

# ΤΕΛΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ ΠΡΟΟΔΟΥ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΒΕ 2010

Θέμα έργου: Ανάλυση αλληλεπίδρασης αστικής ανάπτυξης  
και ζήτησης νερού-ενέργειας

Επιστημονικός υπεύθυνος: Χρήστος Μακρόπουλος

Συντάξαντες: Ευάγγελος Ρόζος, Δημήτρης Μπουζιώτας, και Σωτηρία Μπακή

1	Αντικείμενο/στόχοι του έργου .....	3
2	Κίνητρο έρευνας .....	3
3	Μέθοδος .....	5
4	Γεωγραφική απεικόνιση περιοχής έρευνας .....	5
5	Μοντέλο αστικής ανάπτυξης .....	11
5.1	Γενικά.....	11
5.2	Συντελεστές καταλληλότητας.....	13
5.3	Κανόνες αστικής ανάπτυξης .....	14
5.4	Ρύθμιση μοντέλου CA .....	18
6	Μοντέλο αστικού νερού-ενέργειας .....	20
7	Αστικός κύκλος νερού σε κλίμακα κυττάρου .....	21
8	Αστικός κύκλος νερού σε κλίμακα δήμου .....	26
9	Αλληλεπίδραση αστικής ανάπτυξης με υποδομές νερού-ενέργειας.....	27
10	Αξιολόγηση εναλλακτικών υποδομών διαχείρισης αστικών υδάτων.....	33
11	Ανάγκες για περεταίρω έρευνα .....	35
12	Συμπεράσματα .....	36
13	Αναφορές.....	37
14	APPENDIX.....	42

## 1 Αντικείμενο/στόχοι του έργου

Αντικείμενο της έρευνας ήταν η μελέτη των αλληλεπιδράσεων των συστημάτων Αστικής Ανάπτυξης-Νερού-Ενέργειας σε πολλαπλές κλίμακες. Το τελικό αποτέλεσμα είναι μια νέα συνδυαστική λογική αστικής ανάπτυξης που λαμβάνει υπόψη της την αλληλεπίδρασή της με βασικές υποδομές, όπως αυτές του νερού και είναι σε θέση να εκμεταλλευτεί τα πλεονεκτήματα σύγχρονων αποκεντρωμένων (decentralized) τεχνολογιών χρήσης και ανακύκλωσης αστικού νερού. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η μετάβαση από το κλασικό αστικό μοντέλο (είσοδος – χρήση - διάθεση) σε ένα μοντέλο πιο αποδοτικό και φιλικό προς το περιβάλλον. Τα βασικά αποτελέσματα (deliverables) είναι τα εξής:

1. Η ανάπτυξη ενός ισχυρού εργαλείου προσομοίωσης των αλληλεπιδράσεων Αστικής Ανάπτυξης-Νερού-Ενέργειας το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ανάλυση σεναρίων και την υποστήριξη αποφάσεων σχεδιασμού. Το εργαλείο αυτό υπήρξε και η μεθοδολογική βάση για τη διερεύνηση που διεξήχθη.
2. Η χρήση του εργαλείου για την διερεύνηση της αλληλεπίδρασης των υποδομών Αστικής Ανάπτυξης-Νερού-Ενέργειας και της μακροπρόθεσμης εξέλιξης των κοινωνικο-τεχνικών αυτών συστημάτων. Η διερεύνηση αυτή κατέληξε σε συγκεκριμένα συμπεράσματα/προτάσεις για τον πολεοδομικό σχεδιασμό (με βιώσιμο/οικολογικό/βιοκλιματικό προσανατολισμό) αλλά και προτάσεις για τη ανάπτυξη, σχεδιασμό και λειτουργία (κατανεμημένων) υποδομών διαχείρισης αστικών υδάτων.
3. Ο ακριβέστερος προσδιορισμός των αναγκών προσανατολισμένης έρευνας στον χώρο Νερού-Ενέργειας (συστημικής και τεχνολογικής) με ιδιαίτερη έμφαση στην εφαρμοσιμότητα τέτοιων προσεγγίσεων στα Ελληνικά δεδομένα. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό λόγω των γνωστών προβλημάτων της Ελλάδας με τους υδατικούς πόρους από την μία αλλά και της δυνατότητας της χώρας για ανάπτυξη Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) από την άλλη.

## 2 Κίνητρο έρευνας

Τα ολοένα και αυξανόμενα φαινόμενα λειψυδρίας που προκαλούνται είτε από την κλιματική αλλαγή ή την αύξηση της κατανάλωσης ή και τα δύο, έχουν προξενήσει το επιστημονικό ενδιαφέρον για ανάπτυξη στρατηγικών προσαρμοσμένων στις νέες συνθήκες. Οι στρατηγικές αυτές περιλαμβάνουν τη δυνατότητα επανασχεδιασμού του αστικού κύκλου νερού έτσι ώστε να επιτευχθεί ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση. Οι πρακτικές αυτές περιέχουν την υιοθέτηση ή εφαρμογή ενός ή συνδυασμού των:

- είδη υγιεινής χαμηλής κατανάλωσης π.χ. τουαλέτες διπλής ροής, ντους χαμηλής ροής, εξοικονομητές νερού βρύσης κλπ
- συστήματα ανακύκλωσης, π.χ. συλλογή των όμβριων υδάτων σε κλίμακες από ένα μόνο σπίτι μέχρι γειτονιά.
- προηγμένες τεχνικές μέτρησης και τιμολόγησης, π.χ. ευφυή συστήματα μέτρησης με βάση εποχιακά τιμολόγια (π.χ. μια σημαντικά υψηλότερη τιμή του νερού κατά τη θερινή περίοδο).
- νέες συσκευές χαμηλής κατανάλωσης, π.χ. πλυντήρια ρούχων και πιάτων.
- ήπιες παρεμβάσεις, π.χ. εκστρατείες ευαισθητοποίησης των πολιτών για την ανάγκη να φειδωλής χρήσης νερού
- παρεμβάσεις διαχείρισης της ζήτησης που σχετίζονται με τη βιομηχανία, τον τουρισμό και τις διάφορες δημόσιες χρήσεις (π.χ. άρδευση).

Σε νέο-αναπτυσσόμενες περιοχές μπορούν να υιοθετηθούν σχετικά εύκολα κεντρικές λύσεις (όπως οι μονάδες κεντρικής επεξεργασίας βρόχινου/γκρι νερού) για τη διαχείριση των διαθέσιμων υδάτινων πόρων πιο αποτελεσματικά. Σε υπάρχουσες κατοικίες όμως η μείωση ζήτησης πόσιμου νερού μπορεί να επιτευχθεί κυρίως με εκ των υστέρων τοποθέτηση, ειδών υγιεινής και συσκευών χαμηλής κατανάλωσης ή ενδο-οικιακών μονάδων επεξεργασίας νερού. Και στις δύο περιπτώσεις πρέπει να βρεθεί η βέλτιστη ισορροπία μεταξύ ης μείωσης της ζήτησης πόσιμου νερού και των απαιτούμενων δαπανών (συμπεριλαμβανομένης της ενέργειας).

Η απόδοση αυτών των μέτρων εξαρτάται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κάθε περίπτωσης. Για παράδειγμα, η απόδοση των συστημάτων συλλογής όμβριων υδάτων εξαρτάται άμεσα από τις κλιματολογικές συνθήκες. Οι βέλτιστες προδιαγραφές και η αποτελεσματικότητα αυτών των συστημάτων εξαρτάται από τα στατιστικά χαρακτηριστικά της ετήσιας βροχόπτωσης (μέσο ύψος και χρονική κατανομή των γεγονότων). Ως εκ τούτου, ο ορισμός του φάκελου λειτουργίας των τεχνολογιών αυτών θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις επιπτώσεις των κλιματικών τάσεων για τη μεγιστοποίηση της αξιοπιστίας του συστήματος ύδρευσης.

Όταν επεκτείνεται ο αστικός ιστός αυξάνεται και η ζήτηση. Σε αυτές τις περιπτώσεις μπορούν να προκύψουν συνδυασμένα οφέλη από τη μείωση της ζήτησης του πόσιμου νερού. Από τη μία πλευρά μειώνεται η απαιτούμενη παροχτευτικότητα των νέων υποδομών που χρειάζονται για να εξυπηρετηθούν οι νέες αστικές περιοχές, με ευεργετικές επιπτώσεις στο κόστος της κατασκευής. Από την άλλη πλευρά, η πίεση στο υπάρχον δίκτυο αστικού ύδατος μειώνεται, το οποία μπορεί να χαλαρώσει ή ακόμη και να εξαλείψει την ανάγκη για (δαπανηρή) αναβάθμιση του. Αυτό υποδηλώνει την ανάγκη αξιολόγησης των πρακτικών διαχείρισης της ζήτησης υπό το πρίσμα πιθανών σεναρίων αστικής επέκτασης.

Κίνητρο της παρούσας μελέτης ήταν να εξεταστούν, χαρακτηριστούν και αξιολογηθούν οι

υφιστάμενες και νέες τεχνολογίες/πρακτικές εξοικονόμησης νερού, και να εκτιμηθούν τα πιθανά περιβαλλοντικά οφέλη (μείωση των απολήψεων από το περιβάλλον και διάθεση λυμάτων· Rozos and Makropoulos, 2012). Ως αποτέλεσμα, μια σαφέστερη εικόνα σχηματίστηκε, από την άποψη της βιωσιμότητας, των εναλλακτικών επιλογών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση της απόδοσης του αστικού κύκλου ύδατος. Η πιλοτική εφαρμογή αυτής της μελέτης έγινε στην Αθήνα όπου τα οφέλη από τις νέες τεχνολογίες εξοικονόμησης νερού εξετάστηκαν για διάφορα σενάρια αστικής ανάπτυξης.

### 3 Μέθοδος

Το εργαλείο (UWOT· Makropoulos et al, 2008) ήταν το βασικό εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε για τον χαρακτηρισμό και ιεράρχηση των υφιστάμενων και των νέων τεχνολογιών εξοικονόμησης νερού. Η λίστα των διαθέσιμων τεχνολογιών συγκεντρώθηκε με βάση ακαδημαϊκές δημοσιεύσεις αλλά και εμπορικά έντυπα. Η λίστα αυτή οργανώθηκε σε μια βάση δεδομένων που περιέχει πληροφορίες σχετικά με τις προδιαγραφές των διαφόρων τεχνολογιών (π.χ. «Ενέργεια», «Κόστος Λειτουργίας», «χρήση νερού»).

Ο χαρακτηρισμός των τεχνολογιών εξοικονόμησης νερού έγινε στην κλίμακα δήμου. Για το λόγο αυτό, η περιοχή μελέτης ταξινομήθηκε σε κατηγορίες που αντιστοιχούν σε πολεοδομικούς τύπους με ταυτόσημες ιδιότητες (αστική πυκνότητα, η οικονομική κατάσταση, κλπ). Γι' αυτή την ταξινόμηση ελήφθησαν υπόψη τα χαρακτηριστικά των αστικών περιοχών (π.χ. κατοικησιμότητα) που επηρεάζουν τη λειτουργία των τεχνολογιών εξοικονόμησης νερού. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκε μια μέθοδος που διαχωρίζει την αστική περιοχή σε ομάδες με βάση χωρικές πληροφορίες για τα ακίνητα της περιοχής.

Για την προσομοίωση της επέκτασης των αστικών περιοχών αναπτύχθηκε και χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο χρήσης γης βασισμένο στα Cellular Automate (Liu, 2009). Το μοντέλο χρήσης γης παράγαγε σενάρια αστικής ανάπτυξης/μετασχηματισμού για συγκεκριμένα προάστια της Αθήνας, τα Μεσόγεια, που έχουν έντονη κατασκευαστική δραστηριότητα και διαθεσιμότητα δεδομένων, τα οποία στη συνέχεια αξιολογήθηκαν μέσω του UWOT. Η αξιολόγηση βασίστηκε σε δείκτες όπως η ζήτηση πόσιμου νερού, η μέγιστη απορροή και ο όγκος των παραγόμενων υγρών αποβλήτων. Αυτοί οι δείκτες, τόσο για τις συμβατικές όσο και για τις νέες πρακτικές/τεχνολογίες διαχείρισης αστικού νερού, αποδόθηκαν ως συνάρτηση της αστικής ανάπτυξης. Αυτό έδωσε μια εικόνα για τα συνδυασμένα οφέλη των νέων πρακτικών διαχείρισης της ζήτησης σε περιπτώσεις αστικής ανάπτυξης.

### 4 Γεωγραφική απεικόνιση περιοχής έρευνας

Η πεδιάδα των Μεσογείων βρίσκεται στα ανατολικά του Υμηττού (Σχήμα 1) και οριοθετείται προς τα βόρεια από τους πρόποδες της Πεντέλης, στα ανατολικά από τη θάλασσα και στα νότια από τα βουνά του Λαυρίου. Αυτή η περιοχή ήταν γνωστή για τους αμπελώνες και ελαιώνες μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του '80, όταν άρχισε η αστικοποίηση. Ο αρχικά χαμηλός ρυθμός αστικοποίησης μετατράπηκε σε μια ταχέως εξελισσόμενη διεργασία μετά το Μάρτιο του 2001, μια ημερομηνία που σηματοδοτεί την ολοκλήρωση του νέου Διεθνούς Αερολιμένα Αθηνών και ένα νέο αυτοκινητόδρομο που συνδέει την περιοχή με το κέντρο της Αθήνας.

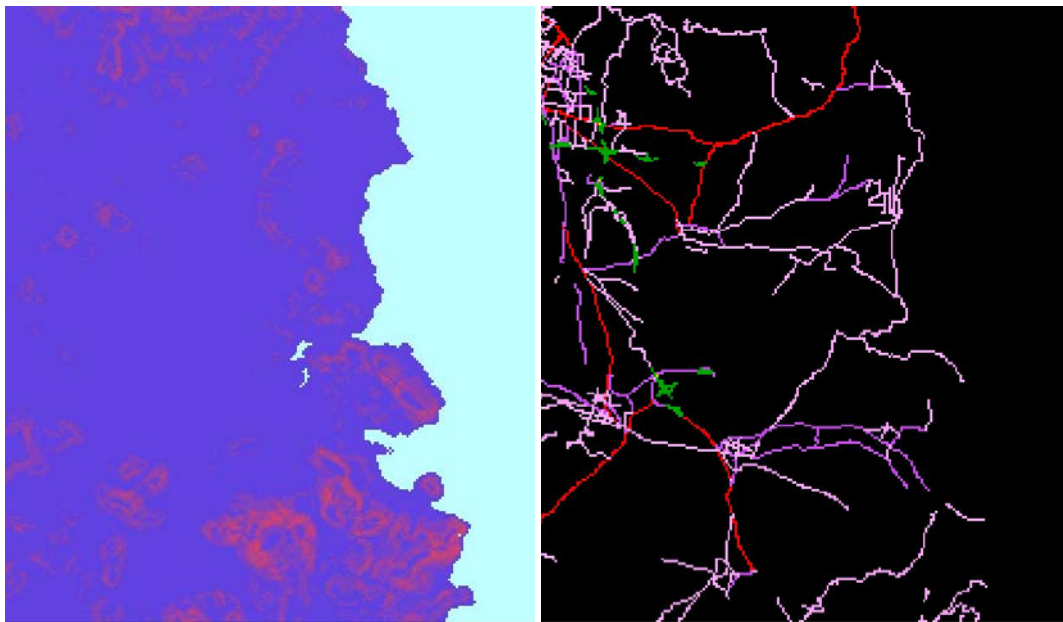


Σχήμα 1: Περιοχή μελέτης εντός κόκκινου πλαισίου (από Google maps).

Για να μοντελοποιηθεί η αστική ανάπτυξη της περιοχής μελέτης χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο κυτταρικών αυτομάτων (Cellular Automate ή CA εφεξής) το οποίο παράγει εύλογα σενάρια πιθανής αστικής επέκτασης/πύκνωσης. Αυτό επιτυγχάνεται «βαθμολογώντας» τις ιδιότητες που καθιστούν μια τοποθεσία περισσότερο ή λιγότερο ελκυστική για αστικοποίηση. Ο «βαθμός» που προκύπτει για κάθε περιοχή στην ορολογία των CA ονομάζεται «παράγοντας καταλληλότητας».

