ανάλυση του DEM ήταν λίγο καλύτερη από 30μ ενώ η ανάλυση των δορυφορικών εικόνων ήταν ακριβώς 30μ, είχε ως αποτέλεσμα το επίπεδο των κλίσεων να έχει ανάλυση 845x987 pixel ενώ το επίπεδο της αστικής γης είχε ανάλυση 782x913 pixel. Αυτή η ασυμβατότητα αντιμετωπίστηκε μετά από αλλαγή της διάστασης της εικόνας των κλίσεων (Resampling) με χρήση του λογισμικού Photoshop. Μέσω του Photoshop υπήρχαν τρεις αλγόριθμοι για εκτέλεση του resampling: του εγγύτερου γείτονα (nearest neighbor), διγραμμική (bilinear) και δικυβική (bicubic). Όμως, με δεδομένο ότι το μοντέλο θεωρεί ότι κάθε pixel που έχει τιμή κλίσης μεγαλύτερη από 21% δεν μπορεί ποτέ να γίνει αστικό, θα πρέπει το αποτέλεσμα του resampling να έχει περίπου τον ίδιο αριθμό pixel με τιμή κλίσης κάτω από 21%, ικανά δηλαδή για αστικοποίηση, με αυτόν της αρχικής-μεγαλύτερης εικόνας. Στην Εικόνα 4-3 φαίνονται για την αρχική εικόνα και τις τρεις μεθόδους, με κόκκινο χρώμα, τα pixel τα οποία έχουν τιμή μεγαλύτερη από 21%. Είναι ξεκάθαρο ότι επιλέχθηκε η διγραμμική μέθοδος (bilinear) διότι διατηρεί τον αριθμό των ικανών προς αστικοποίηση pixel (Εικόνα 4-4).

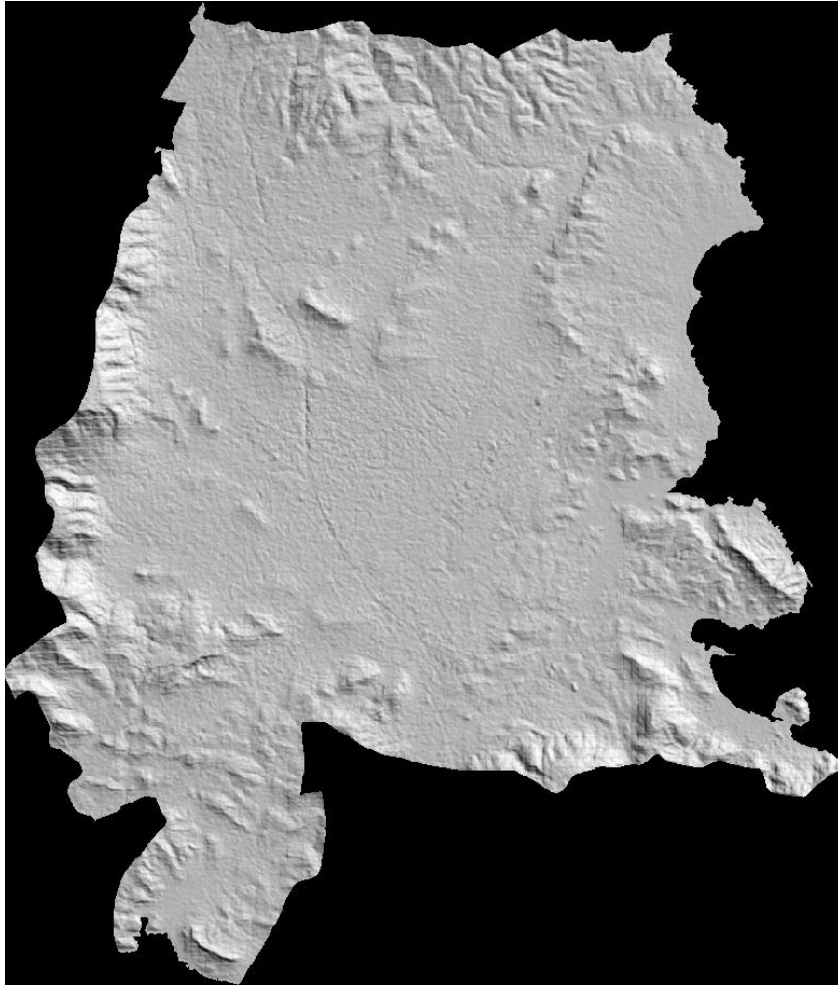


Εικόνα 4-3: Σύγκριση των μεθόδων resampling, όπου φαίνονται με κόκκινο χρώμα τα pixels με τιμή κλίσης πάνω από 21%



Εικόνα 4-4: Επίπεδο κλίσεων έπειτα από bilinear resampling

Για την εξαγωγή της σκίασης αναγλύφου ακολουθήθηκε μία απλή διαδικασία μέσα από την εργαλειοθήκη του QGIS για ψηφιακά μοντέλα εδάφους. Όμοιο resampling υπέστη και το επίπεδο της σκίασης αναγλύφου, δηλαδή από την διάσταση 845x987 σε 782x913, ωστόσο η μέθοδος resampling δεν έχει τόση σημασία όσο στο επίπεδο των κλίσεων διότι, όπως έχει ήδη αναφερθεί, το επίπεδο της σκίασης αναγλύφου είναι καθαρά για λόγους οπτικοποίησης (Εικόνα 4-5).

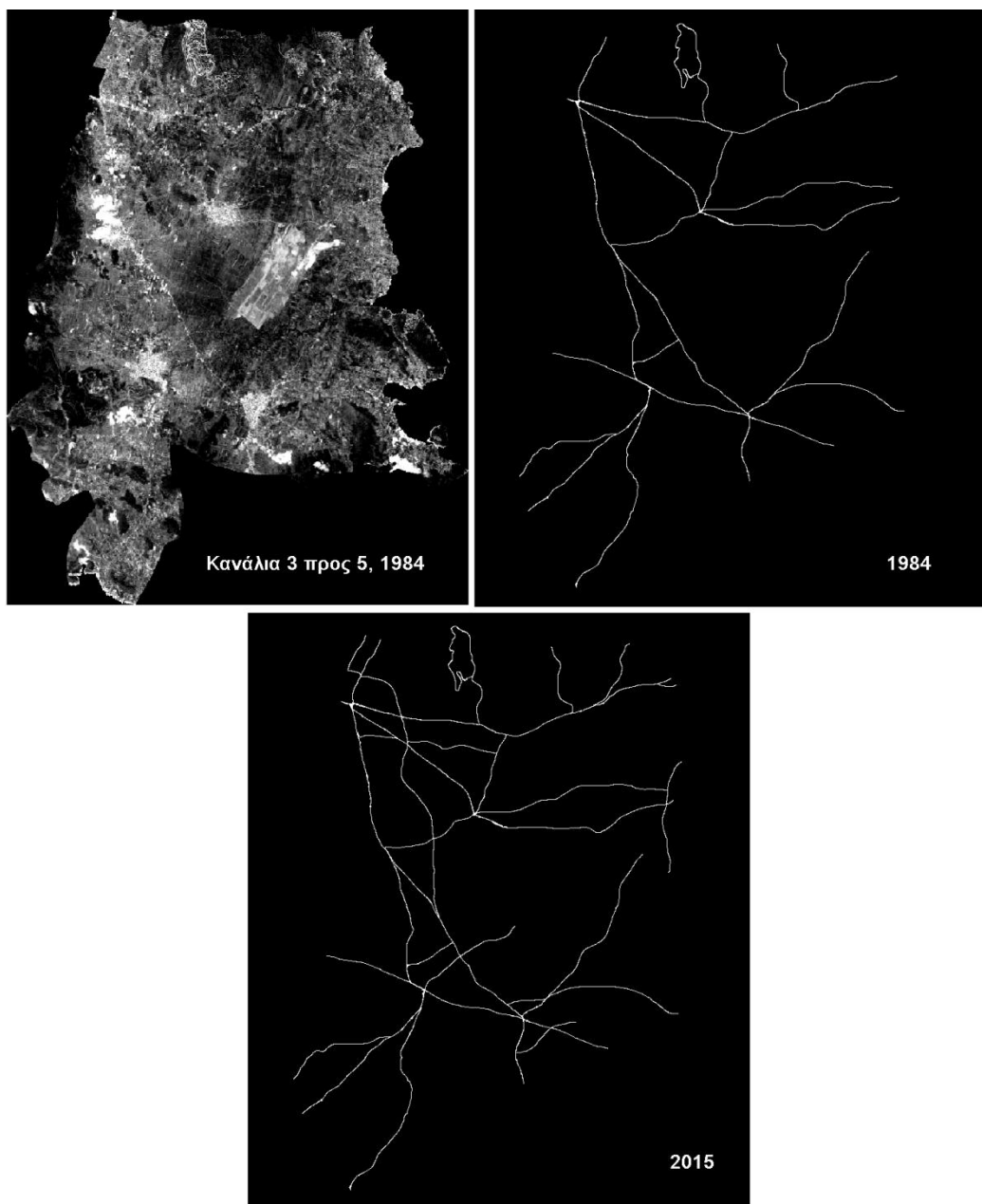


Εικόνα 4-5: Επίπεδο σκίασης αναγλύφου

4.2.2. Οδικό δίκτυο (Transportation)

Η εξαγωγή του οδικού δικτύου για το έτος 1984 έγινε από εικόνες του δορυφόρου Landsat 5 που είναι διαθέσιμες στην εφαρμογή earth explorer (earthexplorer.usgs.gov). Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε ο λόγος καναλιών 3 προς 5 μέσα από τον οποίο τονίζονται τεχνιτές επιφάνειες όπως το οδικό δίκτυο και έπειτα έγινε η ψηφιοποίηση του οδικού δικτύου με την μέθοδο της φωτοερμηνείας (Εικόνα 4-6). Η τιμή της εικονοψηφίδας των εικόνων του Landsat 5 είναι 30μ, η οποία δεν επιτρέπει την ασφαλή ψηφιοποίηση του δευτερεύοντος και του τριτεύοντος οδικού δικτύου μέσω φωτοερμηνείας. Έτσι, ψηφιοποιήθηκε μόνο το κύριο οδικό δίκτυο, άρα δεν χρειάστηκε να δοθούν βάρη στους επιμέρους άξονές του. Για το έτος

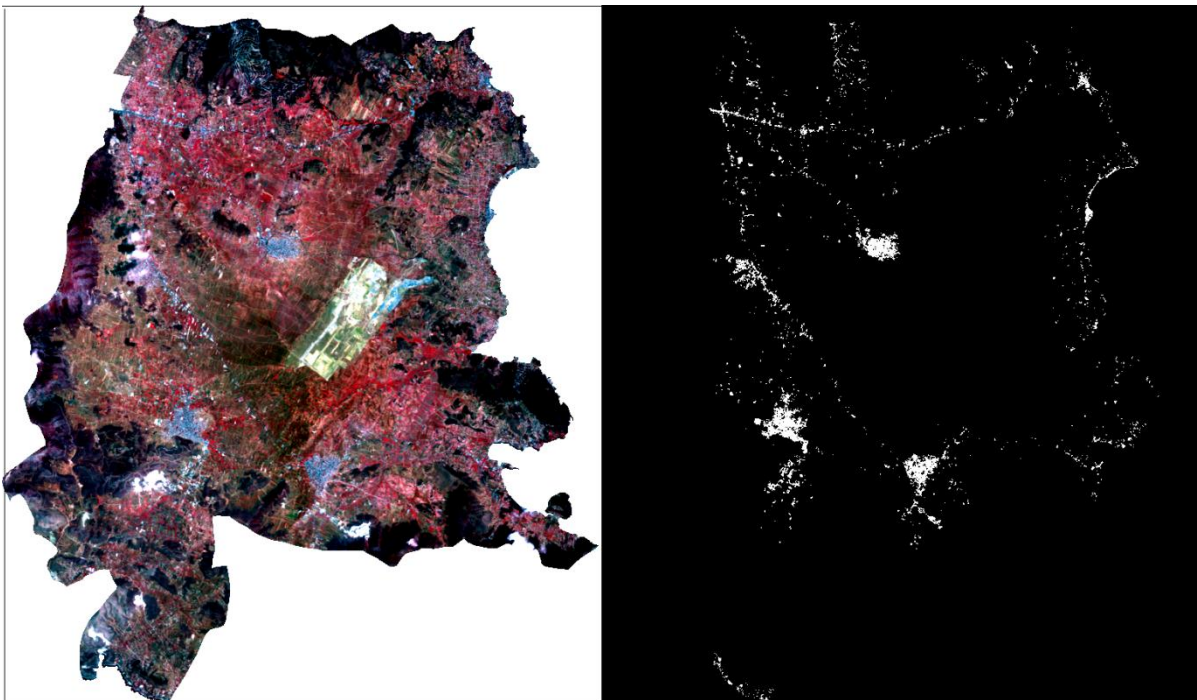
2015, δεν χρειάστηκε ο λόγος καναλιών για την ανάδειξη του οδικού δικτύου, καθώς τα δεδομένα προέρχονταν από τον δορυφόρο Landsat 8 που παράγει εικόνες 16bit σε αντίθεση με τις εικόνες 8bit του Landsat 5, άρα διαθέτει καλύτερη ραδιομετρική ανάλυση. Έτσι, έγινε η προσθήκη της Αττικής οδού και άλλων οδών του κύριου οδικού δικτύου, που για το έτος 1984 δεν ήταν ευδιάκριτες ή ενδεχομένως να μην υπήρχαν, στο επίπεδο του οδικού δικτύου και πάλι μέσω φωτοερμηνείας (Εικόνα 4-6).



Εικόνα 4-6: Οδικό δίκτυο για τα έτη 1984 και 2015 μέσα από φωτοερμηνεία

4.2.3. Επίπεδο αστικής γης (Urban)

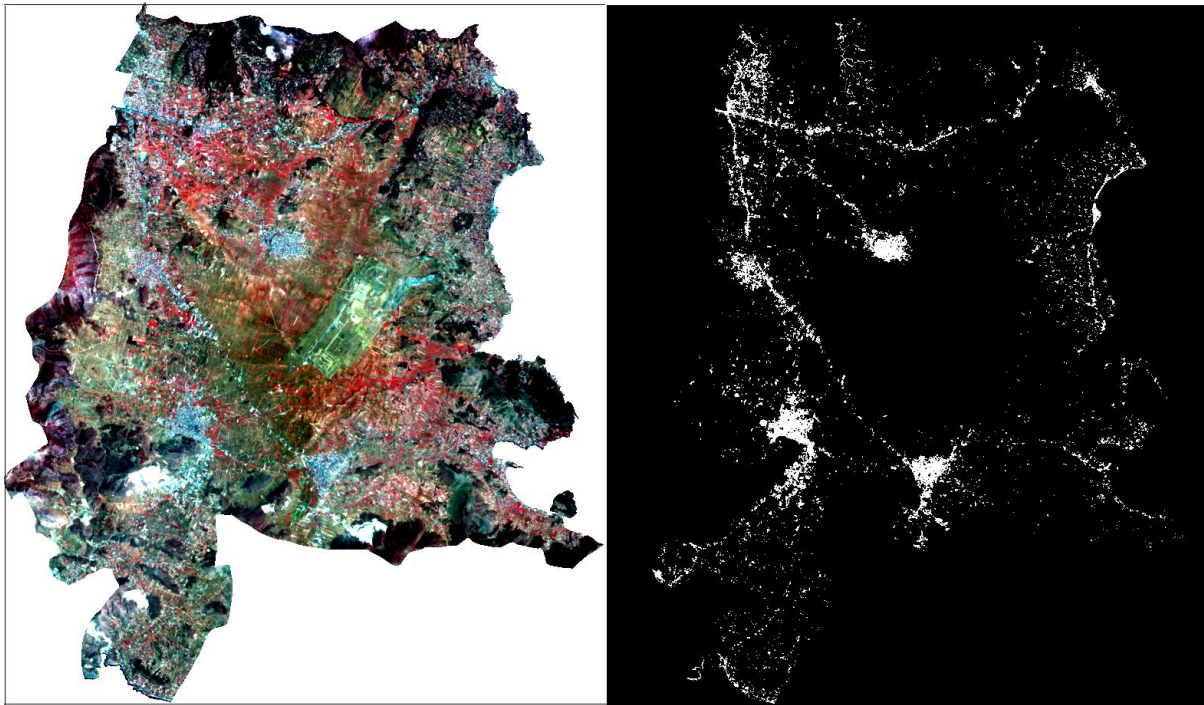
Τα δεδομένα για την εξαγωγή της πληροφορίας για την αστική γη εξήχθησαν από δορυφορικές εικόνες του Landsat 5, για τα έτη 1984, 1995 και 2003, ενώ για το έτος 2015 χρησιμοποιήθηκαν δορυφορικές εικόνες του Landsat 8 (Εικόνες 4-7, 4-8, 4-9, 4-10). Η τιμή της εικονοψηφίδας για τις εικόνες και των δύο δορυφόρων είναι 30μ, όπως έχει ήδη αναφερθεί, με ανάλυση 8bit για τον Landsat 5 και 16bit για τον Landsat 8 και ελήφθησαν και αυτές από την εφαρμογή earth explorer (earthexplorer.usgs.gov). Η εξαγωγή της αστικής γης από τις δορυφορικές εικόνες έγινε μέσα από αυτόματη ταξινόμηση εικόνας μέσω του Semi-Automatic Classification Plugin (fromgistors.blogspot.com), το οποίο είναι ένα δωρεάν πρόσθετο για το QGIS το οποίο αναπτύχθηκε από τον Luca Congedo.



