

«ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ»

ΠΑΡΑΔΟΤΕΟ 1

Αποτύπωση της κάλυψης γης σε υψηλή χωρική ανάλυση –
Εντοπισμός θερμών αστικών ενοτήτων



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκά Διαρθρωτικά
και Επενδυτικά Ταμεία



Αυτοτελές Τμήμα Διαχείρισης Δράσεων ΟΧΕ/ΒΑΑ
Ενδιάμεσος Φορέας Διαχείρισης ΕΠ «Αττική» 2014-
2020 της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΟ
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΑΤΤΙΚΗΣ



Με τη συγχρηματοδότησης της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

ΠΑΡΑΔΟΤΕΟ 1

Αποτύπωση της κάλυψης γης σε υψηλή χωρική ανάλυση – Εντοπισμός θερμών αστικών ενοτήτων

Παροχή υπηρεσίας εργαλείου μέτρησης περιβαλλοντικών δεικτών με αντικείμενο την καταγραφή του θερμικού περιβάλλοντος στον Δήμο Πειραιά προς υποστήριξη σχεδίων προσαρμογής στην αστική κλιματική αλλαγή καθώς και στη δημιουργία δεικτών παρακολούθησης του θερμικού περιβάλλοντος.

Η υπηρεσία υποστηρίζει την πράξη «Πιλοτικός μηχανισμός ενημέρωσης, πρόληψης, διαχείρισης και ευαισθητοποίησης, για τους κινδύνους που απορρέουν από τη κλιματική αλλαγή στο αστικό περιβάλλον του Πειραιά».

Ομάδα έργου:

Καρτάλης Κωνσταντίνος, Καθηγητής ΕΚΠΑ

Πολύδωρος Αναστάσιος, Φυσικός MSc

Ευχαριστούμε για την πολύτιμη συμβολή:

Αγαθαγγελίδης Ηλίας, Φυσικός PhD

Γωνιάδη Μαρία, Φυσικός MSc

Περιεχόμενα

Ευρετήριο Εικόνων.....	5
Ευρετήριο Πινάκων	7
Εισαγωγή	8
Γενικά.....	8
Διάρθρωση παραδοτέου.....	9
Μέρος Α. Αναγνώριση αλλαγών στην περιοχή μελέτης μέσω του διαχρονικού προσδιορισμού της κάλυψης γης	11
Α1.Κάλυψη γης.....	11
Α2. Μεθοδολογία	12
Α2.1 Δεδομένα Landsat	15
Α2.2 Δεδομένα Sentinel 2	16
Α2.3 Δεδομένα Pleiades	18
Α3. Δείκτες παρακολούθησης του αστικού περιβάλλοντος	19
Α3.1 Κανονικοποιημένος δείκτης βλάστησης NDVI	19
Α3.2 Κανονικοποιημένος δείκτης δόμησης NDBI	20
Α4. Παρουσίαση και ανάλυση αποτελεσμάτων.....	20
Α4.1. Αποτελέσματα δεδομένων Landsat	21
Α4.2. Αποτελέσματα δεδομένων Sentinel 2	26
Α4.3. Αποτελέσματα δεδομένων Pleiades	28
Α4.4. Δείκτες NDVI και NDBI.....	29
Α5. Ενσωμάτωση στη Διαδικτυακή Πύλη Γεωχωρικών Πληροφοριών του Δήμου Πειραιά.....	34
Μέρος Β. Ανάλυση του θερμικού περιβάλλοντος της περιοχής μελέτης.....	35
Β1. Θερμικό περιβάλλον.....	35
Β2. Δορυφορική Τηλεπισκόπηση και θερμικό περιβάλλον	36
Β2.1. Διαχρονική μελέτη του θερμικού περιβάλλοντος.....	36
Β2.2. Μελέτη της ετήσιας μεταβολής της Ε.Θ.Ε	39
Β2.3. Μελέτη της ενδοημερήσιας μεταβολής της Επιφανειακής Θερμοκρασίας Εδάφους.....	48
Β2.4. Εντοπισμός θερμικών αστικών ενοτήτων	55

B2.5. Σχέση Επιφανειακής Θερμοκρασίας Εδάφους και αστικού πρασίνου στο Δήμο Πειραιά.....	57
B2.6 Προσομοίωση της θερμοκρασίας του αέρα με τη χρήση μικροκλιματικού μοντέλου	58
Γ. Καταληκτικά σχόλια	66

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1. Ταξινομημένη εικόνα κάλυψης γης για το Δήμο Πειραιά μετά από ψηφιακή επεξεργασία δορυφορικής εικόνας Sentinel 2.	12
Εικόνα 2. Χρονοσειρά δορυφορικών εικόνων για τη μελέτη της κάλυψης γης του Δήμου Πειραιά.	14
Εικόνα 3. Ταξινομημένη εικόνα κάλυψης γης για το Δήμο Πειραιά μετά από ψηφιακή επεξεργασία δορυφορικής εικόνας Landsat.	16
Εικόνα 5. Ταξινομημένη εικόνα κάλυψης γης για το Δήμο Πειραιά μετά από ψηφιακή επεξεργασία δορυφορικής εικόνας Pleiades.	18
Εικόνα 6. Κάλυψη γης του Δήμου Πειραιά το έτος 1985 από δεδομένα Landsat.	22
Εικόνα 7. Κάλυψη γης του Δήμου Πειραιά το έτος 1990 από δεδομένα Landsat.	22
Εικόνα 8. Κάλυψη γης του Δήμου Πειραιά το έτος 1995 από δεδομένα Landsat.	23
Εικόνα 9. Κάλυψη γης του Δήμου Πειραιά το έτος 2000 από δεδομένα Landsat.	23
Εικόνα 10. Κάλυψη γης του Δήμου Πειραιά το έτος 2005 από δεδομένα Landsat.	24
Εικόνα 11. Κάλυψη γης του Δήμου Πειραιά το έτος 2010 από δεδομένα Landsat.	24
Εικόνα 12. Κάλυψη γης του Δήμου Πειραιά το έτος 2015 από δεδομένα Landsat.	25
Εικόνα 13. Κάλυψη γης του Δήμου Πειραιά το έτος 2020 από δεδομένα Landsat.	25
Εικόνα 14. Κάλυψη γης του Δήμου Πειραιά το έτος 2020 από δεδομένα Sentinel 2.	27
Εικόνα 15. Κάλυψη γης του Δήμου Πειραιά το έτος 2021 από δεδομένα Pleiades.	29
Εικόνα 16. Χωρική κατανομή του δείκτη βλάστησης NDVI το 1990.	30
Εικόνα 17. Χωρική κατανομή του δείκτη βλάστησης NDVI το 2000.	30
Εικόνα 18. Χωρική κατανομή του δείκτη βλάστησης NDVI το 2010.	31
Εικόνα 19. Χωρική κατανομή του δείκτη βλάστησης NDVI το 2020.	31
Εικόνα 20. Χωρική κατανομή του δείκτη δόμησης NDBI το 1990.	32
Εικόνα 21. Χωρική κατανομή του δείκτη δόμησης NDBI το 2000.	32
Εικόνα 22. Χωρική κατανομή του δείκτη δόμησης NDBI το 2010.	33
Εικόνα 23. Χωρική κατανομή του δείκτη δόμησης NDBI το 2020.	33
Εικόνα 24. Επιφανειακή θερμοκρασία του εδάφους το έτος 1990.	37
Εικόνα 25. Επιφανειακή θερμοκρασία του εδάφους το έτος 2000.	37
Εικόνα 26. Επιφανειακή θερμοκρασία του εδάφους το έτος 2010.	38
Εικόνα 27. Επιφανειακή θερμοκρασία του εδάφους το έτος 2020.	38
Εικόνα 28. Χωρική κατανομή της Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 17/04/2020.	40
Εικόνα 29. Χωρική κατανομή της Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 04/06/2020.	40
Εικόνα 30. Χωρική κατανομή της Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 22/07/2020.	41
Εικόνα 31. Χωρική κατανομή της Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 23/08/2020.	41
Εικόνα 32. Χωρική κατανομή της Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 08/09/2020.	42
Εικόνα 33. Χωρική κατανομή της Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 26/10/2020.	43
Εικόνα 34. Χωρική κατανομή της Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 27/11/2020.	43
Εικόνα 35. Χωρική κατανομή της Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 14/01/2021.	44

Εικόνα 36. Χωρική κατανομή της Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 20/04/2021.....	45
Εικόνα 37. Χωρική κατανομή της Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 22/05/2021.....	45
Εικόνα 38. Χωρική κατανομή της Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 07/06/2021.....	46
Εικόνα 39. Χωρική κατανομή της Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 25/07/2021.....	46
Εικόνα 40. Χωρική κατανομή της Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 10/08/2021.....	47
Εικόνα 41. Χωρική κατανομή της Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 11/09/2021.....	47
Εικόνα 42. Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 10/06/2020 (αριστερά: πρωί, δεξιά: βράδυ)..	50
Εικόνα 43. Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 21/06/2020 (αριστερά: πρωί, δεξιά: βράδυ)..	51
Εικόνα 44. Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 27/06/2020 (αριστερά: πρωί, δεξιά: βράδυ)..	51
Εικόνα 45. Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 02/07/2020 (αριστερά: πρωί, δεξιά: βράδυ)..	52
Εικόνα 46. Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 10/07/2020 (αριστερά: πρωί, δεξιά: βράδυ)..	52
Εικόνα 47. Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 20/07/2020 (αριστερά: πρωί, δεξιά: βράδυ)..	53
Εικόνα 48. Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 30/07/2020 (αριστερά: πρωί, δεξιά: βράδυ)..	53
Εικόνα 49. Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 12/08/2020 (αριστερά: πρωί, δεξιά: βράδυ)..	54
Εικόνα 50. Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 22/08/2020 (αριστερά: πρωί, δεξιά: βράδυ)..	54
Εικόνα 51. Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 31/08/2020 (αριστερά: πρωί, δεξιά: βράδυ)..	55
Εικόνα 52. Hot spots κατά τις πρωινές ώρες στο Δήμο Πειραιά.....	56
Εικόνα 53. Hot spots κατά τις νυχτερινές ώρες στον Δήμο Πειραιά.....	57
Εικόνα 54. Γραμμική συσχέτιση Ε.Θ.Ε. και δείκτη NDVI για τις περιοχές με πράσινο...	58
Εικόνα 55. Περιοχή προσομοίωσης.	59
Εικόνα 56. Παρεμβάσεις που προσομοιώθηκαν	60
Εικόνα 57. Θερμοκρασία αέρα στις 10.00 (χωρίς παρεμβάσεις).....	61
Εικόνα 58. Θερμοκρασία αέρα στις 10.00 (με παρεμβάσεις).....	61
Εικόνα 59. Θερμοκρασία αέρα στις 12.00 (χωρίς παρεμβάσεις).....	62
Εικόνα 60. Θερμοκρασία αέρα στις 12.00 (με παρεμβάσεις).....	62
Εικόνα 61. Θερμοκρασία αέρα στις 14.00 (χωρίς παρεμβάσεις).....	63
Εικόνα 62. Θερμοκρασία αέρα στις 14.00 (με παρεμβάσεις).....	63
Εικόνα 63. Θερμοκρασία αέρα στις 16.00 (χωρίς παρεμβάσεις).....	64
Εικόνα 64. Θερμοκρασία αέρα στις 16.00 (με παρεμβάσεις).....	64
Εικόνα 65. Θερμοκρασία αέρα στις 18.00 (χωρίς παρεμβάσεις).....	65
Εικόνα 66. Θερμοκρασία αέρα στις 18.00 (με παρεμβάσεις).....	65

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1. Δορυφορικά δεδομένα που επιλέχθηκαν για τη διαχρονική μελέτη κάλυψης γης του Δήμου Πειραιά	13
Πίνακας 2. Ποσοστά δομημένων επιφανειών και βλάστησης στο Δήμο Πειραιά	21
Πίνακας 3. Ποσοστά κάλυψης γης του Δήμου Πειραιά από τα δεδομένα Sentinel 2	27
Πίνακας 4. Δορυφορικά δεδομένα Landsat 8 για την ετήσια μελέτη της Ε.Θ.Ε. του Δήμου Πειραιά.....	39
Πίνακας 5. Κατάλογος δορυφορικών δεδομένων Sentinel 3 που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη.	49

Εισαγωγή

Γενικά

Με το παρόν παραδοτέο ολοκληρώνεται εμπρόθεσμα η πρώτη περίοδος της σύμβασης παροχής υπηρεσίας εργαλείου μέτρησης περιβαλλοντικών δεικτών με αντικείμενο την καταγραφή του θερμικού περιβάλλοντος στον Δήμο Πειραιά για:

- (α) την υποστήριξη σχεδίων προσαρμογής στην αστική κλιματική αλλαγή και
- (β) τη δημιουργία δεικτών παρακολούθησης του θερμικού περιβάλλοντος για την υποστήριξη της πράξης «Πιλοτικός Μηχανισμός Ενημέρωσης, Πρόληψης, Διαχείρισης και Ευαισθητοποίησης, για τους κινδύνους που απορρέουν από την κλιματική αλλαγή στο Αστικό περιβάλλον του Πειραιά» με κωδικό ΟΠΣ (MIS) 5047883.

Σκοπός της παρούσας υπηρεσίας, που διενεργείται σε δυο φάσεις, είναι η υποστήριξη του Πιλοτικού Μηχανισμού για τη λήψη αποφάσεων που αφορούν τις δράσεις, τα μέτρα, τα μελλοντικά εργαλεία και τις πηγές δεδομένων για την υλοποίηση του Σχεδίου προσαρμογής για το έργο «Πιλοτικός Μηχανισμός, Ενημέρωσης, Πρόληψης, Διαχείρισης και Ευαισθητοποίησης Κλιματικών Κινδύνων στο Αστικό Περιβάλλον του Πειραιά».

Αντικείμενο της παρεχόμενης υπηρεσίας είναι η αποτύπωση της κατάστασης του αστικού περιβάλλοντος στον Δήμο Πειραιά. Η προσφερόμενη υπηρεσία επικεντρώνεται στο θερμικό περιβάλλον και στη ποιότητα του αέρα. Σκοπός είναι ο χωρικός εντοπισμός περιβαλλοντικών και κλιματικών πιέσεων και κινδύνων και η αποτίμηση της έντασης τους καθώς επίσης και η ανάπτυξη δεικτών παρακολούθησης της ποιότητας του περιβάλλοντος.

Το παρόν παραδοτέο με τίτλο «Αποτύπωση της κάλυψης γης σε υψηλή χωρική ανάλυση – Εντοπισμός θερμών αστικών ενοτήτων» περιλαμβάνει την αναγνώριση αλλαγών στην περιοχή μελέτης μέσω του διαχρονικού προσδιορισμού της κάλυψης γης (Land Cover) και την ανάλυση του θερμικού περιβάλλοντος της περιοχής μελέτης. Αξιοποιήθηκαν δορυφορικές εικόνες Pleiades, SENTINEL 2 και Landsat για τον προσδιορισμό μέσω τεχνικών ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας, της κάλυψης γης σε διακριτές τάξεις που σχετίζονται με το αστικό περιβάλλον. Επίσης αξιοποιήθηκαν δορυφορικές εικόνες στο θερμικό υπέρυθρο από τους δορυφόρους Landsat και Sentinel 3 ώστε να εντοπισθούν θερμές αστικές ενότητες, δηλαδή περιοχές εντός του αστικού ιστού που συστηματικά εμφανίζουν υψηλότερες θερμοκρασίες επιφανείας εδάφους σε σύγκριση με τις γειτονικές. Το κύριο διάστημα εφαρμογής των ανωτέρω μεθοδολογιών αφορά την τριακονταετία 1990-2020.