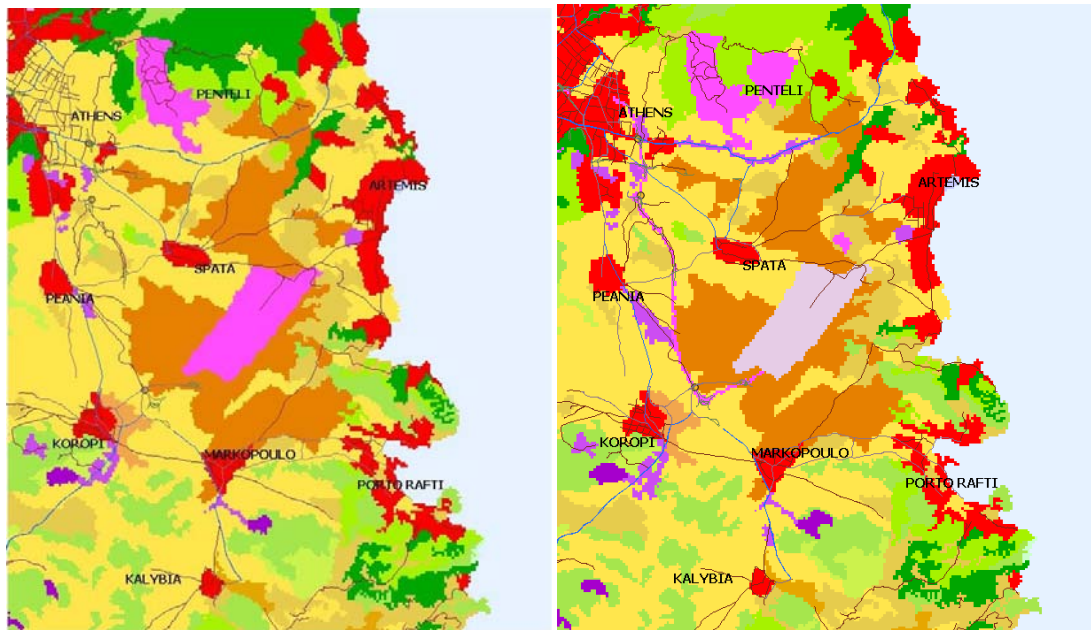
Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα μοντέλων CA είναι η χωρική αναπαράσταση των διεργασιών αστικοποίησης. Αυτό, φυσικά, έχει σαν αποτέλεσμα την απαίτηση γεωγραφικής πληροφορίας η οποία παρέχεται συνήθως με τη μορφή χαρτών μωσαϊκού τύπου (raster). Οι χάρτες αυτοί προήλθαν από διάφορες πηγές:

- i. Χάρτες χρήσεων γης CORINE 1990 και 2000 που καταβιβάστηκαν από την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Περιβάλλοντος (EEA, 2011) και επαναπροβλήθηκαν στο ελληνικό σύστημα συντεταγμένων ΕΓΣΑ 1987 χρησιμοποιώντας το εργαλείο ανοικτού κώδικα gdalwarp.
- ii. Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (Digital Terrain Model ή DTM) που αποκτήθηκε από το Υδροσκόπιο (Hydroscope Project, 2011) και η αρχική ανάλυση του DTM ( $25 \times 25 \text{ m}^2$ ) υποβιβάστηκε στην ανάλυση των χαρτών χρήσης γης ( $100 \times 100 \text{ m}^2$ ) χρησιμοποιώντας το εργαλείο ανοικτού κώδικα gdalwarp. Οι κλίσεις Βορά-Νότου και Ανατολής-Δύσης υπολογίστηκαν με πεπερασμένες διαφορές χρησιμοποιώντας την εντολή gradient του Matlab, ενώ η μέγιστη κλίση εδάφους (Σχήμα 2, αριστερό παράθυρο) εκτιμήθηκε χρησιμοποιώντας ευκλείδεια νόρμα στις κλίσεις Βορά-Νότου και Ανατολής-Δύσης.
- iii. Το μεταφορικό δίκτυο της περιοχής (κόμβοι αυτοκινητοδρόμων, βασικοί οδικοί άξονες, τοπικές οδοί, σταθμοί σιδηροδρόμων) αποκτήθηκε από την υπηρεσία OpenStreetMap (2011) και μετατράπηκε σε χάρτη μωσαϊκού τύπου (Σχήμα 2 right panel) χρησιμοποιώντας το εργαλείο ανοικτού κώδικα gdal\_rasterize.



Σχήμα 2: Αριστερό πλαίσιο, κλίση εδάφους περιοχής μελέτης. Δεξί πλαίσιο μεταφορικό δίκτυο περιοχής μελέτης.

Ο χάρτης χρήσεων γης CORINE 2000 (Σχήμα 3 δεξιά) συγκρίθηκε με αυτόν του 1990 (Σχήμα 3 αριστερά) για τον εντοπισμό των κυρίαρχων διεργασιών αστικοποίησης της περιοχής αυτής. Εκτός από την προαστιακή περιοχή της Αθήνας, που εμφανίζεται στη βορειοδυτική γωνία, το υπόλοιπο της περιοχής μελέτης φαίνεται να διατηρεί τις ίδιες χρήσεις γης κατά τη διάρκεια της δεκαετίας 1990-2000. Αυτό δείχνει ότι η κύρια διαδικασία είναι η αύξηση της πυκνότητας του πληθυσμού δηλαδή πύκνωση του αστικού ιστού.



Σχήμα 3: Χρήσεις γης (με κόκκινο ο αστικό ιστός) και μεταφορικό δίκτυο περιοχής μελέτης σύμφωνα με CORINE 1990 (αριστερά) και 2000 (δεξιά).

Οι κόκκινες περιοχές στο Σχήμα 3 φέρουν τον κωδικό αναγνώρισης CORINE 111, ο οποίος σύμφωνα με την ονοματολογία του CORINE είναι ο κωδικός για «ασυνεχή αστικό ιστό». Ασυνεχής αστικός ιστός είτε είναι κατοικημένες περιοχές γύρω από αστικά κέντρα είτε ανεξάρτητες κατοικημένες περιοχές. Οι περιοχές αυτές περικλείουν πολυκατοικίες, μεμονωμένα σπίτια, κήπους, δρόμους και πάρκα, με το καθένα από αυτά να έχουν επιφάνεια μικρότερη από 25 εκτάρια. Αυτός ο τύπος διαφέρει από τον συνεχή αστικό ιστό στην ύπαρξη περατών επιφανειών όπως κήποι, πάρκα, καλλιεργούμενες εκτάσεις (EEA, 2012b). Ως εκ τούτου, το περίγραμμα των κόκκινων περιοχών θα μπορούσε να ερμηνευτεί ως μια πρόχειρη εκτίμηση των συνόρων του σχεδίου πόλης.

Δεδομένου ότι η πύκνωση της αστικοποίησης είναι η κύρια διεργασία στην περιοχή μελέτης, για την περιγραφή της δυναμικής του πληθυσμού του εν λόγω τομέα η εξέλιξη της αστικής πυκνότητας παίζει πιο σημαντικό ρόλο από ότι η εξέλιξη της χρήσης γης. Η Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Περιβάλλοντος (EEA, 2012a) έχει ετοιμάσει χάρτες πυκνότητας πληθυσμού για ολόκληρη την Ευρώπη συνδυάζοντας τις πληροφορίες που παρέχονται από τοπικά σημεία δειγματοληψίας με τα δεδομένα του CORINE. Πιο συγκεκριμένα, ο πληθυσμός κάθε δήμου διαιρείται με τη συνολική έκταση του δήμου για να εκτιμηθεί η μέση πυκνότητα του πληθυσμού για κάθε δήμο. Στη συνέχεια, η μέση πυκνότητα επιμερίζεται στην περιοχή του κάθε δήμου με τη χρήση συντελεστών βάρους που σχετίζονται με τη χρήσης σύμφωνα με CORINE.

Η πρακτική αυτή δεν θεωρήθηκε επαρκής για την παρούσα μελέτη διότι παρατηρήθηκαν μη ρεαλιστικές τιμές πυκνότητας του πληθυσμού σε βιομηχανικές περιοχές ή σε περιοχές με αμιγώς γεωργική χρήση. Εναλλακτικά σε αυτή τη μελέτη ο επιμερισμός του πληθυσμού βασίστηκε στην



υπόθεση ότι το σύνολο του πληθυσμού του κάθε δήμου διαμένει στις κατοικημένες περιοχές, όπως αυτές ορίζονται από τις κόκκινες ζώνες στους χάρτες του CORINE (Σχήμα 3). Με αυτή την προσέγγιση, απαιτούνται μόνο δύο τύποι παραμέτρων για να περιγραφτεί η αστική πυκνότητα της κάθε περιοχής: τα χαρακτηριστικά των αντιπροσωπευτικών κτισμάτων και το ποσοστό της κατοικήσιμης περιοχή που αυτά καλύπτουν.

Οι ιδιοκτησίες της περιοχής μελέτης ταξινομήθηκαν σε τρεις τύπους. Τα χαρακτηριστικά του κάθε τύπου ελήφθησαν με μακροσκοπική ερμηνεία δορυφορικών εικόνων της περιοχής μελέτης. Με αυτή την ερμηνεία, ελήφθη ο μέσος αριθμός των ατόμων ανά κύτταρο που για τους τρεις τύπους είναι 32, 125 και 300 άτομα ανά εκτάριο αντίστοιχα (το κάθε κύτταρο είναι  $100 \times 100 \text{ m}^2$  άρα 1 εκτάριο). Πιο αναλυτικά:

- Η περιοχή μελέτης διακριτοποιήθηκε με κάρναβο κυττάρων  $100 \times 100 \text{ m}^2$ .
- Το κάθε κύτταρο ταξινομήθηκε βάσει αεροφωτογραφιών από το Κτηματολόγιο (Κtimatologio, 2011). Τρεις πολεοδομικοί τύποι θεωρήθηκαν ως αρκετοί για να αναπαρασταθούν τα χαρακτηριστικά της περιοχή μελέτης.
- Η μέση περατή/αδιαπέρατη επιφάνεια του κάθε τύπου εμβαδομετρήθηκε στις αεροφωτογραφίες (Σχήμα 4).
- Η μέση κατοικησιμότητα (μέσος αριθμός κατοίκων ανά οικία) κάθε τύπου ελήφθη με λογικές παραδοχές (π.χ. από αριθμό ορόφων και επιφάνεια της μέσης πολυκατοικίας όπως φαίνεται από τις αεροφωτογραφίες).
- Ο μέσος αριθμός των πολυκατοικιών ανά τύπο προέκυψε από μέτρηση στις αεροφωτογραφίες.



Σχήμα 4: Αεροφωτογραφίες αστικών περιοχών ( $100 \times 100 \text{ m}^2$ ) των τριών πολεοδομικών τύπων.

Οι κόκκινες ζώνες στους χάρτες CORINE (θεωρούνται ως τα σύνορα του σχεδίου πόλεως) περιέχουν κτισμένα και μη κτισμένα κύτταρα. Ο αριθμός των κτισμένα κυττάρων και η χωρική κατανομή τους προέκυψαν με την ακόλουθη διαδικασία:

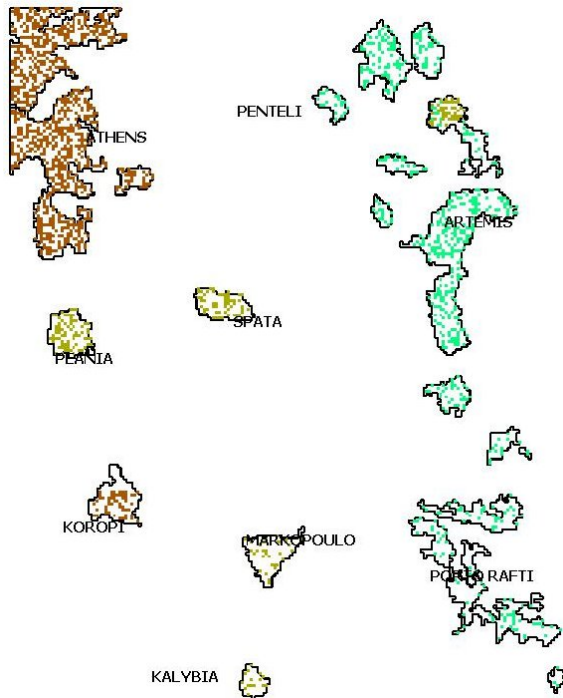
- Πληθυσμιακά δεδομένα ελήφθησαν με την απογραφή του 1991,2001 και 2011 (ELSTAT, 2012).
- Από τις αεροφωτογραφίες επισημάνθηκε ποιοι πολεοδομικοί τύποι εμφανίζονται σε κάθε δήμο.
- Ο αριθμός των κτισμένων κυττάρων για κάθε δήμο ελήφθη διαιρώντας τον πληθυσμού του δήμου (Πίν. 1), με τον μέσο πληθυσμό ανά κύτταρο που υπάρχει στον εκάστοτε δήμο. Ο μέσος αυτός πληθυσμός εξαρτάται από τους πολεοδομικούς τύπους που εμφανίζονται στον κάθε δήμο. Εάν περισσότεροι από ένας τύποι εμφανίζεται σε ένα δήμο (π.χ. η Ραφήνα εμφανίζει μεσο-αστική πυκνότητα γύρω από το λιμάνι και χαμηλή αστικής πυκνότητα σε άλλες περιοχές), τότε ο αριθμός των κυττάρων του δήμου που εμπίπτουν σε κάθε τύπο εκτιμάται από μία γραμμική εξίσωση η οποία έχει τόσες μεταβλητές όσος ο αριθμός των τύπων (π.χ. για Ραφήνα και για το 1991 η εξίσωση είναι  $32a + 125b = 7632$ , όπου οι μεταβλητές  $a$  και  $b$  είναι ο αριθμός κυττάρων των πολεοδομικών τύπων που έχουν 32 και 125 κάτοικους ανά κύτταρο, και 7632 είναι ο πληθυσμός της Ραφήνας το 1991). Σε τέτοιες περιπτώσεις προφανώς υπάρχει απροσδιοριστία και, ως εκ τούτου, ρεαλιστικές τιμές των μεταβλητών πρέπει να επιλεγούν με επιθεώρηση των δορυφορικών εικόνων.
- Ο αριθμός των κτισμένων κυττάρων του κάθε δήμου που βρέθηκε στο προηγούμενο βήμα κατανέμεται τυχαία εντός των ορίων δόμησης (στην περίπτωση ενός μόνο τύπου) ή στο εσωτερικό των ορίων της κατάλληλης γειτονιάς (π.χ. γύρω από το λιμάνι της Ραφήνας τα  $b$  κύτταρα του τύπου με 125 κάτοικους και στην υπόλοιπη περιοχή για τα  $a$  κύτταρα με 32 κάτοικους ανά κύτταρο).

Το Σχήμα 5 παρουσιάζει με διαφορετικό χρώμα τη χωρική κατανομή των τριών πολεοδομικών τύπων σε κάθε δήμο το 1990.

Πίν. 1: Δεδομένα απογραφής.

	1991	2001	2011
<b>Pallini</b>	10695	17232	54390*
<b>Gerakas</b>	8451	13990	
<b>Anthousa</b>	2889	2389	
<b>Artemis</b>	7077	14719	33800**
<b>Spata</b>	7708	10419	
<b>Koropi</b>	16239	24453	30340
<b>Markopoulo</b>	9356	13644	20070
<b>Paiania</b>	9765	12997	26620***
<b>Glyka Nera</b>	5753	6770	
<b>Rafina</b>	7632	10701	19940****
<b>Pikermi</b>	1262	2924	

Σημείωση: \* περιλαμβάνει Γέρακα και Ανθούσα, \*\* περιλαμβάνει Σπάτα, \*\*\* περιλαμβάνει Γλυκά Νερά, \*\*\*\* περιλαμβάνει Πικέρμι.



Σχήμα 5: Σχέδιο πόλης και οι τρεις πολεοδομικοί τύποι το 1990.

## 5 Μοντέλο αστικής ανάπτυξης

### 5.1 Γενικά

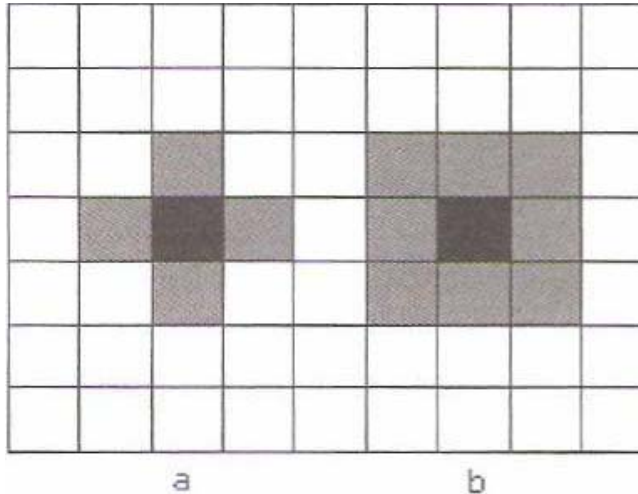
Τα μοντέλα χρήσης γης που βασίζονται σε κυτταρικά αυτόματα (CA) θεωρούνται ως αποτελεσματικά εργαλεία, ικανά να προσομοιώνουν τη δυναμική της αστικής ανάπτυξης και να παράγουν σενάρια πιθανών μελλοντικών καταστάσεων. Σε γενικές γραμμές, η αρχή πίσω τα CA είναι απλή: η περιοχή διακριτοποιείται με ένα κανναβο κυττάρων, με κάθε κύτταρο  $A$  να χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο πιθανών καταστάσεων  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$  καθώς κάποιους κανόνες μετάβασης  $T$  που καθορίζουν το πώς (υπό ποιες προϋποθέσεις) αλλάζει η κατάσταση  $S$  ενός κυττάρου.

Οι κανόνες μετάβασης ορίζουν την κατάσταση  $S_{t+1}$  του κυττάρου στο χρόνο  $t+1$  βασιζόμενοι στην κατάσταση  $S_t$  ( $S_t, S_{t+1}$  ανήκουν στο  $S$ ) στο χρόνο  $t$ , και την πληροφορία  $I_t$  στο χρόνο  $t$ :

$$T: (S_t, I_t) \rightarrow S_{t+1}$$

Η πληροφορία  $I_t$  περιλαμβάνει στην ουσία τις καταστάσεις των γειτονικών κυττάρων του  $A$ . Γειτονιά  $R_A$  του  $A$  ονομάζεται το σύνολο κυττάρων εντός προκαθορισμένου γεωμετρικού σχήματος με κέντρο το  $A$  που ορίζει την ακτίνα επιρροής του  $A$ .

Κλασικά σχήματα που χρησιμοποιούνται στον ορισμό γειτονιάς είναι η γειτονιά τύπου von Neumann neighbourhood (Σχήμα 6a) και Moore (Σχήμα 6b).



Σχήμα 6: Γειτονιές τύπου von Neumann's και Moore's (Benenson and Torrens, 2004).

Πιθανοτικές ή στοχαστικές παράμετροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν στους κανόνες μετάβασης (White and Engelen, 1997), το οποίο έχει το επιθυμητό αποτέλεσμα ότι οδηγεί σε μονομεταβλητά μοντέλα των οποίων η πολυπλοκότητα εξαρτάται από την πολυπλοκότητα των κανόνων μετάβασης.