Εικόνα 4-7: Εικόνα της περιοχής μελέτης το 1984 σε σύνθετο 4-3-2 (αριστερά) και το αποτέλεσμα της αυτόματης ταξινόμησης (δεξιά)

Καταρχάς, χρησιμοποιήθηκε το σύνθετο καναλιών 4-3-2 για τις εικόνες του Landsat 5 και αντίστοιχα το σύνθετο 5-4-3 για τον Landsat 8, στο οποίο οι αστικές περιοχές τονίζονται με γαλάζιο χρώμα. Απαραίτητη για την σωστή ταξινόμηση των εικόνων είναι η

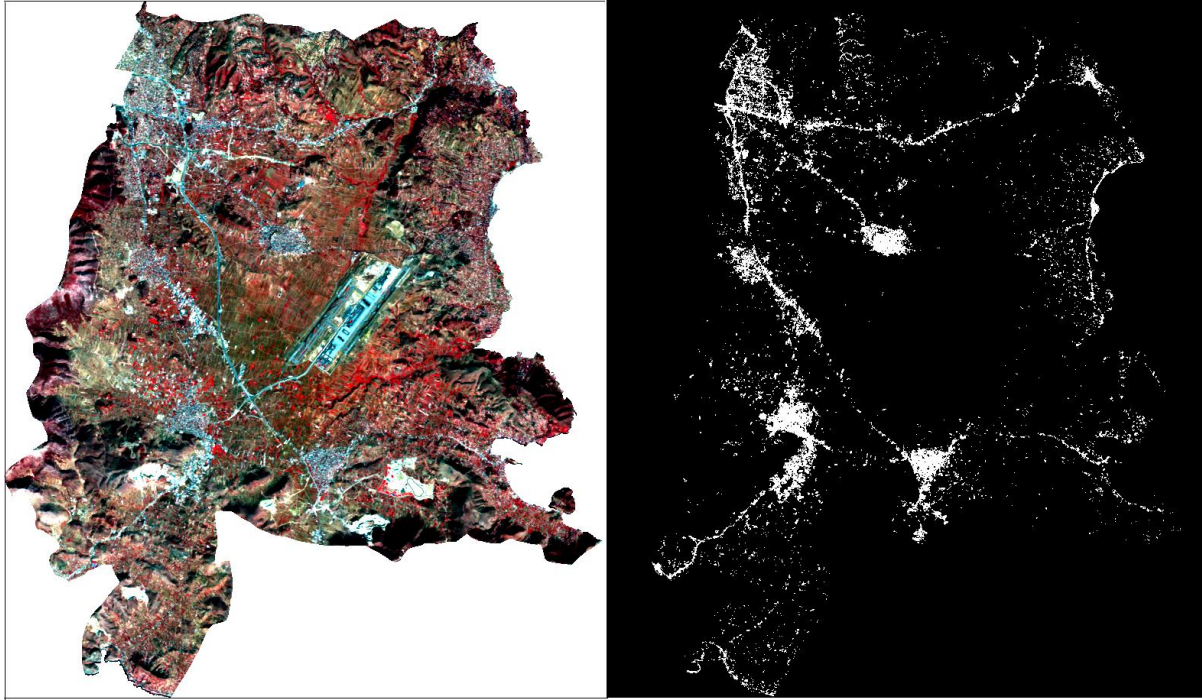
διαδικασία ραδιομετρικής διόρθωσής τους με χρήση των μεταδεδομένων που τις συνοδεύουν και του αλγορίθμου DOS1 (Dark Object Subtraction). Έπειτα, με την χρήση του αλγορίθμου spectral angle mapping και με δείγμα το κέντρο του αστικού πυρήνα του Μαρκόπουλου, ορίστηκε ένα κοινό κατώφλι $4,5^\circ$ και για τις τέσσερις ταξινομήσεις.



Εικόνα 4-8: Εικόνα της περιοχής μελέτης το 1995 (αριστερά) και το αποτέλεσμα της αυτόματης ταξινόμησης (δεξιά)

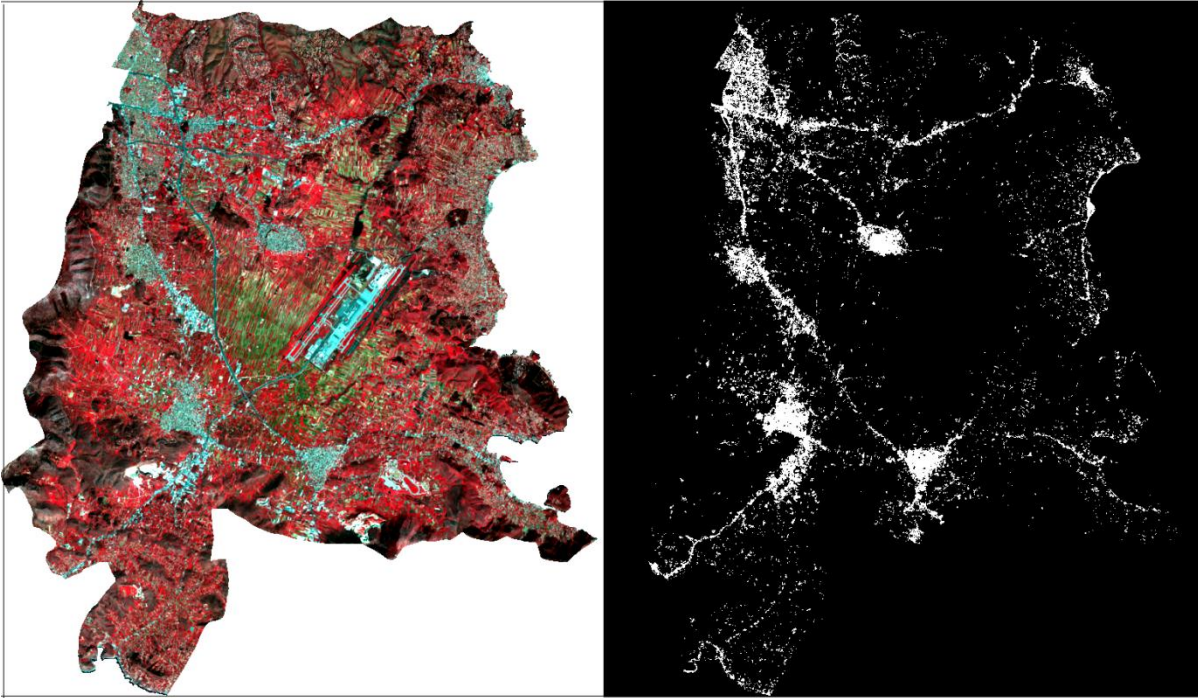
Τα αποτελέσματα της ταξινόμησης διορθώθηκαν από κάποια προφανή σφάλματα, όπως για παράδειγμα σε περιοχές που είναι γνωστό ότι αποτελούν χώρους εξόρυξης και η ταξινόμηση τα αναγνώρισε ως αστικές. Επίσης, επειδή το μοντέλο δεν δέχεται ένα pixel το οποίο την χρονική στιγμή t είναι αστικό να μην είναι και πάλι αστικό την χρονική στιγμή $t+x$, όπου x θετικός ακέραιος, και επειδή τα αποτελέσματα για τις διαδοχικές χρονιές δεν συμφωνούσαν απόλυτα με αυτόν τον κανόνα, καθώς κάθε ταξινόμηση προέρχεται από διαφορετική λήψη, διαφορετική εποχή και διαφορετική χρονιά με αποτέλεσμα κάποια pixel να μην ταξινομηθούν ως αστικά σε διαδοχικές χρονιές. Έτσι, για τα έτη 1995, 2003 και 2015

έγινε αλληλεπίθεση των προηγούμενων επιπέδων αστικής γης ώστε να ικανοποιείται ο κανόνας του μοντέλου.



Εικόνα 4-9: Εικόνα της περιοχής μελέτης το 2003 (αριστερά) και το αποτέλεσμα της αυτόματης ταξινόμησης (δεξιά)

Είναι προφανές ότι τα αποτελέσματα της τελευταίας ταξινόμησης (Εικόνα 4-9), δηλαδή για το έτος 2015 είναι τα πιο αξιόπιστα διότι οι εικόνες του Landsat 8 έχουν καλύτερη ραδιομετρική ανάλυση και συνεπώς είναι πιο διακριτές οι τεχνητές επιφάνειες. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-9, το σύνθετο καναλιών 5-4-3 διαφέρει έντονα σε σχέση με τις υπόλοιπες χρονιές που προέρχονται από εικόνες του Landsat 5. Ομοίως οι περιοχές με βλάστηση φαίνονται με εντονότερους τόνους του κόκκινου λόγω της ανάλυσης των 16bit.



Εικόνα 4-10: Εικόνα της περιοχής μελέτης το 2015 (αριστερά) και το αποτέλεσμα της αυτόματης ταξινόμησης (δεξιά)

4.2.4. Επίπεδο εξαιρουμένων περιοχών

Οι εξαιρούμενες περιοχές από την αστικοποίηση είναι αυτές που βρίσκονται εκτός περιγράμματος των ορίων της περιοχής μελέτης και η περιοχή του αεροδρομίου (Εικόνα 4-11).



Εικόνα 4-11: Εξαιρούμενες περιοχές από την αστικοποίηση (άσπρο χρώμα)

4.3. Εγκατάσταση του Μοντέλου SLEUTH

Η εκτέλεση του μοντέλου γίνεται μέσα από το περιβάλλον εντόλων του Linux, ενώ δεν διαθέτει γραφικά διεπαφής χρήστη (user interface). Για τα συστήματα που έχουν λειτουργικό σύστημα Windows, υπάρχει ο προσομοιωτής Cygwin (<http://www.cygwin.com>). Στην ουσία ο χρήστης διαμορφώνει καταλλήλως ορισμένα αρχεία κειμένου ή σενάρια στα οποία υπάρχουν όλοι οι παράμετροι που χρησιμοποιεί το μοντέλο. Το μοντέλο διαθέτει τρεις λειτουργίες: την δοκιμή (test) που στην ουσία γίνεται έλεγχος των πρόδηλων λαθών που μπορεί να περιέχουν τα σενάρια ή τα δεδομένα εισόδου, την βαθμονόμηση (calibration) όπου αναζητάται ο βέλτιστος συνδυασμός των πέντε παραμέτρων που περιγράφουν και ελέγχουν την αστική ανάπτυξη, και τέλος την λειτουργία πρόβλεψης (prediction) όπου προκύπτουν εικόνες με πιθανότες επέκτασης του αστικού ιστού. Όλες οι λειτουργίες απαιτούν ένα καταλλήλως διαμορφωμένο σενάριο (scenario file). Το αρχείο σεναρίου επιτρέπει στο χρήστη να ενεργοποιήσει ή απενεργοποιήσει επιλεκτικά συγκεκριμένες ρυθμίσεις στον κώδικα, προκειμένου να παραχθούν διάφορα επιπρόσθετα εξαγόμενα στοιχεία για μια λειτουργία, ή ακόμα και να ορίσει το χρώμα για διαφορετικές τιμές των εξαγόμενων κελιών. Απαραίτητη είναι η μεταγλώττιση (compiling) ορισμένων αρχείων ώστε να μπορεί να λειτουργήσει το μοντέλο μέσα από το Cygwin. Τέλος, γίνεται εκτέλεση του μοντέλου σε λειτουργία δοκιμής (test) ώστε να εντοπιστούν πιθανά χονδροειδή λάθη στα δεδομένα εισόδου.

4.4. Βαθμονόμηση κατά Lee-Sallee

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στην παρούσα εργασία εκτελέστηκαν δύο βαθμονομήσεις πάνω στο ίδιο σετ δεδομένων. Το πρώτο στάδιο της βαθμονόμησης (coarse) είναι κοινό για όλες τις μεθόδους βαθμονόμησης ενώ τα επόμενα στάδια (fine και final) εξαρτώνται από την μέθοδο που θα επιλεγεί. Τα αποτελέσματα κάθε βαθμονόμησης βρίσκονται στο αρχείο control_stats.log. Κάθε γραμμή του αρχείου αυτού προκύπτει ως αποτέλεσμα μιας μοναδικής

εκτέλεσης του μοντέλου και τα στατιστικά δεδομένα που περιέχονται στο αρχείο αυτό αναφέρονται ως αποτελέσματα κάθε εκτέλεσης, ενώ οι στήλες των παραμέτρων στο τέλος κάθε γραμμής αποτελούν τις αντίστοιχες αρχικές τιμές των παραμέτρων.

Το SLEUTH παράγει στατιστικά στοιχεία για έντεκα δείκτες, οι οποίοι είναι οι εξής (<http://www.ncgia.ucsb.edu/projects/gig/v2/About/dtDtControlDefine.htm> Τελευταία πρόσβαση 12/9/2015):

- compare: συγκρίνει την ποσότητα της αστικής έκτασης από το μοντέλο προς τη “γνωστή” αστική έκταση για το τελευταίο έτος ελέγχου.
- pop: η διαφορά των ελαχίστων τετραγώνων της αστικής έκτασης από το μοντέλο συγκρινόμενης με την πραγματική για τα έτη ελέγχου.
- edges: η διαφορά των ελαχίστων τετραγώνων για την ποσότητα της αστικής περιμέτρου από το μοντέλο προς την πραγματική αστική περίμετρο για τα έτη ελέγχου.
- clusters: η διαφορά των ελαχίστων τετραγώνων για τον αριθμό των αστικών συγκεντρώσεων από το μοντέλο, συγκρινόμενα με τον πραγματικό αριθμό αυτών για τα αντίστοιχα έτη ελέγχου.
- cluster_size: η διαφορά των ελαχίστων τετραγώνων για τον μέσο όρο του μεγέθους των αστικών συγκεντρώσεων από το μοντέλο, συγκρινόμενων με το γνωστό μέσο όρο των αστικών συγκεντρώσεων για τα έτη ελέγχου.
- lee-sallee: ένας χωρικός δείκτης, μια μέτρηση της χωρικής συσχέτισης μεταξύ της ανάπτυξης που προκύπτει από το μοντέλο και της γνωστής αστικής έκτασης για τα έτη ελέγχου, με την τιμή 1 να αναφέρεται στην πλήρη ταύτιση και την τιμή 0 να αντιπροσωπεύει πλήρη χωρική ασυμφωνία.

- slope: η διαφορά των ελαχίστων τετραγώνων της μέσης κλίσης των αστικοποιημένων κελιών συγκρινόμενης με τη μέση κλίση των γνωστών αστικών κελιών για τα έτη ελέγχου.
- %urban: η διαφορά των ελαχίστων τετραγώνων του ποσοστού των διαθέσιμων αστικοποιημένων κελιών συγκρινόμενα με τα αστικοποιημένα κελιά για τα έτη ελέγχου.
- xmean: η διαφορά των ελαχίστων τετραγώνων του μέσου γεωγραφικού μήκους για τις μοντελοποιημένες αστικές περιοχές συγκρινόμενου με το μέσο γεωγραφικό μήκος των αστικών περιοχών για τα έτη ελέγχου.
- ymean: η διαφορά των ελαχίστων τετραγώνων του μέσου γεωγραφικού πλάτους για τις μοντελοποιημένες αστικές περιοχές συγκρινόμενου με το μέσο γεωγραφικό πλάτος των αστικών περιοχών για τα έτη ελέγχου.
- rad: αφορά μια μέτρηση της αστικής διασποράς.

Οι δείκτες αυτοί παράγονται για κάθε έτος ελέγχου. Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης συγκρίνονται στη συνέχεια με τους δείκτες των ιστορικών δεδομένων και υπολογίζονται οι διαφορές των ελαχίστων τετραγώνων, που καταγράφονται τελικά στο αρχείο control_stats.log που προαναφέρθηκε. Με την μέθοδο Lee-Sallee, τα αποτελέσματα ταξινομούνται με βάση αυτόν τον δείκτη και εξάγονται έτσι οι βέλτιστες τιμές των πέντε παραμέτρων (Diffusion, Breed, Spread, Slope, Road Gravity). Για την συγκεκριμένη βαθμονόμηση χρησιμοποιήθηκε ένας υπολογιστής τύπου desktop με επεξεργαστή Intel Core 2 Quad Q9300, 4gb μνήμη RAM και λειτουργικό σύστημα Windows 7 32bit.

Πρώτο βήμα κάθε βαθμονόμησης (coarse calibration) είναι ο ορισμός των επαναλήψεων Monte Carlo σε ένα μικρό αριθμό (4-5) και τα εύρη των πέντε παραμέτρων από 0 έως 100 με βήμα 25. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή επιλέχθηκαν 5 επαναλήψεις Monte Carlo στο πρώτο στάδιο βαθμονόμησης.

4.4.1. Επιλογή παραμέτρων στο στάδιο coarse calibration

Κάθε στάδιο βαθμονόμησης τροφοδοτεί το επόμενο επιλέγοντας νέες τιμές παραμέτρων, δηλαδή νέα και μικρότερα εύρη τιμών με διαφορετικά βήματα έτσι ώστε αυτή η διαδικασία σύγκλισης να καταλήγει στο βέλτιστο σει παραμέτρων που θα προσασμύζεται πάνω στα δεδομένα εισόδου. Όπως αναφέρθηκε, τα αποτελέσματα του coarse calibration ταξινομούνται σε φθίνουσα σειρά κατά τον δείκτη Lee-Sallee. Έπειτα, για τις τρεις υψηλότερες τιμές του δείκτη, επιλέγουμε την μεγαλύτερη και την μικρότερη τιμή των νέων παραμέτρων και επιλέγουμε ένα βήμα όπου να διαιρεί το εύρος τους σε 4 με 5 μέρη. Σε περίπτωση που η μικρότερη τιμή ταυτίζεται με την υψηλότερη, τότε επιλέγουμε ένα μικρό εύρος τιμών που να περιέχει την τιμή αυτή.

Τα τρία επικρατέστερα αποτελέσματα του coarse calibration μετά από ταξινόμηση κατά τον δείκτη Lee-Sallee, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Παρατηρούμε στον Πίνακα 4-1 ότι η παράμετρος diffusion έχει σταθεροποιηθεί στην τιμή 1, η παράμετρος breed κυμαίνεται μεταξύ 1 και 25, η παράμετρος spread έχει σταθερή τιμή 25 όπως και η παράμετρος slope ενώ η τελευταία παράμετρος road gravity πήγε από το αρχικό εύρος 0 έως 100 στο όχι και τόσο μικρότερο εύρος 1 έως 75.

Αριθμός επανάληψης	Δείκτης ταξινόμησης	Τιμές παραμέτρων				
		Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
Run	Leesallee					
30	0.39600	1	1	25	25	1
155	0.39517	1	25	25	25	1
33	0.39516	1	1	25	25	75

Πίνακας 4-1: Αποτελέσματα του coarse calibration κατά Lee-Sallee

Έτσι, για το επόμενο στάδιο (fine calibration) τα νέα εύρη των τιμών των παραμέτρων προέρχονται από τα αποτελέσματα του coarse calibration. Το νέο σενάριο επεξεργάζεται κατάλληλα ώστε το πεδίο _START να έχει την μικρότερη τιμή του νέου

εύρους, το πεδίο _STOP να έχει την μεγαλύτερη τιμή ενώ το πεδίο _STEP να έχει το βήμα του εύρους (Εικόνα 4-12).

```

CALIBRATION_DIFFUSION_START= 0   CALIBRATION_SLOPE_START=    24
CALIBRATION_DIFFUSION_STEP=  5   CALIBRATION_SLOPE_STEP=     5
CALIBRATION_DIFFUSION_STOP= 20   CALIBRATION_SLOPE_STOP=    49

CALIBRATION_BREED_START=    1   CALIBRATION_ROAD_START=     0
CALIBRATION_BREED_STEP=    6   CALIBRATION_ROAD_STEP=    15
CALIBRATION_BREED_STOP=   25   CALIBRATION_ROAD_STOP=    75

CALIBRATION_SPREAD_START=   24
CALIBRATION_SPREAD_STEP=    5
CALIBRATION_SPREAD_STOP=   49

```

Εικόνα 4-12: Απόσπασμα του σεναρίου του fine calibration κατά Lee-Sallee

4.4.2. Επιλογή παραμέτρων στο στάδιο fine calibration

Ομοίως, η διαδικασία συνεχίζεται ώστε το εύρος των παραμέτρων να γίνεται ακόμα μικρότερο ώστε να βρεθεί το βέλτιστο σετ. Τα αποτελέσματα του fine calibration φαίνονται στον Πίνακα 4-2.