Στη δεύτερη φάση της μελέτης (Π2) η ομάδα έργου θα βασιστεί στα αποτελέσματα του παρόντος παραδοτέου ώστε :

1. Να διερευνηθεί η σύνδεση των θερμών αστικών ενοτήτων με κρίσιμες υποδομές του Δήμου Πειραιά,
2. Να διερευνηθεί η σύνδεση της θερμοκρασίας του αέρα και της επιφανειακής θερμοκρασίας με την αέρια ρύπανση
3. Να αναπτυχθούν περιβαλλοντικοί δείκτες

Συνολικά το έργο θα επιτρέψει στο Δήμο Πειραιά να καταγράψει τις κλιματικές και περιβαλλοντικές πιέσεις που δέχεται, να αναπτύξει ένα σύστημα παρακολούθησης της κατάστασης του αστικού περιβάλλοντος και να υποστηρίξει σχέδια προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή μέσα από στοχευμένες παρεμβάσεις στον αστικό ιστό και στις αστικές λειτουργίες.

Διάρθρωση παραδοτέου

Το παραδοτέο διαρθρώνεται σε δυο μέρη. Στο πρώτο μέρος παρουσιάζεται η 1^η φάση της μελέτης του αστικού περιβάλλοντος του Δήμου Πειραιά και αφορά στην αναγνώριση αλλαγών στη περιοχή μελέτης μέσω του διαχρονικού προσδιορισμού της κάλυψης Γης (Land Cover). Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται δορυφορικές εικόνες SENTINEL 2 και Landsat με χωρικές διακριτικές ικανότητες 10m x 10m και 30m x 30m αντίστοιχα για τον προσδιορισμό μέσω ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας (και της χρήσης λογισμικών επεξεργασίας δορυφορικών δεδομένων SNAP, ERDAS και QGIS) της κάλυψης γης και της ταξινόμησης αυτής σε διακριτές τάξεις που σχετίζονται με το αστικό περιβάλλον.

Ειδικότερα στο διάστημα 1990-2010 χρησιμοποιούνται εικόνες από τις αποστολές Landsat, ενώ για το διάστημα 2015-2020 χρησιμοποιούνται εικόνες και από τον SENTINEL 2. Επιπροσθέτως για δύο συγκεκριμένες ημερομηνίες χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα PLEIADES με χωρική ανάλυση 0.5m x 0.5m που παρείχε η εταιρεία GEOSPATIAL ENABLING TECHNOLOGIES (GET) στο πλαίσιο υποστήριξης του Πιλοτικού Μηχανισμού.

Με βάση την ως άνω ανάλυση εκτιμήθηκε σε ποσοστιαία βάση η κάλυψη γης, γεγονός που επιτρέπει τον εντοπισμό αιτιών διαμόρφωσης ακραίων θερμικών συνθηκών. Επιπροσθέτως, εξήχθησαν πληροφορίες σε ότι αφορά στο ρυθμό αστικότητας και αστικής επέκτασης που έχει προκύψει στο Δήμο Πειραιά κατά τα τελευταία 30 έτη. Χρησιμοποιήθηκαν επίσης διαθέσιμα κτηματολογικά στοιχεία ώστε να ενισχυθεί η προσφερόμενη πληροφορία σε ακόμα βελτιωμένη λεπτομέρεια αλλά και για να διασταυρωθεί η ακρίβεια των εξαγόμενων πληροφοριών.

Στο δεύτερο μέρος του παραδοτέου παρουσιάζεται η δεύτερη φάση της μελέτης που αφορά την ανάλυση του θερμικού περιβάλλοντος του Δήμου Πειραιά. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται δορυφορικές εικόνες στο θερμικό υπέρυθρο από τους δορυφόρους Landsat (σε χωρική διακριτική ικανότητα 30m x 30m) και το δορυφόρο Sentinel 3 (σε χωρική διακριτική ικανότητα 100m x 100m έπειτα την εφαρμογή μεθοδολογίας για τον υποβιβασμό κλίμακας). Τα δεδομένα επιφανειακής θερμοκρασίας που εξήχθησαν αναλύονται στατιστικά ώστε να εντοπισθούν οι θερμές αστικές ενότητες (spots), δηλαδή περιοχές εντός του αστικού ιστού που συστηματικά εμφανίζουν υψηλότερες θερμοκρασίες επιφανείας εδάφους σε σύγκριση με τις γειτονικές. Στο πλαίσιο της μελέτης εξετάζεται και η σχέση μεταξύ της επιφανειακής θερμοκρασία εδάφους με την χωρική κατανομή πρασίνου.

Το παραδοτέο 1 αποτελεί ένα κείμενο βάσης για το Δήμο Πειραιά, στο οποίο μπορεί να ανατρέχει το αρμόδιο κατά περίπτωση στελεχιακό δυναμικό του Δήμου για την υποστήριξη αναγκών σχεδιασμού.

Μέρος Α. Αναγνώριση αλλαγών στην περιοχή μελέτης μέσω του διαχρονικού προσδιορισμού της κάλυψης γης

Το περιβάλλον διακρίνεται σε φυσικό και ανθρωπογενές. Το πιο χαρακτηριστικό είδος ανθρωπογενούς περιβάλλοντος αποτελεί το αστικό περιβάλλον καθώς αυτό διαμορφώνεται κυρίως από τις ανθρωπίνες δραστηριότητες αλλά επίσης σε αυτό ζει το μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού.

Η παρακολούθηση των διαχρονικών αλλαγών κάλυψης/χρήσεων γης, εντός των ορίων (αλλά και στις ευρύτερες περιοχές) σημαντικών πολεοδομικών συγκροτημάτων όπως ο Δήμος Πειραιά συνδέεται άμεσα με το χωροταξικό και πολεοδομικό σχεδιασμό αλλά και με τη μελέτη και την επιλογή δράσεων προσαρμογής στην αστική κλιματική αλλαγή. Παράλληλα δίνεται η δυνατότητα για την αξιολόγηση μέτρων χωρικής πολιτικής που εφαρμόστηκαν αλλά και υποστηρίζεται η κατάρτιση χωρικών σχεδίων και μέτρων προστασίας του φυσικού και ανθρωπογενούς περιβάλλοντος. Ιδιαίτερη σημασία έχει η δυνατότητα για τη σύνδεση των αλλαγών στη κάλυψη γης με αλλαγές στο αστικό μικροκλίμα.

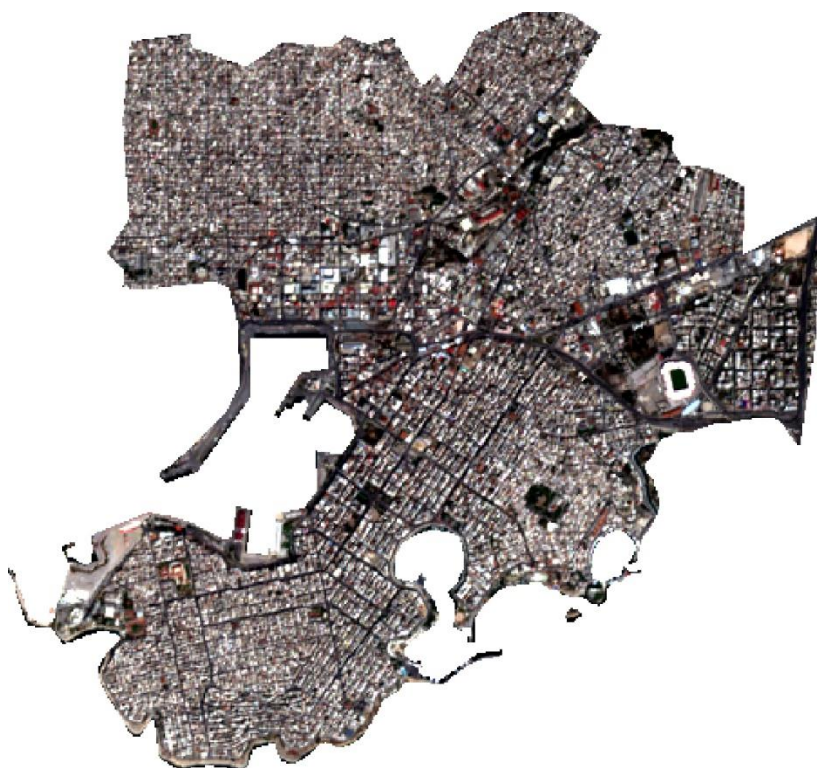
Α1.Κάλυψη γης

Η κάλυψη γης (land cover), με την ευρεία έννοια, αφορά στην κατηγοριοποίηση των διάφορων φυσικών και ανθρωπογενών στοιχείων του εδάφους. Η βλάστηση, το αστικό πλέγμα, οι δρόμοι και άλλα πολλά, αποτελούν διακριτές κατηγορίες κάλυψης γης. Είναι σημαντικό να διαχωριστεί η έννοια της κάλυψης γης από την έννοια της χρήσης γης (land use) η οποία αναφέρεται στον τρόπο χρήσης της γης από τον άνθρωπο, συνήθως με έμφαση στο λειτουργικό ρόλο της γης στις οικονομικές δραστηριότητες. Η χρήση γης αποτελεί αφηρημένη έννοια σε αντίθεση με τη κάλυψη γης που είναι μια έννοια με συγκεκριμένα και μετρήσιμα χαρακτηριστικά και συνεπώς αποτελεί αντικείμενο άμεσης παρατήρησης.

Οι δορυφορικές εικόνες προσφέρουν σημαντικές πληροφορίες για την επιφάνεια της γης, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών. Ιδιαίτερα η παρατήρηση των πόλεων από το διάστημα είναι πολύτιμη, καθώς επιτρέπει την διαχρονική μελέτη του αστικού περιβάλλοντος με εύκολο και χαμηλού κόστους τρόπο. Με τη βοήθεια των δορυφορικών εικόνων παράγονται υψηλής ακρίβειας χάρτες κάλυψης γης, καθώς η πληροφορία για την κάλυψη γης ερμηνεύεται άμεσα από τα στοιχεία που είναι ορατά στις εικόνες.

A2. Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία για τη χαρτογράφηση της κάλυψης γης βασίστηκε στη παραγωγή θεματικών χαρτών από δορυφορικές εικόνες, με τους χάρτες να περιέχουν ποιοτική πληροφορία για τους τύπους κάλυψης γης του Δήμου Πειραιά. Οι θεματικοί χάρτες παρήχθησαν με τη μέθοδο της πολυφασματικής ταξινόμησης σύμφωνα με την οποία τα εικονοστοιχεία της δορυφορικής εικόνας (Εικόνα 1) ταξινομούνται σε τάξεις με βάση τα φασματικά τους χαρακτηριστικά στα διάφορα κανάλια που συνθέτουν την εικόνα. Η ψηφιακή τιμή κάθε εικονοστοιχείου σε κάθε κανάλι καθορίζεται από την ακτινοβολία που ανακλάται ή εκπέμπεται στην αντίστοιχη φασματική περιοχή, το ποσό της οποίας εξαρτάται από το είδος της κάλυψης του εδάφους. Κατά συνέπεια οι τάξεις που προκύπτουν από τη ταξινόμηση της εικόνας αντιστοιχούν σε τύπους κάλυψης γης.



Εικόνα 1. Ταξινομημένη εικόνα κάλυψης γης για το Δήμο Πειραιά μετά από ψηφιακή επεξεργασία δορυφορικής εικόνας Sentinel 2.

Για την παραγωγή των χαρτών κάλυψης γης ακολουθήθηκαν επτά διαδοχικά στάδια:

α. Επιλογή των εικόνων.

Η επιτυχία της ταξινόμησης για τη χαρτογράφηση της κάλυψης γης εξαρτάται από την επιλογή της κατάλληλης ημέρας και της εποχής λήψης των δορυφορικών εικόνων της

περιοχής ενδιαφέροντος. Οι εικόνες επιλέχθηκαν ώστε ο διαχωρισμός των τάξεων που θα δημιουργηθεί να είναι ο μέγιστος δυνατός αλλά και να αντιστοιχούν στη ίδια περίοδο του έτους ώστε να είναι δυνατή η άμεση σύγκρισή τους.

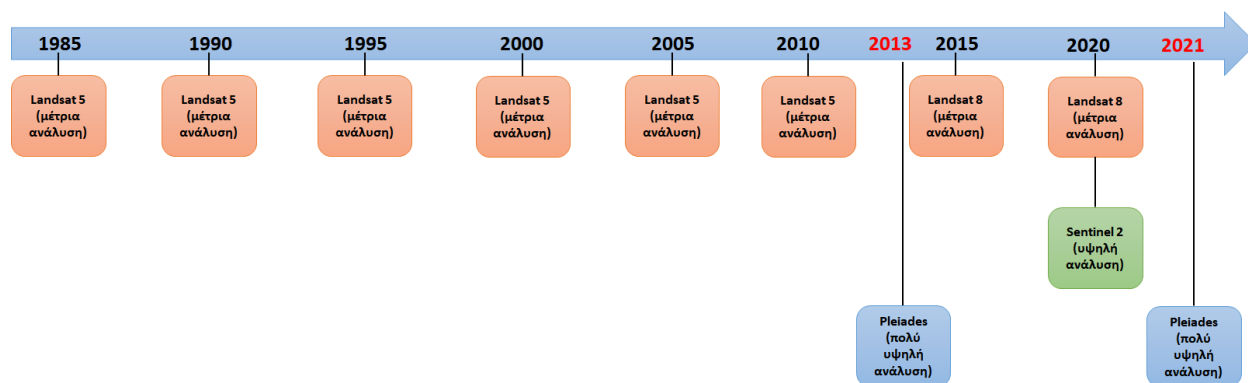
Σημαντικό στοιχείο που λήφθηκε υπόψη για την επιλογή των δεδομένων είναι και η διαθεσιμότητα τους. Ελευθέρως διαθέσιμα δεδομένα από τις δορυφορικές αποστολές Landsat κρίνονται κατάλληλα για τη μελέτη του αστικού περιβάλλοντος αφού η διαθέσιμη χρονοσειρά ξεπερνά τα 30 έτη ενώ η χωρική ανάλυση των 30m x 30m είναι αποδεκτή. Παράλληλα κρίθηκε σκόπιμο να χρησιμοποιηθούν και ελεύθερα διαθέσιμα δεδομένα από τη νέα γενιά δορυφόρων του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος Sentinel 2 τα οποία έχουν υψηλή χωρική ανάλυση (10m x 10m) αλλά είναι διαθέσιμα από το έτος 2016. Τα δεδομένα αυτά θα αποτελέσουν τη κύρια πηγή πληροφορίας για τη κάλυψη γης στο μέλλον σε Πανευρωπαϊκό επίπεδο οπότε η παρούσα μελέτη αποτελεί το έναυσμα για τη διαχρονική μελέτη των αλλαγών κάλυψης γης του Δήμου Πειραιά. Τέλος, η διάθεση εμπορικών δορυφορικών δεδομένων πολύ υψηλής χωρικής ανάλυσης (0.5m x 0.5m) Pleiades από την εταιρεία GEOSPATIAL ENABLING TECHNOLOGIES (GET) επέτρεψε την λεπτομερή καταγραφή της κάλυψης γης στο Δήμο Πειραιά.

Για τη μελέτη της διαχρονικής αναγνώρισης της κάλυψης γης του Δήμου Πειραιά χρησιμοποιήθηκαν ελεύθερα διαθέσιμα δεδομένα Landsat 5 για τη περίοδο 1990-2010, Landsat 8 για τη περίοδο 2015-2020, Sentinel 2 για το έτος 2020 και εμπορικά διαθέσιμα δεδομένα Pleiades για τα έτη 2013 και 2021 (Πίνακας 1).

Πίνακας 1. Δορυφορικά δεδομένα που επιλέχθηκαν για τη διαχρονική μελέτη κάλυψης γης του Δήμου Πειραιά

Δορυφόρος	Ημερομηνία
Landsat 5	23/08/1985
Landsat 5	21/08/1990
Landsat 5	19/08/1995
Landsat 5	16/08/2000
Landsat 5	14/08/2005
Landsat 5	12/08/2010
Landsat 8	26/08/2015
Landsat 8	23/08/2020
Sentinel 2	23/08/2020
Pleiades	26/04/2013
Pleiades	05/07/2021

Η χρονοσειρά δορυφορικών εικόνων που επιλέχτηκε συνοψίζεται στην Εικόνα 2.