Τα μοντέλα CA έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για την πρόβλεψη της χωρικής κατανομής της ανάπτυξης τόσο σε αστικές όσο και σε περιαστικές/μη αστικές περιοχές (Liu, 2009· Pinto and Antunes, 2007). Η ενδεδειγμένη πρακτική για την εφαρμογή των CA σε πολύπλοκες δυναμικές ανάπτυξης βασίζεται σε τέσσερις άξονες (Clarke, 2008):

- Επιλογή χαλαρού ορισμού της γειτονιάς για να επιτευχθούν πιο σύνθετες αλληλεπιδράσεις μεταξύ περισσότερων κυττάρων.
- Ορισμός λεπτομέρειας μοντελοποίησης έτσι ώστε να υπάρχει μία διεργασία ανά κύτταρο.
- Έλεγχος ευλογοφάνειας ρυθμών ανάπτυξης.
- Έλεγχος ευλογοφάνειας χωρικής μεταβολής.

Συχνά οι πιθανές καταστάσεις ενός κυττάρου συμπύσσονται σε μόλις δύο, «αστική» και «μη αστική», δίνοντας δυαδικό χαρακτήρα στο μοντέλο. Αν και αυτό προσφέρει μια απλή προσέγγιση μοντελοποίησης, δεν επιτρέπει την αναπαράσταση περισσότερων ιδιοτήτων μέσα στα κύτταρα, όπως είναι η περίπτωση της διαχείρισης αστικών υδάτων, όπου απαιτούνται δεδομένα όπως η αστική πυκνότητα, κατοικησιμότητα, η συχνότητα χρήσης νερού κλπ. Η γενική περίπτωση στην αστική διαχείριση του νερού απαιτεί την ταξινόμηση μιας αστικής περιοχής σε τομείς με ιδιοκτησίες παρόμοιων ιδιοτήτων προκειμένου να αξιολογηθεί η εφαρμοσιμότητα και βιωσιμότητα των διαφόρων

τεχνολογιών. Αυτό σημαίνει ότι ένα μοντέλο CA προορισμένο για διαχείριση αστικού νερού θα πρέπει να είναι σε θέση να δώσει όχι μόνο μοτίβα αστικής ανάπτυξης αλλά και διαφορετικές καταστάσεις κυττάρων που αντιστοιχούν σε χαρακτηριστικά που συνδέονται άμεσα με τις απαιτήσεις μοντελοποίησης του αστικού νερού όπως οι διαπερατές και αδιαπέρατες περιοχές, ο αριθμός κατοίκων κλπ. Ως εκ τούτου, απαιτείται ένα πιο εξελιγμένο εργαλείο που να δίνει το μοτίβο της αστικής ανάπτυξης σαν μωσαϊκό κυττάρων με διαφορετικές ιδιότητες.

## 5.2 Συντελεστές καταλληλότητας

Η αστική ανάπτυξη της περιοχής μελέτης μοντελοποιήθηκε με τη χρήση ενός CA μοντέλου ασαφούς λογικής (Liu, 2009), ακολουθώντας την επιτυχή εφαρμογή αυτής της μεθόδου για την ίδια περιοχή από τον Μαντέλα (Μαντέλας et al., 2012). Αυτή τη μεθοδολογική προσέγγιση χρησιμοποιεί ασαφή λογική (Fuzzy Logic) για να αναλύσει τις επιπτώσεις της ανθρώπινης συμπεριφοράς στην αστική ανάπτυξη καθώς και CA πολλαπλών καταστάσεων, προκειμένου να καταρτίσει προβλέψεις για την ανάπτυξη των αστικών περιοχών. Τα βασικά χαρακτηριστικά των CA πολλαπλών καταστάσεων είναι ότι τα κύτταρα δεν χαρακτηρίζονται απλώς ως «αστικά» (1) ή «μη-αστικά» (0), αλλά έχουν διαφορετικές καταστάσεις κυττάρων που αντιπροσωπεύουν αστική πυκνότητα και τις ιδιότητες των χτισμάτων.

Το πλαίσιο της ασαφούς λογικής του έχει βασιστεί σε ανεξάρτητα παράλληλων συστήματα ασαφούς συλλογισμού (FIS), με κάθε ένα να εστιάζει σε ένα συγκεκριμένο, ξεχωριστό σύνολο παραγόντων που ευνοούν την αστική ανάπτυξη. Χρησιμοποιήθηκαν FIS πολλαπλής εισόδου/εξόδου αλλά και μονής εισόδου/εξόδου καθώς και γλωσσικοί όροι που προέρχονται από την ανθρώπινη συλλογιστική (Μακρόπουλος et al., 2008). Η χρήση ενός αριθμού ανεξάρτητων FIS οδηγεί σε ένα ευέλικτο σχήμα απεικόνισης, το οποίο είναι ανοικτό στην προσθήκη παραγόντων ανάπτυξης σε περίπτωση διαθεσιμότητας. Οι εισοδοί που μπορούν να χρησιμοποιηθούν εξαρτώνται από τα διαθέσιμα δεδομένα με τους φυσικούς περιορισμούς (κλίση και χρήση γης, προσβασιμότητα σε δίκτυο μεταφοράς, κλπ) να είναι πρωταρχικής σημασίας.

Επιλέχθηκαν συστήματα ασαφούς συλλογισμού τύπου Mamdani (Mamdani και Assilian, 1975) λόγω της εκτεταμένης εφαρμογής τους, της απλότητας της σύνθεσης τους και γενικότητα της χρήσης τους. Οι εισοδοί που χρησιμοποιήθηκαν στο σύστημα πολλαπλής εισόδου μονής εξόδου ήταν η προσβασιμότητα στο οδικό δίκτυο (συμπεριλαμβανομένου του πρωτεύοντος/δευτερεύοντος οδικού δικτύου, καθώς και συνδέσεις με τον αυτοκινητόδρομο), ενώ οι εισοδοί που χρησιμοποιήθηκαν στο μονής εισόδου/εξόδου μοντέλο ήταν τα δεδομένα χρήσης γης από CORINE, το υψόμετρο, καθώς και δεδομένα σχετικά με τη διαθεσιμότητα των μέσων μαζικής μεταφοράς, εκφραζόμενη ως απόσταση από σιδηροδρομικούς σταθμούς. Ένας άλλος παράγοντας που λήφθηκε υπόψη ήταν η απόσταση από τους υπάρχοντες αστικούς πυρήνες, δηλαδή τις εκτάσεις εντός των αστικών ορίων σχεδιασμού,

πράγμα που σημαίνει ότι κάθε διαθέσιμη γη μέσα σε αυτές τις περιοχές έχει τη δυνατότητα να οικοδομηθεί πιο πυκνά και σε λιγότερο χρόνο. Αυτό είναι ένα φαινόμενο που σχετίζεται με το ότι οι οικοδόμηση είναι εφικτή τόσο εντός των ορίων της πόλης όσο έξω από αυτήν αλλά δυσκολότερα (περισσότεροι πολεοδομικοί περιορισμοί) και με μεγαλύτερο κόστος. Έτσι, το κίνητρο για τη δημιουργία κτισμάτων εντός των ορίων της πόλης είναι πολύ υψηλότερο.

Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας ήταν η δημιουργία ανεξάρτητων FIS για κάθε μία από τις προαναφερθείσες εισόδους. Οι εισοδοί απεικονίστηκαν σε ένα αφηρημένο σύνολο. Οι τιμές αυτών των συνόλων συνδυάζονται με νόμους ασαφούς λογικής έτσι ώστε να εκτιμηθεί η συνολική καταλληλότητα. Οι νόμοι αυτοί περιλαμβάνουν λογικούς τελεστές σύζευξης, διάζευξης και αποκλειστικής διάζευξης έτσι ώστε να συνδυάσουν τις διαφορετικές εισόδους σε στα συστήματα πολλαπλών εισόδων μονής εξόδου. Για παράδειγμα στην περίπτωση προσβασιμότητας σε οδικό δίκτυο ένας νόμος συνδυασμού είναι:

*Αν 'Απόσταση από πρωτεύον δίκτυο μικρή' **ΚΑΙ** 'Απόσταση από κόμβο αυτοκινητόδρομου μικρή' **Τότε** 'Καταλληλότητα είναι υψηλή'*

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής των κανόνων είναι αφηρημένες τιμές οι οποίες πρέπει να «μεταφραστούν» σε τιμές που έχουν νόημα. Αυτό γίνεται με χρήση της τεχνικής κέντρου βάρους και το αποτέλεσμα είναι τιμές καταλληλότητας (Suitability Factor ή SF εφεξής) οι οποίες ποσοτικοποιούν την καταλληλότητα για την αστικοποίηση. Οι διαφορετικές τιμές SF που προέρχονται από κάθε FIS συνδυάζονται για να ληφθεί το συνολικό SF, που παίρνει τιμές από 0 (πλήρως ακατάλληλα για διακανονισμό) έως 1 (πολύ κατάλληλο). Κατά τη διάρκεια αυτού του συνδυασμού η χωρική μεταβλητότητα λαμβάνεται επίσης υπόψη με τη χρήση της σταθμισμένης ταξινομημένης χωρικής μέσης τιμής (SOWA) (Makropoulos and Butler, 2006). Το τελικό αποτέλεσμα είναι ένας χάρτης μωσαϊκού τύπου με τον συνολικό συντελεστή καταλληλότητας.

### 5.3 Κανόνες αστικής ανάπτυξης

Όπως προαναφέρθηκε, το μοντέλο αστικής ανάπτυξης που φτιάχτηκε για αυτή τη μελέτη είναι τύπου CA και επιχειρεί να αναπαραστήσει την εξέλιξη των τριών πολεοδομικών τύπων της περιοχής μελέτης. Γι' αυτό τον λόγο κάθε κτισμένο κύτταρο μπορεί να περιέλθει σε μια από τρεις καταστάσεις που ονομάζονται '2', '3' και '4'. Η κατάσταση '2' αντιστοιχεί στις πιο αραιοκατοικημένες αστικές περιοχές και η '4' στις πιο πυκνοκατοικημένες. Η κατάσταση '1' αντιστοιχεί σε μη αστικά κύτταρα, ενώ η '0' αντιστοιχεί σε ένα κύτταρο που δεν μπορεί να οικιστεί και υποδηλώνει ένα φυσικό σύνορο όπως θάλασσα. Προφανώς, τα κύτταρα του μοντέλου με κατάσταση '0' καλύπτουν περιοχές που δεν μεταβάλλονται χρονικά και άρα αποκλείονται από τους κανόνες αστικής ανάπτυξης.

Οι διαφορετική αστική πυκνότητα για κάθε κατάσταση κυττάρων προκύπτει από ένα διαφορετικό προκαθορισμένο σύνολο ιδιοτήτων, όπως η κατοικησιμότητα, ο αριθμός κτισμάτων ανά κύτταρο, οι διαπερατές/αδιαπέρατο περιοχές, κλπ. Συνήθως η αύξηση της αστικής πυκνότητας σημαίνει οικοδόμηση πολυκατοικιών σε οικόπεδα που καταλαμβάνονται από μονώροφα σπίτια με κήπους. Το γεγονός αυτό μοντελοποιείται με τη μετάβαση ενός κυττάρου από την κατάσταση '2' στην '3' ή/και '4', και από την '3' στην '4'.

Η γενική δομή του μοντέλου επιτρέπει όλων των ειδών αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διαφόρων καταστάσεων κυττάρων. Η διατύπωση των κανόνων μπορεί να προσαρμοστεί για να συμπεριλάβει ταχέως μεταβαλλόμενες καταστάσεις κυττάρων (π.χ. ταχεία αστική πύκνωση), ή τύπους καταστάσεων κυττάρων που αλληλεπιδρούν μόνο με συγκεκριμένες καταστάσεις (π.χ. η περίπτωση των διαφόρων αστικών χρήσεων γης και η αντίστοιχη εξέλιξη τους σε πυκνότερες αλλά διακριτές καταστάσεις).

Οι είσοδοι του μοντέλου CA είναι ο χάρτης με τους συντελεστές καταλληλότητας (η δημιουργία του οποίου περιγράφεται παραπάνω) και ο χάρτης με τις καταστάσεις των κυττάρων διακριτοποίησης στην αρχή της προσομοίωσης. Για τη βαθμονόμηση του μοντέλου και τον έλεγχο της ευλογοφάνειας της υπολογισμένης αύξησης πληθυσμού (βλ. Clarke, 2008) χρησιμοποιήθηκαν χρονοσειρές πληθυσμού ανά δήμο.

Οι μηχανισμοί πίσω την αστική ανάπτυξη πολλαπλών καταστάσεων ακολουθούν ένα μινιμαλιστικό πρότυπο το οποίο επιχειρεί να αποσαφηνίσει τις αλληλεπιδράσεις που καθοδηγούν την κυτταρικά αναπαριστώμενη αστική ανάπτυξη χωρίς την προσθήκη περιττής πολυπλοκότητας ή ευρεστικών κανόνων. Πιο συγκεκριμένα, τα παρακάτω στάδια ακολουθούνται σε κάθε χρονικό βήμα:

- i. Ένας αλγόριθμος αστικής ανάπτυξης, παρόμοιος με εκείνον που παρουσιάστηκε και δοκιμάστηκε με επιτυχία από τους Mantelas et al. (2012) και Rozos et al. (2011), αποφασίζει ποια μη αστικά κύτταρα πρόκειται να αστικοποιηθούν σε κάθε χρονικό βήμα. Εφαρμόστηκαν δύο κανόνες αστικής επέκτασης και ένας κανόνας της αυθόρμητης ανάπτυξης (σε περιοχές μη γειτνιάζουσες με αστικούς πυρήνες). Στους κανόνες αυτούς η αναπαράσταση βασίζεται μόνο στη δυαδική απεικόνιση (αστικό ή μη-αστικό κύτταρο) της περιοχής σε κάθε χρονικό βήμα, αγνοούνται δηλαδή οι διαφορετικές καταστάσεις των κυττάρων.
- ii. Ακολούθως, ο αλγόριθμος απόδοσης καταστάσεων στα κύτταρα εκχωρεί τις πρόπουσες καταστάσεις σε όλα τα κύτταρα που αστικοποιήθηκαν με τον προηγούμενο κανόνα. Ο κανόνας αυτός ισχύει μόνο για τα κύτταρα που είχαν μετατραπεί από μη αστικά σε αστικά κατά το συγκεκριμένο χρονική βήμα.
- iii. Τέλος ο μηχανισμός πύκνωσης αυξάνει τις καταστάσεις σε κάποια από τα αστικά κύτταρα (π.χ. από '2' σε '3' ή '4') δηλαδή τα μετατραπεί σε κύτταρα με μεγαλύτερη αστική πυκνότητα.

Όλοι οι κανόνες έχουν τον ίδιο γενικό τύπο, συνδυάζουν τον συντελεστή καταλληλότητας με την πίεση αστικοποίησης που προέρχεται από τα γειτονικά κύτταρα που ορίζει ο κύκλος Moore. Διαφορετικές ακτίνες του κύκλου χρησιμοποιούνται σε κάθε κανόνα (ακτίνα 1 και 2 για την επέκταση, 3 για την αυθόρμητη ανάπτυξη, ακτίνα 1 και 2 για την πύκνωση και αρχική αστικοποίηση). Οι κανόνες έχουν πιθανοτική φύση δίνοντας έτσι τη δυνατότητα σε κάθε κύτταρο να αλλάξει από μη αστικό σε αστικό, ή να αλλάξει κατάσταση. Η επιρροή της «γειτονιάς» είναι διαφορετική στα διάφορα χρονικά βήματα της προσομοίωσης (π.χ. τα αστικά κύτταρα με κατάσταση '4' ασκούν υψηλότερη πίεση στα γειτονικά τους από αυτά με κατάσταση '3' ή '2'). Αυτό επηρεάζει και τη φάση της απόδοσης κατάστασης αλλά και τη φάση πύκνωσης του αστικού ιστού.

Σε κάθε κανόνα υπεισέρχεται ένας παράγοντας ταχύτητας  $vf$  με τιμές στο  $(0, 1]$ , ο οποίος δηλώνει την ένταση και την ταχύτητα με την οποία εφαρμόζεται ο κανόνας σε κάθε χρονικό βήμα. Για παράδειγμα, η αστική ανάπτυξη είναι μια σχετικά γρήγορη διαδικασία σε σχέση με την πύκνωση, έτσι η πύκνωση έχει μια σημαντικά μικρότερη τιμή  $vf$ . Ο γενικός τύπος του κάθε κανόνα σε κάθε κύτταρο είναι:

$$PROB = f(SF, MooreRules, vf)$$

όπου  $PROB$  είναι η πιθανότητα να αλλάξει η κατάσταση ενός κυττάρου,  $SF$  ο συντελεστής καταλληλότητας του συγκεκριμένου κυττάρου,  $MooreRules$  είναι οι λόγοι/αναλογίες αστικοποίησης που ορίζονται από τη «γειτονιά» (ορίζεται από τον κύκλο Moore), και  $vf$  ο συντελεστής ταχύτητας.

Για να οριστεί η ταχύτητα με την οποία κάθε κανόνας εφαρμόζεται, η πληθυσμιακή ανάπτυξη της περιοχής πρέπει να είναι γνωστή (π.χ. με στατιστικά στοιχεία του πληθυσμού). Το μοντέλο στη συνέχεια βαθμονομείται με βάση τα μοτίβα της ταχύτητας της πληθυσμιακής ανάπτυξης. Επίσης, εξετάζονται τα άνω όρια στην αστική ανάπτυξη που προέρχονται από περιορισμούς του πληθυσμού (π.χ. μέγιστο επιτρεπόμενος πληθυσμός στην περιοχή της μελέτης).