Αριθμός επανάληψης	Δείκτης ταξινόμησης	Τιμές παραμέτρων				
		Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
Run	Leesallee					
1	0.39633	1	1	24	24	15
0	0.39583	1	1	24	24	1
3	0.39581	1	1	24	24	45

Πίνακας 4-2: Αποτελέσματα του fine calibration κατά Lee-Sallee

Παρατηρούμε ότι οι παράμετροι breed, spread και slope σταθεροποιήθηκαν ενώ η μόνη παράμετρος που δείχνει να μην συγκλίνει το ίδιο γρήγορα είναι η road gravity. Στο στάδιο fine calibration επιλέχθηκαν 8 Monte Carlo επαναλήψεις. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα τα νέα εύρη για το στάδιο final calibration φαίνονται στην Εικόνα 4-13.

```

CALIBRATION_DIFFUSION_START= 0 CALIBRATION_SLOPE_START= 22
CALIBRATION_DIFFUSION_STEP= 1 CALIBRATION_SLOPE_STEP= 1
CALIBRATION_DIFFUSION_STOP= 5 CALIBRATION_SLOPE_STOP= 27

CALIBRATION_BREED_START= 0 CALIBRATION_ROAD_START= 0
CALIBRATION_BREED_STEP= 1 CALIBRATION_ROAD_STEP= 9
CALIBRATION_BREED_STOP= 5 CALIBRATION_ROAD_STOP= 45

CALIBRATION_SPREAD_START= 22
CALIBRATION_SPREAD_STEP= 1
CALIBRATION_SPREAD_STOP= 27

```

Εικόνα 4-13: Απόσπασμα του σεναρίου final calibration κατά Lee-Sallee

Είναι χαρακτηριστικό ότι ενώ και στο προηγούμενο στάδιο η παράμετρος diffusion είχε σταθεροποιηθεί στην τιμή 1 και έτσι επιλέχθηκε το εύρος 0 έως 20 με βήμα 5, τώρα το εύρος είναι 0 έως 5 με βήμα 1. Αντίστοιχα και για τις υπόλοιπες σταθερές παραμέτρους τα εύρη γίνονται όλο και μικρότερα.

4.4.3. Επιλογή παραμέτρων στο στάδιο final calibration

Σε αυτό το στάδιο τα αποτελέσματα ταξινομούνται και πάλι κατά τον δείκτη Lee-Sallee, όμως αυτή την φορά επιλέγεται μόνο η υψηλότερη τιμή του δείκτη η οποία ορίζει τις παραμέτρους ενώ επιλέχθηκαν 10 επαναλήψεις Monte Carlo και επιλέγεται μόνο η επικρατέστερη τιμή κατά τον δείκτη Lee-Sallee αντί για τις μέχρι τώρα τρεις επικρατέστερες (Πίνακας 4-3).

Αριθμός επανάληψης	Δείκτης ταξινόμησης	Τιμές παραμέτρων				
		Diff	Brd	Sprd	Slp	RG
Run	Leesallee					
10	0.39741	1	1	22	23	36

Πίνακας 4-3: Αποτελέσματα του final calibration κατά Lee-Sallee

Εφόσον υπάρχει μία μοναδική τιμή για κάθε παράμετρο, στο στάδιο derive coefficient values η αρχική με την τελική τιμή ταυτίζονται και το βήμα είναι η μονάδα (Εικόνα 4-14).

```

CALIBRATION_DIFFUSION_START= 1    CALIBRATION_SLOPE_START=    23
CALIBRATION_DIFFUSION_STEP=  1    CALIBRATION_SLOPE_STEP=     1
CALIBRATION_DIFFUSION_STOP=  1    CALIBRATION_SLOPE_STOP=    23

CALIBRATION_BREED_START=      1    CALIBRATION_ROAD_START=    36
CALIBRATION_BREED_STEP=      1    CALIBRATION_ROAD_STEP=     1
CALIBRATION_BREED_STOP=      1    CALIBRATION_ROAD_STOP=    36

CALIBRATION_SPREAD_START=     22
CALIBRATION_SPREAD_STEP=      1
CALIBRATION_SPREAD_STOP=     22

```

Εικόνα 4-14: Απόσπασμα του σεναρίου derive coefficient values κατά Lee-Sallee

4.4.4. Τελικό στάδιο βαθμονόμησης-derive coefficient values

Λόγω των κανόνων αυτοτροποποίησης του μοντέλου, που έχουν ήδη αναφερθεί, οι τιμές των παραμέτρων κατά το τελευταίο έτος ελέγχου είναι πιθανό να μεταβληθούν σε σχέση με το πρώτο έτος. Έτσι, λόγω της τυχαίας μεταβλητότητας του μοντέλου σε αυτό το στάδιο ο αριθμός των επαναλήψεων Monte Carlo είναι αρκετά μεγαλύτερος σε σχέση με τα προηγούμενα στάδια, δηλαδή τέθηκε στην τιμή 100, και το τελικό σετ παραμέτρων προκύπτει από τον μέσο όρο των τιμών του τελευταίου έτους ελέγχου. Τα αποτελέσματα βρίσκονται το αρχείο avg.log (Πίνακας 4-4).

	Έτος ελέγχου	Παράμετροι				
run	year	diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav
0	1995	1.10	24.30	1.10	18.75	36.43
0	2003	1.20	26.32	1.20	14.46	36.85
0	2015	1.35	29.65	1.35	6.08	37.69

Πίνακας 4-4: Απόσπασμα από το αρχείο avg.log κατά Lee-Sallee

Είναι χαρακτηριστική η πτώση της τιμής της παραμέτρου slope resistance λόγω των κανόνων αυτοτροποποίησης από το έτος 1995 μέχρι το 2015. Οι τιμές της τελευταίας τιμής

του πίνακα στρογγυλοποιούνται και έτσι προκύπτει το τελικό σετ παραμέτρων που θα χρησιμοποιηθεί για το στάδιο της πρόγνωσης του μοντέλου (Πίνακας 4-5).

Τελικές Παράμετροι	Τιμές
diffusion	1
spread	30
breed	1
slope resistance	6
road gravity	38

Πίνακας 4-5: Τελικές παράμετροι της βαθμονόμησης κατά Lee-Sallee

4.5. Βαθμονόμηση κατά Optimum SLEUTH Metric (OSM)

Η συγκεκριμένη βαθμονόμηση του ίδιου σετ δεδομένων έγινε σε υπολογιστή τύπου laptop με επεξεργαστή Core i5, 4gb RAM και λειτουργικό σύστημα Windows 7 64bit. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η ίδια σχεδόν με μοναδική εξαίρεση την ταξινόμηση των αποτελεσμάτων κάθε σταδίου της βαθμονόμησης κατά τον δείκτη OSM αντί του δείκτη Lee-Sallee. Για να επιτευχθεί αυτό, στην ιστοσελίδα του μοντέλου υπάρχει διαθέσιμος ένας απλός κώδικας που μετά από μεταγλώτιση και με μία απλή εντολή στο περιβάλλον του Cygwin, τα αποτελέσματα αποθηκεύονται και ταξινομούνται σε φθίνουσα σειρά σε ένα αρχείο κειμένου και ακολουθείται η ίδια διαδικασία όπως και κατά την βαθμονόμηση κατά Lee-Sallee. Οι επαναλήψεις Monte Carlo είναι οι ίδιες με πριν για κάθε στάδιο.

4.5.1. Επιλογή παραμέτρων στο στάδιο coarse calibration

Όπως και πριν, οι πέντε παράμετροι έχουν αρχικό εύρος από 0 έως 100 με βήμα 25 κατά το στάδιο coarse calibration. Μετά την εκτέλεση του OSM, παράγεται το αρχείο top50b.log που περιέχει τις 50 καλύτερες τιμές των παραμέτρων ταξινομημένες κατά OSM. Φαίνεται από τον Πίνακα 4-6 ότι όλες οι παράμετροι εκτός από την breed έχουν περιορίσει

αισθητά το εύρος τιμών τους και αναλόγως διαμορφώνεται το σενάριο (Εικόνα 4-15) για το επόμενο στάδιο της βαθμονόμησης (fine calibration).

Δείκτης	Παράμετροι				
	Diff	Brd	Sprd	Slp	Road
OSM	25	75	50	100	75
0.35844228	25	1	75	100	75
0.35766274	25	1	50	75	75

Πίνακας 4-6: Αποτελέσματα του coarse calibration κατά OSM

```

CALIBRATION_DIFFUSION_START= 25 CALIBRATION_SLOPE_START= 75
CALIBRATION_DIFFUSION_STEP= 10 CALIBRATION_SLOPE_STEP= 5
CALIBRATION_DIFFUSION_STOP= 75 CALIBRATION_SLOPE_STOP= 100

CALIBRATION_BREED_START= 0 CALIBRATION_ROAD_START= 74
CALIBRATION_BREED_STEP= 15 CALIBRATION_ROAD_STEP= 5
CALIBRATION_BREED_STOP= 75 CALIBRATION_ROAD_STOP= 99

CALIBRATION_SPREAD_START= 50
CALIBRATION_SPREAD_STEP= 5
CALIBRATION_SPREAD_STOP= 75

```

Εικόνα 4-15: Απόσπασμα του σεναρίου fine calibration κατά OSM

4.5.2. Επιλογή παραμέτρων στο στάδιο fine calibration

Σε αυτό το στάδιο ο δείκτης OSM παρουσίασε μία μικρή αύξηση της τιμής του που σημαίνει καλύτερη προσαρμογή στα ιστορικά δεδομένα ελέγχου. Επίσης, είναι αξιοσημείωτο ότι η παράμετρος breed ενώ είχε μεγάλο εύρος τιμών στο προηγούμενο στάδιο, τώρα σταθεροποιήθηκε στην τιμή 15, ενώ η παράμετρος diffusion μείωσε αισθητά το εύρος της (Πίνακας 4-7).

Δείκτες	Παράμετροι				
	Diff	Brd	Sprd	Slp	Road
OSM	35	15	60	95	99
0.37604231	25	15	55	85	89
0.37188312	45	15	60	100	84

Πίνακας 4-7: Αποτελέσματα του fine calibration κατά OSM

Στο στάδιο final calibration, τα εύρη γίνονται ακόμα μικρότερα και σε περίπτωση που η τιμή σταθεροποιείται, όπως στην παράμετρο breed, τότε επιλέγεται ένα εύρος πέντε τιμών με βήμα την μονάδα (Εικόνα 4-16).

```

CALIBRATION_DIFFUSION_START= 25 CALIBRATION_SLOPE_START=      85
CALIBRATION_DIFFUSION_STEP=   5 CALIBRATION_SLOPE_STEP=       3
CALIBRATION_DIFFUSION_STOP=  45 CALIBRATION_SLOPE_STOP=      100

CALIBRATION_BREED_START=      14 CALIBRATION_ROAD_START=     84
CALIBRATION_BREED_STEP=       1 CALIBRATION_ROAD_STEP=       3
CALIBRATION_BREED_STOP=      19 CALIBRATION_ROAD_STOP=      99

CALIBRATION_SPREAD_START=     55
CALIBRATION_SPREAD_STEP=      1
CALIBRATION_SPREAD_STOP=     60

```

Εικόνα 4-16: Απόσπασμα του σεναρίου final calibration κατά OSM

4.5.3. Επιλογή παραμέτρων στο στάδιο final calibration

Σε αυτό το στάδιο επιλέγεται μόνο η επικρατέστερη τιμή κατά OSM και προκύπτει το τελευταίο σετ παραμέτρων που μοντελοποιούν την περιοχή μελέτης. Σε αυτό το στάδιο η μέγιστη τιμή του OSM δεν μεταβλήθηκε αισθητά (Πίνακας 4-8).

Δείκτες	Παράμετροι				
OSM	Diff	Brd	Sprd	Slp	Road
0.37788653	30	17	60	94	93

Πίνακας 4-8: Αποτελέσματα του final calibration κατά OSM

Στο σενάριο του επόμενου σταδίου, οι τελικές με τις αρχικές τιμές των παραμέτρων ταυτίζονται και το βήμα είναι η μονάδα (Εικόνα 4-17).

```

CALIBRATION_DIFFUSION_START= 30 CALIBRATION_SLOPE_START= 94
CALIBRATION_DIFFUSION_STEP= 1 CALIBRATION_SLOPE_STEP= 1
CALIBRATION_DIFFUSION_STOP= 30 CALIBRATION_SLOPE_STOP= 94

CALIBRATION_BREED_START= 17 CALIBRATION_ROAD_START= 93
CALIBRATION_BREED_STEP= 1 CALIBRATION_ROAD_STEP= 1
CALIBRATION_BREED_STOP= 17 CALIBRATION_ROAD_STOP= 93

CALIBRATION_SPREAD_START= 60
CALIBRATION_SPREAD_STEP= 1
CALIBRATION_SPREAD_STOP= 60

```

Εικόνα 4-17: Απόσπασμα του σεναρίου derive coefficient values κατά OSM

4.5.4. Τελικό στάδιο βαθμονόμησης-derive coefficient values

Σε αυτό το στάδιο τα βέλτιστα αποτελέσματα που θα μοντελοποιήσουν την αστική διάχυση προκύπτουν από το αρχείο avg.log (Πίνακας 4-9) όπου επιλέγονται οι μέσοι όροι των παραμέτρων για το τελευταίο έτος ελέγχου έπειτα από την αυτοτροποποίηση που τυχόν να έχουν υποστεί αυτόματα από το μοντέλο. Έπειτα, οι τιμές για το έτος 2015 στογγυλοποιούνται και προκύπτει το τελικό σετ παραμέτρων που θα χρησιμοποιηθεί για την λειτουργία πρόβλεψης του μοντέλου (Πίνακας 4-10).

run	Έτος ελέγχου year	Παράμετροι				
		diffus	spread	breed	slp_res	rd_grav
0	1995	33.14	66.28	18.78	89.56	93.44
0	2003	35.88	71.77	20.33	84.82	93.92
0	2015	40.44	80.87	22.91	75.05	94.89

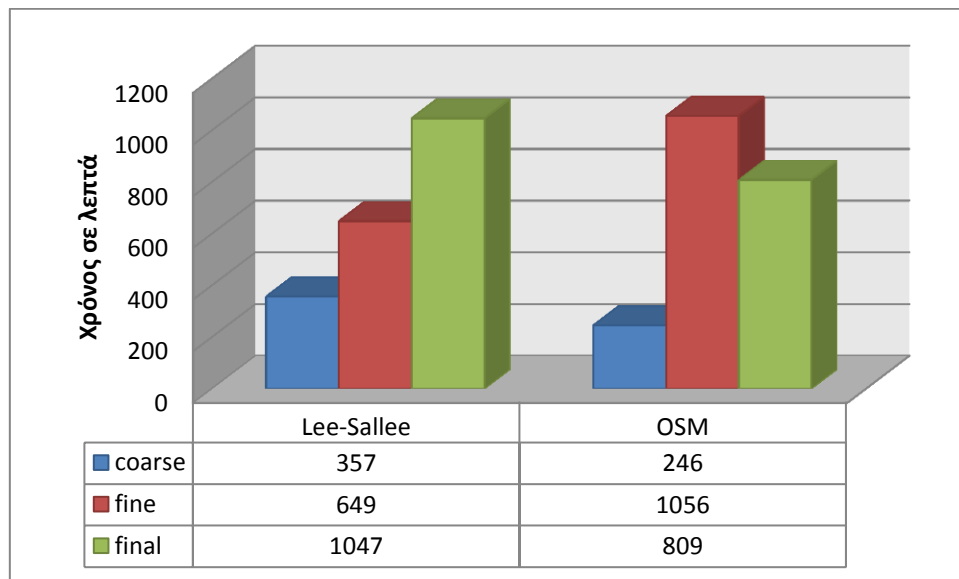
Πίνακας 4-9: Απόσπασμα από το αρχείο avg.log κατά OSM

Τελικές Παράμετροι	Τιμές
diffusion	40
spread	81
breed	23
slope resistance	75
road gravity	95

Πίνακας 4-10: Τελικές παράμετροι της βαθμονόμησης κατά OSM

4.6. Σύγκριση των βαθμονομήσεων κατά Lee-Sallee και κατά OSM

Όπως έχει ήδη αναφερθεί το στάδιο της βαθμονόμησης είναι το πιο κρίσιμο για την αποτελεσματική και αξιόπιστη πρόβλεψη του μοντέλου. Άρα, κάθε μέθοδος βαθμονόμησης παράγει διαφορετικά σενάρια παραμέτρων και άρα διαφορετικά μελλοντικά σενάρια αστικής ανάπτυξης για το ίδιο αρχικό σενάριο δεδομένων. Οι τελικές τιμές των δύο δεικτών δεν διαφέρουν κατά πολύ. Συγκεκριμένα, ο δείκτης Lee-Sallee έφτασε την τιμή 0.39741 ενώ ο δείκτης OSM έφτασε την τιμή 0.37788653. Το γεγονός ότι οι δύο βαθμονομήσεις εκτελέστηκαν σε διαφορετικούς υπολογιστές δεν μπορεί να εξάγει σαφή συμπεράσματα ως προς το ποια μέθοδος είναι η πιο ταχεία και χρησιμοποιεί κατά συνέπεια λιγότερους υπολογιστικούς πόρους. Στο Διάγραμμα 4-1 παρουσιάζονται συγκριτικά οι χρόνοι κάθε σταδίου βαθμονόμησης για την κάθε μέθοδο.