Εικόνα 2. Χρονοσειρά δορυφορικών εικόνων για τη μελέτη της κάλυψης γης του Δήμου Πειραιά.

β. Προεπεξεργασία.

Η συλλογή των κατάλληλων δορυφορικών δεδομένων είναι απαραίτητη προϋπόθεση για μια επιτυχή ταξινόμηση κάλυψης γης. Τα δεδομένα Landsat ανακτήθηκαν δωρεάν από τον διαδικτυακό αποθετήριο του Αμερικάνικου οργανισμού γεωλογικής επισκόπησης USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov>) και αφορούν δεδομένα επιπέδου 2 (Landsat Collection 2 Level-2 Science Products¹) δηλαδή ατμοσφαιρικά διορθωμένα προϊόντα.

Τα δεδομένα Sentinel 2 ανακτήθηκαν δωρεάν από το διαδικτυακό αποθετήριο του Ευρωπαϊκού προγράμματος Copernicus (<https://scihub.copernicus.eu>) και αφορούν δεδομένα επιπέδου 2 (Sentinel 2 Level-2A²) δηλαδή ατμοσφαιρικά διορθωμένα προϊόντα.

γ. Επιλογή της μεθόδου ταξινόμησης.

Η επιλογή της μεθόδου ταξινόμησης συνήθως εξαρτάται από την γνώση της περιοχής μελέτης, τον αριθμό και τα χαρακτηριστικά των τάξεων που απαιτούνται. Η εμπειρία της ομάδας έργου στη μελέτη του αστικού περιβάλλοντος της Αττικής με τη χρήση δορυφορικών δεδομένων επέτρεψε την επιλογή της επιβλεπόμενης ταξινόμησης ως καταλληλότερης για το Δήμο Πειραιά.

¹Για περισσότερες πληροφορίες: <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-collection-2-level-2-science-products>

²Για περισσότερες πληροφορίες: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/processing-levels/level-2>

Στην επιβλεπόμενη ταξινόμηση, ο μελετητής στηρίζεται στην ικανότητα αναγνώρισης των εκπαιδευτικών πολυγώνων (training sites) και την a priori γνώση της κάλυψης γης για να βοηθήσει το λογισμικό επεξεργασίας εικόνας να καθορίσει τα στατιστικά κριτήρια για την ταξινόμηση της περιοχής μελέτης.

Η συγκεκριμένη μέθοδος ταξινόμησης κρίθηκε ως η καταλληλότερη καθώς ο Δήμος Πειραιά εμφανίζει μικρό σχετικά αριθμό τύπων κάλυψης γης, ενώ παράλληλα δίνεται η δυνατότητα για επιλογή διακριτών και ευμεγεθών πολυγώνων εκπαίδευσης. Μέσω της επιβλεπόμενης ταξινόμησης του Δήμου Πειραιά έγινε η καλύτερη δυνατή αναπαράσταση της κάλυψης γης κάτι το οποίο οφείλεται κυρίως στον τρόπο επιλογής των πεδίων εκπαίδευσης για την επιβλεπόμενη ταξινόμηση.

δ. Στάδιο της αξιολόγησης του χάρτη.

Οι τελικοί χάρτες κάλυψης γης αξιολογήθηκαν ως προς την αξιοπιστία τους. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν διαθέσιμες αεροφωτογραφίες υψηλής ανάλυσης και κτηματολογικά δεδομένα.

A2.1 Δεδομένα Landsat

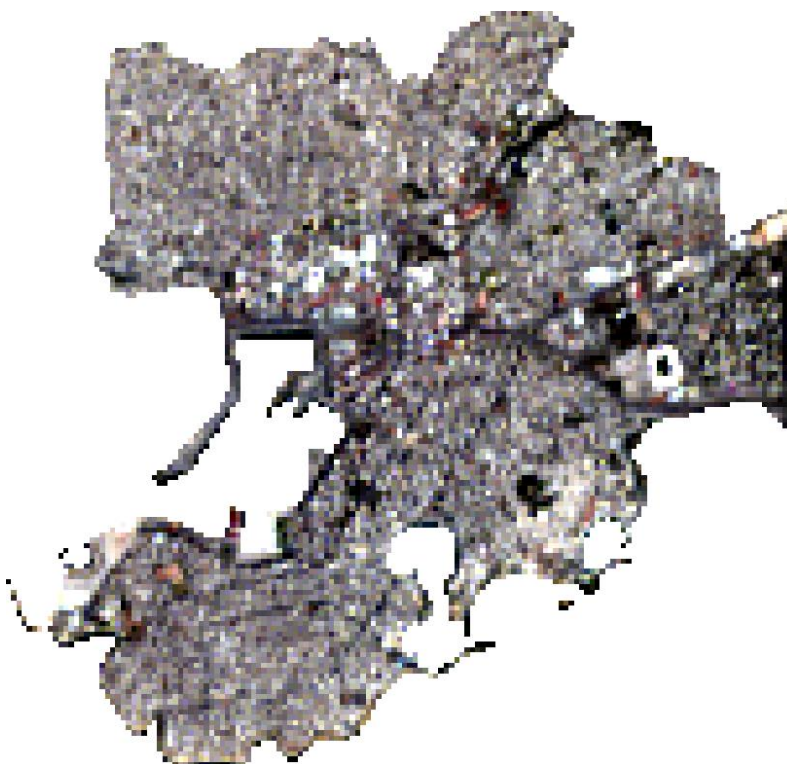
Οι δορυφόροι Landsat μπορούν να ομαδοποιηθούν σε 3 κατηγορίες με βάση τα χαρακτηριστικά των αισθητήρων που φέρουν:

- Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τους δορυφόρους Landsat 1,2,3 που ήταν εξοπλισμένοι μόνο με τον πολυφασματικό σαρωτή (MSS), που κατέγραφε δεδομένα σε 4 φασματικές ζώνες (2 στο ορατό και 2 στο εγγύς υπέρυθρο).
- Τη δεύτερη κατηγορία συνιστούν οι δορυφόροι Landsat 4,5,6,7 που ήταν εξοπλισμένοι με το θεματικό χαρτογράφο (TM) ή τον ενισχυμένο θεματικό χαρτογράφο (ETM+), έχοντας βελτιωμένη χωρική και ραδιομετρική ανάλυση. Επιπλέον, προστέθηκαν δύο ακόμη ζώνες καταγραφής στα μήκη κύματος του θερμικού υπέρυθρου και μέσου υπέρυθρου.
- Η τρίτη κατηγορία αποτελείται από τον Landsat 8 που είναι εξοπλισμένος με τους αισθητήρες OLI (Operational Land Imager) και TIRS (Thermal Infrared sensor). Ο αισθητήρας OLI έχει αυξημένη τη φασματική ανάλυση με την προσθήκη δύο ακόμη φασματικών ζωνών και ο αισθητήρας TIRS έχει μία επιπλέον ζώνη στο θερμικό υπέρυθρο. Ο δορυφόρος Landsat 9 που ανήκει στην ίδια κατηγορία εκτοξεύτηκε το 2021 και θα συνεχίσει την παρακολούθηση της γης για το πρόγραμμα συμπληρωματικά με τον Landsat 8.

Το αρχείο Landsat είναι η μεγαλύτερη χρονικά συλλογή μεσαίας ανάλυσης δορυφορικών δεδομένων και διατίθεται δωρεάν σε οποιονδήποτε μέσω της ιστοσελίδας

<https://earthexplorer.usgs.gov>. Τα προϊόντα που παρέχονται από το πρόγραμμα Landsat είναι 16-bit εικόνες σε μορφή GeoTIFF. Πρακτικά, πρόκειται για τη κλασσική μορφή εικόνων TIFF σε συνδυασμό με την απαραίτητη πληροφορία γεωαναφοράς. Το σύστημα αναφοράς που χρησιμοποιείται είναι το παγκόσμιο γεωδαιτικό σύστημα (WGS84) στο προβολικό σύστημα UTM. Επιπλέον, τα τελικά δεδομένα που παράγονται και είναι διαθέσιμα έχουν υποστεί γεωμετρική επεξεργασία μέσω κυβικής συνέλιξης (cubic convolution) και είναι προσανατολισμένα προς το βορρά.

Η χωρική ανάλυση των εικόνων Landsat είναι ικανοποιητική για την ανίχνευση και παρακολούθηση των αλλαγών στην κάλυψη γης που οφείλονται στην ανθρωπογενή δραστηριότητα, με επαρκή κάλυψη για μεγάλου εύρους εφαρμογές όπως αποτυπώνεται στην Εικόνα 3 για το Δήμο Πειραιά.



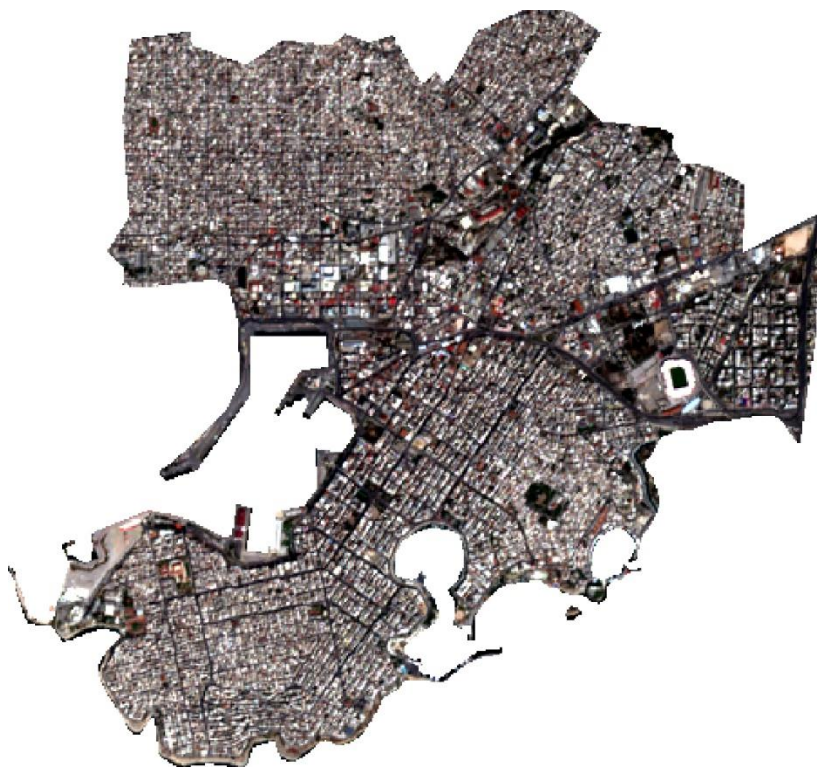
Εικόνα 3. Ταξινομημένη εικόνα κάλυψης γης για το Δήμο Πειραιά μετά από ψηφιακή επεξεργασία δορυφορικής εικόνας Landsat.

A2.2 Δεδομένα Sentinel 2

Οι δορυφορικές αποστολές Sentinel εντάσσονται στο πρόγραμμα της Ευρωπαϊκής Ένωσης Copernicus, που έχει ως στόχο την παροχή πληροφοριών μέσω της

δορυφορικής παρατήρησης της γης και in situ (αισθητήρες στο έδαφος, στη θάλασσα και στον αέρα) δεδομένων.

Οι δορυφόροι Sentinel-2 (προς το παρόν σύστημα δύο παρόμοιων δορυφόρων που θα αυξηθούν σε τέσσερεις τα επόμενα χρόνια) παρέχουν υψηλής ανάλυσης πολυφασματικές εικόνες, για την παρακολούθηση του εδάφους, της βλάστησης, των υδάτινων επιφανειών καθώς επίσης και των παράκτιων περιοχών. Ο πολυφασματικός σαρωτής (MSI) που φέρουν οι δορυφόροι Sentinel 2 καλύπτει 13 φασματικές ζώνες (443-2.190nm) με χωρικές αναλύσεις των 10m (για 4 φασματικά κανάλια στο ορατό και το εγγύς υπέρυθρο), 20m (για 6 φασματικά κανάλια στις μέσες υπέρυθρες ζώνες) και 60m (3 κανάλια για ατμοσφαιρικές διορθώσεις). Το κύριο χαρακτηριστικό του δορυφόρου Sentinel 2 που αξιοποιήθηκε στη μελέτη της κάλυψης γης του Δήμου Πειραιά είναι τα τρία φασματικά κανάλια στο ορατό και ένα κανάλι στο εγγύς υπέρυθρο που χαρακτηρίζονται **από χωρική διακριτική ικανότητα 10m x 10m**. Αυτό δίνει τη δυνατότητα για λεπτομερή αναπαράσταση των αστικών επιφανειών, με μικρή φασματική ανάμιξη μεταξύ των διαφορετικών καλύψεων γης (Εικόνα 4 αλλά και σύγκριση με την Εικόνα 3 που αποδίδεται σε χωρική διακριτική ικανότητα 30m x 30m).



Εικόνα 4. Ταξινομημένη εικόνα κάλυψης γης για το Δήμο Πειραιά μετά από ψηφιακή επεξεργασία δορυφορικής εικόνας Sentinel 2.

A2.3 Δεδομένα Pleiades

Το Pleiades είναι ένα σύστημα παρατήρησης της γης που αποτελείται από δύο πανομοιότυπους δορυφόρους. Το σύστημα Pleiades περιλαμβάνει τους δορυφόρους 1A (εκτοξεύτηκε το 2011) και 1B (εκτοξεύτηκε το 2012). Οι δύο δορυφόροι λειτουργούν στην ίδια τροχιά και έχουν τη δυνατότητα καθημερινής λήψης πάνω από οποιοδήποτε σημείο του πλανήτη. Η τροχιά των δορυφόρων είναι ηλιοσύγχρονη, σχεδόν κυκλική και το υψόμετρο αυτής είναι τα 694 χιλιόμετρα.

Και οι δύο δορυφόροι ανήκουν στην κατηγορία των μικρών δορυφόρων (η μάζα τους είναι 1000 kg) και προσφέρουν εικόνες στο παγχρωματικό του κανάλι (480-830nm) σε χωρική ανάλυση 0.5m και 2.0m στα τέσσερα πολυφασματικά κανάλια (Μπλε 430-550nm, Πράσινο 490-610nm, Κόκκινο 600-720nm & Εγγύς Υπέρυθρο 750-950nm). Χαρακτηριστικό των δορυφόρων Pleiades είναι η εξαιρετική στερεοσκοπική ικανότητα που είναι ιδιαίτερα σημαντική για τις εφαρμογές χαρτογραφίας (Εικόνα 5).



Εικόνα 4. Ταξινομημένη εικόνα κάλυψης γης για το Δήμο Πειραιά μετά από ψηφιακή επεξεργασία δορυφορικής εικόνας Pleiades.

A3. Δείκτες παρακολούθησης του αστικού περιβάλλοντος

Οι δείκτες είναι εργαλεία που υποστηρίζουν την αξιολόγησή, την ανάλυση και την κατανόηση διάφορων μεταβολών, όπως αυτές που αναφέρονται στη κάλυψη γης των αστικών περιοχών. Είναι ουσιαστικά ένας άμεσος και εύκολα κατανοητός τρόπος αξιολόγησης της κατάστασης μιας αστικής περιοχής, που αναδεικνύει τις αρνητικές και τις θετικές πτυχές ενός φαινομένου. Η σημαντικότητα των δεικτών, αναδεικνύεται ιδιαίτερα στις εφαρμογές όπου απαιτείται η επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων, με σκοπό να εξαχθούν συμπεράσματα και να καταλήξουν σε κάποιες πολιτικές.