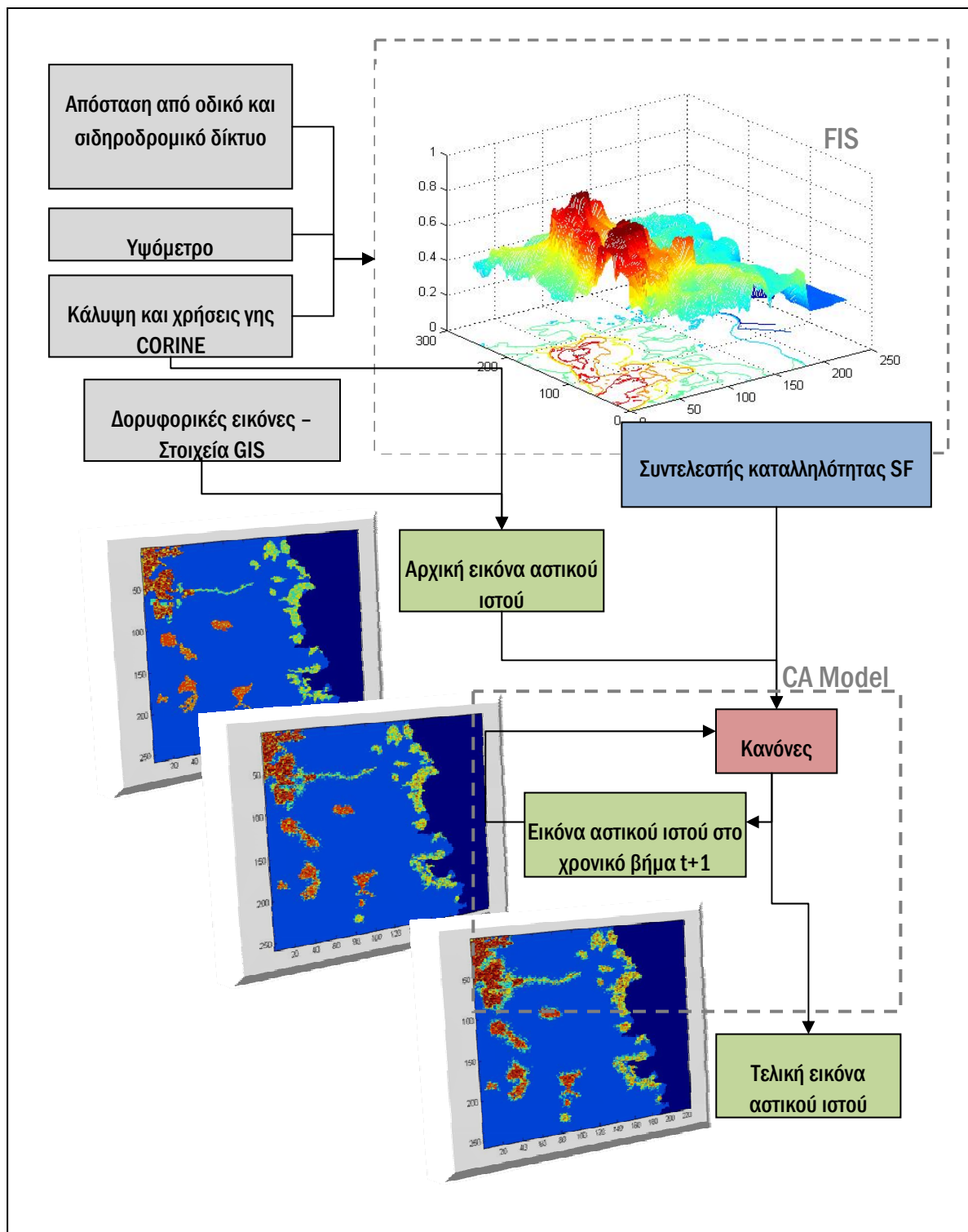
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το σχήμα του μοντέλου δύο μεταβλητές, τον συντελεστή καταλληλότητας  $SF$  και τον παράγοντα ταχύτητας  $vf$ . Θεωρητικά, και οι δύο από αυτούς μπορούν να είναι χωρικά ή χρονικά μεταβλητοί, και μπορούν να υπόκεινται σε βελτιστοποίηση κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης του μοντέλου  $CA$ . Ωστόσο, οι παράγοντες αυτοί αξιολογούνται από διαφορετικούς μηχανισμούς αστικής ανάπτυξης και έχουν διαφορετικούς, διακριτούς ρόλους.

Σε άλλες μελέτες (π.χ., Mantelas et al. 2012), ο ρόλος του συντελεστή καταλληλότητας είναι διττός: (α) αντιπροσωπεύει την καταλληλότητα μιας περιοχής, (β) ορίζει την ταχύτητα πύκνωσης και ανάπτυξης. Σε αυτή την μελέτη, μια δι-παραμετρική προσέγγιση επελέγη αντ' αυτού, με διάκριση στους ξεχωριστούς ρόλους που παίζουν η ταχύτητα ανάπτυξης (χρονική συνιστώσα) και η καταλληλότητα (χωρική συνιστώσα). Γι αυτό τον λόγο το  $SF$  ελήφθη κατανεμημένο χωρικά αλλά σταθερό χρονικά (όπως δηλώνει η έννοια «καταλληλότητα για οικοδόμηση μιας περιοχής» που



οδηγείται από την ανθρώπινη λογική), ενώ το  $v_f$  μπορεί να κυμανθεί χρονικά αλλά σε κάθε χρονικό βήμα όλη η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από μια ενιαία τιμή (σχετίζεται άμεσα με την οικονομική ανάπτυξη, την εισροή πληθυσμού, τα ποσοστά της μετανάστευσης, της πολιτικής κλπ). Σε περιπτώσεις ένδειας δεδομένων, όπως στην περίπτωση αυτής της μελέτης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σταθερές τιμές  $v_f$  προκειμένου να διατηρηθεί η απλότητα της παραμετροποίησης. Χρονικά μεταβλητές τιμές μπορούν χρησιμοποιηθούν στις περιπτώσεις που υπάρχει χωρο-χρονική πληροφορία όπως η λεπτομερή εξέλιξη του οδικού δικτύου της περιοχής.

Τα βασικά στάδια του μοντέλου CA δείχνονται στο Σχήμα 7. Αρχικά ο συντελεστής καταλληλότητα της περιοχής υπολογίζεται με τη χρήση του ασαφούς συστήματος συλλογισμού (FIS). Ακολούθως, ο συντελεστής καταλληλότητας (SF) και η αρχική εικόνα του αστικού ιστού καθώς και στατιστικά στοιχεία που σχετίζονται με τον πληθυσμό της περιοχής χρησιμοποιούνται ως είσοδοι για το μοντέλο CA προκειμένου να παραχθούν σενάρια αστικής ανάπτυξης.



Σχήμα 7: Διάγραμμα ροής του μοντέλου CA που αναπτύχθηκε σ' αυτή την μελέτη.

#### 5.4 Ρύθμιση μοντέλου CA

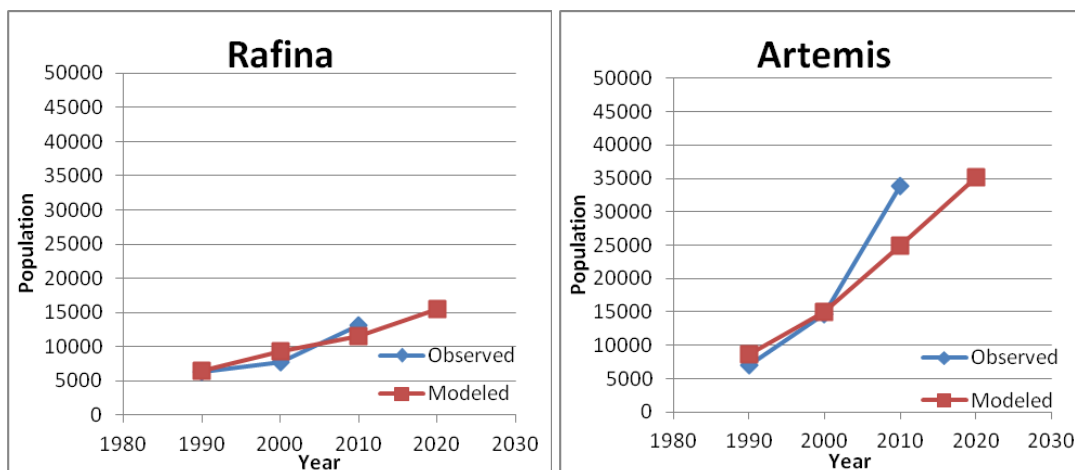
Το μοντέλο CA εφαρμόστηκε στην περιοχή των Μεσογείων, χαρακτηριστικό προάστιο της Αθήνας με έντονη οικοδομική δραστηριότητα. Η βαθμονόμηση του μοντέλου έγινε με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία, τους χάρτες χρήσης γης CORINE 1990 και 2000, και στατιστικά στοιχεία του πληθυσμού από τις απογραφές 1991, 2001 και 2011. Οι χάρτες με το μεταφορικό δίκτυο και τα υψόμετρα της

περιοχής χρησιμοποιήθηκαν επίσης κατά τον υπολογισμό του συντελεστή καταλληλότητας, όπως αναλύθηκε προηγουμένως.

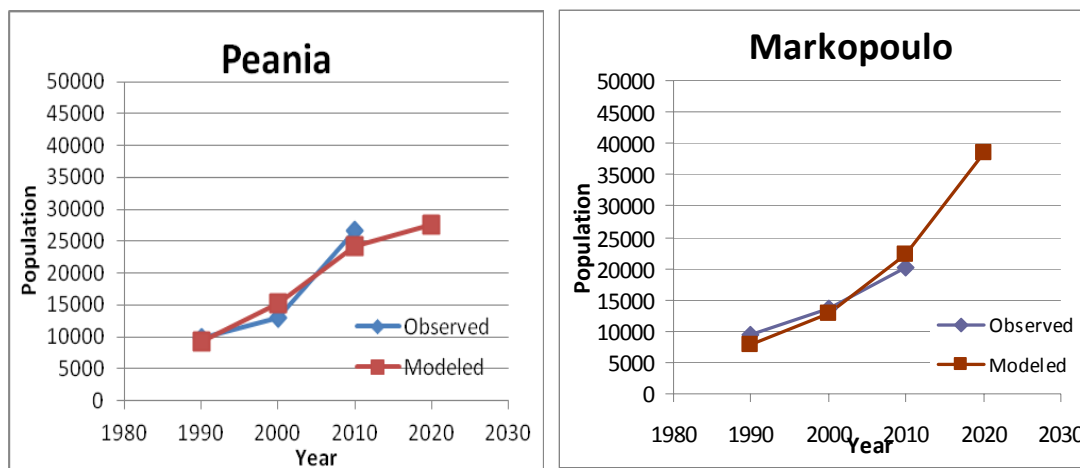
Η αρχική κατάσταση αντιστοιχεί στο έτος 1990 και παρήχθη συνδυάζοντας το CORINE 1990 με την απογραφή του 1991. Με αντίστοιχο τρόπο δημιουργήθηκαν δύο ενδιάμεσες εικόνες, μία για το 2000 καθώς και μία για το 2010 οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στην βαθμονόμηση του μοντέλου τόσο όσον αφορά την ακρίβεια της πρόγνωσης του σχήματος των νέων αστικών περιοχών όσο και του ρυθμού ανάπτυξης.

Ακολουθώντας τη διπαραμετρική προσέγγιση που αναφέρθηκε πριν, χρησιμοποιήθηκε ένας ενιαίος χωρικά και χρονικά σταθερός παράγοντας ταχύτητας  $\nu f$  για κάθε κανόνα. Ο στόχος ήταν να αναπαραχθεί συνολική εισροή πληθυσμού στην περιοχή καθώς και ανάπτυξη για κάθε διαφορετικό δήμο συμβατή με τα ιστορικά στοιχεία πληθυσμού.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το μοντέλο CA αντιπροσωπεύει επαρκώς τόσο την αστική ανάπτυξη όσο και την αύξηση του πληθυσμού στους περισσότερους δήμους. Ακόμη και οι μη γραμμικές τάσεις πληθυσμού αντιπροσωπεύονται ικανοποιητικά, με εξαίρεση την Παλλήνη, όπου το μοντέλο αποτυγχάνει να αποδώσει την εκρηκτική ανάπτυξη της. Ο λόγος είναι ότι η Παλλήνη παρουσιάζει ένα ιδιαίζον μοτίβο ανάπτυξης με αύξηση του πληθυσμού κατά 61% τα έτη 1990-2000 και στη συνέχεια τριπλασιασμό αυτού κατά τα έτη 2000-2010, ενώ άλλοι δήμοι έχουν ένα μέσο ρυθμό ανάπτυξης 49% κατά την πρώτη δεκαετία και 88% στη δεύτερη δεκαετία.



Σχήμα 8: Παρατηρημένη και προσομοιωμένη αύξηση του πληθυσμού για Ραφήνα και Άρτεμις.



Σχήμα 9: Παρατηρημένη και προσομοιωμένη αύξηση του πληθυσμού για Παιανία και Μαρκόπουλο.

## 6 Μοντέλο αστικού νερού-ενέργειας

Πρακτικές διαχείρισης της ζήτησης μπορούν να υλοποιηθούν είτε με την εισαγωγή νέων καταναμημένων τεχνολογιών, συμπεριλαμβανομένων των τουαλετών χαμηλής κατανάλωσης, ή την υιοθέτηση τεχνικών όπως η συλλογή των όμβριων υδάτων και ανακύκλωση του νερού (Makropoulos and Butler, 2010). Τα οφέλη από αυτές τις τεχνολογίες/πρακτικές δεν είναι εύκολο να εκτιμηθούν εκ των προτέρων, δεδομένου ότι εξαρτιούνται από αλληλεπιδράσεις μεταξύ αυτών των τεχνολογιών και των οικιακών συσκευών, καθώς και από τις κλιματικές συνθήκες. Για παράδειγμα, η μείωση της ζήτησης από ένα σύστημα συλλογής βρόχινου νερού (με μια δεδομένη χωρητικότητα των δεξαμενών) εξαρτάται από το ύψος των βροχοπτώσεων, τη συχνότητα των βροχοπτώσεων και τον αριθμό και το είδος των οικιακών συσκευών που μπορούν να χρησιμοποιήσουν όμβρια ύδατα αντί του πόσιμου (Rozos et al., 2010). Για να διερευνηθούν αυτές οι παράμετροι και αλληλεπιδράσεις, έχουν αναπτυχθεί bottom-up μοντέλα που προσομοιώνουν τη ζήτηση ξεκινώντας από το επίπεδο της οικιακής συσκευής. Λίγα είναι αυτά τα μοντέλα και περιλαμβάνουν το μοντέλο Aquacycle (Mitchel et al, 2001· Mitchell, 2005), το City Water Balance Model (CWB) (Last and Mackay, 2010) καθώς και το Urban Water Optioneering Tool (UWOT) (Makropoulos et al., 2008).

Το UWOT είναι ένα μικρο-στοιχειακό μοντέλο που προσομοιώνει τις τυπικές αστικές ροές (πόσιμο νερό, λύματα και απορροή ομβρίων) καθώς και την αλληλεπίδραση τους μέσω σχημάτων ανακύκλωσης (συμπεριλαμβανομένων για παράδειγμα επεξεργασία γκρι νερού και συλλογή όμβριων υδάτων). Ένα αστικό δίκτυο νερού αντιπροσωπεύεται ως σύνολο μικρο-στοιχείων (συσκευές νερού, τεχνολογίες νερού, υδραγωγεία, δεξαμενές, κλπ) τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με εικονικούς συνδέσμους. Το UWOT προσομοιώνει τη λειτουργία του κάθε στοιχείου του δικτύου σε κάθε χρονικό

βήμα. Οι έξοδοι των ανάντη μικρο-στοιχείων είναι οι εισοδοί στην κατάντη μικρο-στοιχείων (ακολουθώντας τις εικονικές συνδέσεις) για το επόμενο χρονικό βήμα προσομοίωσης. Το UWOT μπορεί να συναθροίσει τις εξόδους των παρόμοιων εξαρτημάτων του δικτύου για να αποκτήσει τις ροές σε ανώτερες κλίμακες (π.χ. κλίμακα της αστικής ανάπτυξης). Το UWOT προσομοιώνει επίσης τη διακύμανση στάθμης του νερού εντός των ταμιευτήρων ή/και των δεξαμενών του δικτύου. Τέλος, το UWOT καταγράφει την καταναλισκόμενη ενέργεια καθώς και το αρχικό και λειτουργικό κόστος που απαιτούνται για την κανονική λειτουργία του αστικού κύκλου του νερού.

Οι πληροφορίες που απαιτούνται από το UWOT για την προσομοίωση της λειτουργίας των μικρο-στοιχείων νερού (κατανάλωση νερού, απαιτούμενη ενέργεια, τιμές BOD, αρχικό και λειτουργικό κόστος, κτλ) είναι αποθηκευμένες σε μια βάση δεδομένων, η οποία ονομάζεται «βιβλιοθήκη τεχνολογιών». Η βιβλιοθήκη αυτή έχει συμπληρωθεί με τις πληροφορίες που προέρχονται από έρευνες, εγχειρίδια επαγγελματιών, επιστημονικές δημοσιεύσεις, εργαστηριακές και πιλοτικές δοκιμές, κλπ. Αυτή η βάση δεδομένων επιτρέπει στον χρήστη εύκολη επιλογή συνδυασμών τεχνολογιών προς αξιολόγηση από το UWOT (Makropoulos et al., 2008).