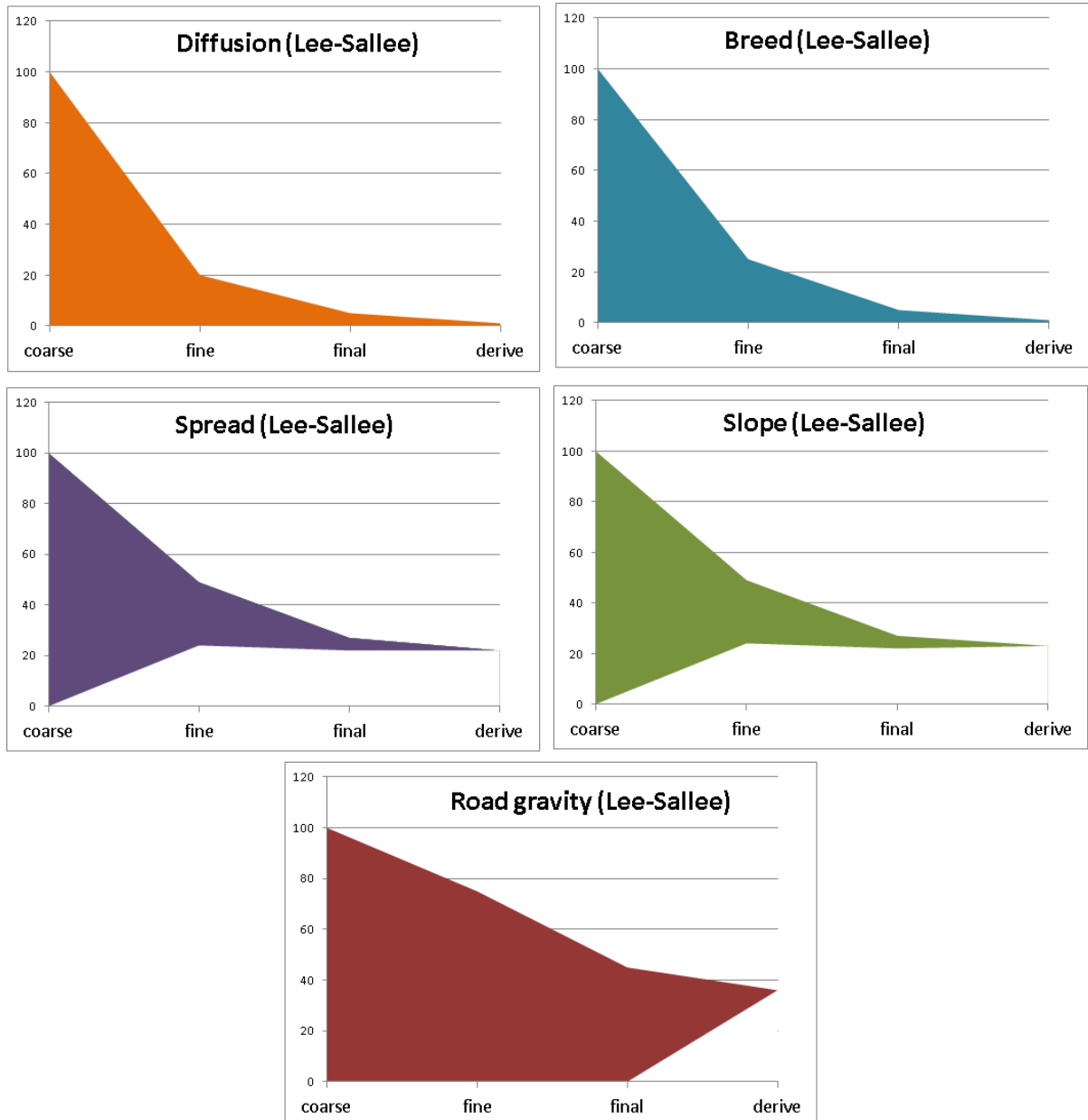
Διάγραμμα 4-1: Διάρκεια κάθε σταδίου βαθμονόμησης

Η βαθμονόμηση κατά Lee-Sallee εκτελέστηκε σε έναν υπολογιστή με αρκετά παλαιότερης αρχιτεκτονικής επεξεργαστή σε σχέση με αυτή κατά OSM, γεγονός που δικαιολογεί το ότι διήρκησε περισσότερη ώρα η πρώτη βαθμονόμηση αφού τα αρχικά εύρη τιμών είναι κοινά και για τις δύο μεθόδους. Συγκεκριμένα, στο στάδιο coarse calibration οι

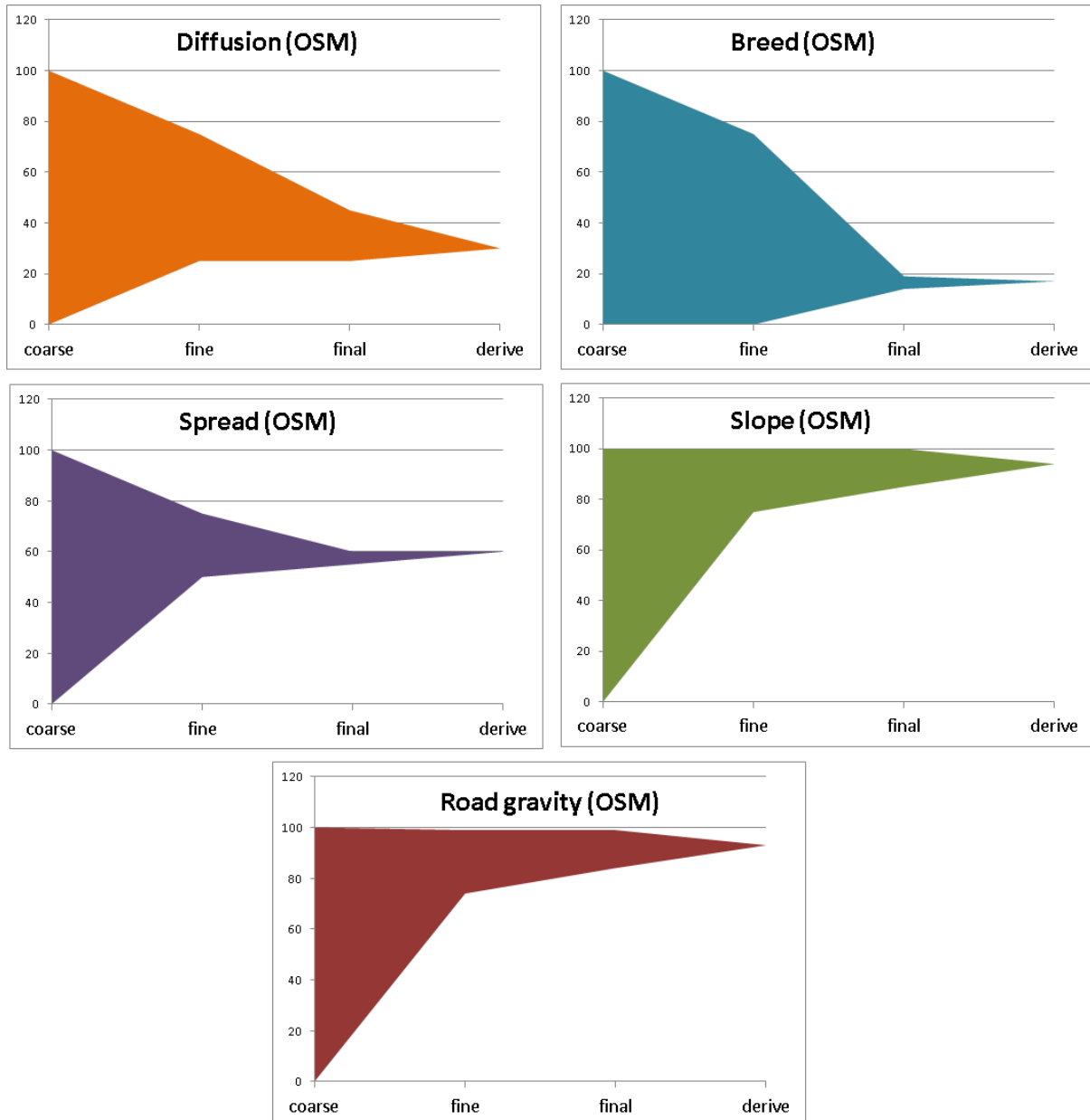
πέντε παράμετροι μπορούν να λάβουν πέντε διαφορετικές τιμές άρα το πλήθος των πιθανών συνδυασμών είναι $5^5 = 3125$ άρα η ταχύτητα εκτέλεσης είναι ανάλογη με τον αριθμό των Monte Carlo επαναλήψεων και αντιστρόφως ανάλογη με την υπολογιστική δύναμη του επεξεργαστή που χρησιμοποιεί ο υπολογιστής. Ωστόσο, το στάδιο fine calibration της πρώτης βαθμονόμησης διήρκησε 649 λεπτά ενώ στην δεύτερη 1056 λεπτά ενώ για τα υπόλοιπα στάδια συμβαίνει το αντίθετο. Έτσι, δεν προκύπτουν σαφή συμπεράσματα ως προς το ποια μέθοδος είναι ταχύτερη.

Ο ρυθμός με τον οποίο συγκλίνει κάθε μέθοδος αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα που επηρεάζει τον χρόνο εκτέλεσης και την αποτελεσματικότητα της βαθμονόμησης. Οι δύο μέθοδοι χρησιμοποιούν διαφορετικούς δείκτες από το αρχείο control_stats.log για να ταξινομήσουν τις παραμέτρους και να εξάγουν τα εύρη τιμών τους που θα τροφοδοτήσουν το επόμενο στάδιο βαθμονόμησης. Παρατηρώντας και συγκρίνοντας τις Εικόνες 4-18 και 4-19, δικαιολογείται το ότι η βαθμονόμηση κατά Lee-Sallee στο στάδιο fine διήρκησε λιγότερο γιατί τα εύρη τιμών είναι μικρότερα άρα λογικά υπάρχουν λιγότεροι πιθανοί συνδυασμοί των παραμέτρων που πρέπει να ελεγχθούν.

Τέλος, οι Πίνακες 4-5 και 4-10 που παρουσιάζουν τις τελικές παραμέτρους που προκύπτουν έπειτα από την εφαρμογή των κανόνων αυτοτροποποίησης, δείχνουν τελείως διαφορετικά σετ βέλτιστων παραμέτρων. Αυτό επιβεβαιώνει την υπόθεση ότι η κάθε μέθοδος βαθμονόμησης παράγει διαφορετικά αποτελέσματα ακόμα και αν εξετάζεται το ίδιο σετ δεδομένων εισόδου.



Εικόνα 4-18: Διαγράμματα συμπεριφοράς των παραμέτρων βαθμονόμησης κατά Lee-Sallee



Εικόνα 4-19: Διαγράμματα συμπεριφοράς των παραμέτρων βαθμονόμησης κατά OSM

4.7. Στάδιο Πρόγνωσης του Μοντέλου SLEUTH

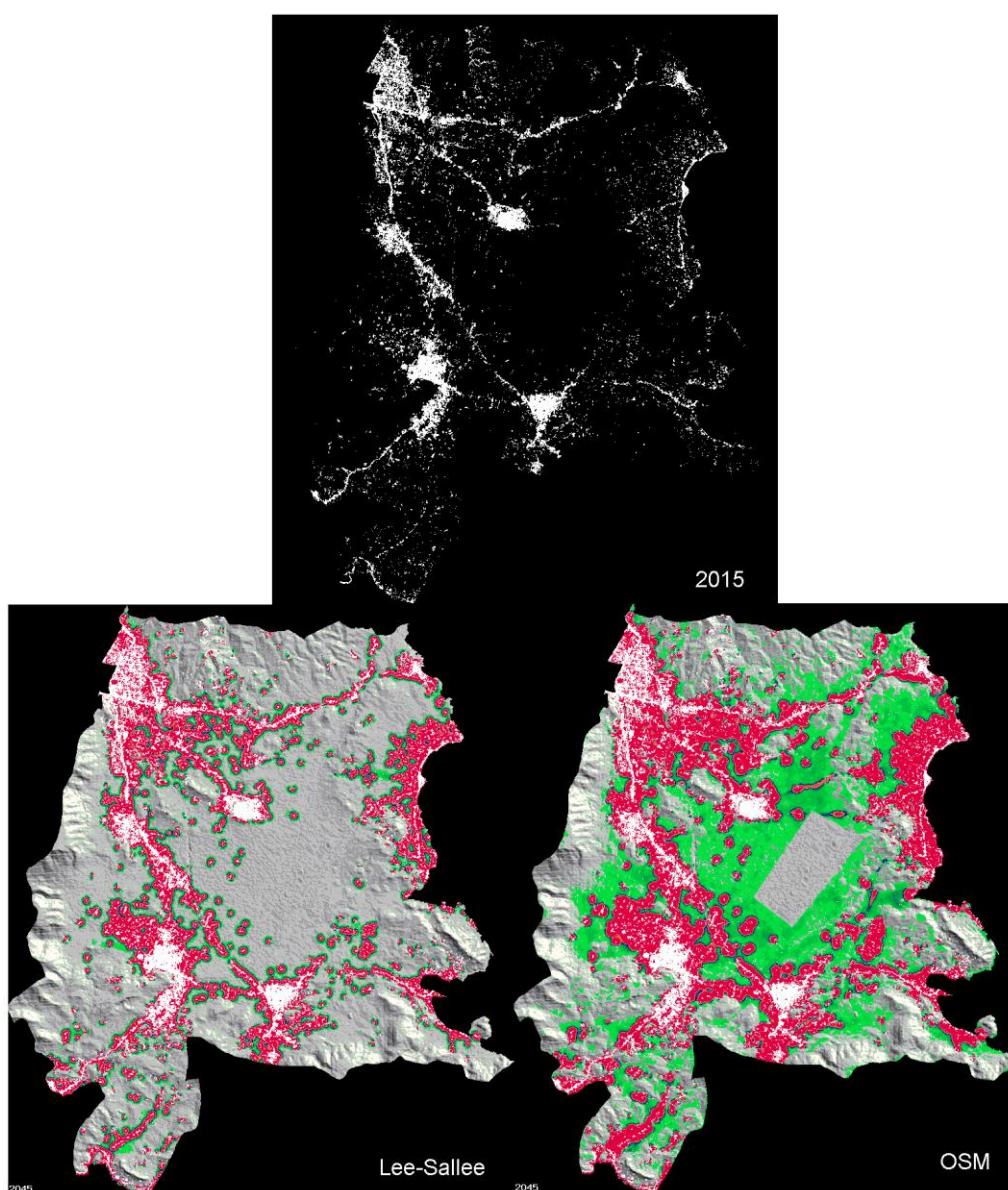
Μετά το στάδιο της βαθμονόμησης, ακολουθεί το τελικό στάδιο, αυτό της πρόγνωσης-πρόβλεψης του μοντέλου. Σαν διαδικασία είναι πολύ ταχύτερη σε σχέση με την βαθμονόμηση, αφού το μόνο που αρκεί είναι η τροποποίηση ενός αρχείου σεναρίου, θέτοντας ένα μεγάλο αριθμό επαναλήψεων Monte Carlo (επιλέχθηκαν 100 επαναλήψεις) και

θέτοντας τις παραμέτρους που εξήχθησαν από το στάδιο της βαθμονόμησης ως ικανές για την βέλτιστη μοντελοποίηση της περιοχής μελέτης. Η πρόβλεψη έγινε για την περίοδο 2015-2045 δηλαδή για μία περίοδο 30 ετών. Μία μεγαλύτερη περίοδος πρόβλεψης ενδέχεται να έχει λιγότερη ακρίβεια διότι αυξάνονται οι πιθανότητες για εμφάνιση αστάθμητων παραγόντων όπως οικονομική κρίση ή φυσικές καταστροφές που επηρεάζουν άμεσα την αστική ανάπτυξη.

Με αυτά τα δεδομένα, το μοντέλο στο στάδιο πρόγνωσης παράγει εικόνες τύπου .gif για κάθε έτος της περιόδου που μελετάται στις οποίες το χρώμα κάθε pixel έχει χρώμα ανάλογα με την πιθανότητα αστικοποίησής του. Το χρώμα για κάθε πιθανότητα ορίζεται στο σενάριο της πρόγνωσης. Εφόσον έγιναν δύο διαφορετικές βαθμονομήσεις, προκύπτουν προφανώς και δύο διαφορετικές προβολές της αστικής ανάπτυξης για την περιοχή των Μεσογείων Αττικής που αξίζουν ανάλυση και σύγκριση.

Συγκρίνοντας τις δύο εικόνες μελλοντικής εξέλιξης του αστικού ιστού (Εικόνα 4-20) θα λέγαμε ότι δεν διαφέρουν κατά πολύ ως προς τις βασικές περιοχές στις οποίες υπάρχει έντονη αστική ανάπτυξη. Οι διαφορές εμφανίζονται στην ένταση και όχι τόσο στη διασπορά των νέων περιοχών που πρόκειται να μετατραπούν σε αστικές. Και στις δύο εικόνες φαίνεται ο Γέρακας να έχει αστικοποιηθεί πλήρως και να σχηματίζει με τα Γλυκά Νερά και την Παλλήνη μία νέα ενιαία αστική οντότητα. Παράλληλα, αναπτύσσεται το βόρειο κομμάτι της Παιανίας ενώ και στις δύο περιπτώσεις το Κορωπί επεκτείνεται προς τα δυτικά. Η Αρτέμιδα αναπτύσσεται έντονα δημιουργώντας μία ζώνη κατά μήκος της ακτής της αλλά και η περιοχή Βελανιδιά που βρίσκεται δυτικά του κέντρου της Αρτέμιδας φαίνεται να δημιουργεί νέο αστικό πυρήνα. Στην πρόβλεψη κατά OSM, μεταξύ της περιοχής αυτής και των Σπατών, παρατηρείται αστικοποίηση κατά μήκος της οδού που συνδέει τις δύο περιοχές. Η περιοχή του Πόρτο Ράφτη παρουσιάζει παρόμοια ανάπτυξη με την Αρτέμιδα, δηλαδή ζώνη κατά μήκος της ακτής της ενώ ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περιοχή βορειοανατολικά του

Μαρκόπουλου και βόρεια των περιοχών Καλυβέζα και Αγία Τριάδα, που το 2015 σύμφωνα με παρατήρηση μέσω του λογισμικού Google Earth, εμφανίζει διάσπαρτες κατοικίες χαμηλού ύψους με πισίνες στις περισσότερες περιπτώσεις. Σύμφωνα με τις προβλέψεις, η περιοχή αυτή μέχρι το 2045 θα αποτελεί ξεχωριστό αστικό πυρήνα. Η πόλη των Σπάτων δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη αστική διάχυση, μόνο περιοχές βόρεια από αυτήν ανάμεσα στην Παλλήνη και το Πικέρμι δείχνουν τάσεις αστικοποίησης. Τέλος, η Αγία Μαρίνα δείχνει να αναπτύσσεται κατά μήκος της κύριας οδού που την διατρέχει.



Εικόνα 4-20: Αρχική αστική γη, τάση εξέλιξης το 2045 κατά Lee-Sallee και τάση εξέλιξης κατά OSM

Στην πρόβλεψη κατά OSM, λόγω των αρκετά μεγαλύτερων τιμών των παραμέτρων diffusion, spread και breed, σε σχέση με την πρόβλεψη κατά Lee-Sallee, υπάρχουν πολλές περιοχές με πράσινους τόνους, δηλαδή με χαμηλή πιθανότητα αστικοποίησης. Σύμφωνα με τον Πίνακα 4-11, οι περιοχές με πιθανότητα μικρότερη από 30% που φαίνονται με τόνους του πράσινου είναι 102220 pixel, για την προβολή κατά OSM, ενώ μόλις 29419 για την προβολή κατά Lee-Sallee. Έτσι, αυτές οι περιοχές δεν σχολιάστηκαν λόγω της μικρής πιθανότητας εμφάνισής τους.