Κύριος σκοπός των δεικτών παρακολούθησης του αστικού περιβάλλοντος που επιλέχθηκαν για το Δήμο Πειραιά είναι η ενίσχυση της διαχρονικής αποτύπωσης των αλλαγών κάλυψης γης και η άμεση και εύχρηστη παροχή πληροφοριών για τη κατάσταση του αστικού περιβάλλοντος του Δήμου τόσο για τους μελετητές του Πιλοτικού Μηχανισμού όσο και για τους χρήστες της Διαδικτυακής Πύλης Γεωχωρικών Πληροφοριών του Δήμου Πειραιά.

A3.1 Κανονικοποιημένος δείκτης βλάστησης NDVI

Ο κανονικοποιημένος δείκτης βλάστησης (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index) είναι ένας δείκτης που εντοπίζει την παρουσία βλάστησης και βασίζεται συνήθως σε δορυφορικά δεδομένα.

Η ικανότητα του δείκτη να εντοπίζει τη παρουσία και τη πυκνότητα της βλάστησης βασίζεται στην ακόλουθη αρχή: "η βλάστηση απορροφά σε υψηλά ποσοστά την ορατή ακτινοβολία (από 0,4 έως 0,7 μm) για χρήση κατά τη φωτοσύνθεση. Από την άλλη πλευρά, ανακλά σε μεγάλο βαθμό την εγγύς υπέρυθρη ακτινοβολία (από 0,7 έως 1,1 μm). Εάν η ανακλώμενη ακτινοβολία στο εγγύς υπέρυθρο μήκος κύματος είναι πολύ περισσότερη από ότι στο ορατό μήκος κύματος, τότε η βλάστηση στο συγκεκριμένο σημείο είναι πιθανό να είναι πυκνή". Μεγαλύτερες τιμές του δείκτη υποδηλώνουν εντονότερη παρουσία βλάστησης.

Με μαθηματικούς όρους, ο τύπος υπολογισμού του δείκτη NDVI είναι ο εξής:

$$NDVI = \frac{(NIR - VIS)}{(NIR + VIS)}$$

όπου NIR η εγγύς υπέρυθρη ακτινοβολία και VIS η ορατή ακτινοβολία στο ερυθρό μήκος κύματος.

Ενδεικτικά, αρνητικές τιμές αντιστοιχούν στο χιόνι ή στο νερό, τιμές κοντά στο μηδέν αντιστοιχούν σε περιοχές χωρίς ή με ελάχιστη βλάστηση όπως οι αστικές περιοχές, ενώ

θετικές τιμές αντιστοιχούν σε περιοχές με βλάστηση. Όσο υψηλότερη είναι η τιμή NDVI, τόσο πιο έντονη η παρουσία βλάστησης.

Ο δείκτης NDVI είναι από τους πιο χρησιμοποιούμενους δείκτες για τη διαχρονική παρακολούθηση του αστικού περιβάλλοντος ενώ οι δορυφορικές αποστολές Landsat και Sentinel υποστηρίζουν τον υπολογισμό του δείκτη.

A3.2 Κανονικοποιημένος δείκτης δόμησης NDBI

Με γνώμονα το γεγονός ότι η εφαρμογή του δείκτη NDVI δεν οδηγεί στην εξαγωγή λεπτομερών χωρικών πληροφοριών, κρίθηκε σκόπιμο να εφαρμοσθεί επίσης ο κανονικοποιημένος δείκτης αστικής μεταβολής (NDBI – Normalized Difference Built-up Index), ουσιαστικά δείκτης που εντοπίζει τη παρουσία δόμησης και βασίζεται επίσης σε δορυφορικά δεδομένα.

Η ικανότητα του δείκτη να εντοπίζει τη παρουσία δόμησης οφείλεται στο γεγονός ότι τα δομικά υλικά όπως το τσιμέντο, η άσφαλτος κτλ απορροφούν σε υψηλά ποσοστά τη μικρού μήκους κύματος υπέρυθρη ακτινοβολία (από 1.5 έως 3 μm) ενώ ανακλούν σε μεγάλο βαθμό την εγγύς υπέρυθρη ακτινοβολία (από 0.7 έως 1.1 μm).

Ο μαθηματικός τύπος υπολογισμού του δείκτη NDVI είναι ο εξής:

$$NDVI = \frac{(SWIR - NIR)}{(SWIR + NIR)}$$

όπου SWIR η μικρού μήκους κύματος υπέρυθρη ακτινοβολία και NIR η εγγύς υπέρυθρη ακτινοβολία.

Αρνητικές τιμές του δείκτη αντιστοιχούν σε υδάτινες επιφάνειες και σε περιοχές με βλάστηση, ενώ θετικές τιμές αντιστοιχούν σε δομημένες περιοχές. Όσο υψηλότερη είναι η τιμή NDBI, τόσο πιο έντονη η δόμηση.

A4. Παρουσίαση και ανάλυση αποτελεσμάτων

Στη παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διαχρονικής μελέτης της κάλυψης γης για το Δήμο Πειραιά. Ξεκινώντας από τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των δεδομένων μέτριας χωρικής ανάλυσης Landsat αποτυπώνεται το διαχρονικά υψηλό ποσοστό κάλυψης γης από δομημένες επιφάνειες και αντίστοιχα αναδεικνύεται η έλλειψη πράσινων χώρων εντός του Δήμου.

A4.1. Αποτελέσματα δεδομένων Landsat

Η επεξεργασία των δορυφορικών δεδομένων Landsat, τα οποία όπως έχει προαναφερθεί έχουν χωρική ανάλυση 30m x 30m, οδήγησε στην ταξινόμηση της κάλυψης γης του Δήμου Πειραιά σε τέσσερις βασικές τάξεις:

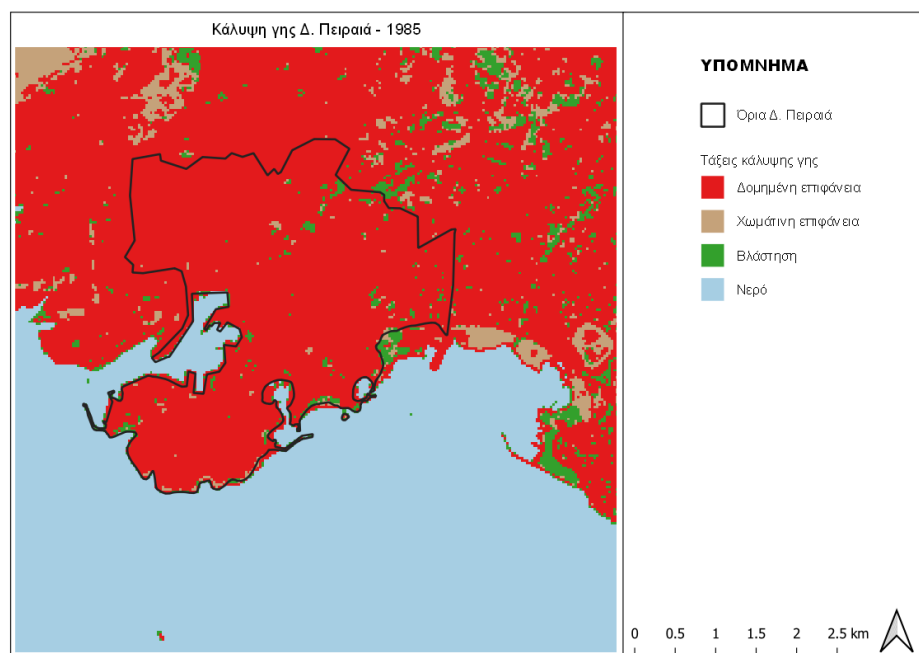
1. Δομημένες επιφάνειες
2. Βλάστηση
3. Χωμάτινες επιφάνειες
4. Νερό

Τα αποτελέσματα παρατίθενται στις επόμενες Εικόνες 6 – 13. Δεν παρατηρούνται ιδιαίτερες αλλαγές στη κάλυψη γης αφενός διότι ο Δήμος Πειραιά έχει αυξημένη οικιστική και βιομηχανική ανάπτυξη από τις αρχές του 20ου αιώνα, αφετέρου γιατί η μέτρια χωρική ανάλυση των δεδομένων δεν επιτρέπει την κατηγοριοποίηση της κάλυψης γης σε περισσότερες τάξεις.

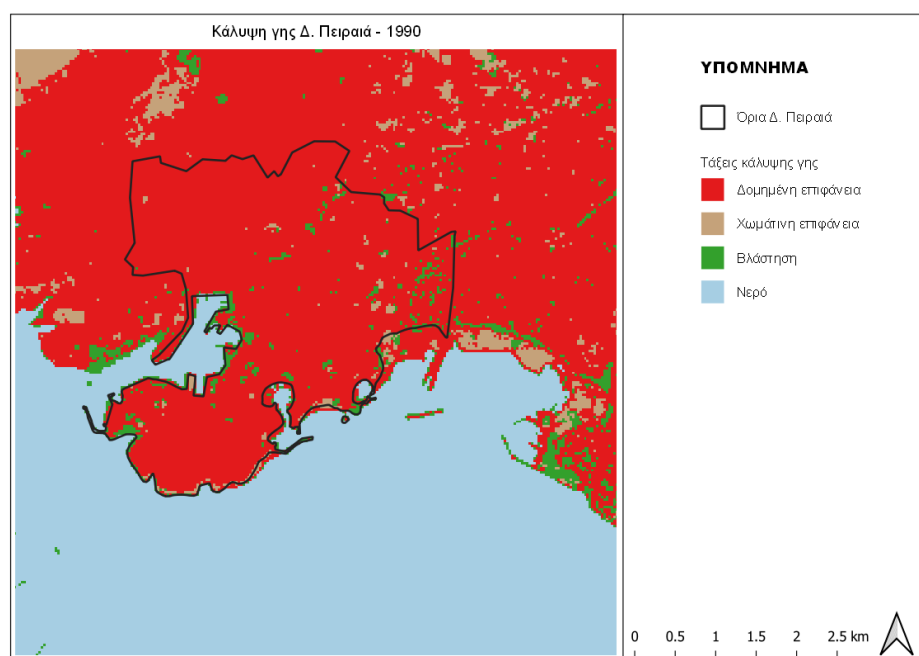
Είναι εμφανές από τη μελέτη των εικόνων αλλά και τη στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων πως ο Δήμος Πειραιά στερείται περιοχών με φυσική βλάστηση, η οποία διαχρονικά καταλαμβάνει λιγότερο από το 5% της συνολικής έκτασης του Δήμου (Πίνακας 2).

Πίνακας 2. Ποσοστά δομημένων επιφανειών και βλάστησης στο Δήμο Πειραιά

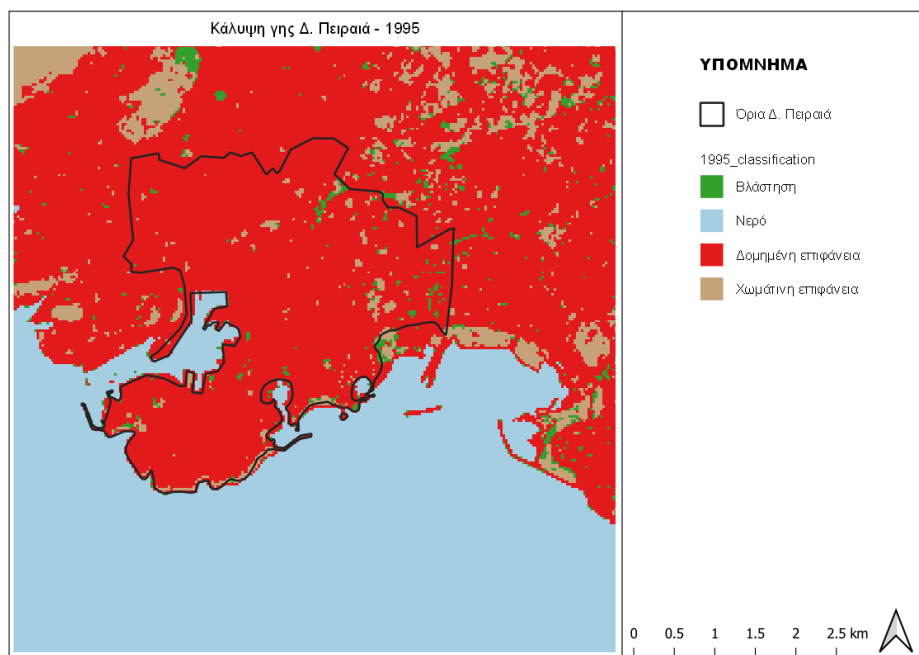
Έτος	Ποσοστό δομημένων επιφανειών (%)	Ποσοστό βλάστησης (%)
1985	94.65	2.99
1990	93.28	5.03
1995	94.18	3.96
2000	95.76	2.19
2005	96.44	1.86
2010	96.16	2.04
2015	96.83	1.80
2020	96.68	2.43



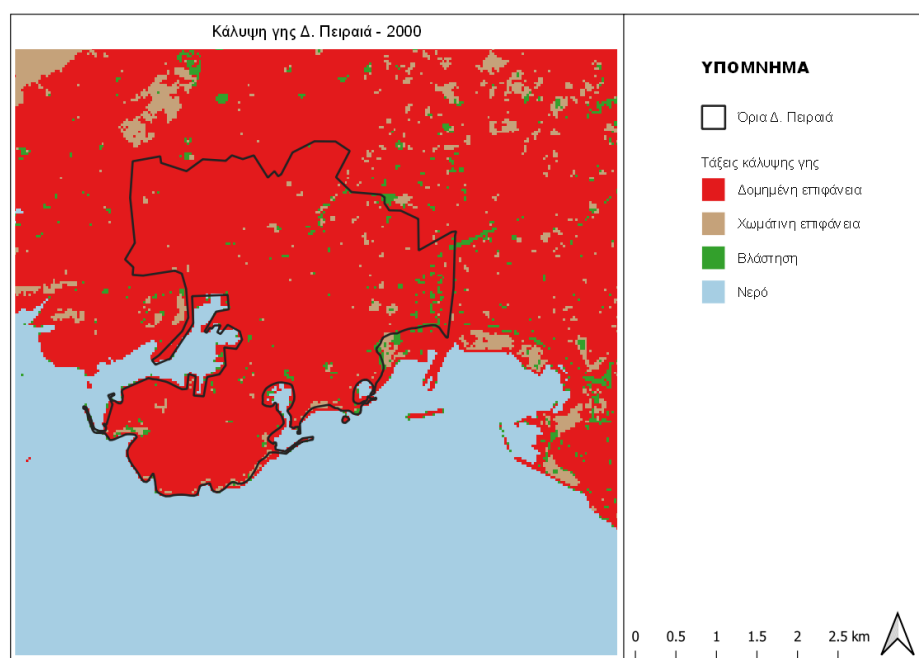
Εικόνα 5. Κάλυψη γης του Δήμου Πειραιά το έτος 1985 από δεδομένα Landsat.



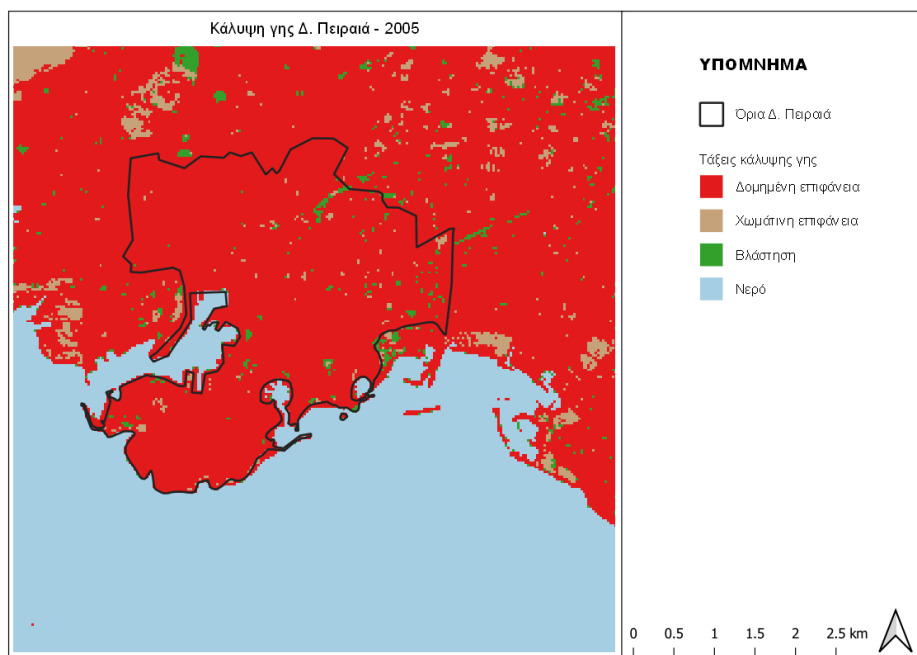
Εικόνα 6. Κάλυψη γης του Δήμου Πειραιά το έτος 1990 από δεδομένα Landsat.