## 7 Αστικός κύκλος νερού σε κλίμακα κυττάρου

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 5.3 τα αστικά κύτταρα της περιοχής μελέτης ταξινομούνται σε τρεις πολεοδομικούς τύπους (αντιστοιχούν στις εναλλακτικές καταστάσεις κυττάρου '2', '3' και '4' του μοντέλου CA). Ο αστικός κύκλος νερού αυτών των τριών τύπων αναπαριστάται από το UWOT με τη βοήθεια κατάλληλων εννοιολογικών οντοτήτων που ονομάζονται Μονάδες Αστικής Απόκριση (MAA). Μια MAA χαρακτηρίζεται από τις ακόλουθες ιδιότητες:

- i. Ο αριθμός των μονάδων διαμονής. Κάθε MAA περιλαμβάνει ένα σταθερό αριθμό μονάδων διαμονής. Μονάδα διαμονής θεωρείται κάθε συγκρότημα κατοικιών με μία μόνο σύνδεση στο δίκτυο.
- ii. Η κατοικησιμότητα. Είναι ο μέσος αριθμός των ανθρώπων που φιλοξενεί μια μονάδα διαμονής, ο οποίος μπορεί να περιλαμβάνει μια ενιαία οικογένεια ή πολλές οικογένειες στην περίπτωση πολυώροφων κτιρίων (πολεοδομικοί τύποι 3 και 4).
- iii. Η δημόσια αδιαπέρατη περιοχή. Αυτό αναφέρεται στην περιοχή της MAA που καταλαμβάνεται από δρόμους, πεζοδρόμια και δημόσια κτίρια (π.χ. σχολεία, νοσοκομεία).
- iv. Οι ιδιωτικές και δημόσιες διαπερατές περιοχές. Αυτό αναφέρεται στην περιοχή της MAA που καταλαμβάνεται από τους κήπους και πάρκα.

- v. Η ιδιωτική αδιαπέρατη περιοχή. Αυτό αναφέρεται στη συνολική χτισμένη επιφάνεια της ΜΑΑ.
- vi. Η τοπολογία του αστικού δικτύου νερού. Πρόκειται για τις εγκατεστημένες συσκευές νερού, η ύπαρξη συστήματος ανακύκλωσης νερού, το είδος των υπονόμων (παντοροϊκά/χωριστικά), κλπ.

Σε αυτή την μελέτη, η συνολική έκταση της κάθε ΜΑΑ (έχει να κάνει με τις πιο πάνω ιδιότητες iii, iv και v) ισούται με τη χωρική διακριτοποίηση του μοντέλου CA (δηλ.  $100 \times 100 \text{ m}^2$ ). Οι πέντε πρώτες ιδιότητες της πιο πάνω λίστας, ο οποίες ορίζουν στην ουσία τον πολεοδομικό τύπο, αποκτήθηκαν με δορυφορικές εικόνες όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 4. Αυτή η πληροφορία για τις τρεις ΜΑΑ αυτής της μελέτης δίνεται στον Πιν. 2 (ο πολεοδομικός τύπος 2 αντιστοιχεί στον τύπο 2 του μοντέλου CA, υπενθυμίζεται ότι ο τύπος 1 αντιστοιχεί σε μη αστικές περιοχές ενώ ο τύπος 0 σε μη οικοδομήσιμες περιοχές).

Πιν. 2: Πολεοδομικοί τύποι περιοχής μελέτης.

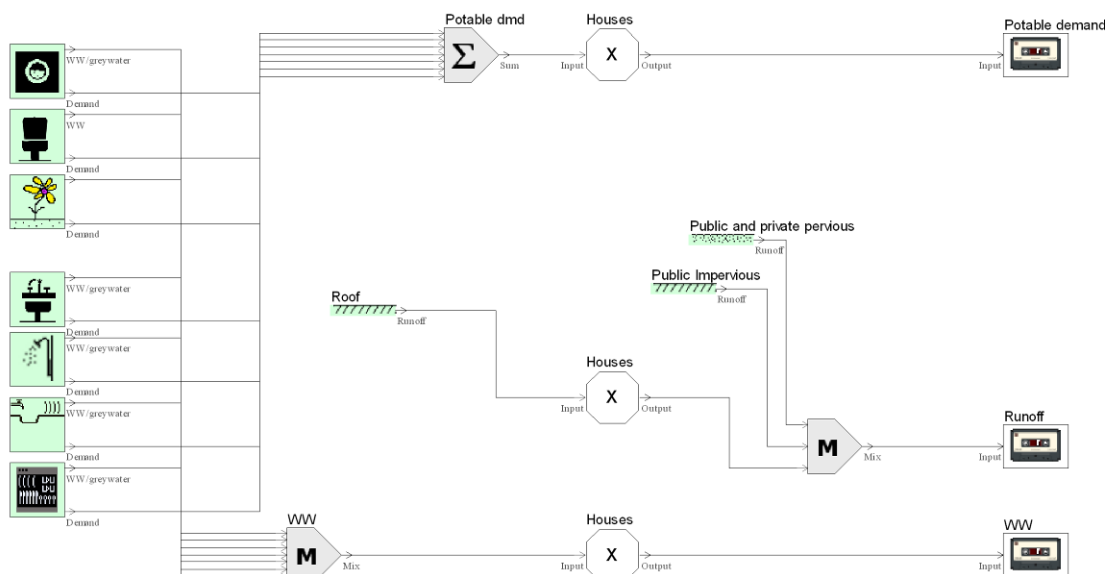
	Τύπος 2	Τύπος 3	Τύπος 4
<b>Κατοικησιμότητα</b>	3.2	7.4	20
<b>Μονάδες διαμονής</b>	10	17	15
<b>Δημόσια αδιαπέρατη</b> <b>(m<sup>2</sup>)</b>	1000	4645	3925
<b>Συνολική περατή (m<sup>2</sup>)</b>	8200	2635	3225
<b>Ιδιωτική αδιαπέρατη</b> <b>(m<sup>2</sup>)</b>	80	160	190

Η ιδιότητα vi της πιο πάνω λίστας είναι η τοπολογία του δικτύου (υδραυλική εγκατάσταση). Σε αυτή τη μελέτη, πέντε διαφορετικές τοπολογίες δικτύου και υποδομές διαχείρισης αστικών υδάτων εξετάστηκαν:

- Οι δύο πρώτες τοπολογίες περιλαμβάνουν τη μηδενική λύση Business As Usual (BAU) και την επιλογή εγκατάστασης των συσκευών χαμηλής κατανάλωσης (LOW). Αυτές οι δύο έχουν ταυτόσημες συνδέσεις μεταξύ των μικρο-στοιχείων τους (Σχήμα 10). Οι προδιαγραφές και τα χαρακτηριστικά χρήσης των οικιακών συσκευών νερού που χρησιμοποιούνται στην BAU λύση λαμβάνονται από τη βιβλιογραφία (EEA, 2001· Grant, 2006). Η συνολική ημερήσια κατά κεφαλήν κατανάλωση με εγκατάσταση αυτών των συσκευών είναι 184 L/p/d. Οι συσκευές χαμηλής κατανάλωσης της επιλογής LOW περιλαμβάνουν μια διπλή βαλβίδα 4/2 L τουαλέτας (Grant, 2002), ένα ντους χαμηλής ροής (Eartheasy, 2012), ένα πλυντήριο με πιστοποίηση ENERGY STAR που έχει κάδο 107 L και συντελεστή κατανάλωσης νερού 3.4 (EnergyStar, 2012a) και ένα πλυντήριο πιάτων με πιστοποίηση ENERGY STAR 16L/χρήση (EnergyStar, 2012b). Η ημερήσια κατά κεφαλήν κατανάλωση με εγκατάσταση αυτών των συσκευών είναι 97 L/p/d.

- Οι επόμενες δύο τοπολογίες (Σχήμα 11) επιχειρούν η μεν πρώτη να επιτύχει εξοικονόμηση νερού με την εφαρμογή ενός συστήματος συλλογή όμβριων υδάτων (RWH) και η δεύτερη περαιτέρω μείωση συνδυάζονται τη συλλογή ομβρίων με συσκευές χαμηλής κατανάλωσης. Οι χωρητικότητες των δεξαμενών που χρησιμοποιούνται στο σύστημα RWH είναι 2, 10 και 20 m<sup>3</sup> για τους πολεοδομικούς τύπους 2, 3 και 4 αντίστοιχα. Οι επιφάνειες συλλογής βρόχινου νερού στους τρεις τύπους είναι 80, 160 και 190 m<sup>2</sup> (μέση επιφάνεια στέγης που υπολογίζεται από δορυφορικές εικόνες). Το μέσο ετήσια ύψος βροχόπτωσης, όπως εκτιμάται από ημερήσιες χρονοσειρές βροχόπτωσης (Freemeteo, 2011) είναι 376 χιλιοστά.
- Η πέμπτη τοπολογία περιλαμβάνει τοπική ανακύκλωση γκρι νερού (GWR) χρησιμοποιώντας μια τοπική μονάδα επεξεργασίας νερού από το ντους και τον νιπτήρα, και παρέχει επεξεργασμένο νερό στην τουαλέτα, το πλυντήριο ρούχων και για το πότισμα των κήπων (Σχήμα 12).

Οι συχνότητες χρήσης των συσκευών (που εκφράζονται σε αριθμό των χρήσεων ανά άτομο ανά ημέρα) θεωρούνται σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης και είναι ίδιες για όλες τις τοπολογίες. Οι συχνότητες της χρήσης των συσκευών νερού σε χρήση/άτομο/ημέρα είναι (Grant, 2006): πλυντήριο πιάτων 0.38, πότισμα κήπων 0.5, νιπτήρας 1, ντους 0.8, τουαλέτα 4.6 και πλυντήριο ρούχων 0.6.

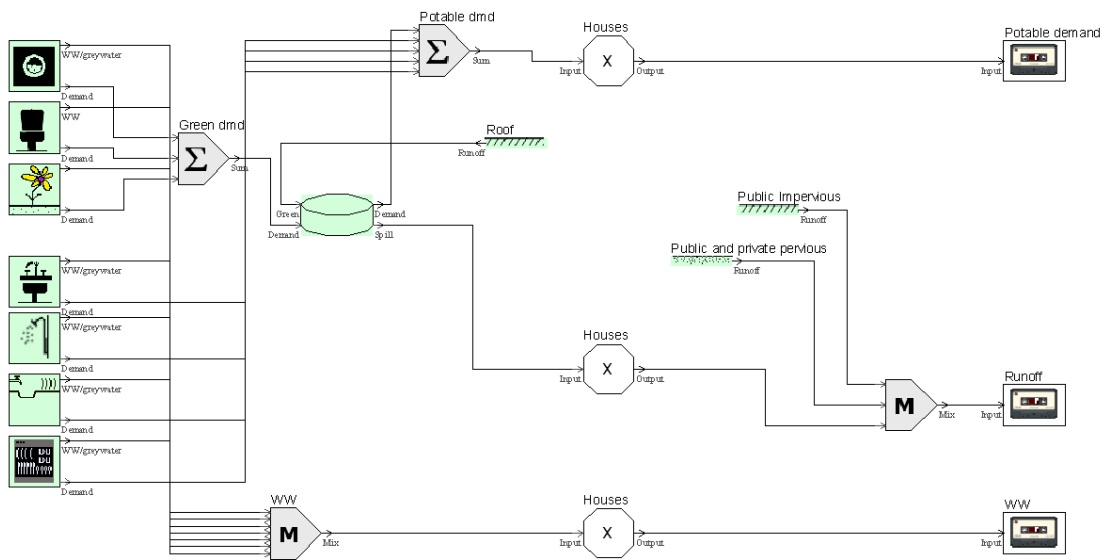


Σχήμα 10: Τοπολογία των επιλογών BAU και LOW.

Στο Σχήμα 10 παρουσιάζεται η τοπολογία του δικτύου της μηδενικής λύσης BAU και της επιλογής LOW (έχει όμοιες συνδέσεις, αλλά διαφορετικές συσκευές). Η ζήτηση των εσωτερικών συσκευών νερού (πλυντήριο, τουαλέτα, νιπτήρας, ντους, νεροχύτης και πλυντήριο πιάτων) και των υπαίθριων καταναλώσεων αθροίζονται μέσα από τα μικρο-στοιχεία που σημειώνονται με Σ στο Σχήμα 10. Στη συνέχεια, η ζήτηση πολλαπλασιάζεται με τον αριθμό των μονάδων διαμονής ανά κύτταρο και το αποτέλεσμα είναι η ζήτηση πόσιμου νερού της MAA. Οι έξοδοι όλων των συσκευών αναμιγνύονται

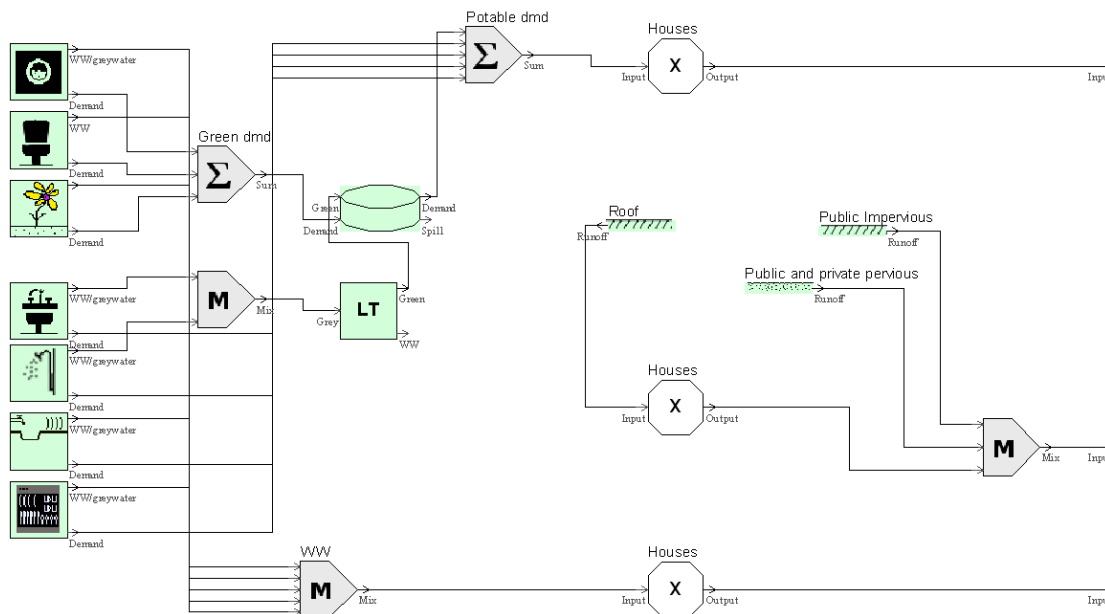
χρησιμοποιώντας το στοιχείο που σημειώνεται με M στο Σχήμα 10. Μετά, η ροή αυτή πολλαπλασιάζεται με τον αριθμό των μονάδων διαμονής ανά κύτταρο, το οποίο δίνει τη ροή ακαθάρτων της MAA. Τέλος, οι βροχοπτώσεις στις στέγες των νοικοκυριών δημιουργούν απορροή, η οποία, αφού πολλαπλασιάζεται με τον αριθμό των μονάδων διαμονής, αναμιγνύεται με την απορροή από τις δημόσιες αδιαπέρατες περιοχές και την απορροή από το σύνολο των περατών περιοχών του κυττάρου. Το αποτέλεσμα είναι η απορροή από τη MAA.

Το δίκτυο των επιλογών RWH και RWHLOW (Σχήμα 11), και το δίκτυο της επιλογής GWR (Σχήμα 12) διαφέρουν ελαφρώς από το δίκτυο της λύσης BAU. Αμφότερα περιλαμβάνουν μια δεξαμενή, η οποία λαμβάνει στις μεν δύο πρώτες επιλογές τα όμβρια στη δε τελευταία επεξεργασμένο γκρι νερό από μία τοπική μονάδα.



Σχήμα 11: Τοπολογία επιλογών RWH and RWHLOW.





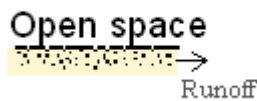
Σχήμα 12: Τοπολογία επιλογής GWR.

Η εφαρμογή των πέντε επιλογών στους τρεις πολεοδομικούς τύπους (Πιν. 2) έχουν σαν αποτέλεσμα δεκαπέντε MAA. Ο αστικός κύκλος νερού αυτών των MAA προσομοιώνεται με UWOT. Το UWOT χρησιμοποιήθηκε με ημερήσιο χρονικό βήμα (ιστορική ημερήσια χρονοσειρά βροχόπτωσης ελήφθη από Freemeteo (2011)). Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, παρουσιάζονται στον Πιν. 3, αντιστοιχούν στην περίοδο από 1/1/1980 μέχρι 31/12/1999. Οι τιμές που εμφανίζονται σε αυτόν τον πίνακα περιλαμβάνουν τη μέση ζήτηση πόσιμου νερό, την μέση παροχή ακαθάρτων και τον μέγιστο όγκο απορροής ομβρίων για την περίοδο προσομοίωσης.

Πιν. 3: Αποτελέσματα προσομοίωσης των δεκαπέντε (3 πολεοδομικοί τύποι × 5 επιλογές υδραυλικών εγκαταστάσεων) MAA με το UWOT.

	Τύπος υδρ. εγκατάστασης	Πολεοδομικός τύπος 2	Πολεοδομικός τύπος 3	Πολεοδομικός τύπος 4
Μέση ζήτηση πόσιμου (L/d)	BAU	5893	22778	53873
	LOW	3091	11760	27599
	RWH	5305	20574	51527
	RWH	2567	9640	25259
	LOW	GWR	4165	15985
Μέση παροχή ακαθάρτων (L/d)	BAU	5718	22481	53610
	LOW	2916	11463	27336
	RWH	5718	22480	53610
	RWH	2916	11463	27336
	LOW	GWR	3990	15687
Μέγιστος όγκος απορροής (L/d)	BAU	307806	866066	806880
	LOW	307806	866066	806880
	RWH	297030	724577	502743
	RWH	300893	739763	538959
	LOW	GWR	307806	866066

Μη-αστικά κύτταρα (πολεοδομικός τύπος 1) θεωρούνται οι ανοικτοί χώροι και χαρακτηρίζονται από ένα μέσο ρυθμό κατείδυσης. Οι έντονες βροχοπτώσεις αναμένεται να δώσουν απορροή στις περιοχές των εν λόγω κυττάρων. Για την προσομοίωση της απορροής, μια μονάδα απόκρισης παρασκευάστηκε η οποία περιέχει μόνο ένα μικρο-στοιχείο, μια περατή περιοχή (Σχήμα 13). Η περιοχή αυτού του μικρο-στοιχείου είναι 10000 m<sup>2</sup> (ίση με την περιοχή ενός κυττάρου), η χωρητικότητα εδαφικής υγρασίας υποτέθηκε ότι είναι 150 mm, και η εξάτμιση και ο ρυθμός διείσδυσης 1% και 20% ανά ημέρα αντίστοιχα. Η μέγιστη απορροή που δίνει η προσομοίωση με ημερήσιο χρονικό βήμα είναι 127236 L στις 26 Μαρτίου 1998 (όπως και οι αντίστοιχες τιμές στον Πιν. 3).