Πιθανότητες αστικοποίησης (%)	Χρώμα πιθανότητας	Πλήθος pixel κατά Lee-Sallee	Έκταση σε στρέμματα	Πλήθος pixel κατά OSM	Έκταση σε στρέμματα
100-90		21230	19107	51651	46485,9
90-80		9693	8723,7	8931	8037,9
80-70		6706	6035,4	6324	5691,6
70-60		5622	5059,8	5094	4584,6
60-50		5049	4544,1	4750	4275
50-40		5025	4522,5	4597	4137,3
40-30		5225	4702,5	5398	4858,2
30-20		5731	5157,9	8066	7259,4
20-10		7717	6945,3	24956	22460,4
10-1		15971	14373,9	69198	62278,2

Πίνακας 4-11: Πλήθος pixel ανάλογα με την πιθανότητα αστικοποίησης για τις δύο προσομοιώσεις

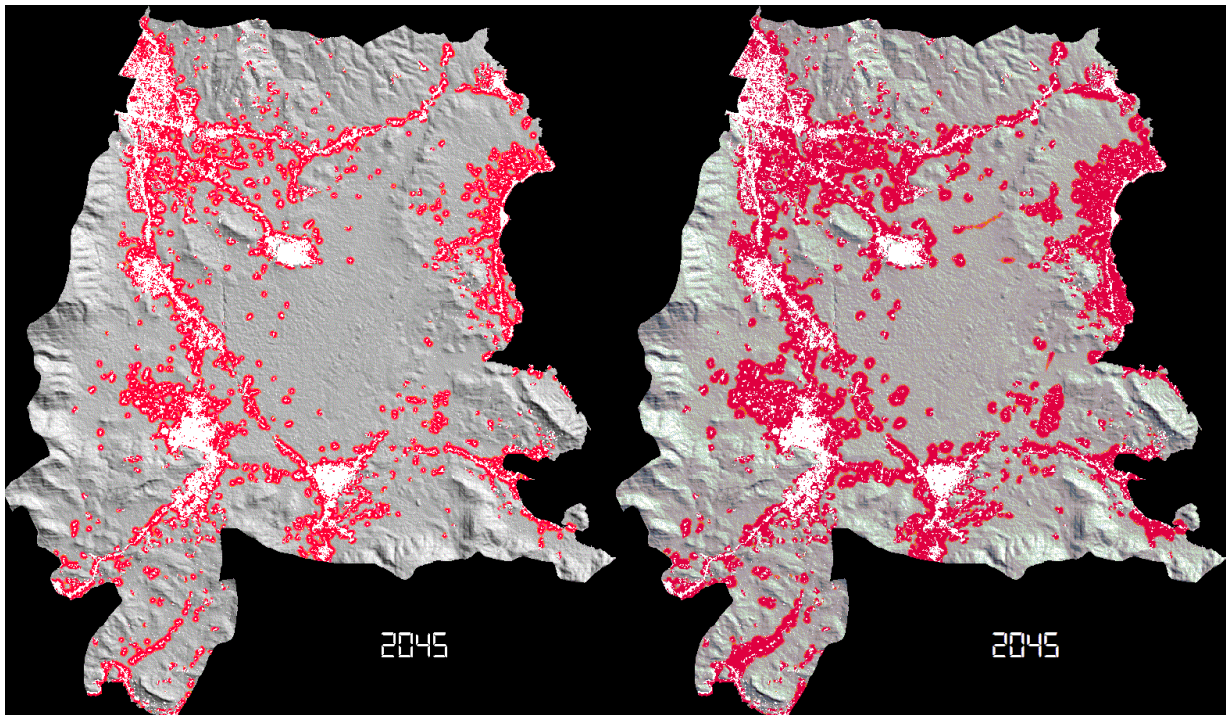
Όπως αναφέρθηκε, η βαθμονόμηση κατά OSM παρήγαγε αρκετά μεγαλύτερες τιμές για το σετ παραμέτρων, γεγονός που φαίνεται καθαρά στις τελικές εικόνες και επιβεβαιώνεται αριθμητικά στον Πίνακα 4-11. Η έκταση που προβλέπεται για το 2045 να μετατραπεί σε αστική με πιθανότητα 90%-100%, ανέρχεται σε 19107 στρέμματα στην πρώτη περίπτωση ενώ για την δεύτερη περίπτωση ανέρχεται σε 46485,9 στρέμματα.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μοντελοποίηση της αστικής διάχυσης στην περιοχή των Μεσογείων Αττικής μέσω της συνδυαστικής χρήσης του μοντέλου SLEUTH, ενός ΓΣΠ και μεθόδων ψηφιακής τηλεπισκόπησης για την εξαγωγή, την επεξεργασία και την οπτικοποίηση των δεδομένων εισόδου. Παράλληλα, η εργασία στοχεύει στην σύγκριση των δύο δημοφιλέστερων μεθόδων βαθμονόμησης που έχουν αναπτυχθεί για το συγκεκριμένο μοντέλο και των τελικών προβλέψεων που αυτές παράγουν. Εφόσον η ερευνητική κοινότητα που μελετά το μοντέλο SLEUTH δεν έχει καταλήξει σε σαφές πόρισμα ως προς το ποια μέθοδος είναι αποτελεσματικότερη, μία σύγκριση των αποτελεσμάτων που παράγουν αυτές μπορεί να οδηγήσει σε χρήσιμα συμπεράσματα. Η περίοδος πρόβλεψης είναι μεταξύ 2015 και 2045 και τα έτη ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν στη βαθμονόμηση είναι το 1984, 1995, 2003 και 2015. Συγκρίνοντας τις δύο μεθόδους βαθμονόμησης, θα λέγαμε ότι η ταχύτητα σύγκλισής τους είναι παρόμοια καθότι οι χρόνοι εκτέλεσης δεν διαφέρουν κατά πολύ. Ανάλογα με το στάδιο της βαθμονόμησης που εξετάζεται, παρατηρείται διαφορετική σύγκλιση, με την μέθοδο Lee-Sallee να υπερτερεί στο στάδιο fine ενώ η μέθοδος OSM υπερτερεί στο στάδιο final (Εικόνες 4-17, 4-18). Οι δύο δείκτες (Lee-Sallee και OSM) είχαν τελικά σχεδόν ίδιες τιμές δηλαδή 0.39741 για τον Lee-Sallee και 0.37788653 για τον OSM, γεγονός που δείχνει σχεδόν ίση αποτελεσματικότητα και αξιοπιστία των δύο μεθόδων με μικρό προβάδισμα για την μέθοδο Lee-Sallee.

Στην φάση της πρόγνωσης αντικατοπτρίζεται και οπτικοποιείται το γεγονός ότι οι δύο μέθοδοι παράγουν τελείως διαφορετικά σεντ παραμέτρων που ορίζουν το πως λειτουργεί το μοντέλο. Η μέθοδος Lee-Sallee χαρακτηρίζεται ως πιο “συντηρητική” σε σχέση με την OSM, καθώς σε αυτήν οι τιμές των παραμέτρων που προκύπτουν από αυτήν είναι αισθητά μικρότερες σε σχέση με την μέθοδο OSM. Φυσικά, αυτή η διαφορά στις τιμές των παραμέτρων έχει ως αποτέλεσμα μία μεγαλύτερη εξάπλωση του αστικού ιστού για την

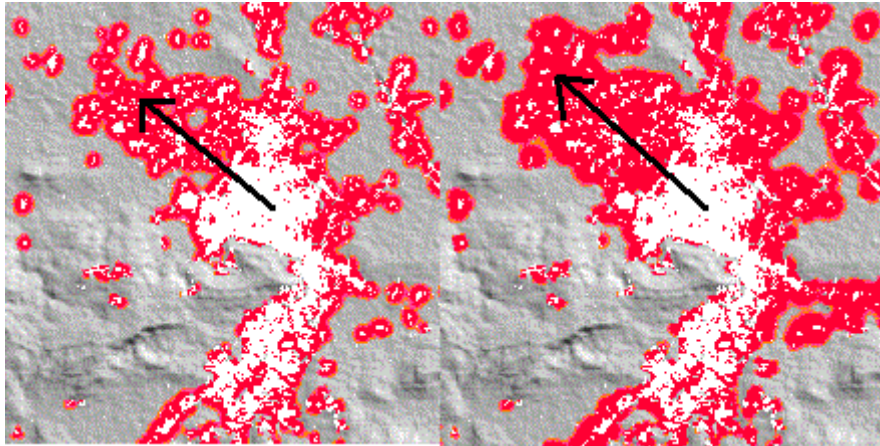
μέθοδο OSM σε σχέση με την πιο συγκρατημένη διάχυση που παρατηρείται με την μέθοδο Lee-Sallee. Ωστόσο, ιδιαίτερα ενδιαφέρον εύρημα αποτελεί το γεγονός ότι οι κύριες περιοχές που παρουσιάζουν ανάπτυξη, δηλαδή αυτές με πιθανότητα αστικοποίησης από 60% και πάνω, είναι σχεδόν ίδιες σαν σχήμα και για τις δύο μεθόδους και η διαφορά τους έγκειται μόνο στην έκταση (Εικόνα 5-1).



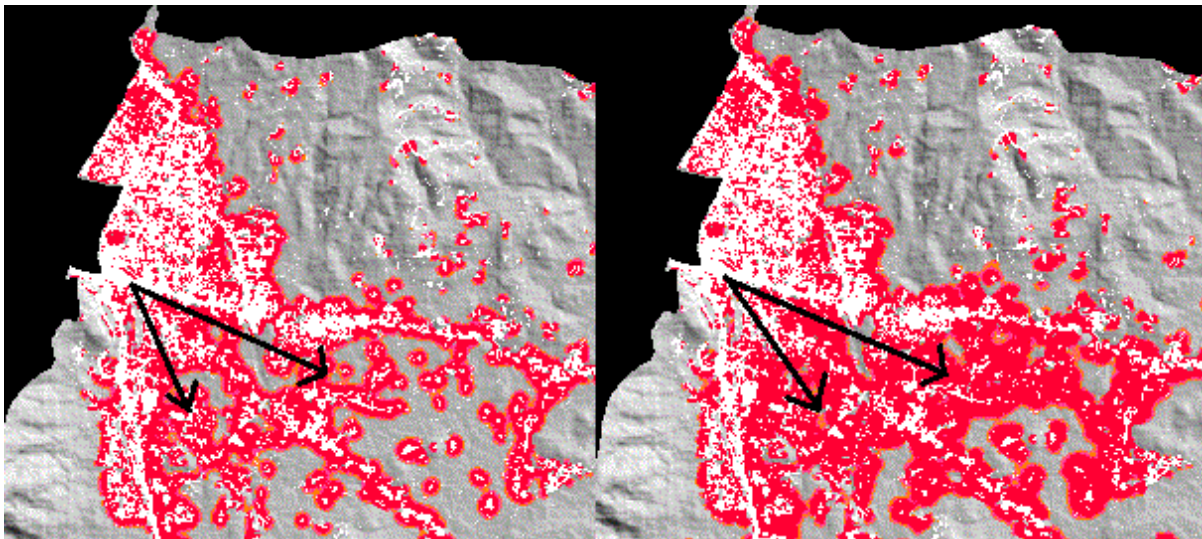
Εικόνα 5-1: Περιοχές μελλοντικής αστικοποίησης με πιθανότητα πάνω από 60% κατά Lee-Sallee (αριστερά) και κατά OSM (δεξιά)

Συγκεκριμένα, αν η μελλοντική εξάπλωση αντιμετωπιστεί ως ροή που ξεκινά από την υφιστάμενη αστική γη του 2015, τότε και στις δύο περιπτώσεις για την περιοχή του Κορωπίου, η τάση για αστικοποίηση βρίσκεται βορειοδυτικά του κέντρου, στην περιοχή του Αγίου Γεωργίου (Εικόνα 5-2). Ομοίως, στην Εικόνα 5-3, για την περιοχή του Γέρακα, των Γλυκών Νερών και της Παλλήνης, επιβεβαιώνεται το συμπέρασμα ότι τα χωρικά πρότυπα μοιάζουν και για τα δύο μελλοντικά σενάρια και η μόνη διαφορά τους είναι ως προς το

μέγεθος. Τέλος, στην περιοχή της Αρτέμιδας παρατηρείται μία νέα ζώνη αστικής γης κατά μήκος της ακτογραμμής (Εικόνα 5-4).

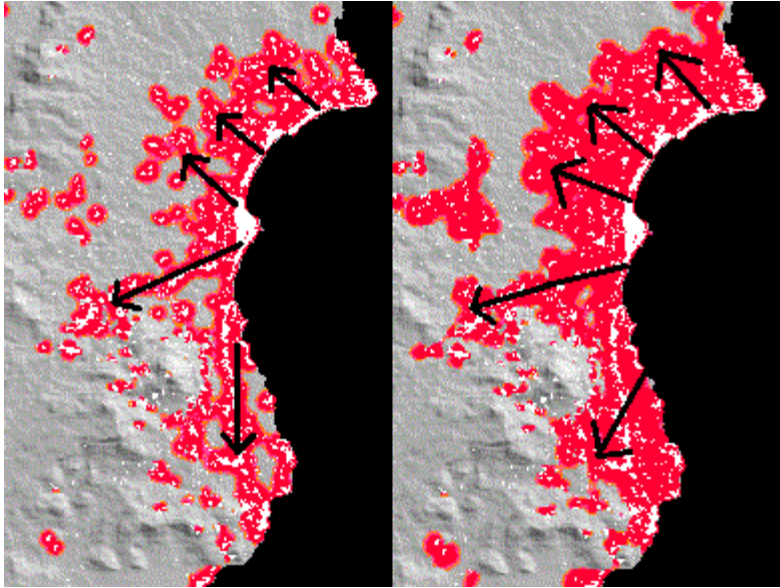


Εικόνα 5-2: Τάσεις αστικοποίησης για το Κορωπί κατά Lee-Sallee (αριστερά) και κατά OSM (δεξιά)



Εικόνα 5-3: Τάσεις αστικοποίησης για τον Γέρακα, τα Γλυκά Νερά και την Παλλήνη κατά Lee-Sallee (αριστερά) και κατά OSM (δεξιά)

Ταυτόχρονα, η μέθοδος OSM προβλέπει πολύ μεγαλύτερες εκτάσεις με μικρή πιθανότητα αστικοποίησης σε σχέση με την Lee-Sallee, γεγονός που δημιουργεί μεγαλύτερη αβεβαιότητα για αυτές τις περιοχές.



Εικόνα 5-4: Τάσεις αστικοποίησης για την Αρτέμιδα κατά Lee-Sallee (αριστερά) και κατά OSM (δεξιά)

Τέλος, η συμβολή των ΓΣΠ, για την προεπεξεργασία και διαχείριση των πρωτογενών δεδομένων, όπως δορυφορικές εικόνες και ψηφιακά μοντέλα εδάφους, την μελέτη και ανάλυση των παρατηρούμενων προτύπων της αστικής ανάπτυξης αποδείχθηκε ιδιαίτερα σημαντική και απολύτως απαραίτητη αναδεικνύοντας τα οφέλη που μπορούν να αποκομιστούν με την συνδυαστική χρήση ενός ΓΣΠ και ενός μοντέλου αστικής ανάπτυξης, όπως είναι το SLEUTH.

6. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Τα μοντέλα αστικής ανάπτυξης αποτελούν ένα χρήσιμο εργαλείο για κάθε διαδικασία σχεδιασμού και λήψης αποφάσεων. Οι τάσεις αστικοποίησης που καταδεικνύουν μπορεί να χρησιμοποιηθούν από τους σχεδιαστές ώστε να κάνουν εκτίμηση των επιπτώσεων αυτών των τάσεων και θα ήταν αδύνατον να προβλεφθούν χωρίς τα μοντέλα αυτά.

Για να γίνουν πιο αποτελεσματικά τα μοντέλα αστικής ανάπτυξης θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη όλο και περισσότερες μεταβλητές του πολύπλοκου συστήματος που ονομάζεται πόλη. Σε αυτή την κατεύθυνση, το επόμενο στάδιο ενός διδιάστατου μοντέλου είναι το τριδιάστατο. Η τρίτη διάσταση μπορεί να αποτελεί για παράδειγμα το ύψος κτιρίων και η φάση της πρόγνωσης να γίνεται σε πραγματικό χρόνο με άμεση οπτικοποίηση. Ακόμη, η εισαγωγή οικονομικών στοιχείων στην διαδικασία πρόβλεψης θα μπορούσε να αποτελέσει σημαντική προσθήκη. Επίσης, η ενσωμάτωση ενός αστικού μοντέλου με ένα πακέτο GIS έτσι ώστε να λειτουργούν σε απόλυτη αρμονία θα έκανε την διαδικασία προετοιμασίας των δεδομένων πολύ απλούστερη και φιλικότερη προς τον χρήστη. Ήδη εδώ και αρκετά χρόνια οι Clarke και Gaydos (1998) έχουν τονίσει την ανάγκη για ένα τέτοιο μοντέλο.

Τέλος, μία αδυναμία του SLEUTH είναι ότι η κατάσταση του κάθε κελιού είναι δυαδική, δηλαδή μπορεί να είναι αστικά ή μη αστικά. Το μοντέλο δεν μπορεί να αντιμετωπίσει και να διαχειριστεί διαφορετικούς τύπους αστικότητας και επομένως να μοντελοποιήσει την συμπεριφορά τους στο μέλλον. Οι διαφορετικοί τύποι αστικότητας ενδεχομένως προκύπτουν από πληθυσμιακά δεδομένα, όπως είναι η πυκνότητα πληθυσμού ή ακόμα και πολεοδομικά, όπως για παράδειγμα η πυκνότητα δόμησης σε επίπεδο οικοδομικού τετραγώνου. Μία βελτιωμένη έκδοση του μοντέλου που θα μπορεί να διαχειρίζεται διαφορετικούς τύπους αστικότητας θα το καθιστά πιο ρεαλιστικό.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αραβαντινός, Α. Ι. (2007). *Πολεοδομικός Σχεδιασμός για μία βιώσιμη ανάπτυξη του αστικού χώρου*. Αθήνα: Συμμετρία.
- Barnes, K. B., Morgan III, J. M., Roberge, M. C., & Lowe, S. (2001). Sprawl development: its patterns, consequences, and measurement. *Towson University, Towson*, 1-24.
- Batty, M. (2009). Urban modeling. *International Encyclopedia of Human Geography*. Oxford, UK: Elsevier.
- Batty, M., & Longley, P. A. (1994). *Fractal cities: a geometry of form and function*. Academic Press.
- Batty, M., Besussi, E., & Chin, N. (2003). *Traffic, urban growth and suburban sprawl*. CASA Working Paper Series, 70, University College London (UCL), Britain.
- Bays, C. (1987). Candidates for the Game of Life in Three Dimensions. *Complex Systems*, 1, 373-400.
- Berglund, L. (2014). *REPORT: Review of Land-Use Models-Summary and Documentation*. WSP Analysis & Strategy.
- Berling-Wolff, S., & Wu, J. (2004). Modeling urban landscape dynamics: A case study in Phoenix. *Urban Ecosystems*, 7, 215-240.
- Bruegmann, R. (2005). *Sprawl: A Compact History*. Chicago, London: The University of Chicago Press.
- Γερασίμου, Σ. (2007). Η εξέλιξη της πόλης και της πολεοδομίας στην ελληνιστική εποχή. *ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΑ & ΤΕΧΝΕΣ*, 103, 91-96.
- Camagni, R., Gibelli, M. C., Rigamonti, P. (2002). Urban mobility and urban form: The social and environmental costs of different patterns of urban expansion. *Ecological Economics*, 40, 199-216.