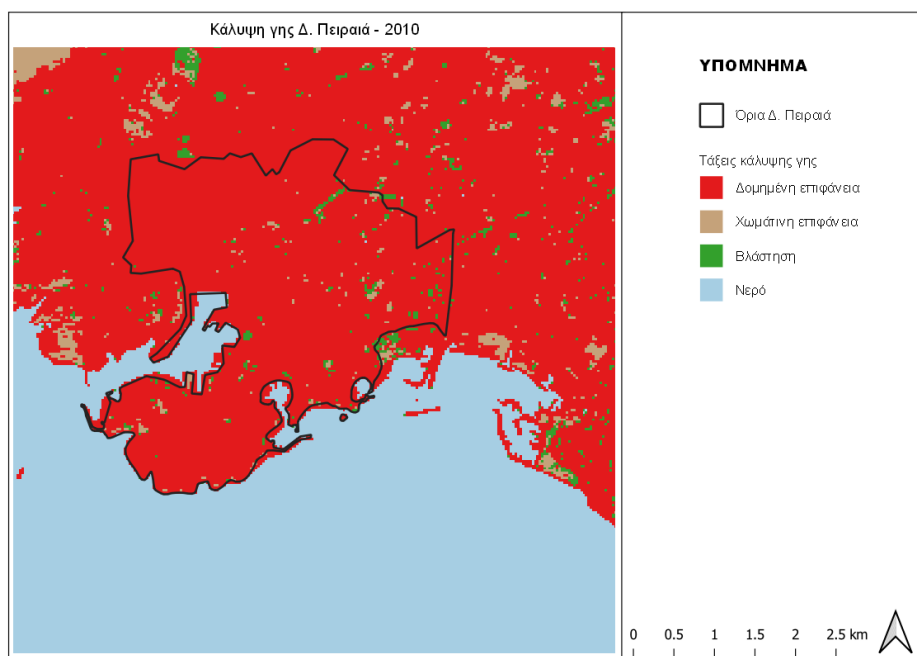
Εικόνα 7. Κάλυψη γης του Δήμου Πειραιά το έτος 1995 από δεδομένα Landsat.



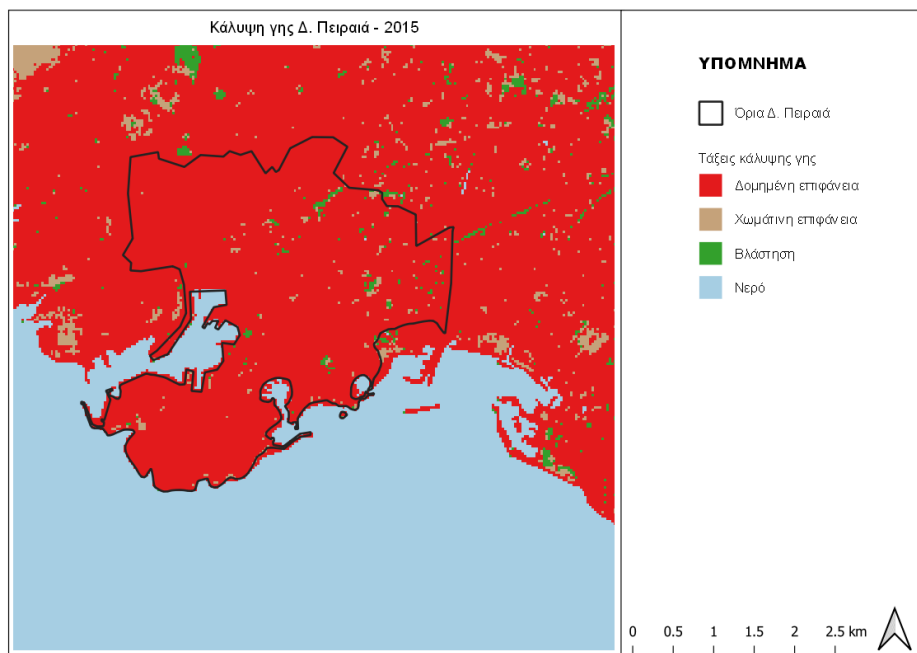
Εικόνα 8. Κάλυψη γης του Δήμου Πειραιά το έτος 2000 από δεδομένα Landsat.



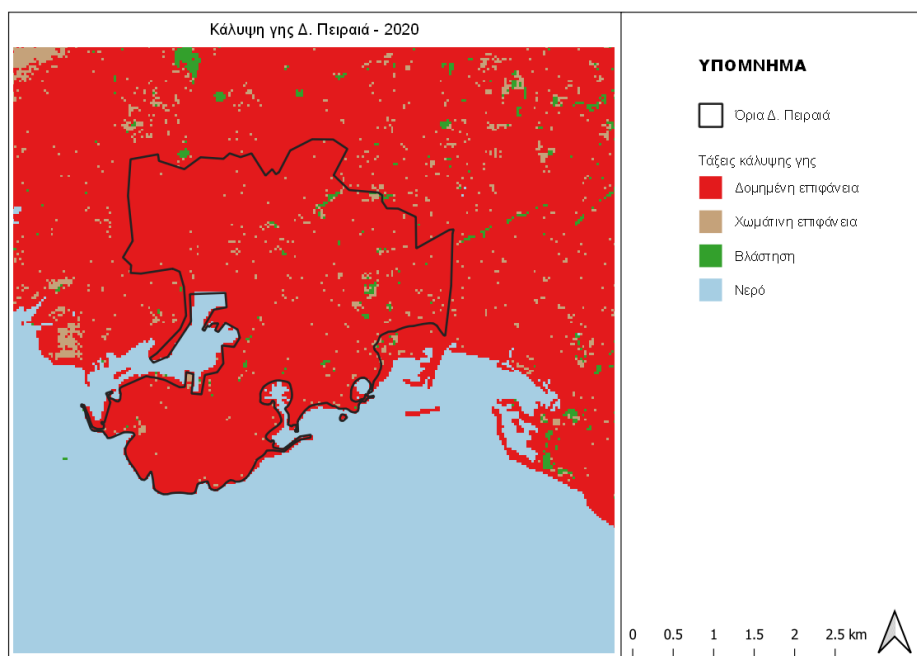
Εικόνα 9. Κάλυψη γης του Δήμου Πειραιά το έτος 2005 από δεδομένα Landsat.



Εικόνα 10. Κάλυψη γης του Δήμου Πειραιά το έτος 2010 από δεδομένα Landsat.



Εικόνα 11. Κάλυψη γης του Δήμου Πειραιά το έτος 2015 από δεδομένα Landsat.



Εικόνα 12. Κάλυψη γης του Δήμου Πειραιά το έτος 2020 από δεδομένα Landsat.

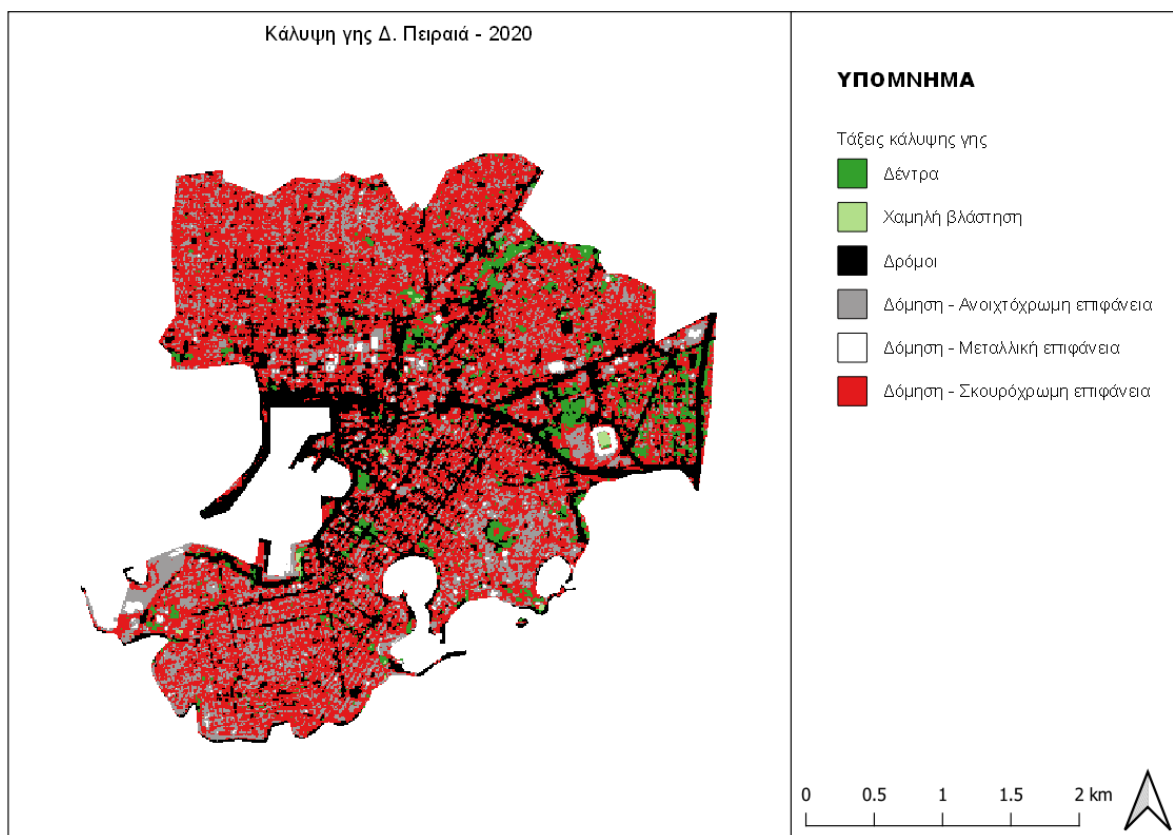
A4.2. Αποτελέσματα δεδομένων Sentinel 2

Η επεξεργασία των δορυφορικών δεδομένων Sentinel 2, τα οποία έχουν υψηλή χωρική ανάλυση 10m x 10m, οδήγησε στην ταξινόμηση της κάλυψης γης του Δήμου Πειραιά σε έξι βασικές τάξεις:

1. Δόμηση - Μεταλλική επιφάνεια
2. Δόμηση – Σκουρόχρωμη επιφάνεια
3. Δόμηση – Ανοιχτόχρωμη επιφάνεια
4. Δρόμοι
5. Βλάστηση – Δέντρα
6. Αραιή βλάστηση – Χωμάτινη επιφάνεια

Τα βασικά συμπεράσματα που εξάγονται από το χάρτη κάλυψης γης (Εικόνα 14) προφανώς δεν διαφέρουν από τα προηγούμενα, πλην όμως είναι περισσότερο λεπτομερή. Καταγράφεται το χαμηλό ποσοστό βλάστησης, ιδιαίτερα στο νότιο και δυτικό τμήμα του Δήμου και το υψηλότερο ποσοστό δομημένων επιφανειών.

Η χρήση δεδομένων υψηλής ανάλυσης καθιστά εφικτή τη ταξινόμηση των δομημένων επιφανειών σε ξεχωριστές κατηγορίες ανάλογα με τα υλικά της επιφανείας αυτών αλλά και τον εντοπισμό των μεγάλων δρόμων του Δήμου. Οι δομημένες επιφάνειες διακρίθηκαν σε αυτές που καλύπτονται από μεταλλικά υλικά, σε αυτές που καλύπτονται από σκουρόχρωμα υλικά (τσιμέντο, κεραμίδια κτλ) και σε αυτές που καλύπτονται από ανοιχτόχρωμα υλικά (μονωτικά υλικά, ανοιχτόχρωμα δομικά υλικά). Η χρησιμότητα αυτού του διαχωρισμού έγκειται στο γεγονός πως τα δομικά υλικά έχουν διαφορετικές οπτικές και θερμικές ιδιότητες οι οποίες μπορούν έμμεσα να εκτιμηθούν από το αποδιδόμενο χρώμα της επιφάνειας εδάφους. Σημειώνεται δε ότι τα σκουρόχρωμα δομικά υλικά ανακλούν λιγότερο την ηλιακή ακτινοβολία και θερμαίνονται περισσότερο από τα αντίστοιχα ανοιχτόχρωμα.



Εικόνα 13. Κάλυψη γης του Δήμου Πειραιά το έτος 2020 από δεδομένα Sentinel 2.

Τα ποσοστά κάθε τάξης κάλυψης γης παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3. Ποσοστά κάλυψης γης του Δήμου Πειραιά από τα δεδομένα Sentinel 2

Τάξη κάλυψης γης	Ποσοστό (%)
Δόμηση - Μεταλλική επιφάνεια	1.15
Δόμηση - Σκουρόχρωμη επιφάνεια	54.1
Δόμηση - Ανοιχτόχρωμη επιφάνεια	19.2
Δρόμοι	20.6
Βλάστηση - Δέντρα	3.75
Αραιή βλάστηση - Χωμάτινη επιφάνεια	1.25

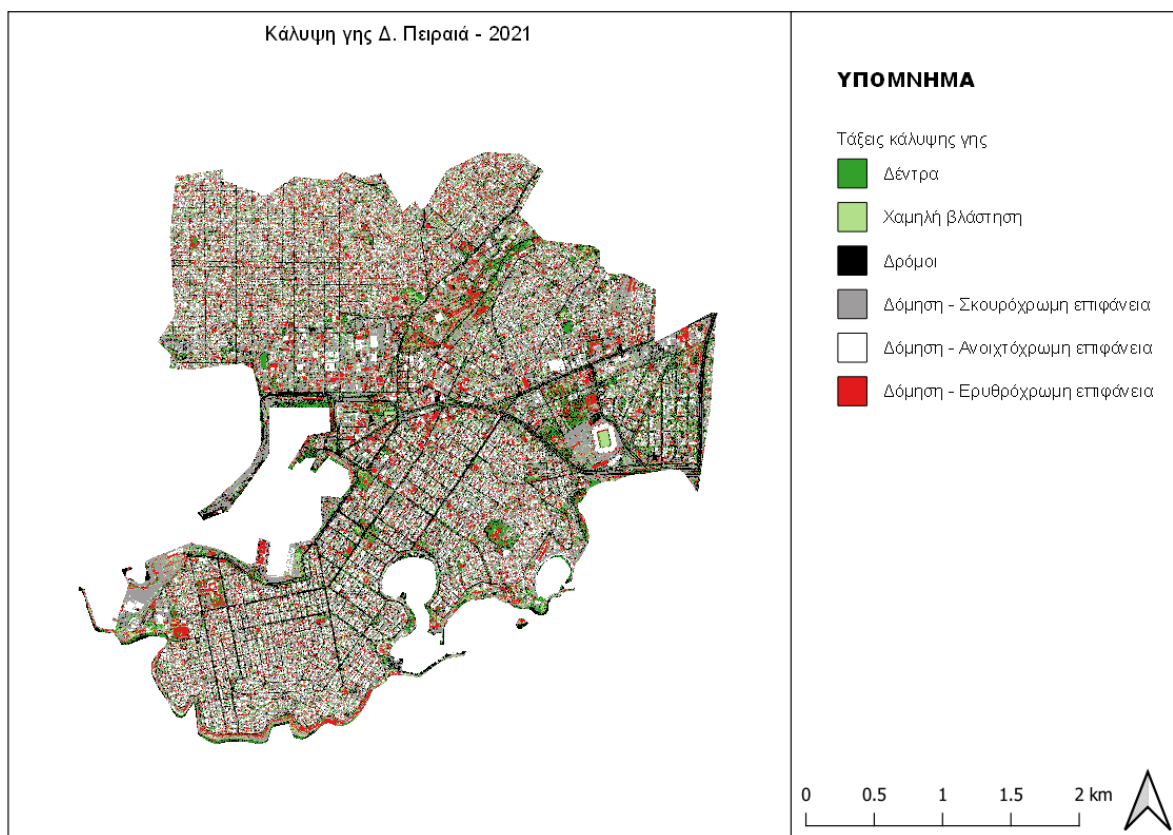
A4.3. Αποτελέσματα δεδομένων Pleiades

Η επεξεργασία των δορυφορικών δεδομένων Pleiades³ τα οποία έχουν πολύ υψηλή χωρική ανάλυση 0.5m x 0.5m, οδήγησε στην ταξινόμηση της κάλυψης γης του Δήμου Πειραιά σε έξι βασικές τάξεις:

1. Δόμηση – Ανοιχτόχρωμη επιφάνεια
2. Δόμηση – Σκουρόχρωμη επιφάνεια
3. Δόμηση – Ερυθρόχρωμη επιφάνεια
4. Δρόμοι
5. Βλάστηση – Δέντρα
6. Αραιή βλάστηση – Χωμάτινη επιφάνεια

Η πολύ υψηλή χωρική ανάλυση των δεδομένων επιτρέπει την λεπτομερή αποτύπωση της κάλυψης γης του Δήμου Πειραιά (Εικόνα 15). Οι δομημένες περιοχές κατηγοριοποιήθηκαν σε τρεις κατηγορίες ανάλογα τα χαρακτηριστικά της επιφανείας τους. Παρότι δεν μπορεί να ληφθεί απευθείας πληροφορία για το δομικό υλικό της επιφανείας (καθώς τα διαθέσιμα δεδομένα Pleiades παρέχουν πληροφορία μόνο στο ορατό φάσμα) μπορεί έμμεσα να εξαχθεί από το χρώμα της επιφανείας. Έτσι οι σκουρόχρωμες δομημένες επιφάνειες αντιστοιχούν σε επιφάνειες με τσιμέντο, ασφαλτο κτλ, ερυθρόχρωμες επιφάνειες συνήθως αντιστοιχούν σε οροφές με κεραμίδια ενώ ανοιχτόχρωμες επιφάνειες αντιστοιχούν συνήθως σε επιφάνειες καλυμμένες με μονωτικά υλικά ή μεταλλικές οροφές.

³ 26/04/2013 και 05/07/2021

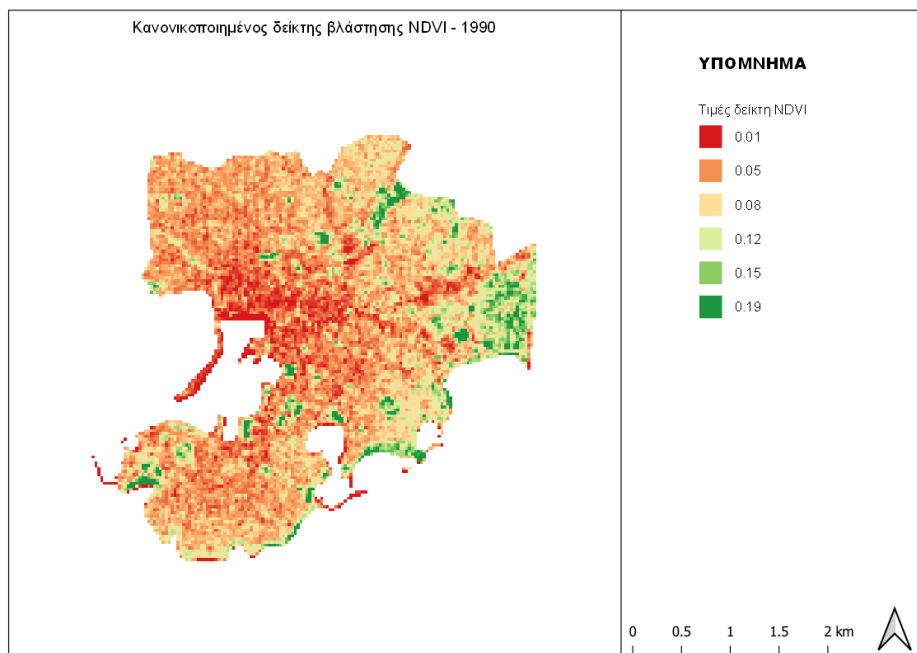


Εικόνα 14. Κάλυψη γης του Δήμου Πειραιά το έτος 2021 από δεδομένα Pleiades.

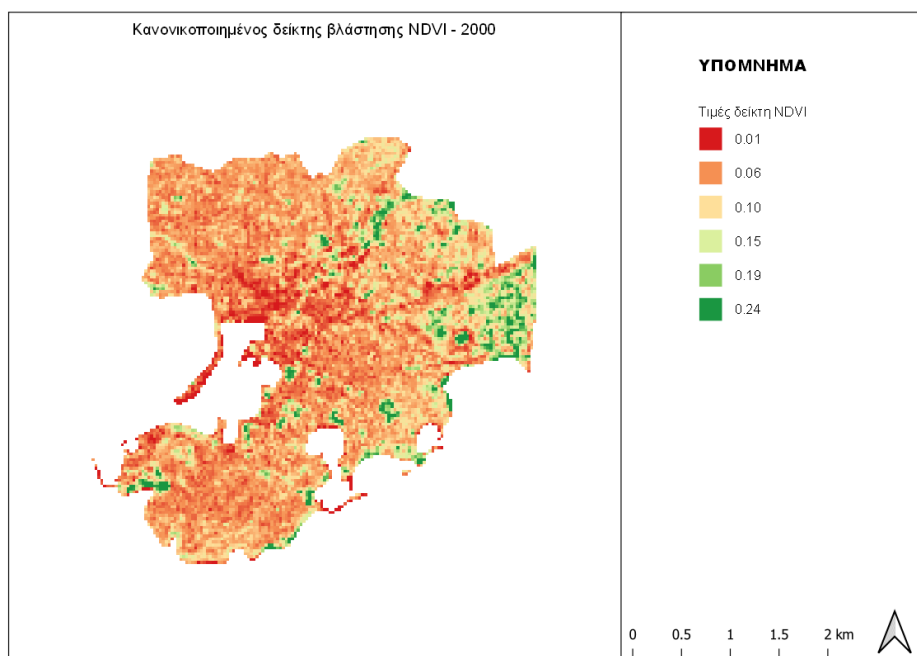
A4.4. Δείκτες NDVI και NDBI

Χρησιμοποιώντας δορυφορικά δεδομένα από τις αποστολές Landsat υπολογίστηκαν οι δείκτες βλάστησης NDVI και δόμησης NDBI για τη περίοδο 1990 έως 2020 ανά 10 έτη. Στις Εικόνες 16 -19 αποτυπώνεται με εύχρηστο και άμεσο τρόπο η χωρική κατανομή του δείκτη NDVI στο Δήμο Πειραιά για τη περίοδο μελέτης.

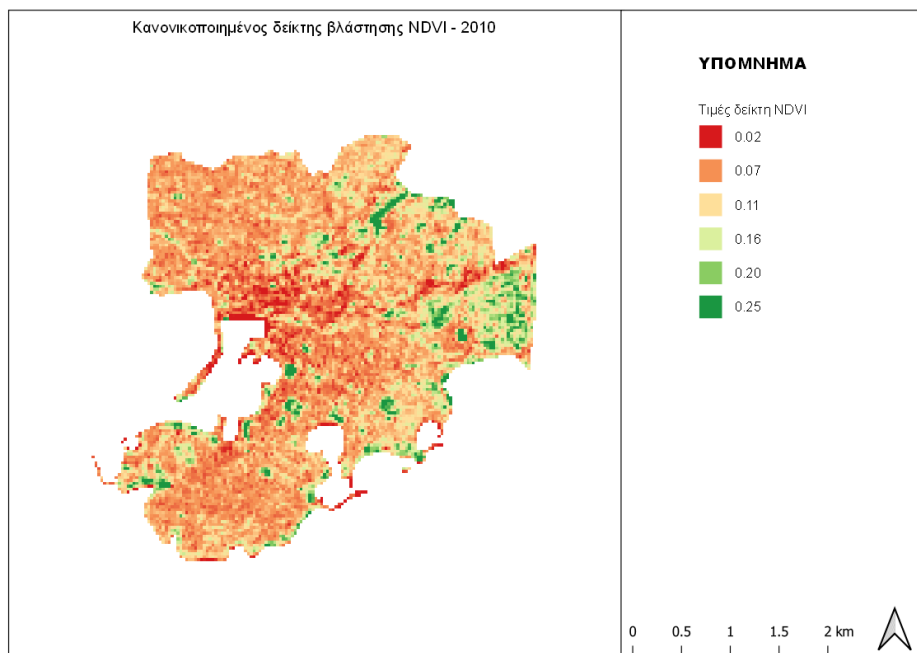
Για την ίδια περίοδο και δεδομένα, υπολογίστηκε ο δείκτης δόμησης NDBI. Η χωρική κατανομή του δείκτη στο Δήμο Πειραιά παρουσιάζεται στις εικόνες 20 - 23. Από τη συγκριτική εξέταση των εικόνων διακρίνεται αύξηση της δόμησης στις κεντρικές και νότιες περιοχές του Δήμου.



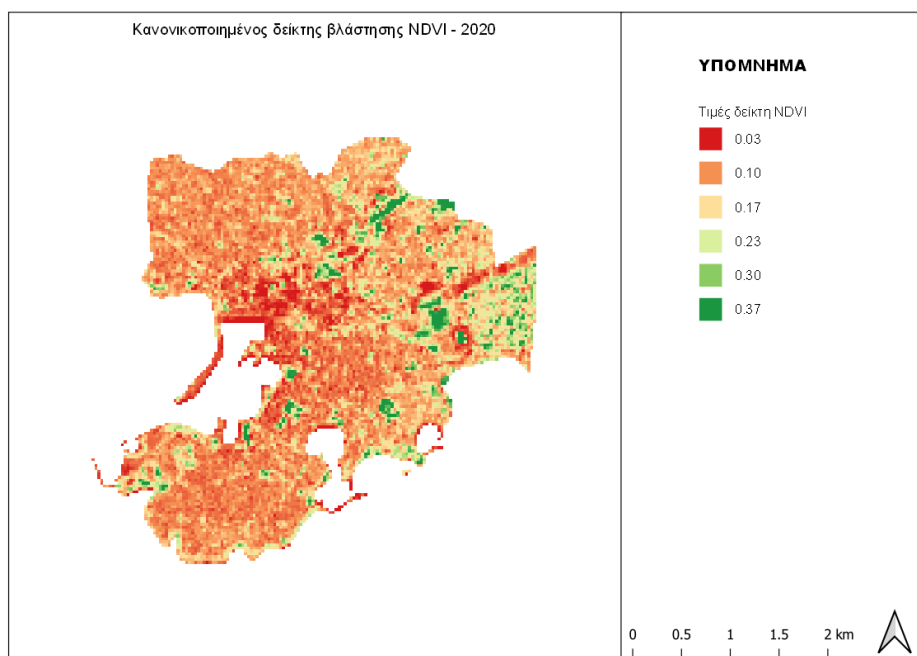
Εικόνα 15. Χωρική κατανομή του δείκτη βλάστησης NDVI το 1990.



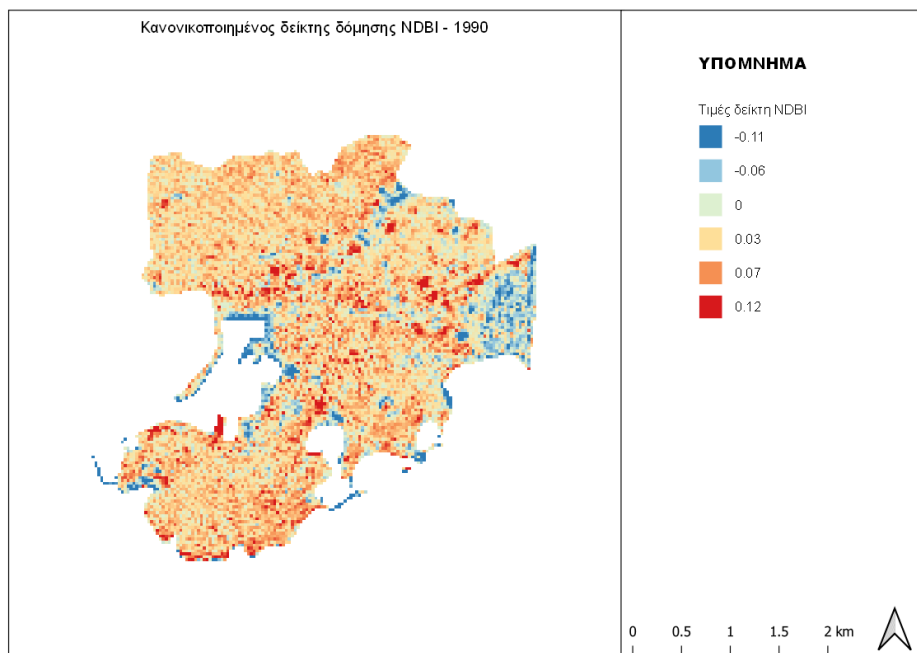
Εικόνα 16. Χωρική κατανομή του δείκτη βλάστησης NDVI το 2000.



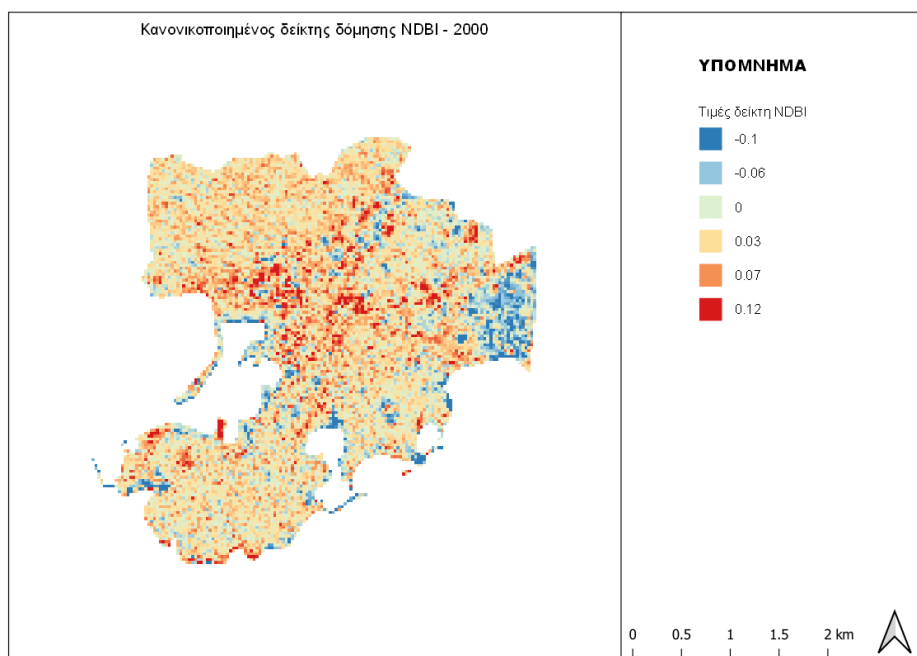
Εικόνα 17. Χωρική κατανομή του δείκτη βλάστησης NDVI το 2010.