Σχήμα 13: Μοντελοποίηση μη αστικών κυττάρων.

Το ημερήσιο χρονικό βήμα είναι επαρκές για την παροχή εκτιμήσεων της ημερήσιας ζήτησης αλλά όχι για την εκτίμηση της αιχμής της απορροής. Η τελευταία εκτιμάται για την επιλογή BAU (τιμή αναφοράς) και για την επιλογή RWH (η μόνη επιλογή που αναμένεται να έχει επιπτώσεις στην απορροή) με ωριαίο χρονικό βήμα χρησιμοποιώντας χρονοσειρά βροχόπτωσης που ελήφθη από έναν μετεωρολογικό σταθμό κοντά στην περιοχή μελέτης (NTUA, 2011). Η διάρκεια αυτής της προσομοίωσης είναι περίπου ένας μήνας και καλύπτει μόνο την περίοδο κατά την οποία σημειώθηκε ο μεγαλύτερος όγκος απορροής στο ημερήσιο χρονικό βήμα προσομοίωσης (Μάρτιος 1998). Τα αποτελέσματα αυτής της προσομοίωσης για τα αστικά κύτταρα φαίνονται στον Πιν. 4 ενώ η απορροή από μη αστικό κύτταρο θεωρείται ότι είναι 0 L/h.

Πιν. 4: Μέγιστη απορροή (L/h) εκτιμημένη από το UWOT για ωριαίο χρονικό βήμα.

Τύπος υδρ. Εγκατάστασης	Πολεοδομικός τύπος 2	Πολεοδομικός τύπος 3	Πολεοδομικός τύπος 4
<b>BAU</b>	37958	155313	142871
<b>RWH</b>	37816	97954	82770.4

## 8 Αστικός κύκλος νερού σε κλίμακα δήμου

Ο Πιν. 3 εμφανίζει τα αποτελέσματα του UWOT στην κλίμακα μιας ΜΑΑ. Για να αποκτηθούν οι ροές του αστικού κύκλου νερού στην κλίμακα του δήμου για κάθε ένα από τα έτη 1990, 2000, 2010 και 2020 ο πίνακας αυτός πολλαπλασιάστηκε με τον αντίστοιχο πίνακα των αστικών κυττάρων ανά πολεοδομικό τύπο (δηλαδή τον Πιν. 5 για το έτος 1990, τον Πιν. 6 για το έτος 2000, τον Πιν. 7 για το έτος 2010 και τον Πιν. 8 για το έτος 2020).

Ο όγκος απορροής στην κλίμακα του δήμου υπολογίζεται με τον πολλαπλασιασμό του Πιν. 4 με τον αντίστοιχο πίνακα των αστικών κυττάρων ανά πολεοδομικό τύπο. Στη συνέχεια, η μέγιστη παροχή σε  $m^3/s$  υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας τη μέθοδο τριγωνικού υδρογραφήματος SCS και τον τύπο Kirpich:

$$Q = 2.8 \times 10^{-7} \frac{V}{t_p}$$

όπου  $V$  είναι ο μέγιστος όγκος απορροής σε L στην κλίμακα δήμου και  $t_p$  είναι ο χρόνος ανόδου του πλημμυρογραφήματος σε h. Το τελευταίο εκτιμάται χρησιμοποιώντας τον τύπο  $t_p = D/2 + 0.6 t_c$ , όπου  $D$  είναι η διάρκεια της βροχόπτωσης σε h. Ο χρόνος συγκέντρωσης  $t_c$  σε h εκτιμάται από το τύπο Kirpich (Κουτσογιάννης, 2011):

$$t_c = 0.0195 \frac{L^{0.77}}{60 S^{0.385}}$$

όπου  $S$  είναι η κλίση σε m/m (μετά από εξέταση του ψηφιακού αναγλύφου της περιοχής, θεωρήθηκε ως αντιπροσωπευτική μια ομοιόμορφη κλίση ίση με 3%) και  $L$  το μέγιστο μήκος απορροής σε m. Το τελευταίο υπολογίστηκε από τον αριθμό των κυττάρων βασιζόμενοι στην προσέγγιση ότι η ανάπτυξη των αστικών κυττάρων σχηματίζει ένα απλό γεωμετρικό σχήμα (τετράγωνο). Σε αυτή την περίπτωση  $n$  κύτταρα οργανώνονται σε ένα  $\sqrt{n} \times \sqrt{n}$  τετράγωνο με διαγώνιο μήκους  $L = \sqrt{2} \times \sqrt{n} \times 100$  m (100 m είναι η ανάλυση των ψηφιακών χαρτών).

Είναι προφανές ότι οι παραδοχές που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των μέγιστων τιμών παροχής είναι αδρομερείς και η χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι απλουστευτική. Επιπλέον, ένας δήμος μπορεί να έχει περισσότερες από μία έξοδο για αποστράγγιση ομβρίων. Σε τέτοιες περιπτώσεις, τα κύτταρα του δήμου πρέπει να ταξινομηθούν σε διάφορες ομάδες ανάλογα με την έξοδο στην οποία στραγγίζονται τα όμβρια τους (για τον ορθό υπολογισμό του  $L$ ). Σε αυτή τη μελέτη, οι πτυχές αυτές δεν ελήφθησαν υπόψη. Για το λόγο αυτό, τα αποτελέσματα μπορεί να χρησιμεύσουν μόνο για ενδεικτικές συγκρίσεις μεταξύ των εναλλακτικών επιλογών.

## 9 Αλληλεπίδραση αστικής ανάπτυξης με υποδομές νερού-ενέργειας

Η εξέλιξη της αστικής ανάπτυξης στη περιοχή μελέτης, όπως αυτή εκτιμήθηκε από το μοντέλο αστικής ανάπτυξης, παρουσιάζεται στους Πιν. 5, Πιν. 6, Πιν. 7 και Πιν. 8, οι οποίοι δίνουν τον αριθμό των κυττάρων για κάθε πολεοδομικό τύπο στους δήμους της περιοχής μελέτης.

Πιν. 5: Αριθμός μη αστικών και αστικών κυττάρων ανά δήμο το 1990.

	<b>Άρτεμις</b>	<b>Πόρτο Ράφτη</b>	<b>Σπάτα</b>	<b>Παιανία</b>	<b>Μαρκόπουλο</b>	<b>Ραφήνα</b>	<b>Παλλήνη</b>	<b>Κορωπί</b>
<b>Μη αστικά</b>	2094	4768	317	472	774	382	158	338
<b>Τύπος 2</b>	270	117	0	0	0	26	0	0
<b>Τύπος 3</b>	0	0	57	74	32	45	0	0
<b>Τύπος 4</b>	0	0	0	0	0	0	32	53

Πιν. 6: Αριθμός μη αστικών και αστικών κυττάρων ανά δήμο το 2000.

	<b>Άρτεμις</b>	<b>Πόρτο Ράφτη</b>	<b>Σπάτα</b>	<b>Παιανία</b>	<b>Μαρκόπουλο</b>	<b>Ραφήνα</b>	<b>Παλλήνη</b>	<b>Κορωπί</b>
<b>Μη αστικά</b>	1957	4702	272	427	747	348	139	274
<b>Τύπος 2</b>	388	180	11	9	7	47	14	56
<b>Τύπος 3</b>	18	3	84	104	52	55	3	6
<b>Τύπος 4</b>	1	0	7	6	0	3	34	55

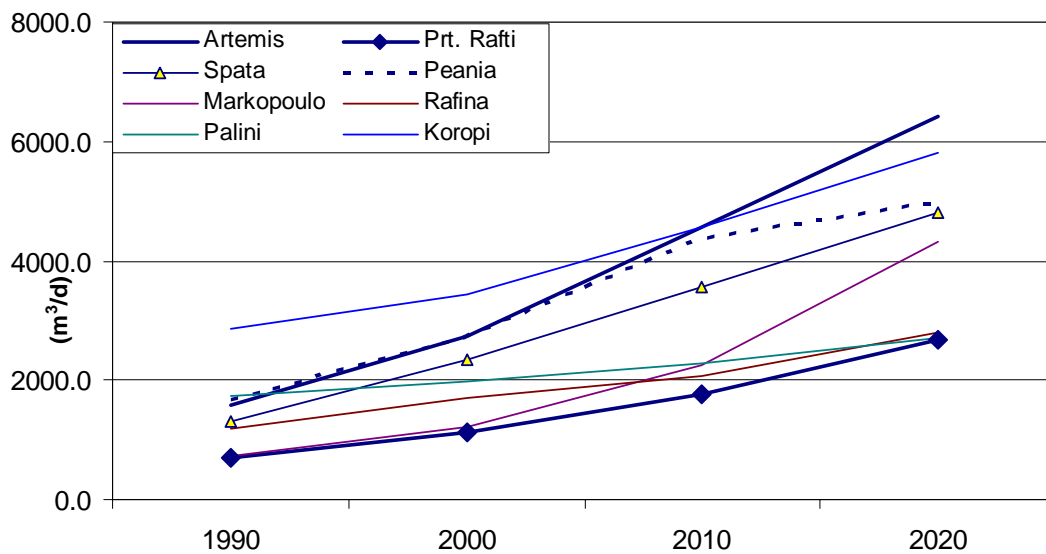
Πιν. 7: Αριθμός μη αστικών και αστικών κυττάρων ανά δήμο το 2010.

	<b>Άρτεμις</b>	<b>Πόρτο Ράφτη</b>	<b>Σπάτα</b>	<b>Παιανία</b>	<b>Μαρκόπουλο</b>	<b>Ραφήνα</b>	<b>Παλλήνη</b>	<b>Κορωπί</b>
<b>Μη αστικά</b>	1836	4609	241	390	698	329	123	244
<b>Τύπος 2</b>	455	267	19	18	25	57	20	50
<b>Τύπος 3</b>	66	9	87	102	76	60	12	31
<b>Τύπος 4</b>	7	0	27	36	7	7	35	66

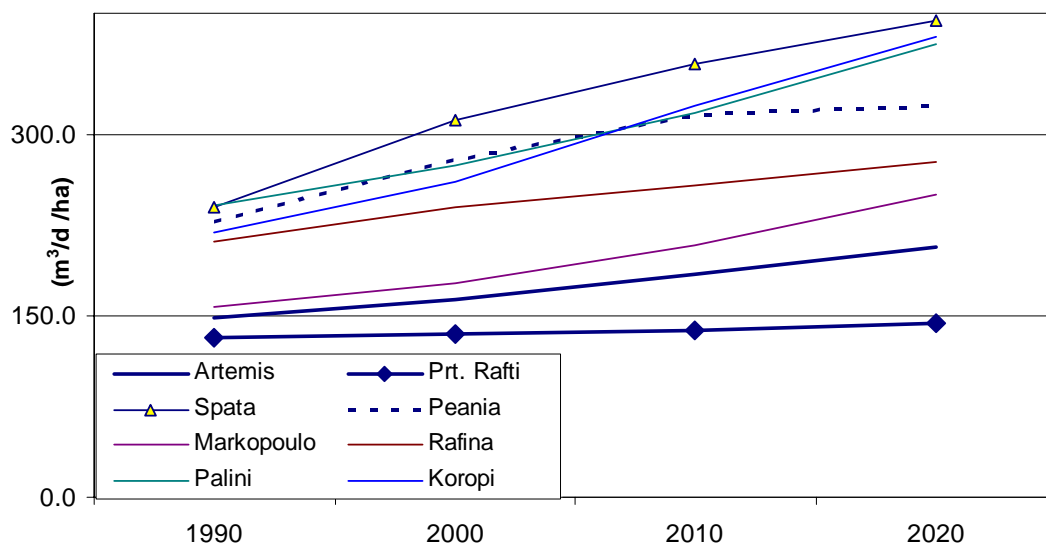
Πιν. 8: Αριθμός μη αστικών και αστικών κυττάρων ανά δήμο το 2020.

	<b>Άρτεμις</b>	<b>Πόρτο Ράφτη</b>	<b>Σπάτα</b>	<b>Παιανία</b>	<b>Μαρκόπουλο</b>	<b>Ραφήνα</b>	<b>Παλλήνη</b>	<b>Κορωπί</b>
<b>Μη αστικά</b>	1730	4516	224	379	650	319	115	229
<b>Τύπος 2</b>	499	342	14	24	24	54	11	28
<b>Τύπος 3</b>	122	26	84	92	94	59	26	51
<b>Τύπος 4</b>	13	1	52	51	38	21	38	83

Η εξέλιξη της ζήτησης πόσιμου νερού των δήμων της περιοχής μελέτης για την λύση αναφοράς (BAU) δίνεται στο Σχήμα 14. Η εξέλιξη του όγκου ακαθάρτων ακολουθεί παραπλήσιο μοτίβο με αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 14.

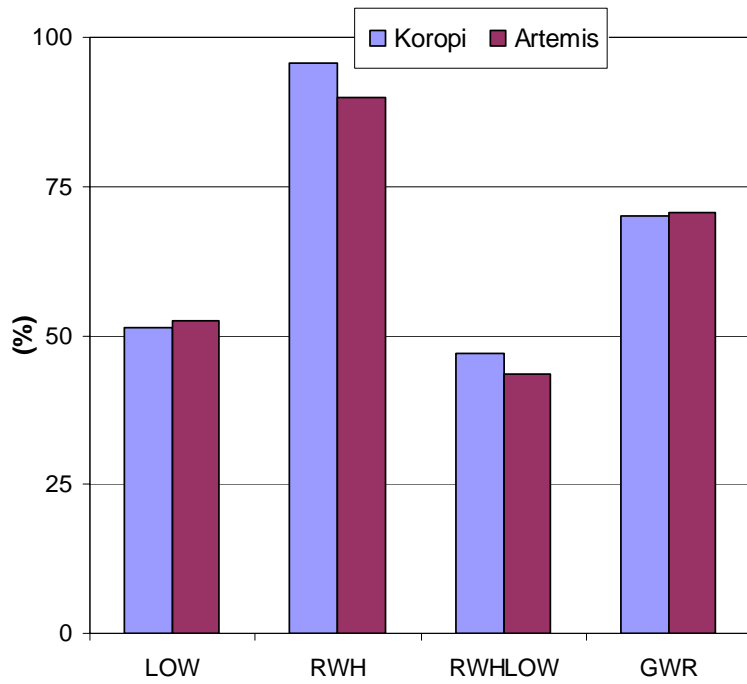


Σχήμα 14: Ζήτηση πόσιμου νερού ανά ημέρα για κάθε δήμο, μηδενική λύση (BAU).

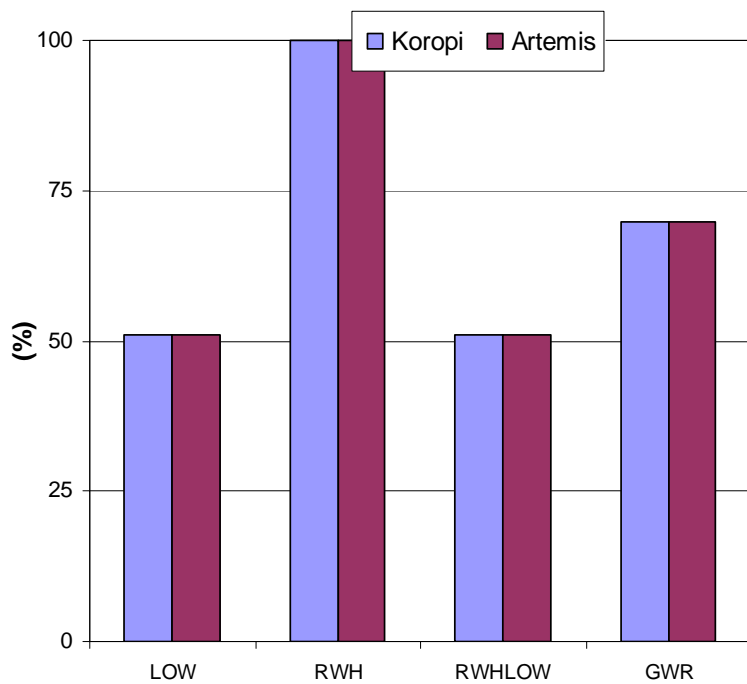


Σχήμα 15: Ενδεικτικός μέγιστος όγκος απορροής ανά εκτάριο για κάθε δήμο, μηδενική λύση (BAU).

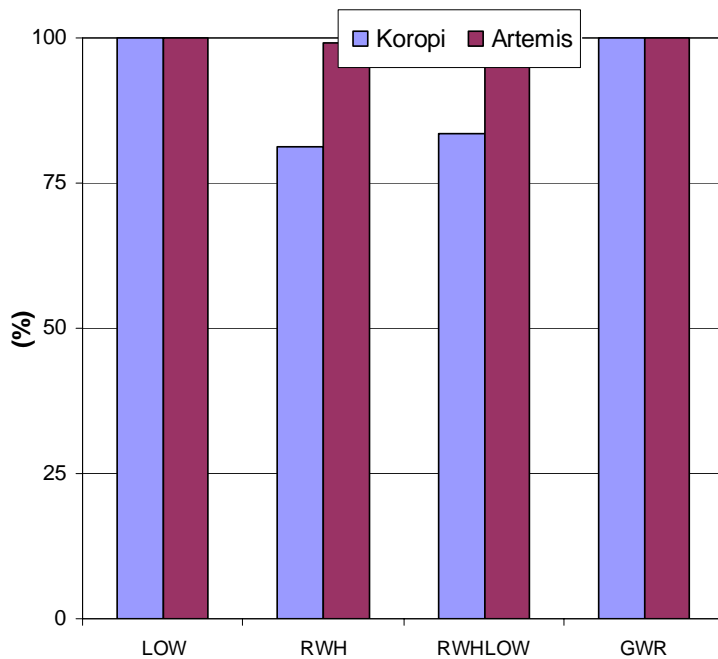
Η εξέλιξη τού ενδεικτικού μέγιστου όγκου απορροής για τη λύση BAU φαίνεται στο Σχήμα 15.