- Chin, N. (2002). *Unearthing the Roots of Urban Sprawl: A Critical Analysis of Form, Function and Methodology*. CASA Working Papers Series, 47, University College London (UCL), Britain.
- Christaller, W. (1966). *Central Places in Southern Germany*. (C. W. Baskin Μεταφρ.). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall. (Πρώτη έκδοση στην γερμανική γλώσσα το 1933).
- Clarke, K. C. (2008a). Mapping and Modelling Land Use Change: an Application of the SLEUTH Model. *Landscape Analysis and Visualisation: Spatial Models for Natural Resource Management and Planning*, 353-366. Berlin: Springer.
- Clarke, K. C. (2008b). A Decade of Cellular Urban Modeling with SLEUTH: Unresolved Issues and Problems. *Planning Support Systems for Cities and Regions*, 47-60, Cambridge, MA: Lincoln Institute of Land Policy.
- 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 science*, 12(7), 699-714.
- Clarke, K. C., Hoppen, S., & Gaydos, L. (1996). Methods and techniques for rigorous calibration of a cellular automaton model of urban growth. *Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling, Santa Fe, New Mexico*.
- 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*, 24, 247-261.
- Clarke, K. C., Gazulis, N., Dietzel, C. K., & Goldstein, N. C. (2007). A decade of SLEUTHing: Lessons learned from applications of a cellular automaton land use

- change model. *Twenty Years of the International Journal of Geographical Information Systems and Science*, 413-425. Boca Raton, FL: Taylor and Francis.
- Chaudhuri, G., & Clarke, K. C. (2013). The SLEUTH Land Use Change Model: A Review. *International Journal of Environmental Resources Research*, 1(1), 88-104.
- Couclelis, H. (1985). Cellular worlds: a framework for modeling micro-macro dynamics. *Environment and planning A*, 17(5), 585-596.
- Davis, K. (1955). The Origin and Growth of Urbanization in the World. *American Journal of Sociology*, 60, 429-437.
- Dietzel, C., & Clarke, K. C. (2004). Replication of Spatio-Temporal Land Use Patterns at three levels of Aggregation by an Urban Cellular Automata, P.M.A. Slood, B. Chopard, and A.G. Hoekstra (Eds.), *ACRI 2004, LNCS 3305*, 523-532, Berlin, Heidelberg: Springer.
- Dietzel, C., & Clarke, K. C. (2007). Toward Optimal Calibration of the SLEUTH Land Use Change Model. *Transactions in GIS*, 11(1), 29-45.
- Donoso, M. (2008). *Geosimulation of Population Dynamics, Urban Growth and Dasymetric Densities in Northwest Florida 1974-2025* (Διδακτορική διατριβή), Department of Geography, University of Georgia.
- Doxiadis, C. A. (1964). The Ancient Greek City and the City of the Present. *Ekistics*, 18, 346-364.
- Doxiadis, C. A. (1971). Ancient Greek Settlements. *Ekistics*, 31, 4-21.
- Ewing, R. (1997). Is Los Angeles-style sprawl desirable?. *Journal of the American planning association*, 63(1), 107-126.
- Galster, G., Hanson, R., Ratcliffe, M. R., Wolman, H. Coleman, S., & Freihage, J. (2001). Wrestling Sprawl to the Ground: Defining and Measuring an Elusive Concept. *Housing Policy Debate*, 12(4), 681-717.

- Gardner, M. (1970). The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game 'Life'. *Scientific American*, 233, 120–123.
- Hall, T. (2005). *Αστική Γεωγραφία*. Αθήνα: Κριτική.
- Hamidi, S., & Ewing, R. (2014). A longitudinal study of changes in urban sprawl between 2000 and 2010 in the United States. *Landscape and Urban Planning*, 128, 72-82.
- Harris, C. D., & Ullman, E. L. (1945). The Nature of Cities. *Annals of the American Academy of Political and Social Science*, 242, 7-17, Beverly Hills, CA: SAGE.
- Hoyt, H. (1939). *The Structure and Growth of Residential Neighbourhoods in American Cities*. Washington: Federal Housing Administration.
- Jantz, C. A., Goetz, S. J., & Shelley, M. K. (2003). Using the SLEUTH urban growth model to simulate the impacts of future policy scenarios on urban land use in the Baltimore/Washington metropolitan area. *Environment and Planning B*, 31, 251-271.
- Jantz, C. A., Goetz, S. J., Donato, D., & Claggett, P. (2010). Designing and implementing a regional urban modeling system using the SLEUTH cellular urban model. *Computers, Environment and Urban Systems*, 34, 1-16.
- King, L. J. (1984). CENTRAL PLACE THEORY. In G. I. Thrall (Ed.), *SCIENTIFIC GEOGRAPHY*, 1. Beverly Hills, CA: SAGE.
- Kruse, F. A., Lefkoff, A. B., Boardman, J. W., Heidebrecht, K. B., Shapiro, A. T., Barloon, P. J., & Goetz, A. F. H. (1993). The spectral image processing system (SIPS)—interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. *Remote sensing of environment*, 44(2), 145-163.
- Lawrence, B. L. (2005). The context and causes of sprawl. *Nature in fragments: the legacy of sprawl*. 3-17, New York, NY: Columbia University Press.
- Liu, Y. (2008). *Modelling urban development with geographical information systems and cellular automata*. Boca Raton, FL: CRC Press.

- Lopez, R. (2014). Urban Sprawl in the United States: 1970-2010. *Cities and the Environment (CATE)*, 7(1), 7.
- Losch, A. (1954). *The Economics of Location*. (W. H. Woglom Μεταφρ.). New Haven, London: Yale University Press. (Πρώτη έκδοση στην γερμανική γλώσσα το 1940).
- Μαντέλας, Ε., (2011). *Υπολογιστική Προσομοίωση Αστικής Επέκτασης με χρήση Ασαφών Κυψελοειδών Αυτομάτων* (Διδακτορική διατριβή), Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ), Ελλάδα.
- Νάκος, Β. (2011). *ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΙΑ*. Αθήνα: Εκδόσεις ΕΜΠ.
- Pacione, M. (2009). *Urban Geography: A Global Perspective* (3rd ed.). New York, NY: Routledge.
- Park, R. E., Burgess, E. W., & McKenzie, R. D. (1925). *The City*. Chicago, London: The University of Chicago Press.
- 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*, 93(2), 314-337.
- Rui, Y. (2013). *Urban Growth Modeling Based on Land-use Changes and Road Network Expansion* (Διδακτορική διατριβή). Royal Institute of Technology (KTH), Sweden
- Σταυράκου, Γ. (2014). *Προσομοίωση εξέλιξης και επέκτασης αστικών περιοχών με χρήση κυψελοειδών αυτομάτων: εφαρμογή του υποδείγματος SLEUTH στο πολεοδομικό συγκρότημα Ηρακλείου Κρήτης* (Μεταπτυχιακή εργασία). Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ), Ελλάδα.
- Sante, I., Garcia, A. M., Miranda, D., & Crecente, R. (2010). Cellular automata models for the simulation of real-world urban processes: A review and analysis, *Landscape and Urban Planning*, 96, 108-122.
- Shiffman, D. (2012). *The Nature of Code*. D. Shiffman.

- Silva, E. A., & Clarke, K. C. (2002). Calibration of the SLEUTH urban growth model for Lisbon and Porto, Portugal. *Computers, Environment and Urban Systems*, 26, 525-552.
- Sipper, M. (1997). *Evolution of Parallel Cellular Machines: The Cellular Programming Approach*. Berlin: Springer.
- Tobler, W. R. (1979). Cellular Geography. S. Gale and G. Olsson (Eds.), *Philosophy in Geography*, 379-386, Dordrecht, Holland: D. Reidel Publishing Company.
- Torrens, P. M. (2003). Automata-based models of urban systems. *Advanced Spatial Analysis*, P. Longley & M. Batty (Eds.), Redlands: ESRI Press, 61-79.
- Torrens, P. M. (2006). Simulating Sprawl. *Annals of the Association of American Geographers*, 96(2), 248-275.
- Van Metre, P. C., Mahler, B. J., & Furlong, E. T. (2000). Urban sprawl leaves its PAH signature. *Environmental Science & Technology*, 34(19), 4064-4070.
- Waddell, P., & Ulfarsson, G. F., (2004). Introduction to Urban Simulation: Design and Development of Operational Models. *Handbook 5: Transport Geography and Spatial Systems*. Oxford: Pergamon Press.
- Wolfram, S. (1983). Statistical mechanics of cellular automata. *Reviews of modern physics*, 55(3), 601-644.
- Wolfram, S. (1984). Cellular automata: a model of complexity. *Nature*, 311, 419-424.
- Yoffee, N. (2005). *Myths of the Archaic State: Evolution of the Earliest Cities, States, and Civilizations*. New York, NY: Cambridge University Press.

Σύνδεσμοι στο Διαδίκτυο

Εφαρμογή της USGS για λήψη δεδομένων δορυφόρων

<http://earthexplorer.usgs.gov/> Τελευταία πρόσβαση 4/6/2015

Δεδομένα απογραφών

<http://www.e-demography.gr/> Τελευταία πρόσβαση 9/9/2015

Project Gigalopolis

<http://www.ncgia.ucsb.edu/projects/gig/> Τελευταία πρόσβαση 4/8/2015

Εικόνες πρώιμων αστικών μοντέλων των Burgess και Hoyt

http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitesize/geography/urban_environments/urban_models_medcs_rev1.shtml Τελευταία πρόσβαση 20/7/2015

Εικόνες πρώιμου μοντέλου του Ullman

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b1/Ulman2.png> Τελευταία πρόσβαση 26/7/2015

Ιστοσελίδα του λογισμικού Cygwin

<http://www.cygwin.com> Τελευταία πρόσβαση 14/6/2015

Πληροφορίες για τους δείκτες του μοντέλου SLEUTH

<http://www.ncgia.ucsb.edu/projects/gig/v2/About/dtDtControlDefine.htm> Τελευταία πρόσβαση 12/9/2015

Εικόνα παραδείγματος του game of life

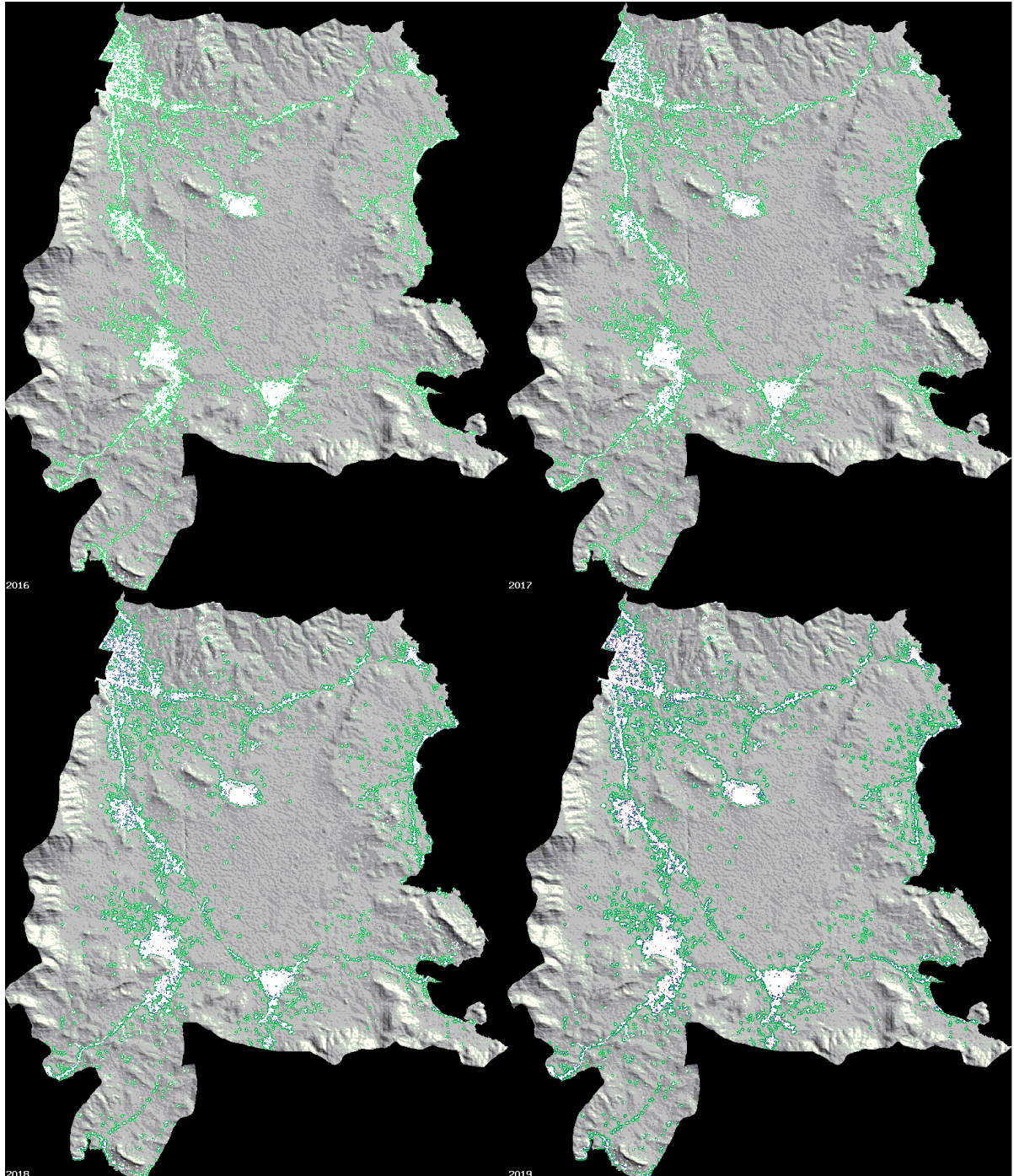
<https://bmscblog.wordpress.com/2013/05/17/modelling-conways-game-of-life-implemented-in-r/> Τελευταία πρόσβαση 7/10/2015

Automatic Classification Plugin για το QGIS

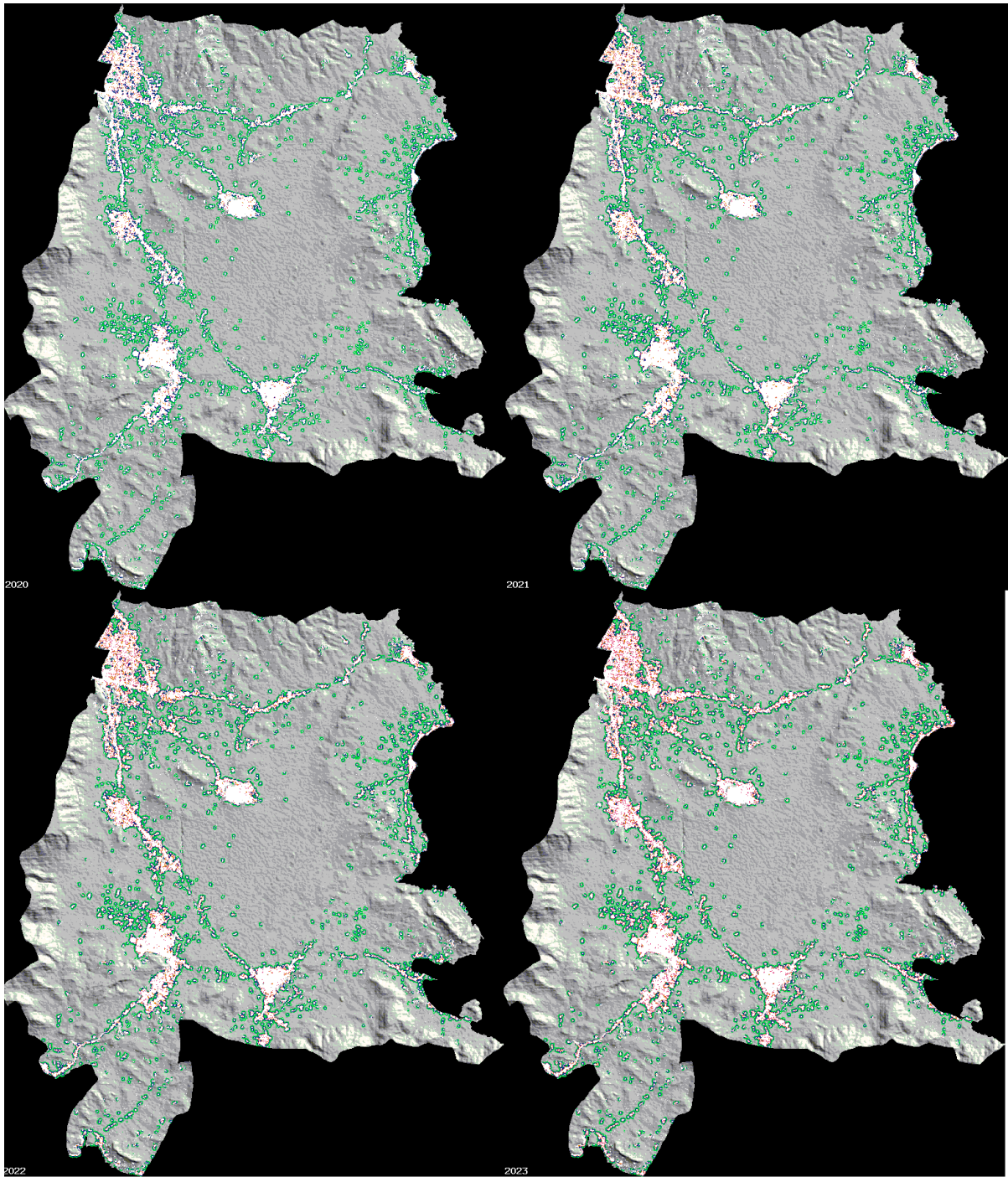
<http://fromgistors.blogspot.com> Τελευταία πρόσβαση 4/6/2015

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Το παράρτημα περιλαμβάνει όλες τις εικόνες του σταδίου πρόβλεψης για την χρονική περίοδο 2016-2045 για τις δύο διαφορετικές βαθμονομήσεις κατά Lee-Sallee και κατά Optimum Sleuth Metric.