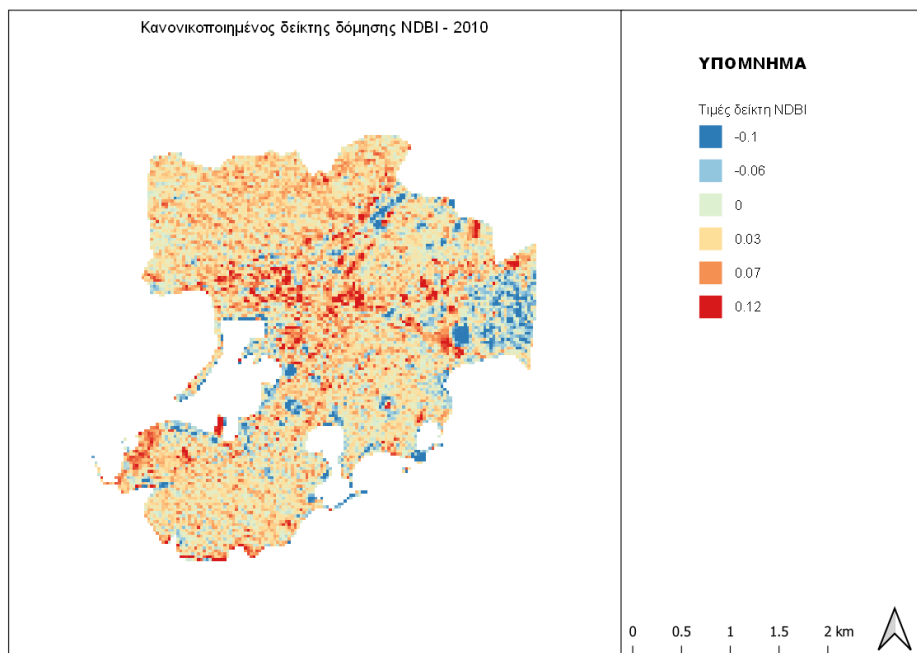
Εικόνα 18. Χωρική κατανομή του δείκτη βλάστησης NDVI το 2020.



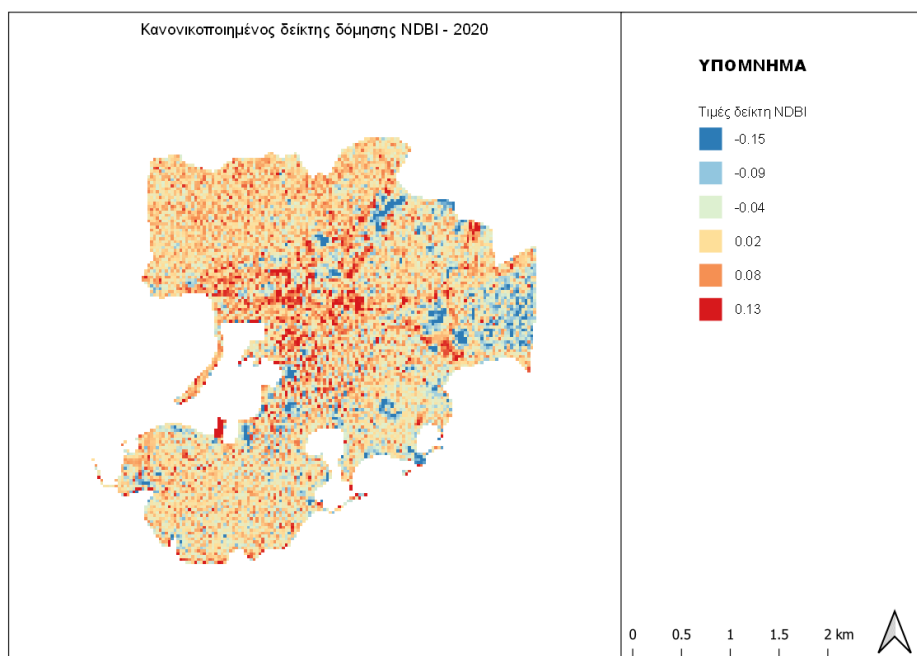
Εικόνα 19. Χωρική κατανομή του δείκτη δόμησης NDBI το 1990.



Εικόνα 20. Χωρική κατανομή του δείκτη δόμησης NDBI το 2000.



Εικόνα 21. Χωρική κατανομή του δείκτη δόμησης NDBI το 2010.



Εικόνα 22. Χωρική κατανομή του δείκτη δόμησης NDBI το 2020.

A5. Ενσωμάτωση στη Διαδικτυακή Πύλη Γεωχωρικών Πληροφοριών του Δήμου Πειραιά

Τα αποτελέσματα της μελέτης είναι διαθέσιμα σε ηλεκτρονική μορφή και παραδίδονται μαζί με το παρόν κείμενο. Είναι άμεσα επεξεργάσιμα σε οποιοδήποτε λογισμικό GIS και είναι δυνατόν να ενσωματωθούν στη Διαδικτυακή Πύλη Γεωχωρικών Πληροφοριών του Δήμου Πειραιά πριν την επίσημη λειτουργία της.

Συνοπτικά παραδίδονται σε ηλεκτρονική μορφή τα εξής:

1. Χαρτογραφικά δεδομένα σε μορφή Geotiff
2. Αρχεία ετικέτας qml
3. Αρχεία χρωματισμού sld
4. Χάρτες σε μορφή png

Μέρος Β. Ανάλυση του θερμικού περιβάλλοντος της περιοχής μελέτης

Η σημασία του μικροκλίματος στον αστικό σχεδιασμό αναγνωρίζεται όλο και περισσότερο τα τελευταία έτη. Σε αρκετές πόλεις ανά τον κόσμο οι χωροταξικές και πολεοδομικές παρεμβάσεις συναξιολογούν την κατάσταση του αστικού μικροκλίματος αλλά και εκτιμούν τις επιπτώσεις των παρεμβάσεων επί αυτού.

Σε αστικές περιοχές όπως ο Δήμος Πειραιά, το έντονο ανάγλυφο, η ποικιλία των πηγών εκπομπής θερμότητας, η αστική μορφολογία και οι γεωμετρικές παράμετροι των κτιρίων, τα διάφορα είδη των υλικών, η χωρική μεταβολή της θερμοχωρητικότητας, κ.α. επιβάλλουν μία λεπτομερή μελέτη και ανάλυση των μηχανισμών που επηρεάζουν το αστικό μικροκλίμα.

Η αστική κλιματολογία χαρακτηρίζεται από μικρής (αστικής) κλίμακας φαινόμενα, ενώ το ενεργειακό ισοζύγιο της αστικής περιοχής επηρεάζεται από την ενεργειακή συμπεριφορά των κτιρίων σε ότι αφορά τα κέρδη και τις απώλειες ενέργειας. Ειδικότερα ο συνδυασμός της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, των δομικών χαρακτηριστικών της πόλης και των ιδιαίτερων κλιματικών συνθηκών που επικρατούν, συνθέτουν το αστικό μικροκλίμα, το οποίο επηρεάζει τη ζωή των κατοίκων και τη λειτουργία της πόλης.

Οι παράμετροι που αναλύθηκαν στο πρώτο μέρος της παρούσας μελέτης όπως η κάλυψη γης, η παρουσία βλάστησης και η πυκνότητα δόμησης έχουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του αστικού μικροκλίματος, του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας (ΑΘΝ) αλλά και των ενδοαστικών θερμικών νησίδων (hot spots) που συνδέονται με το μέγεθος της αστικής περιοχής, τις παραγωγικές δραστηριότητες που φιλοξενούνται σε αυτή, την πυκνότητα δόμησης, την ποιότητα των κατασκευών, τον πληθυσμό και την πληθυσμιακή πυκνότητα. Επισημαίνεται ότι το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας αποκτά ιδιαίτερη σημασία κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, δεδομένου ότι οι υψηλές θερμοκρασίες επιδρούν στο αστικό περιβάλλον με την πρόκληση δυσφορίας στους κατοίκους, την αύξηση των δαπανών ψύξης και κλιματισμού και την αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας κατά τις ώρες αιχμής.

Β1. Θερμικό περιβάλλον

Η διαχρονική μελέτη της θερμοκρασίας αέρα και επιφανείας σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα του πρώτου μέρους του παραδοτέου, διαμορφώνουν το βασικό σκελετό για τη μελέτη των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στο Δήμο Πειραιά. Το αστικό περιβάλλον στην Ελλάδα είναι ιδιαίτερα ευάλωτο σε επεισόδια καύσωνα, τα οποία

συνήθως συνδέονται με μεταφορά θερμών αέριων μαζών από την Αφρική κατά τη διάρκεια της θερμής περιόδου του έτους και σε περιόδους όπου διακόπτεται η κυκλοφορία των ετήσιων ανέμων. Τα κύματα καύσωνα είναι ιδιαίτερα επικίνδυνα για την υγεία των κατοίκων σε αστικές περιοχές καθώς συνδέονται με αύξηση της θνησιμότητας, ιδιαίτερα σε μεσογειακές πόλεις όπως ο Πειραιάς, ενώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα κύματα καύσωνα ενισχύονται λόγω της κλιματικής αλλαγής, σε ένταση, συχνότητα και διάρκεια.

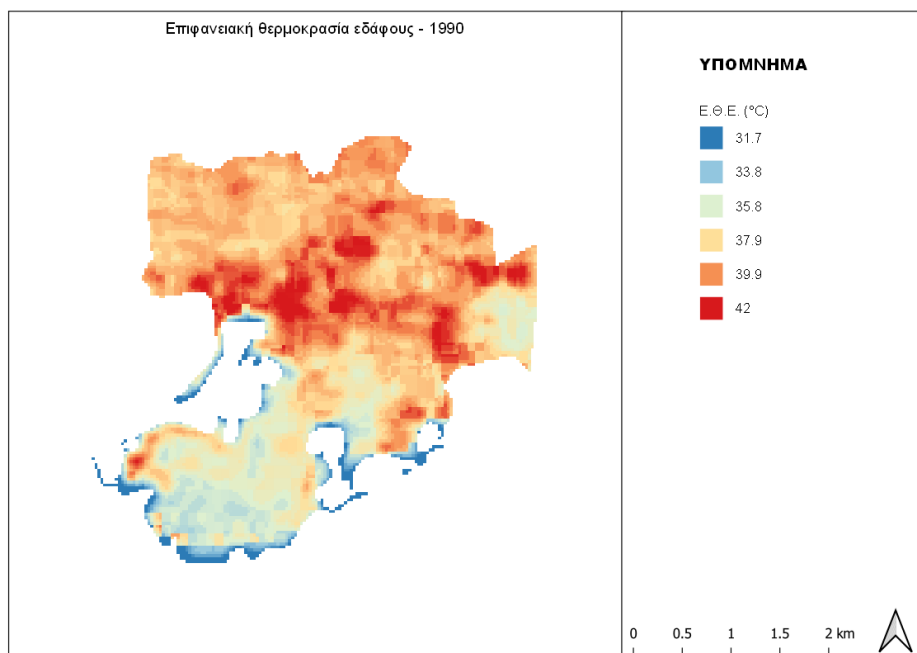
B2. Δορυφορική Τηλεπισκόπηση και θερμικό περιβάλλον

Με την επεξεργασία δορυφορικών εικόνων είναι δυνατός ο προσδιορισμός της επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους (Ε.Θ.Ε.) με τη χρήση εικόνων στο θερμικό υπέρυθρο (8-12 μm) και διακριτική ικανότητα που φτάνει τα 30 μέτρα (Landsat). Με τον τρόπο αυτό δίνεται η δυνατότητα για τη χωρική αποτύπωση της επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους, αποτύπωση που υποστηρίζει την αναγνώριση περιοχών υψηλής ενεργειακής έντασης, τον εντοπισμό ενδοαστικών θερμικών νησίδων αλλά και την ανίχνευση αλλαγών στο αστικό μικροκλίμα. Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, θα πραγματοποιηθεί επίσης παραμετρική συσχέτιση της επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους με τη θερμοκρασία του αέρα, ώστε να εκτιμάται η χωρική κατανομή της θερμοκρασίας αέρα σε χωρική διακριτική ικανότητα 30 μέτρα x 30 μέτρα.

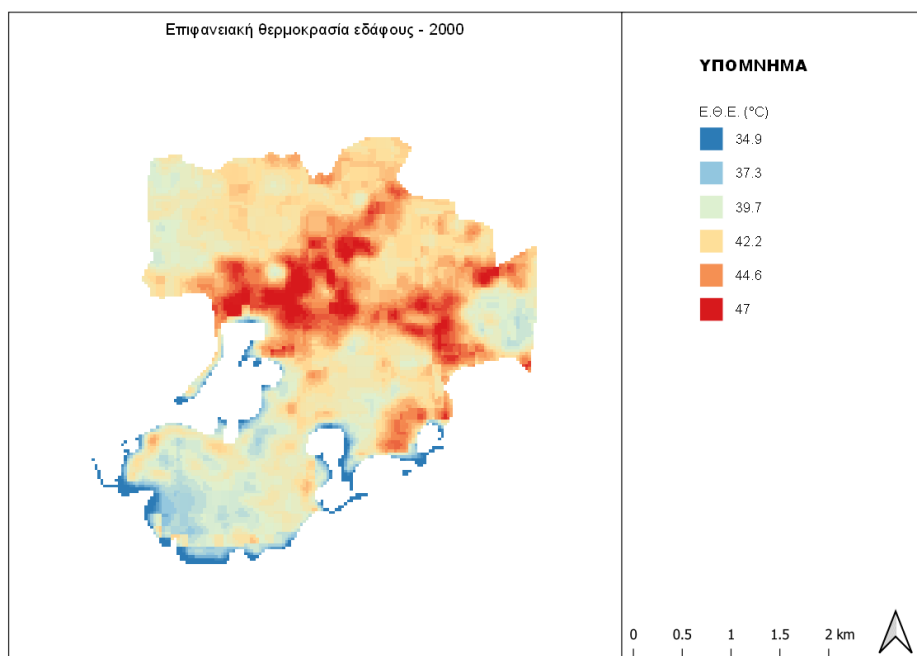
B2.1. Διαχρονική μελέτη του θερμικού περιβάλλοντος

Με τη χρήση δεδομένων Landsat για τα ίδια έτη για τα οποία πραγματοποιήθηκε η ανάλυση του πρώτου μέρους της μελέτης υπολογίστηκε η επιφανειακή θερμοκρασία του εδάφους και αποτυπώθηκε χαρτογραφικά η χωρική της κατανομή (Εικόνες 24 – 27). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε χάρτες και θα ενσωματωθούν στη Διαδικτυακή Πύλη Γεωχωρικών Πληροφοριών του Δήμου Πειραιά.

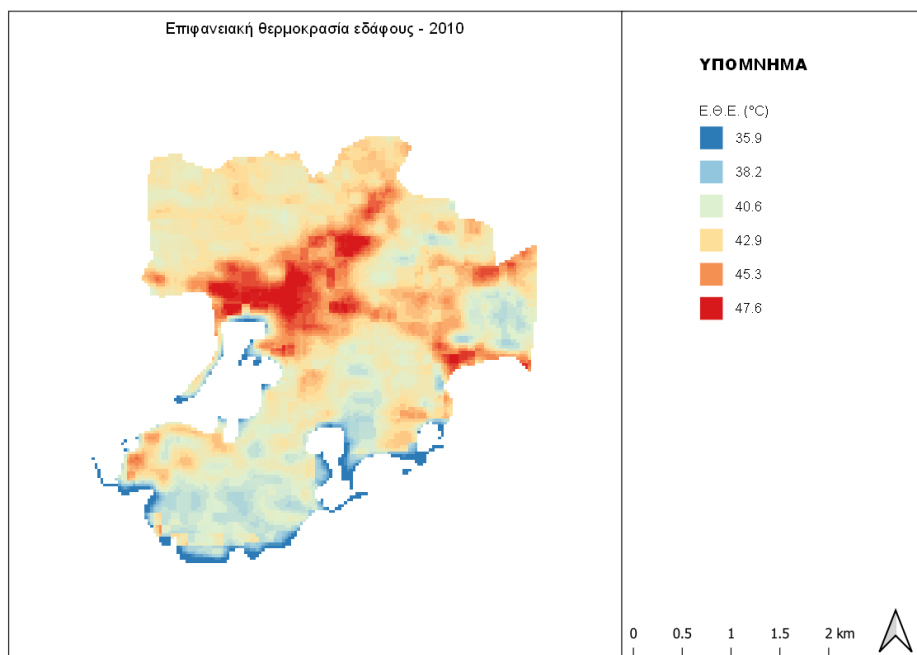
Η χωρική κατανομή της Ε.Θ.Ε. είναι σταθερή κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης με συγκεκριμένες συνοικίες να εμφανίζουν υψηλές Ε.Θ.Ε. σε σχέση με τις υπόλοιπες. Οι μέγιστες τιμές της Ε.Θ.Ε. ξεπερνούν τους 45°C τους καλοκαιρινούς μήνες ενώ πρέπει να τονιστεί πως η ώρα διέλευσης των δορυφόρων πάνω από την Ελλάδα είναι περίπου στις 12.00.