Σχήμα 16: Ζήτηση πόσιμου νερού για κάθε μια από τις λύσεις σε σχέση με την μηδενική λύση (BAU).



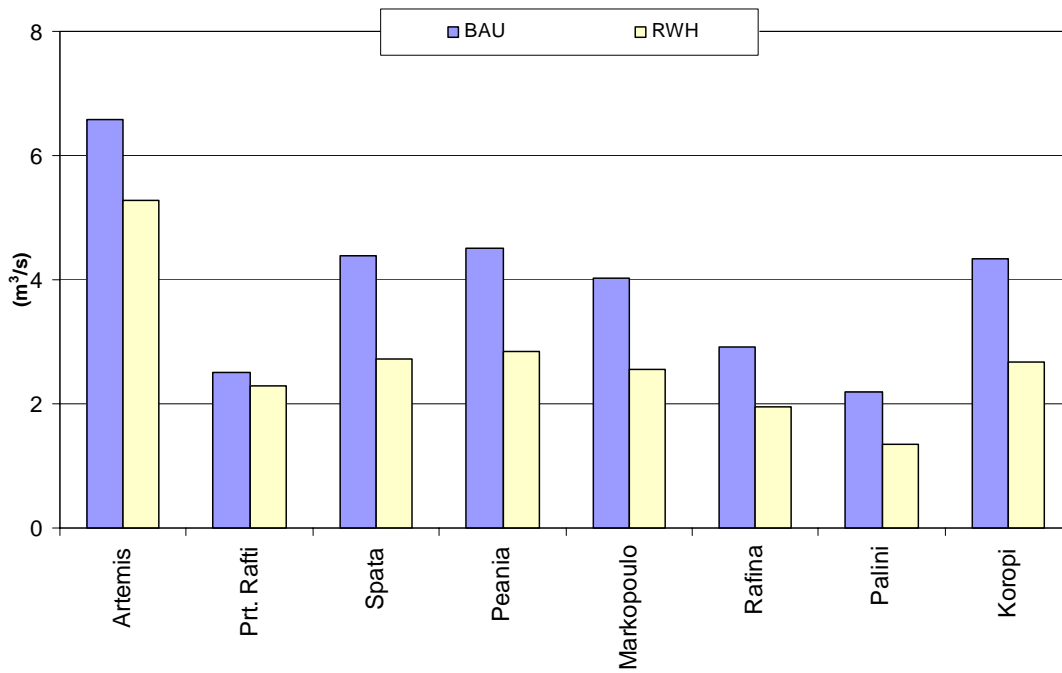
Σχήμα 17: Όγκος ακαθάρτων για κάθε μια από τις λύσεις σε σχέση με την μηδενική λύση (BAU).



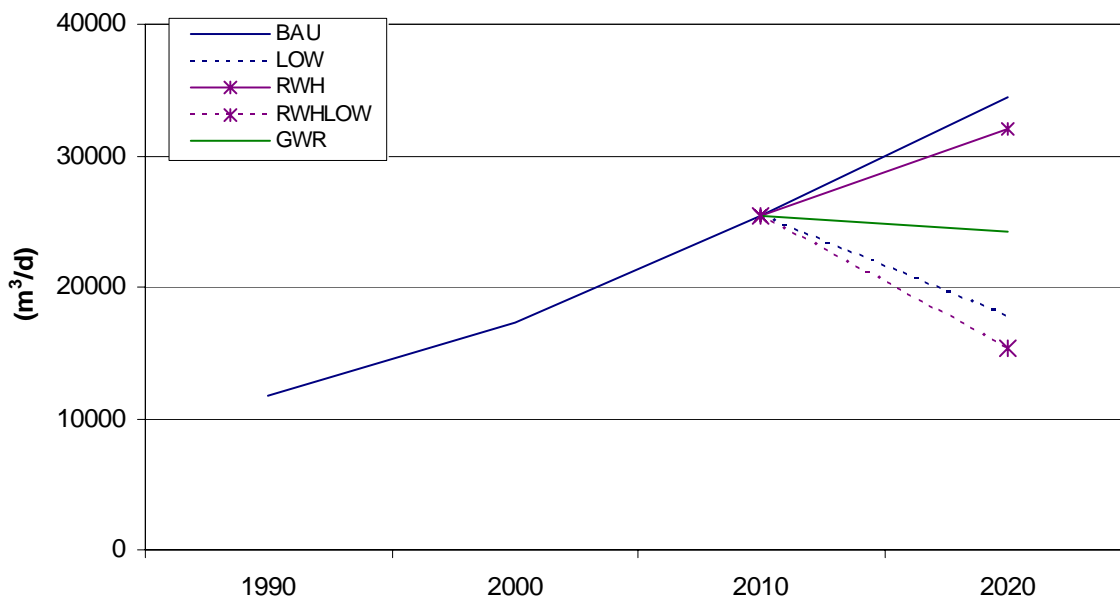
Σχήμα 18: Μέγιστος όγκος απορροής για κάθε μια από τις λύσεις σε σχέση με την μηδενική λύση (BAU).

Η βελτίωση της απόδοσης του αστικού κύκλου νερού με την εφαρμογή κάθε μιας από τις τέσσερις επιλογές υποδομών διαχείρισης αστικών υδάτων (συσκευές χαμηλής κατανάλωσης νερού, συλλογή των όμβριων υδάτων, συσκευές χαμηλής κατανάλωσης νερού συν συλλογή των όμβριων υδάτων και γκρι ανακύκλωση νερού) σε σύγκριση με τη λύση BAU δείχνεται στο Σχήμα 16, Σχήμα 17 και Σχήμα 18. Απόλυτες τιμές βελτίωσης μπορεί να ληφθούν με συνδυασμό αυτών των τριών σχημάτων με το Σχήμα 14 και Σχήμα 15. Το Κορωπί και η Άρτεμις επιλέχθηκαν ως αντιπροσωπευτικοί δήμοι υψηλής και χαμηλής πυκνότητας αντίστοιχα. Τα σχήματα 16, 17 και 18 εμφανίζουν σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο αυτών δήμων μόνο στον μέγιστο όγκο απορροής.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με ωριαίο χρονικό βήμα της επιλογής RWH και της λύσης BAU φαίνονται στο Σχήμα 19. Η εξέλιξη της συνολικής ζήτησης πόσιμου νερού της περιοχής μελέτης δείχνεται στο Σχήμα 20 (θεωρείται σταθερός ρυθμός διείσδυσης νέας τεχνολογίας ίσος με 10%/έτος). Αυτό το σχήμα περιλαμβάνει και τις τέσσερις επιλογές υποδομών διαχείρισης αστικών υδάτων μαζί με τη μηδενική λύση BAU.



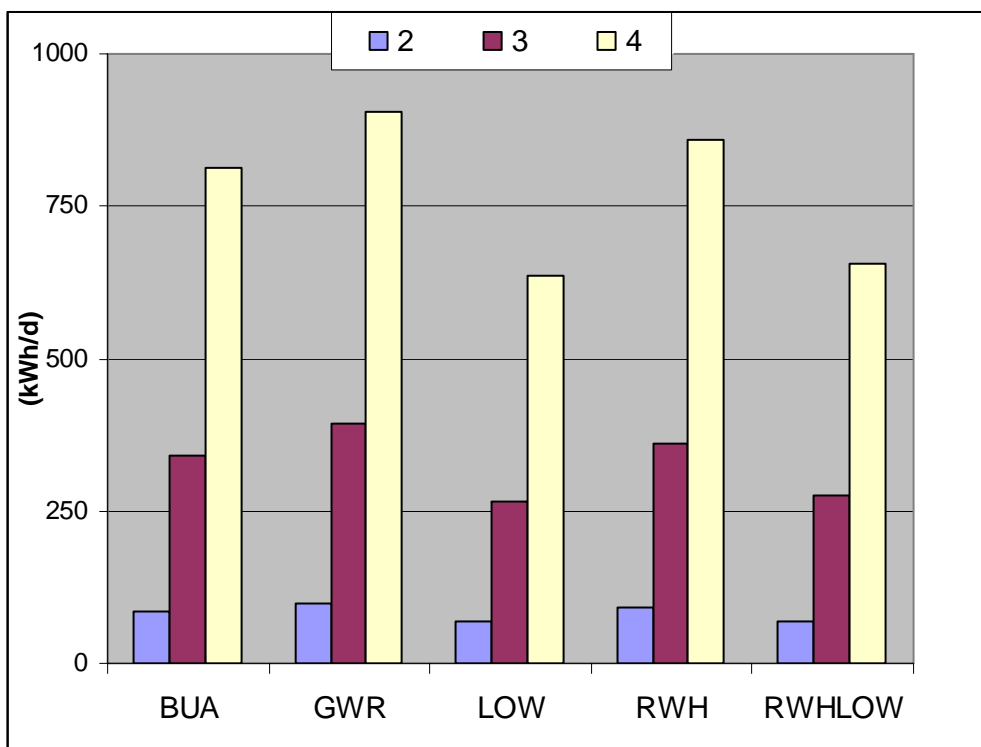
Σχήμα 19: Σύγκριση αιχμής απορροής από τους δήμους της περιοχής μελέτης με υποδομές διαχείρισης αστικών υδάτων BAU και RWH.



Σχήμα 20: Σύγκριση εξέλιξης ζήτησης πόσιμου νερού για όλη την περιοχή μελέτης για τις τέσσερις εναλλακτικές επιλογές υποδομών διαχείρισης αστικών υδάτων και τη μηδενική λύση.

Η ημερήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας που σχετίζεται με τον αστικό κύκλο νερού για τη μηδενική λύση και για τις εναλλακτικές υποδομές διαχείρισης φαίνεται στο Σχήμα 21.





Σχήμα 21: Ημερήσια κατανάλωση ενέργειας οικιακών συσκευών νερού στους πολεοδομικούς τύπους 2,3 και 4 για τις εναλλακτικές υποδομές διαχείρισης αστικών υδάτων.

## 10 Αξιολόγηση εναλλακτικών υποδομών διαχείρισης αστικών υδάτων

Η ζήτηση νερού στη μηδενική λύση (BAU) εξαρτάται άμεσα από τον πληθυσμό. Συνεπώς, το Σχήμα 14 μπορεί να θεωρηθεί ως μία αναπαράσταση της εξέλιξης του πληθυσμού, όπως εκτιμάται από το μοντέλο CA. Σύμφωνα με αυτό το σχήμα, το 2020 η Άρτεμις διαθέτει την υψηλότερη ζήτηση πόσιμου νερού μεταξύ όλων των δήμων. Επιπλέον, η Άρτεμις διαθέτει τον υψηλότερο ρυθμό αύξησης της ζήτησης πόσιμου νερού. Αυτό επιβεβαιώνεται και πληθυσμιακά στοιχεία των απογραφών. Η Άρτεμις εκτείνεται σε μια έκταση 7.3 km<sup>2</sup> κοντά στη θάλασσα, έχει εύκολη πρόσβαση και όμορφο τοπίο. Ως εκ τούτου η περιοχή αυτή είναι πολύ ελκυστική για να κατοικηθεί.

Στο Σχήμα 15 παρουσιάζεται η απορροή από τους δήμους της περιοχής μελέτης. Οι υψηλότερες τιμές σε αυτό το διάγραμμα εμφανίζονται στους πιο πυκνοκατοικημένους δήμους. Η Άρτεμις, παρά τον υψηλό ρυθμό αύξησης του πληθυσμού, εξακολουθεί να εμφανίζεται στο κάτω μέρος του διαγράμματος με μια μέτρια τάση αύξησης. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στους χαμηλούς συντελεστές απορροής λόγω της χαμηλής αστικής πυκνότητας αυτής της περιοχής.

Η επιτεύξιμη μείωση ζήτησης πόσιμου νερού για κάθε μία από τις εναλλακτικές επιλογές υποδομών διαχείρισης αστικών υδάτων δείχνεται στο Σχήμα 16. Από το σχήμα αυτό είναι προφανές ότι η επιλογή LOW (εγκατάσταση των συσκευών χαμηλής κατανάλωσης νερού) πέτυχε την υψηλότερη μείωση της ζήτησης πόσιμου νερού. Η επιλογή GWR (γκρι ανακύκλωση νερού) πέτυχε μείωση κατά 70%, που είναι και η τυπική τιμή που αναφέρεται στη βιβλιογραφία για αυτήν την υποδομή διαχείρισης αστικών υδάτων (π.χ. Greenworks, 2012). Η RWH (συλλογή των όμβριων υδάτων) επιλογή επιτυγχάνει τη χαμηλότερη μείωση, ενώ ο συνδυασμός RWH και LOW φαίνεται να βελτιώνει οριακά μόνο την απόδοση της LOW. Η κακή απόδοση της λύση RWH συζητείται στην επόμενη παράγραφο. Παρόμοια αποτελέσματα ελήφθησαν για στο Σχήμα 17 για τον όγκο ακαθάρτων.

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 7, οι περιοχές συλλογής βρόχινου νερού από τους τρεις πολεοδομικούς τύπους είναι 80, 160 και 190 m<sup>2</sup> ενώ η μέση ετήσια βροχόπτωση είναι ύψους 376 mm. Εάν ο συντελεστής απορροής από τις στέγες λαμβάνεται ίσος με 0.80 (Pilgrim και Cordery, 1993) συμπεραίνεται ότι η μέγιστη ετήσια συλλεγόμενη βροχόπτωση είναι 30.1, 60.2 και 71.4 m<sup>3</sup> για τους τρεις τύπους αντίστοιχα. Αυτές οι τιμές αντιστοιχούν σε 82.4, 164.8 και 195.7 L/d. Από την άλλη πλευρά, η ζήτηση πράσινου νερού (συχνότητα της χρήσης της τουαλέτας, του πλυντηρίου ρούχων και κήπου πολλαπλασιασμένη με την κατανάλωση ανά χρήση και μετά με την κατοικησιμότητα) των τριών τύπων είναι 380.5, 879.9 και 2378.1 L/d αντίστοιχως. Συνεπώς, το διαθέσιμο συλλεγόμενο όμβριο ύδωρ είναι μικρότερο από τη ζήτηση πράσινου νερού και πολύ χαμηλότερο από τη συνολική ζήτηση ενός νοικοκυριού (ποσοστό μεταξύ 5% και 10%).

Οι τιμές απορροής στο Σχήμα 19 που αντιστοιχούν στη μηδενική λύση (BAU) μπορούν να επαληθευτούν με την ορθολογική μέθοδο θεωρώντας βροχόπτωση ύψους 25 mm/h (μέγιστη ένταση στις ωριαίες χρονοσειρές βροχόπτωσης) και συντελεστή απορροής 0.30, όπως προτείνεται από ASCE (1969) για τις προαστιακές οικιστικές περιοχές. Το Σχήμα 19 δείχνει ότι η εφικτή μείωση της αιχμής της απορροής με την εφαρμογή της επιλογής RWH κυμαίνεται από 10% για τις αστικές περιοχές χαμηλής πυκνότητας (π.χ. Πόρτο Ράφτη) μέχρι σχεδόν 40% για τις αστικές περιοχές υψηλής πυκνότητας (π.χ. Σπάτα, Κορωπί). Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε παραπάνω η επιλογή RWH συμβάλλει οριακά στη μείωση της ζήτησης πόσιμου νερό. Ως εκ τούτου, η λύση αυτή λειτουργεί περισσότερο ως ένα βιώσιμο σύστημα αποστράγγισης (SUDS) στην περιοχή μελέτης, του οποίου η αποτελεσματικότητα αυξάνεται όσο αυξάνεται η αστική πυκνότητα.

Στο Σχήμα 20 συγκρίνονται τα πιθανά οφέλη μείωσης της ζήτησης πόσιμου νερού από τις υποδομές διαχείρισης αστικών υδάτων. Η επιλογή RWH συνδυασμένη με LOW επιτυγχάνει τη μεγαλύτερη μείωση της ζήτησης πόσιμου νερού και έχει επιπλέον τα οφέλη της μείωσης της αιχμής της απορροής. Η LOW επιτυγχάνει τη δεύτερη μεγαλύτερη μείωση, ελαφρώς χαμηλότερη από αυτήν του συνδυασμού RWH και LOW. Η GWR επιτυγχάνει μέτρια μείωση ενώ η RWH επιτυγχάνει αμελητέα μείωση.

Στο Σχήμα 21 φαίνεται καταρχάς το προφανές, ότι η κατανάλωση ενέργειας σε κάθε ΜΑΑ εξαρτάται την πυκνότητα δόμησης. Όσον αφορά τις εναλλακτικές επιλογές υποδομών διαχείρισης αστικών υδάτων, φαίνεται ότι η χαμηλότερη κατανάλωση επιτυγχάνεται με την επιλογή LOW. Αυτό συμβαίνει διότι οι συσκευές χαμηλής κατανάλωσης νερού (π.χ. ντουζιέρα) έχουν σαν συνέπεια και χαμηλή κατανάλωση ηλεκτρισμού για θέρμανση του νερού. Η επιλογή RWH έχει υψηλότερη κατανάλωση από την μηδενική λύση γιατί χρειάζεται ενέργεια για να αντληθεί το νερό από τη δεξαμενή ομβρίων. Τέλος η επιλογή GWH έχει τις υψηλότερες απαιτήσεις ενέργειας που απαιτούνται για τη λειτουργία της μονάδας επεξεργασίας γκρι νερού.

Τα σχετικά πλεονεκτήματα των εξετασμένων υποδομών διαχείρισης αστικών υδάτων φαίνονται συγκεντρωτικά στον Πιν. 9.