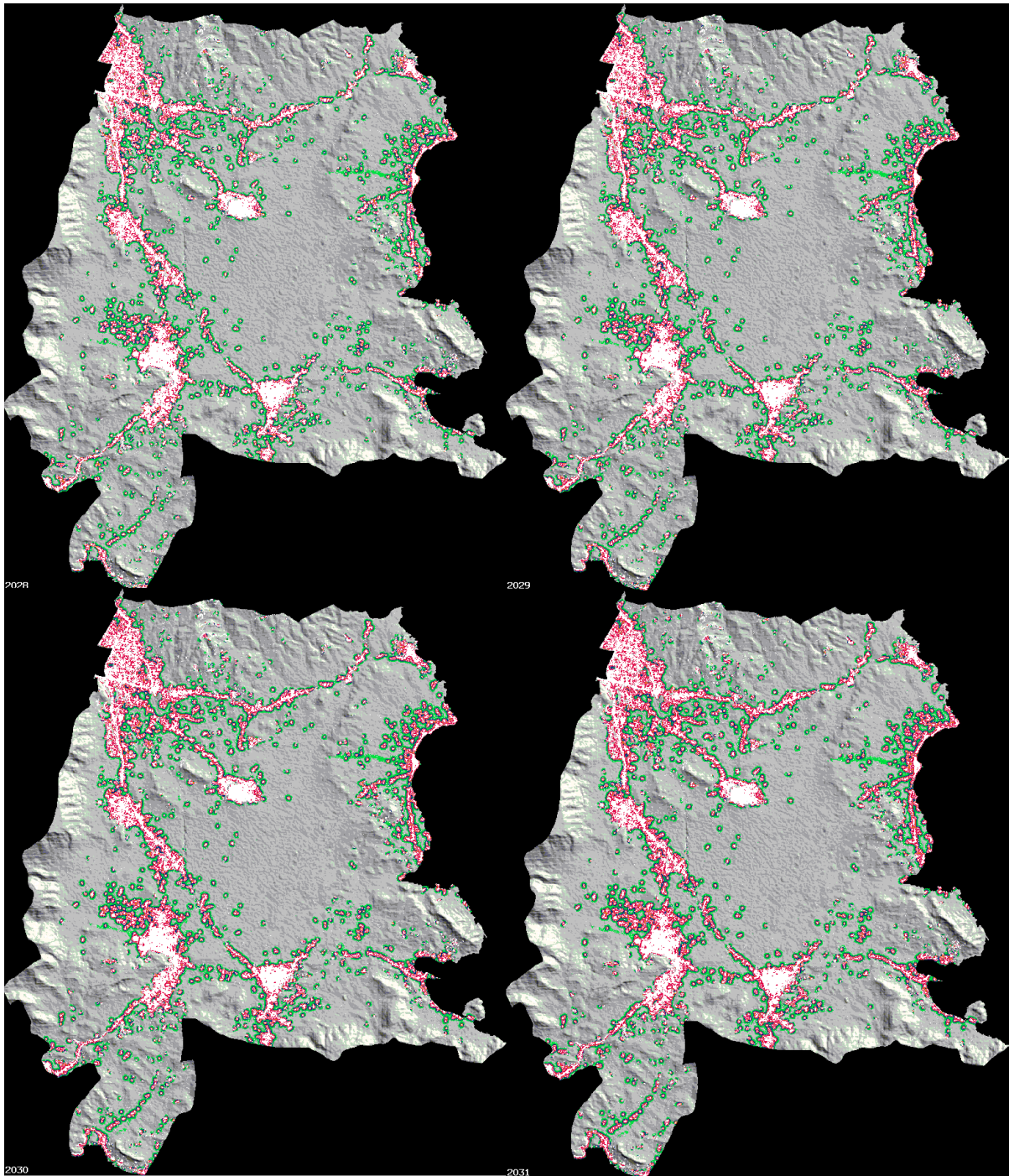
Εικόνα Π-1: Εκτίμηση επέκτασης της αστικής γης για τα έτη 2016, 2017, 2018, 2019 κατά Lee-Sallee



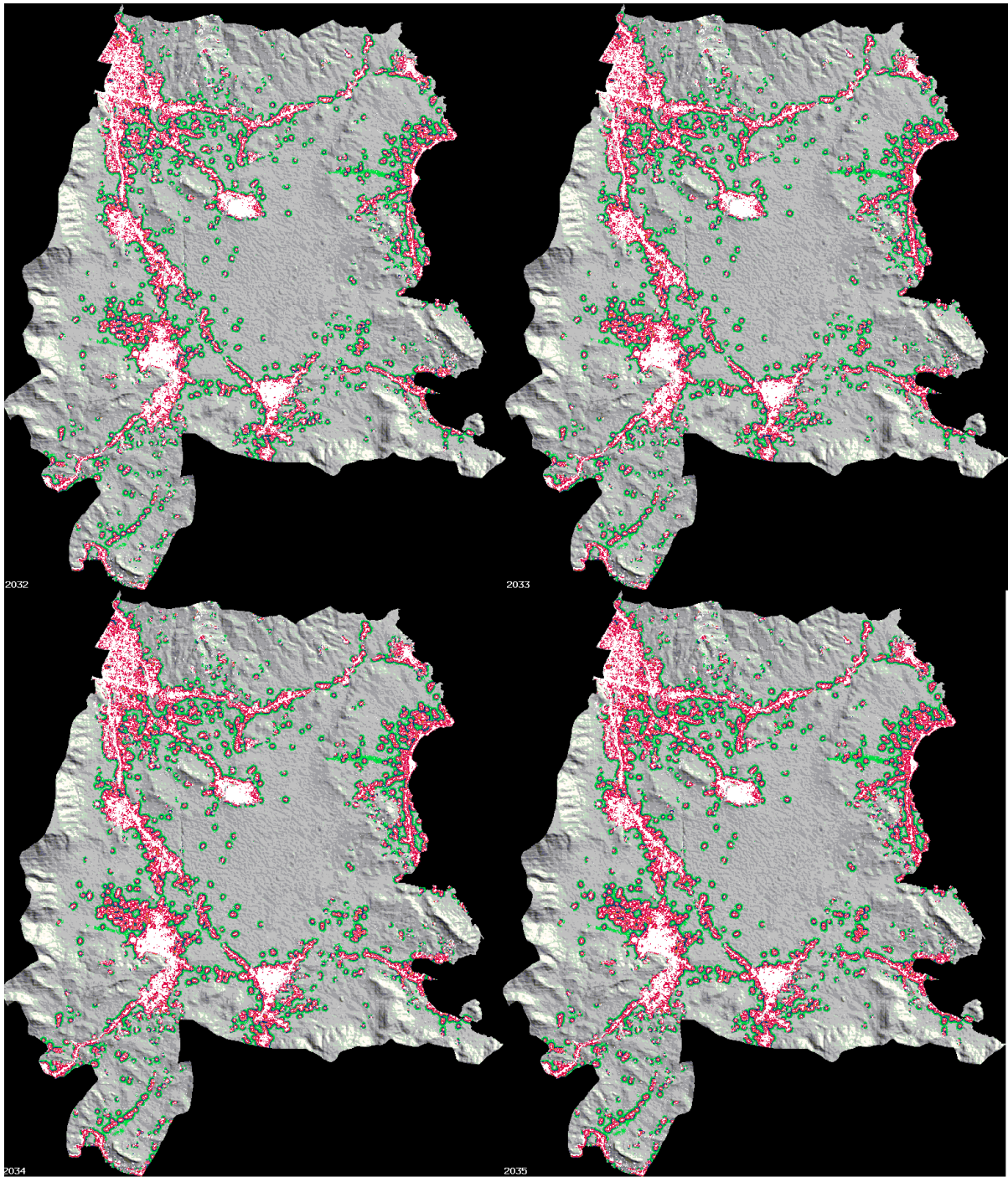
Εικόνα Π-2: Εκτίμηση επέκτασης της αστικής γης για τα έτη 2020 ,2021 ,2022, 2023 κατά Lee-Sallee



Εικόνα Π-3: Εκτίμηση επέκτασης της αστικής γης για τα έτη 2024, 2025, 2026, 2027 κατά Lee-Sallee



Εικόνα Π-4: Εκτίμηση επέκτασης της αστικής γης για τα έτη 2028 ,2029, 2030, 2031 κατά Lee-Sallee



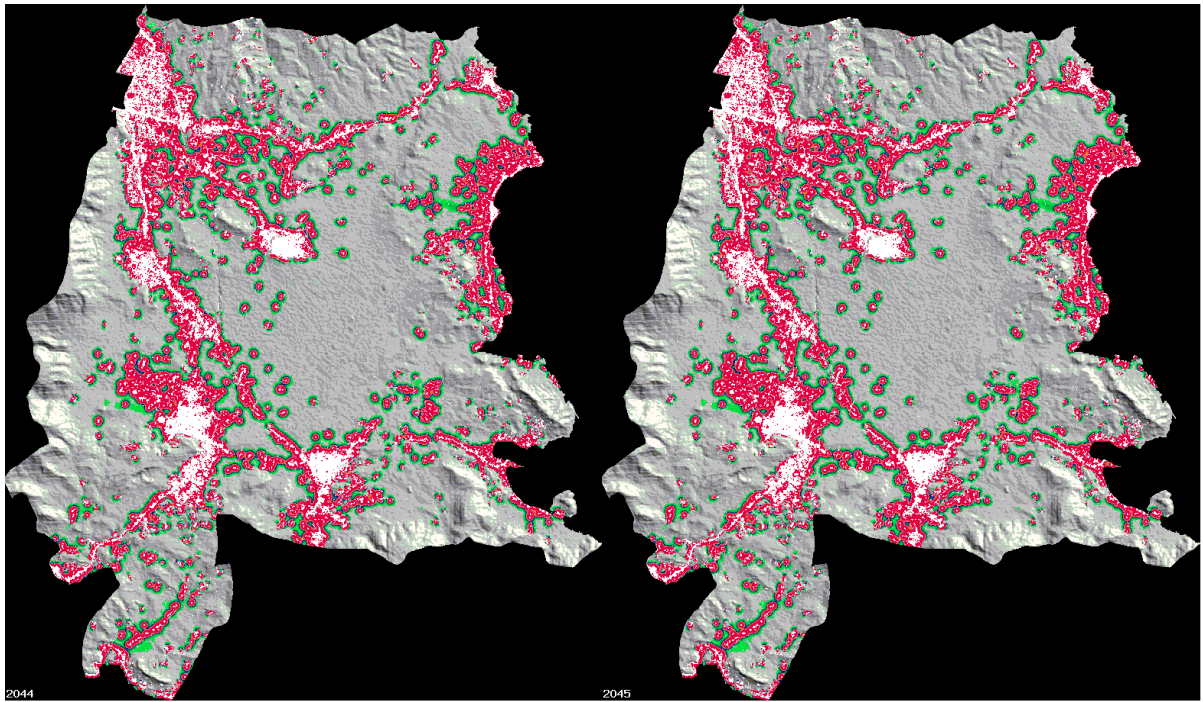
Εικόνα Π-5: Εκτίμηση επέκτασης της αστικής γης για τα έτη 2032, 2033, 2034, 2035 κατά Lee-Sallee



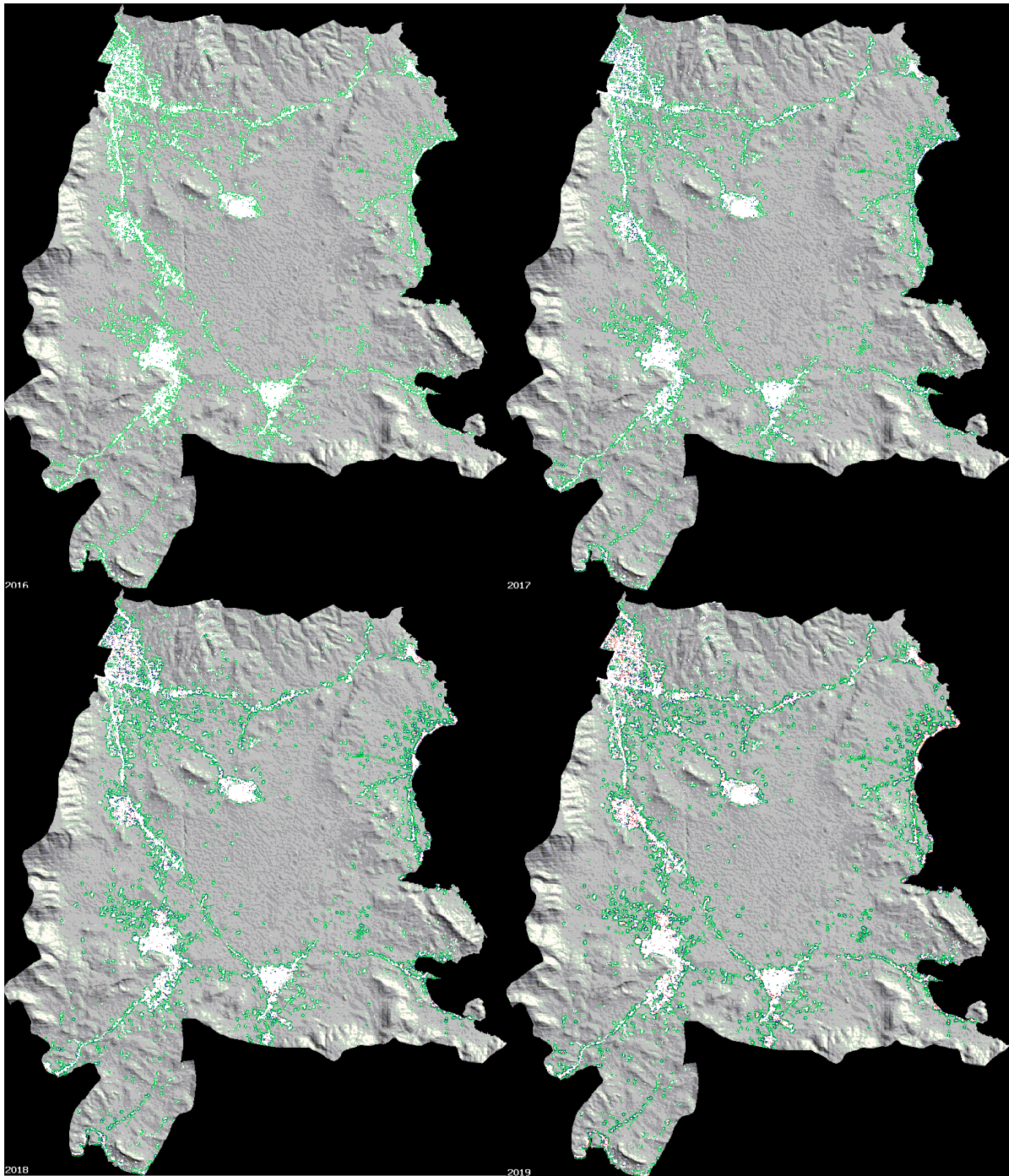
Εικόνα Π-6: Εκτίμηση επέκτασης της αστικής γης για τα έτη 2036, 2037, 2038, 2039 κατά Lee-Sallee



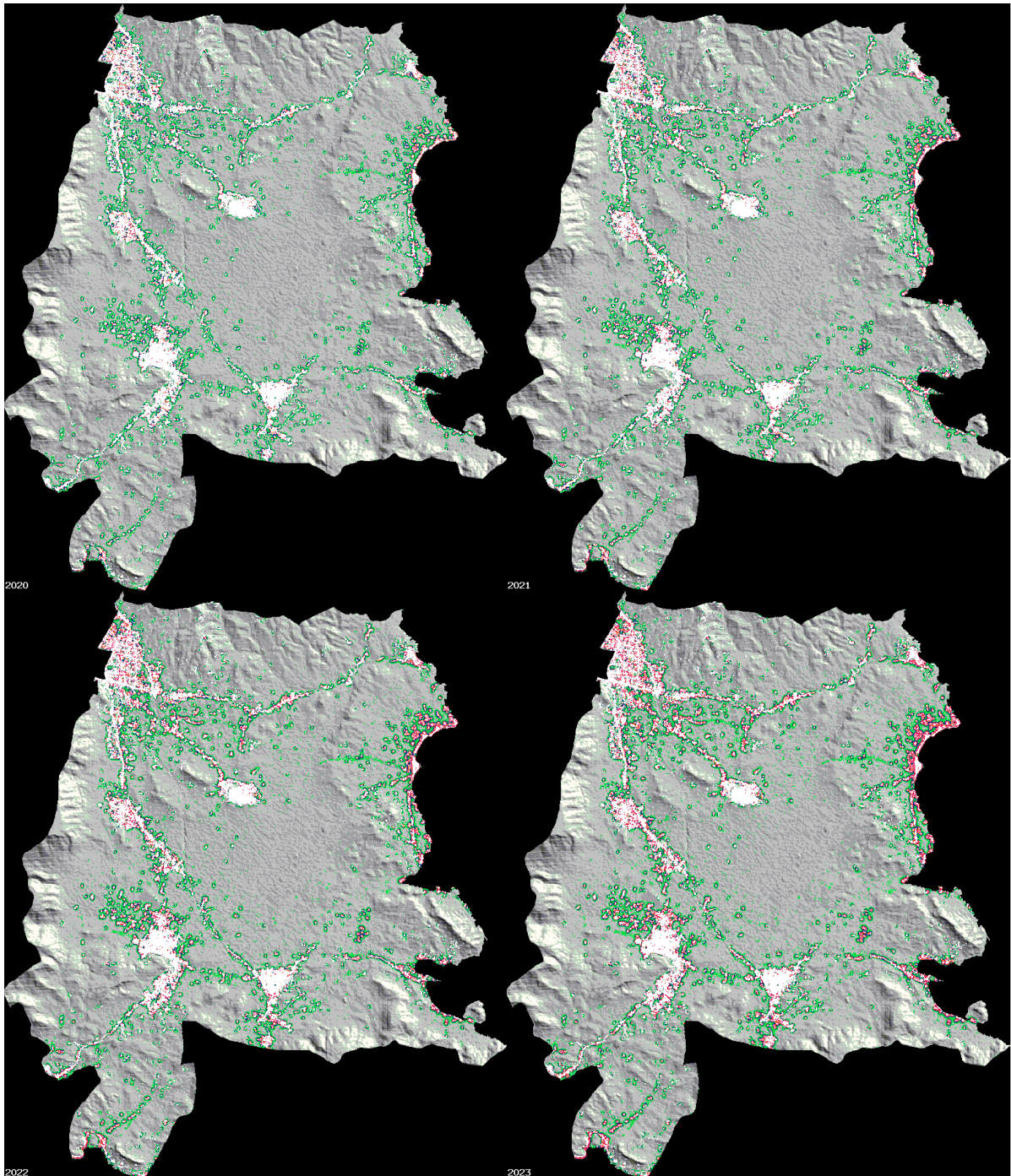
Εικόνα Π-7: Εκτίμηση επέκτασης της αστικής γης για τα έτη 2040, 2041, 2042, 2043 κατά Lee-Sallee



Εικόνα Π-8: Εκτίμηση επέκτασης της αστικής γης για τα έτη 2044 και 2045 κατά Lee-Sallee



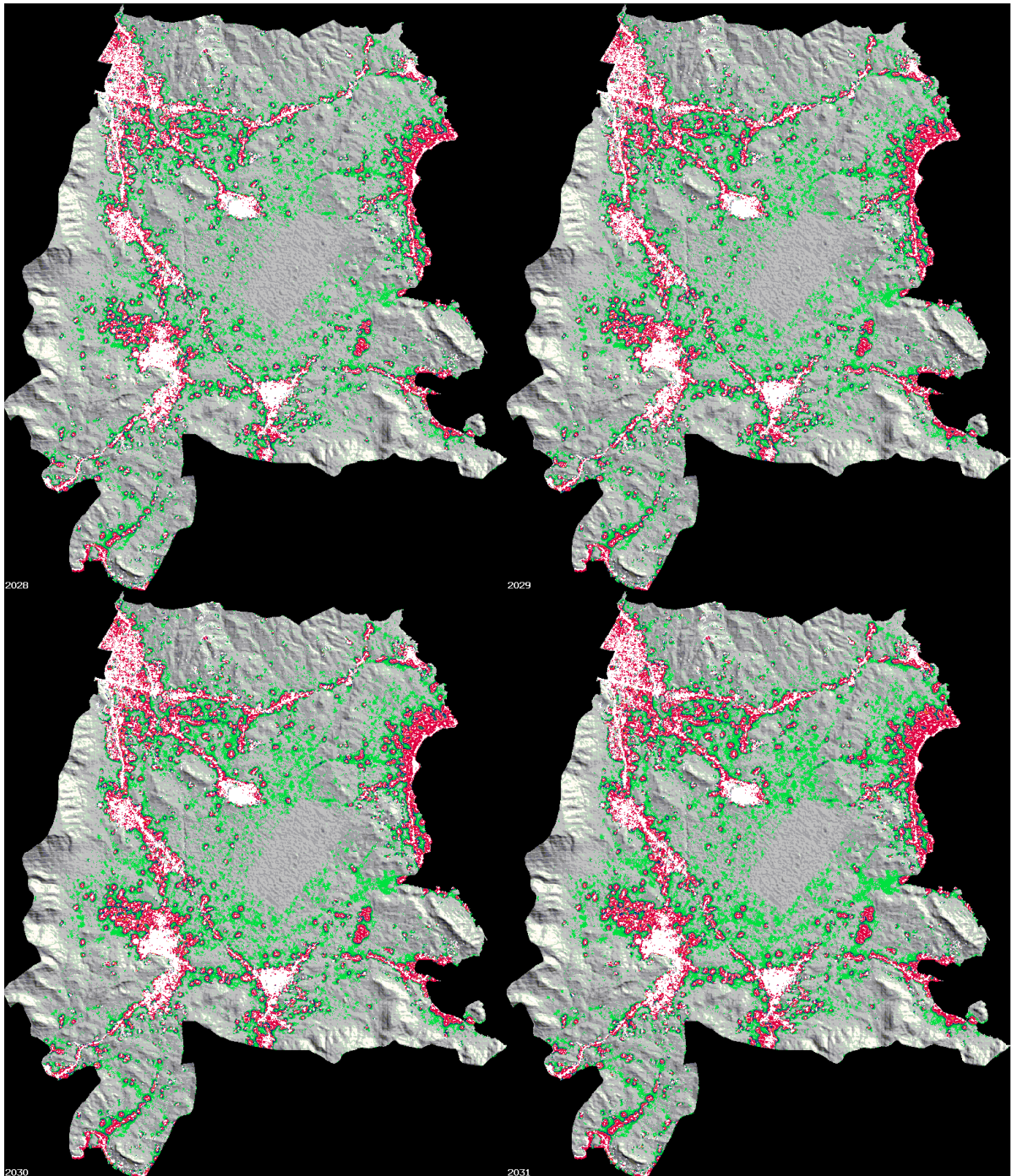
Εικόνα Π-9: Εκτίμηση επέκτασης της αστικής γης για τα έτη 2016, 2017, 2018, 2019 κατά OSM



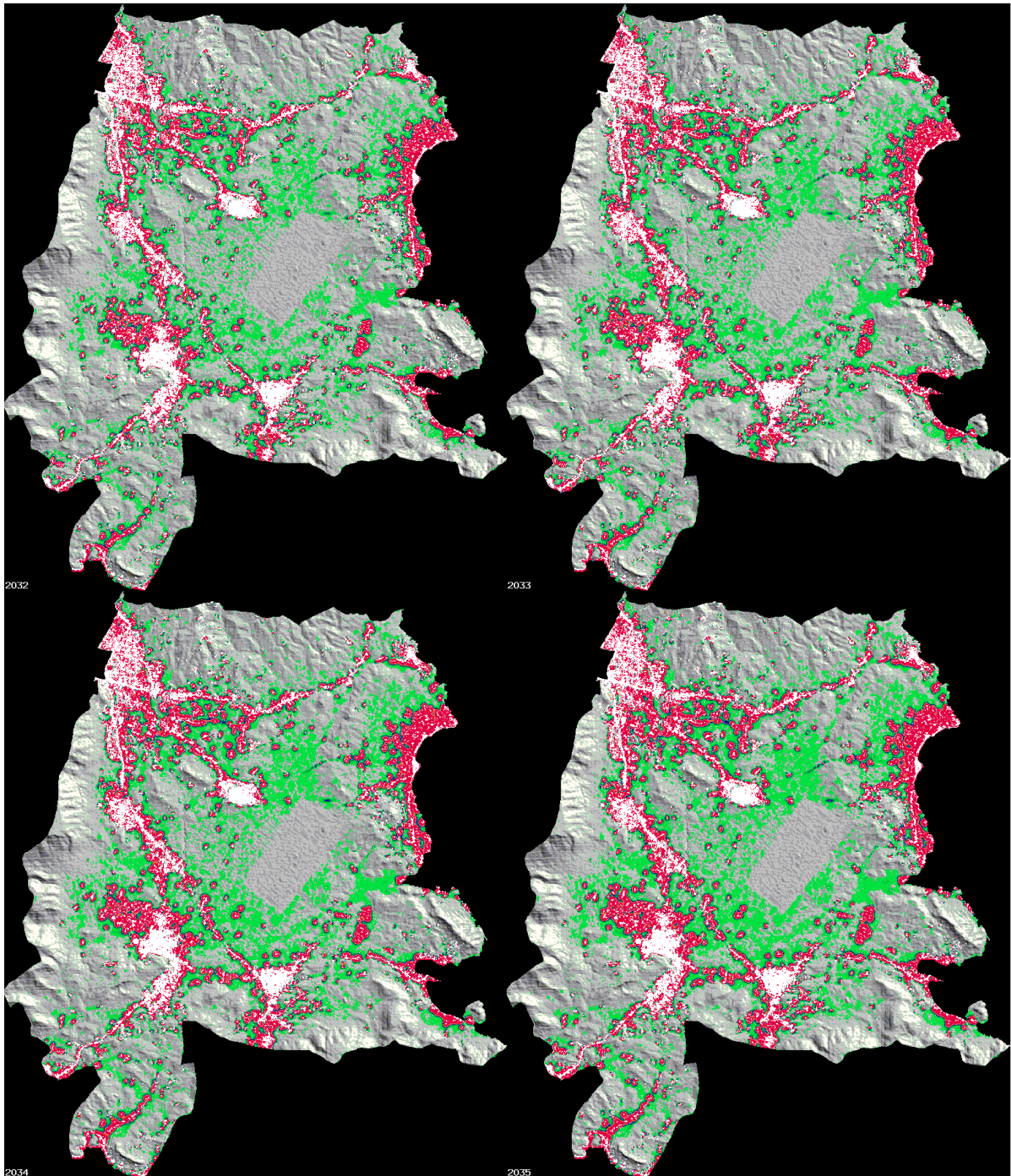
Εικόνα Π-10: Εκτίμηση επέκτασης της αστικής γης για τα έτη 2020, 2021, 2022, 2023 κατά OSM



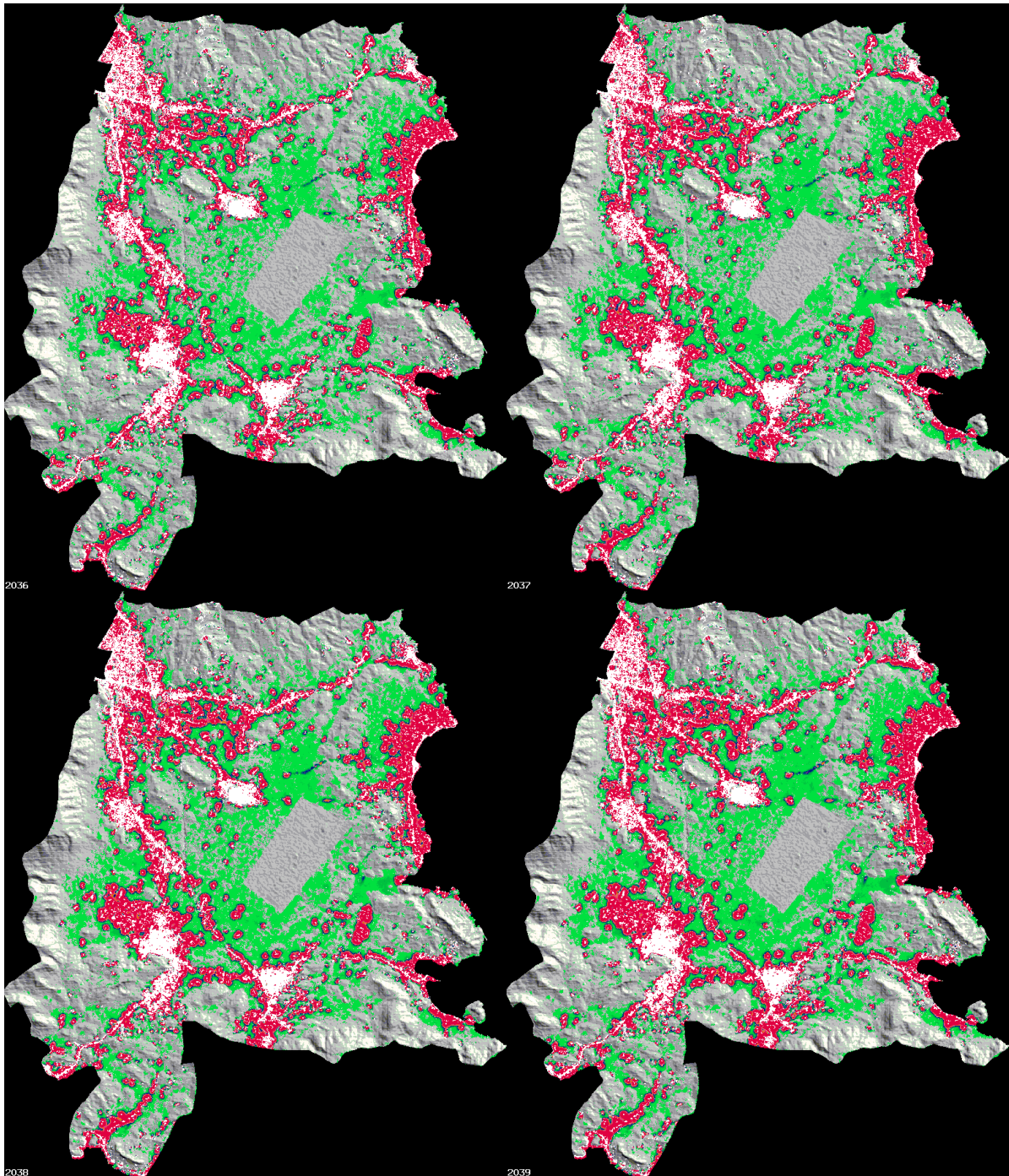
Εικόνα Π-11: Εκτίμηση επέκτασης της αστικής γης για τα έτη 2024, 2025, 2026, 2027 κατά OSM



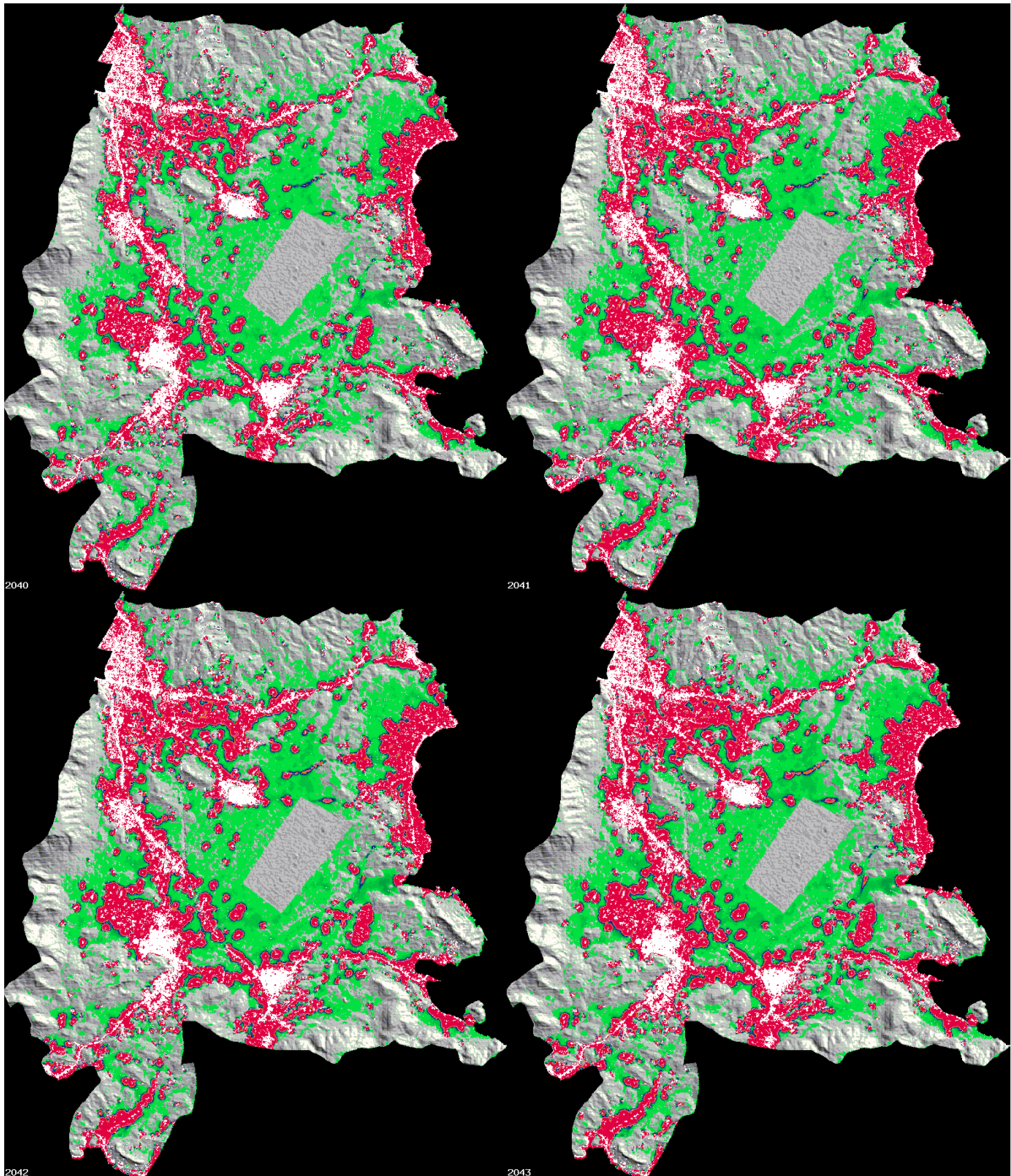
Εικόνα Π-12: Εκτίμηση επέκτασης της αστικής γης για τα έτη 2028, 2029, 2030, 2031 κατά OSM



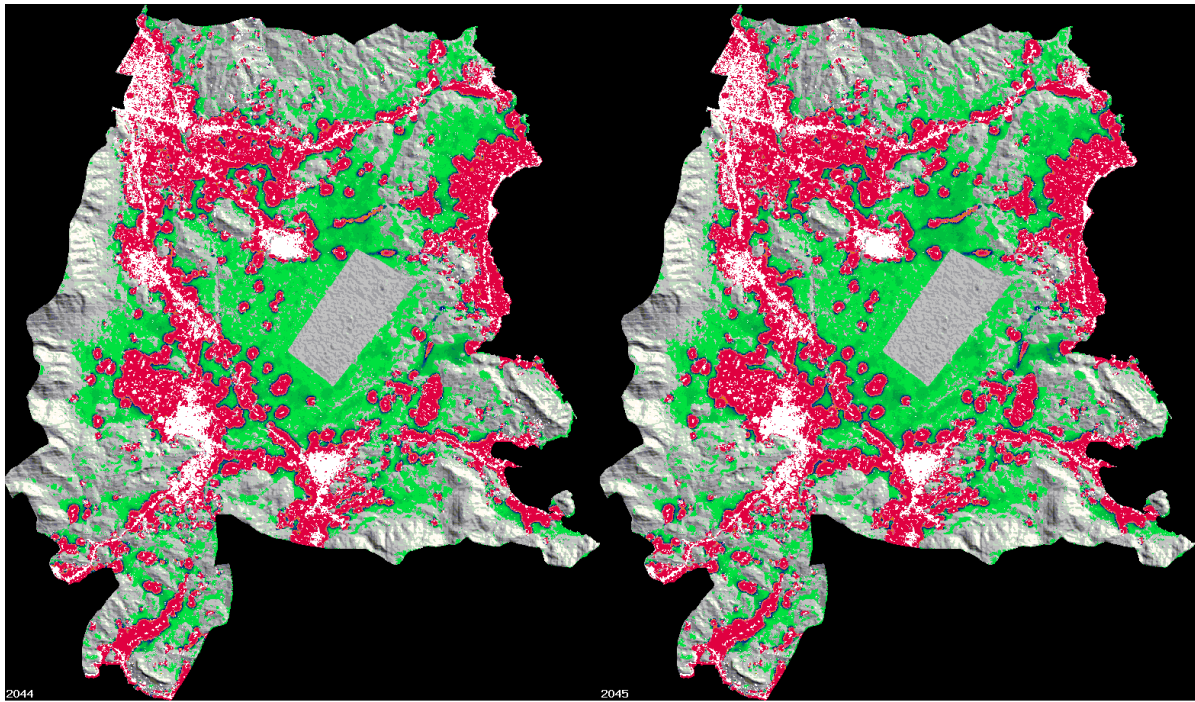
Εικόνα Π-13: Εκτίμηση επέκτασης της αστικής γης για τα έτη 2032, 2033, 2034, 2035 κατά OSM



Εικόνα Π-14: Εκτίμηση επέκτασης της αστικής γης για τα έτη 2036, 2037, 2038, 2039 κατά OSM



Εικόνα Π-15: Εκτίμηση επέκτασης της αστικής γης για τα έτη 2040, 2041, 2042, 2043 κατά OSM



Εικόνα Π-16: Εκτίμηση επέκτασης της αστικής γης για τα έτη 2044 και 2045 κατά OSM