Πιν. 9: Πλεονεκτήματα υποδομών διαχείρισης αστικών υδάτων.

	<b>Μείωση ζήτησης πόσιμου</b>	<b>Μείωση όγκου ακαθάρτων</b>	<b>Μείωση απορροής ομβρίων</b>	<b>Κατανάλωση ενέργειας</b>
<b>LOW</b>	Υψηλή	Υψηλή	Χαμηλή	Χαμηλή
<b>GWH</b>	Μέτρια	Μέτρια	Χαμηλή	Υψηλή
<b>RWH</b>	Χαμηλή	Χαμηλή	Υψηλή	Μέτρια

## 11 Ανάγκες για περεταίρω έρευνα

Το νερό και η ενέργεια αποτελούν φυσικούς πόρους άρρηκτα συνδεδεμένους μεταξύ τους, για τη βιώσιμη διαχείριση των οποίων απαιτείται μια ολοκληρωμένη και συνδυαστική προσέγγιση προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι αλληλεπιδράσεις και συμβιβασμοί (trade-offs) μεταξύ τους (Hoff, 2011). Η σχέση νερού ενέργειας έχει ιδιαίτερη σημασία για τον αστικό υδατικό κύκλο και κατά συνέπεια και για τις υδατικές εταιρείες, καθώς η ενεργειακή κατανάλωση αποτελεί στην πλειοψηφία των περιπτώσεων το υψηλότερο λειτουργικό κόστος μετά το ανθρώπινο δυναμικό (Brandt et al., 2011).

Είναι σημαντικό να δοθεί έμφαση στην ποσοτικοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας σε όλες τις φάσεις του αστικού κύκλου νερού (πηγή, μεταφορά, επεξεργασία, μεταφορά πόσιμου νερού, τελική χρήση, επεξεργασία λυμάτων) (Retamal et al., 2011· Klein et al., 2005· Cohen et al., 2004) προκειμένου να γίνει εμπεριστατωμένη εκτίμηση της επίδρασης διαφόρων πολιτικών διαχείρισης. Συνεπώς είναι σκόπιμη η επέκταση της παρούσας ερευνητικής εργασίας μέχρι την πηγή καθώς και την τελική διάθεση των λυμάτων, έτσι ώστε να επιτευχθεί μια ολοκληρωμένη εκτίμηση των αλληλεπιδράσεων νερού και ενέργειας μέσα στον κύκλο αστικού νερού που θα επιτρέψει τον σχεδιασμό και την ιεράρχηση κατάλληλων παρεμβάσεων. Οι παρεμβάσεις αυτές αναφέρονται τόσο

στην παροχή πόσιμου νερού (εναλλακτικές πηγές υδροδότησης, αφαλάτωση, κτλ.) όσο και στην διαχείριση της ζήτησης (demand management measures).

Επίσης πέρα από τη μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας, είναι σημαντικό να διερευνηθεί περαιτέρω και η αξιοποίηση του ανανεώσιμου ενεργειακού δυναμικού μέσα στον αστικό υδατικό κύκλο. Η εξοικονόμηση ενέργειας σε συνδυασμό με την ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (π.χ. μικρά και μίνι υδροηλεκτρικά κατά μήκος των εξωτερικών υδραγωγείων και εσωτερικών δικτύων ύδρευσης, αντλιοσταμείωση, ανάκτηση ενέργειας στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, κτλ.) παρέχει τη δυνατότητα για μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος των συστημάτων αστικού νερού.

## 12 Συμπεράσματα

Σε αυτή τη μελέτη ένα μοντέλο χρήσης γης συνδυάστηκε με ένα μοντέλο αστικού κύκλου νερού για να χαρακτηρίσει και να ιεραρχήσει τις υφιστάμενες νέες τεχνολογίες και πρακτικές εξοικονόμησης νερού, καθώς και για να εκτιμήσει τα περιβαλλοντικά οφέλη από αυτές λαμβάνοντας υπόψη τις δυναμικές συνθήκες της περιοχής μελέτης. Η περιοχή της εφαρμογής ήταν η πεδιάδα των Μεσογείων, ένα ταχύτατα αναπτυσσόμενο προάστιο των Αθηνών. Τα συγκεκριμένα συμπεράσματα αυτής της μελέτης ήταν:

- i. Ιεράρχηση υποδομών διαχείρισης αστικών υδάτων στα Μεσόγεια Αθηνών. Η εγκατάσταση συσκευών χαμηλής κατανάλωσης είναι το μέτρο που πέτυχε την υψηλότερη μείωση ζήτησης πόσιμου νερού. Η ανακύκλωση του γκρι νερού πέτυχε μια μέση μείωση ενώ η συλλογή ομβρίων πέτυχε σχεδόν μηδενική μείωση. Όμως, η συλλογή ομβρίων είχε σημαντική μείωση του όγκου απορροής των της τάξης του 40% για πυκνοκατοικημένες περιοχές ενώ η μείωση έπεφτε στο 10% για αραιοκατοικημένες περιοχές. Τέλος η ενέργεια που απαιτούν τα συστήματα ανακύκλωσης γκρι νερού και συλλογής ομβρίων είναι υψηλότερη από αυτή της μηδενικής λύσης. Αντιθέτως η επιλογή συσκευών χαμηλής κατανάλωσης νερού συνοδεύεται και από μείωση της κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας.
- ii. Συνδυασμός υποδομών διαχείρισης αστικών υδάτων στα Μεσόγεια Αθηνών. Η ταυτόχρονη εφαρμογή δύο ή περισσότερων μέτρων διαχείρισης αστικών υδάτων είναι συμφέρουσα διότι επιτρέπει τη σύνθεση των επιμέρους οφελών από κάθε ένα από τα ξεχωριστά μέτρα (π.χ. εγκατάσταση των συσκευών χαμηλής κατανάλωσης νερού και συλλογής ομβρίων για τη μείωση τόσο της ζήτησης πόσιμου νερού όσο και της αιχμής της απορροής).

Πιο γενικά συμπεράσματα από αυτή την μελέτη είναι τα ακόλουθα:

- iii. Ιεράρχηση και χρονική ανάλυση των ζητήσεων. Εάν η ζήτηση αναμένεται να ξεπεράσει την ικανότητα ενός συμβατικού συστήματος αστικού κύκλου νερού σε κάποια ημερομηνία, τότε τα μέτρα θα πρέπει να προγραμματιστούν πολύ πριν από την ημερομηνία αυτή, λαμβάνοντας υπόψη ρεαλιστικούς ρυθμούς διείσδυσης των νέων τεχνολογιών και υλοποίησης απαιτούμενων μέτρων. Οι εμπειρογνώμονες μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα διαγράμματα της εξέλιξης της ζήτησης για εναλλακτικά μέτρα διαχείρισης αστικών υδάτων (π.χ. Σχήμα 20) που προέρχονται από το συνδυασμό ενός μοντέλου χρήσης γης με ένα μοντέλο αστικού κύκλου νερού για να σχεδιάσουν και να προγραμματίσουν τις στρατηγικές παρέμβασης.
- iv. Ιεράρχηση και χωρική ανάλυση των ζητήσεων. Ο συνδυασμός ενός αστικού μοντέλου κύκλου νερού με ένα μοντέλο χρήσης γης διευκολύνει το σχεδιασμό της αστικής ανάπτυξης διότι παρέχει εκτιμήσεις ανηγμένων απαιτήσεων για κάθε αστική περιοχή (στην παρούσα μελέτη τα όρια δήμου, αλλά σε γενικές γραμμές μπορεί να είναι άλλες περιοχές ενδιαφέροντος, για παράδειγμα , περιοχές που αντιστοιχούν στους κόμβους του δικτύου αποχέτευσης) συναρτήσει του χρόνου. Αυτό βοηθά τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων να καθορίσουν τόσο την εφαρμογή μέτρων που επιτυγχάνουν την καλύτερη συμβιβαστική λύση μεταξύ των διαφόρων δεικτών επίδοσης και να καθορίσει η ενδεδειγμένη θέση των απαιτούμενων δράσεων/παρεμβάσεων.
- v. Ιεράρχηση προτεραιοτήτων και αστικές ιδιότητες. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των μοντέλων χρήσης γης σε σχέση με τα τυπικά μοντέλα πληθυσμού είναι η ικανότητά τους να περιγράφουν ξεχωριστά τη δυναμική του κάθε τυπικού καταναλωτή. Αυτό παρείχε ένα καλύτερο επίπεδο λεπτομέρειας και την καλύτερη κατανόηση των παραμέτρων που καθορίζουν προβλήματα της διαχείρισης των αστικών υδάτων.

Η αυξανόμενη διαθεσιμότητα ανοιχτών γεωγραφικών πληροφοριών (δορυφορικές εικόνες και ορθοφωτοχάρτες, οδικοί χάρτες, χάρτες χρήση γης κλπ), σε συνδυασμό με τη διαλειτουργικότητα των σύγχρονων μαθηματικών εργαλείων (π.χ. Matlab, Octave κλπ) με τα σύγχρονα εμπορικά (π.χ. ArcGIS) ή open-source γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (π.χ. QGIS) παρέχουν εύκολη εφαρμογή προηγμένης χωρικής ανάλυσης και μεθόδων μοντελοποίησης. Αυτά μπορούν να εφαρμοστούν σε κάθε περιοχή ενδιαφέροντος για την παροχή προσαρμοσμένων λύσεων και παρεμβάσεων στις υφιστάμενες ή τις νέες αστικές περιοχές.

## 13 Αναφορές

- American Society of Civil Engineers and Water Pollution Control Federation. (1969). Design and Construction of Sanitary Storm Sewers, ASCE Manuals and Report on Engineering practice no. 37 and WPCF Manual of Practice no. 9.
- Benenson, I., and Torrens, P. M. (2004). Computers, Environment and Urban Systems. Vol. 28, no. 1-2, pp. 1-8, Jan.-Mar. 2004.
- Brandt, M., Middleton, R., Gordon Wheale and Schulting, F. (2011). Energy Efficiency in the Water Industry, a Global Research Project. Water Practice & Technology, 6 (2).
- Clarke, K.C. (2008). A Decade of Cellular Urban Modeling with SLEUTH: Unresolved Issues and Problems, Ch. 3 in Planning Support Systems for Cities and Regions (Ed. Brail, R. K., Lincoln Institute of Land Policy, Cambridge, MA, pp 47-60.
- Cohen, R., Nelson, B. and Wolff, G. (2004) NRDC: Energy Down the Drain: The Hidden Costs of California's Water Supply, 85; Pacific Institute, Oakland, California: Natural Resources Defense Council.
- Eartheasy (2012). Solutions for Sustainable Living, Low-Flow Aerators / Showerheads, available online at [http://eartheasy.com/live\\_lowflow\\_aerators.htm](http://eartheasy.com/live_lowflow_aerators.htm), accessed at June 2012.
- EEA (2012a). Population density disaggregated with Corine land cover 2000, Raster data on population density using Corine Land Cover 2000 inventory, available online at <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/population-density-disaggregated-with-corine-land-cover-2000-2>, accessed at June 2012.
- EEA (2012b), European Environment Agency, CORINE land cover: Part II.1 Nomenclature available online at [http://www.eea.europa.eu/en/publications/COR0-part2/land\\_coverPart2.1.pdf](http://www.eea.europa.eu/en/publications/COR0-part2/land_coverPart2.1.pdf), accessed July 2012.
- EEA (2011), European Environment Agency, Corine Land Cover 2000 raster data - version 13 (02/2010), available online at <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2000-raster>, accessed Apr. 2011.
- EEA. (2001). Sustainable water use in Europe: Part 2 – Demand management, Environmental issue report no. 19, © European Environment Agency, Copenhagen, 2001.
- ELSTAT (2012). Hellenic Statistical Authority, Dataset population/Demographic data, available online at <http://www.statistics.gr/portal/page/portal/ESYE/PAGE-database>, accessed at June 2012.

- ENERGY STAR (2012a). Clothes Washers for Consumers, available online at [http://www.energystar.gov/index.cfm?fuseaction=find\\_a\\_product.showProductGroup&pgw\\_code=CW](http://www.energystar.gov/index.cfm?fuseaction=find_a_product.showProductGroup&pgw_code=CW) accessed June 2012.
- ENERGY STAR (2012b). Dishwashers for Consumers, available online at [http://www.energystar.gov/index.cfm?fuseaction=find\\_a\\_product.showProductGroup&pgw\\_code=DW](http://www.energystar.gov/index.cfm?fuseaction=find_a_product.showProductGroup&pgw_code=DW), accessed June 2012.
- FreeMeteo (2011). Daily weather history for ATHINAI (AIRPORT), <http://freemeteo.com/>, Apr. 2011.
- Grant, N. (2006). Water conservation products, In Water Demand Management, Butler, D. and Memon, F. A. (Eds.), IWA Publishing, London, pp. 82 – 106.
- Grant, N. (2002). Best Practice water-efficient WCs, Nature in Vogue - Building For a Future, Autumn 2002.
- GreenWorks (2012), GreenWorks sustainable building solutions, Greywater Recycling Overview, available online at <http://www.greenworks.co.uk/grey-water-recycling.php>, accessed at June 2012.
- Hoff, H. (2011). Understanding the Nexus. Background Paper for the Bonn2011 Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus. Stockholm Environment Institute, Stockholm.
- Hydroscope Geoportal, (2011). Fourth-order administrative division – Municipalities, GML: SDE\_4thOrder.zip, available online at <http://thyamis.itia.ntua.gr:8080/geoportal/catalog/quicklink/quicklink.page>, accessed in Apr. 2011.
- Klein, G., Krebs, M., Hall, V., O'Brien, T. and Blevins, B. B. (2005). California's Water – Energy Relationship, 180; California Energy Commission.
- Ktimatologio, (2011). Orthophoto images, available online at <http://gis.ktimanet.gr/wms/ktbasemap/default.aspx>, accessed in Apr. 2011.
- Last, E., and Mackay, R. (2010). City Water Balance – A New Tool For Scoping Integrated Urban Water Management Options, IAHR European Congress, 2010.
- Liu, Y. (2009). Modelling Urban Development with Geographical Information Systems and Cellular Automata, New York: CRS Press Taylor & Francis Group, 2009.

- Makropoulos, C. and Butler, D. (2010). Distributed Water Infrastructure for Sustainable Communities, *Water Resources Management*, vol. 24, no. 11, pp. 2795-2816.
- Makropoulos, C., Butler, D. and Maksimovic, C. (2008), Building Decision Support Systems based on Fuzzy Inference, In: *Practical Hydroinformatics: Computational Intelligence and Technological Developments in Water Applications*, S. Abrahart, D. Solomatine, eds, Springer, 506p, ISBN: 978-3-540-79880-4, 2008.
- Makropoulos, C. K., Natsis, K., Liu, S., Mittas, K., and Butler, D. (2008), Decision support for sustainable option selection in integrated urban water management, *Environmental Modelling and Software*, vol. 23, no. 12, Dec. 2008, pp. 1448-1460.
- Makropoulos, C. and Butler, D. (2006). Spatial ordered weighted averaging: incorporating spatially variable attitude towards risk in spatial multi-criteria decision-making, *Environmental Modelling & Software* 21 (1), pp. 69-84.
- Mamdani, E. H., and Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller, *International Journal of Man-Machine Studies*, vol. 7, no. 1, pp. 1-13, Nov. 1975.
- Mantelas, L. , Prastacos, P., Hatzichristos, T. and Koutsopoulos, K. (2012). A Linguistic Approach to Model Urban Growth, *International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems (IJAEIS)*, vol . 3, no. 2, Jul. 2012.
- Mitchell, V., Mein, R. and McMahon, T. (2001). Modelling the urban water cycle, *Environmental Modelling and Software*, vol. 16, no. 7, Nov. 2001, pp. 615-629.
- Mitchell G. (2005). *Aquacycle User Guide*, aquacycle a daily urban water balance model, revision 1.2.1, February 2005.
- NTUA (2011), National Technical University of Athens Online Weather Data, Historical Data, <http://openmeteo.org/db/stations/d/1334/>, Apr. 2011.
- Κουτσογιάννης, Δ. (2011) Σχεδιασμός Αστικών Δικτύων Αποχέτευσης, Έκδοση 4, 180 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, p. 44.
- OpenStreetMap (2011), The Free Wiki World Map, available online at <http://www.openstreetmap.org/>, accessed in Apr. 2011.
- Pilgrim, D.H. and, Cordery, I. (1993). "Flood runoff", Chapter 9 of "Handbook of Hydrology", 9.1-9.42, McGraw-Hill, New York, 1993.



- Pinto N. and Antunes, A. P. (2007). CELLULAR AUTOMATA AND URBAN STUDIES: A LITERATURE SURVEY, ACE.
- Retamal, M., Abeysuriya, K., Turner, A., and White, S. (2008) WATER ENERGY NEXUS Literature Review, 45; Institute for Sustainable Futures, University of Technology Sydney.
- Rozos, E., and Makropoulos, C. (2012). Assessing the combined benefits of water recycling technologies by modelling the total urban water cycle, Urban Water Journal, 9 (1), doi:10.1080/1573062X.2011.630096, February 2012.
- Rozos, E., Baki, S., Bouziotas, D., and Makropoulos, C. (2011), Exploring the link between urban development and water demand: The impact of water-aware technologies and options, Computing and Control for the Water Industry (CCWI) 2011, Exeter, UK, CCWI2011-311, University of Exeter, 2011.
- Rozos, E., Makropoulos, C. K., and Butler, D. (2010). Design robustness of local water-recycling schemes, J. of Water Resources Planning and Management - ASCE, vol. 136, no. 5, Sep./Oct. 2010, pp. 531-538.
- White, R., and Engelen G. (1997). Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modelling, Environment and Planning B: Planning and Design 24(2), pp. 235-246.

## 14 APPENDIX

Ακολουθούν οι δημοσιεύσεις που έγιναν στα πλαίσια του ερευνητικού.