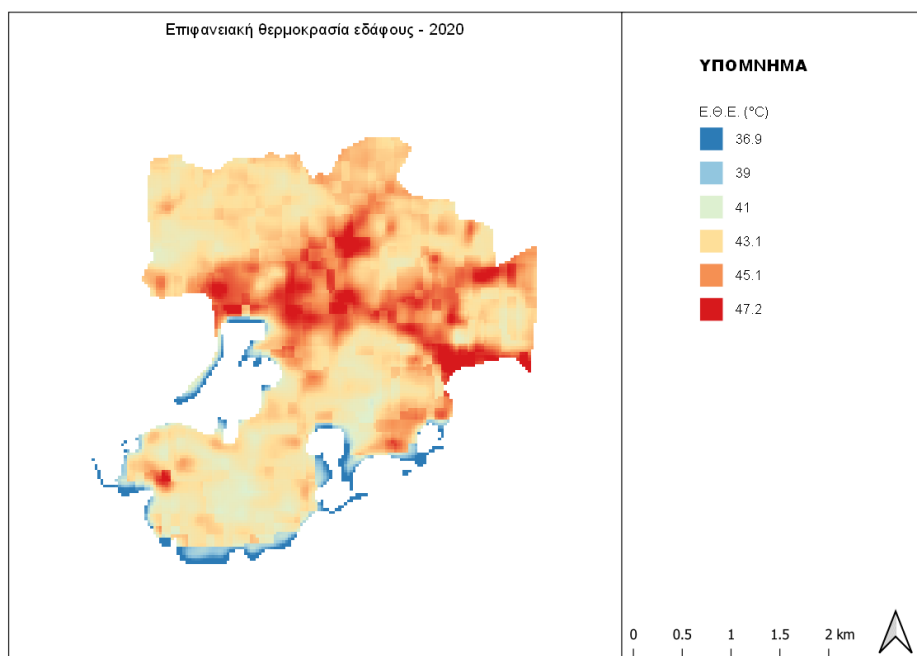
Εικόνα 23. Επιφανειακή θερμοκρασία του εδάφους το έτος 1990.



Εικόνα 24. Επιφανειακή θερμοκρασία του εδάφους το έτος 2000.



Εικόνα 25. Επιφανειακή θερμοκρασία του εδάφους το έτος 2010.



Εικόνα 26. Επιφανειακή θερμοκρασία του εδάφους το έτος 2020.

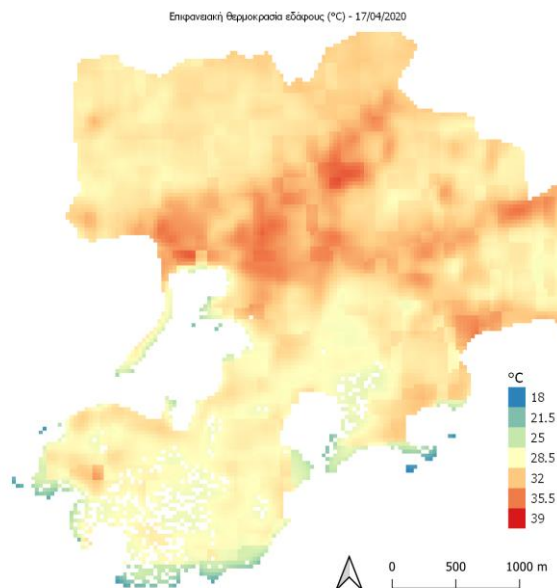
B2.2. Μελέτη της ετήσιας μεταβολής της Ε.Θ.Ε

Ειδικότερα για τα δύο τελευταία έτη (2020 και 2021) χρησιμοποιήθηκαν όλα τα διαθέσιμα δεδομένα (Πίνακας 3) από το δορυφόρο Landsat 8 για τη μελέτη της επιφανειακής θερμοκρασίας του Δήμου Πειραιά ώστε να υπολογισθεί η χωρική κατανομή της Ε.Θ.Ε. κατά τη διάρκεια του έτους.

Πίνακας 4. Δορυφορικά δεδομένα Landsat 8 για την ετήσια μελέτη της Ε.Θ.Ε. του Δήμου Πειραιά

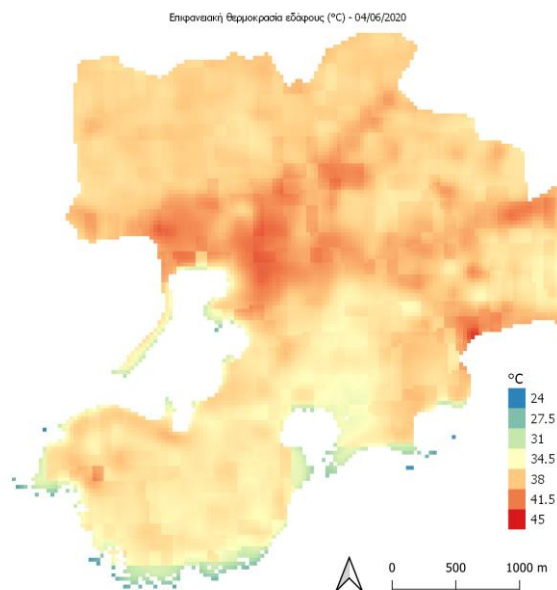
17/04/2020	27/11/2020	25/07/2021
04/06/2020	14/01/2021	10/08/2021
22/07/2020	20/04/2021	26/08/2021
23/08/2020	22/05/2020	11/09/2021
08/09/2020	07/06/2021	27/09/2021
10/10/2020	23/06/2021	
26/10/2020	09/07/2021	

Στην Εικόνα 28 απεικονίζεται η Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά για τον μήνα Απρίλιο με την τιμές της να φτάνει τους 39 °C. Οι μέγιστες θερμοκρασίες παρατηρούνται κοντά στο Στάδιο Ειρήνης και Φιλίας, στο λιμάνι του Πειραιά καθώς και στην γύρω αστική περιοχή και στο αμαξοστάσιο του ΟΣΕ. Οι ελάχιστες θερμοκρασίες παρατηρούνται στις παραθαλάσσιες περιοχές του Δήμου, αν και η εκτίμηση εμπεριέχει ποσοστό σφάλματος καθώς λόγω της ανάλυσης του δορυφόρου (30m x 30m) έχει συμπεριληφθεί και μικρό μέρος της θάλασσας στον υπολογισμό.



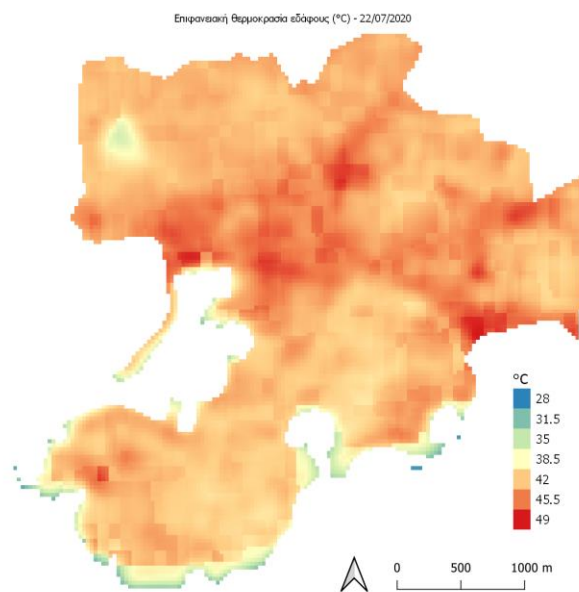
Εικόνα 27. Χωρική κατανομή της Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 17/04/2020.

Στην Εικόνα 29 παρουσιάζεται η Ε.Θ.Ε. για το μήνα Ιούνιο 2020 με την επιφανειακή θερμοκρασία να φτάνει στους 45°C. Οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές της Ε.Θ.Ε. παρουσιάζονται σημαντικά αυξημένες σε σχέση με τον μήνα Απρίλιο ενώ η χωρική κατανομή της δεν παρουσιάζει σημαντικές αλλαγές.

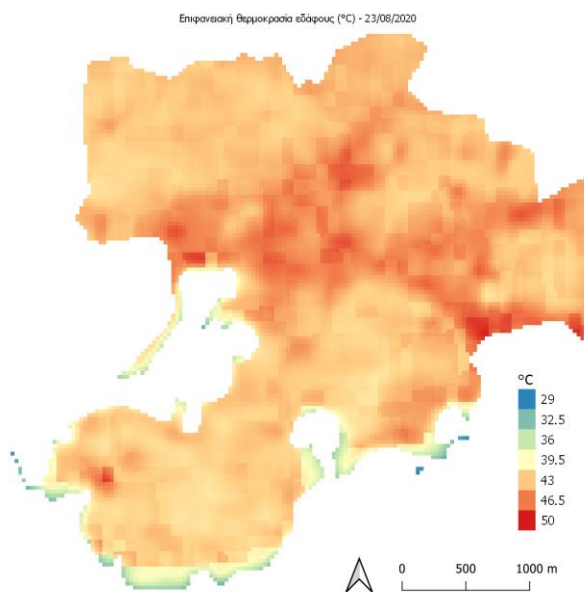


Εικόνα 28. Χωρική κατανομή της Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 04/06/2020.

Κατά τον μήνα Ιούλιο του 2020 η Ε.Θ.Ε. κυμαίνεται από 28°C έως 49°C. Οι περιοχές εμφάνισης των υψηλότερων και χαμηλότερων Ε.Θ.Ε. δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες αλλαγές, όμως έχουν αυξηθεί οι περιοχές που εμφανίζουν πολύ υψηλές Ε.Θ.Ε.. Η Ε.Θ.Ε. τον Αύγουστο του 2020 κυμάνθηκε μεταξύ 29°C και 50°C στα ίδια επίπεδα με τον Ιούλιο (Εικόνα 31). Όπως και τον Ιούλιο οι περισσότερες περιοχές του Δήμου Πειραιά εμφανίζουν πολύ υψηλές Ε.Θ.Ε.

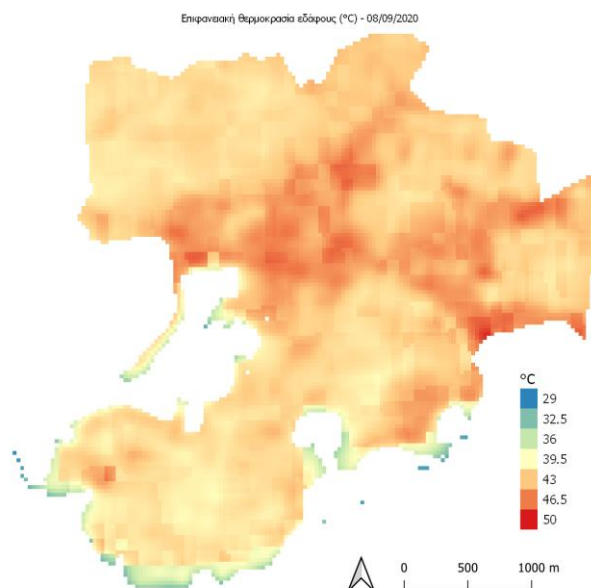


Εικόνα 29. Χωρική κατανομή της Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 22/07/2020.



Εικόνα 30. Χωρική κατανομή της Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 23/08/2020.

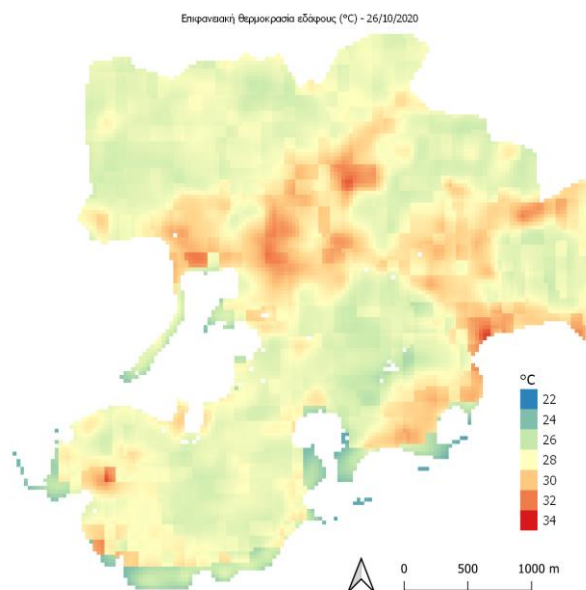
Στην Εικόνα 32 παρουσιάζεται η Ε.Θ.Ε. για το Δήμο Πειραιά για τις αρχές του Σεπτεμβρίου με την τιμή της να κυμαίνεται μεταξύ 29-50°C, στα ίδια ουσιαστικά επίπεδα με τον Αύγουστο, αναδεικνύοντας πως και ο Σεπτέμβριος είναι ένας μήνας όπου το θερμικό περιβάλλον του Δήμου Πειραιά δέχεται έντονες πιέσεις.



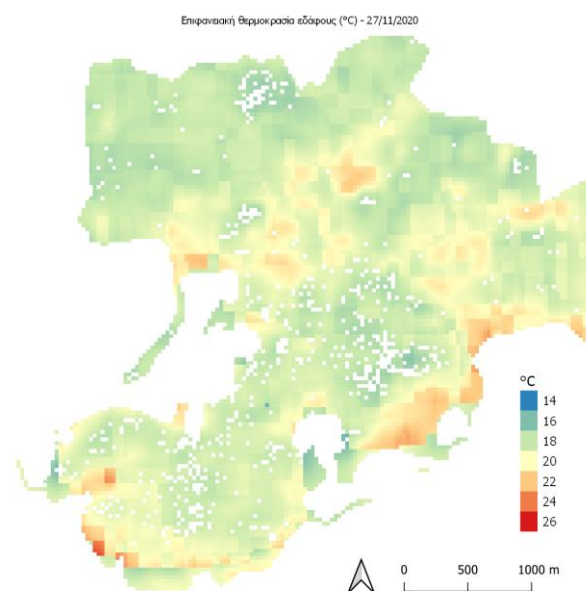
Εικόνα 31. Χωρική κατανομή της Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 08/09/2020.

Τον Οκτώβριο, η Ε.Θ.Ε. κυμαίνεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες από 22 °C έως 34 °C παρουσιάζοντας σημαντική μείωση σε σχέση με τους προηγούμενους μήνες (Εικόνα 33). Το μεγαλύτερο μέρος του Δήμου έχει σχετικά χαμηλές Ε.Θ.Ε., με τις υψηλές τιμές της Ε.Θ.Ε. να εντοπίζονται κοντά στο Στάδιο Ειρήνης και Φιλίας, στο λιμάνι του Πειραιά και στη γύρω αστική περιοχή καθώς και στο αμαξοστάσιο του ΟΣΕ.

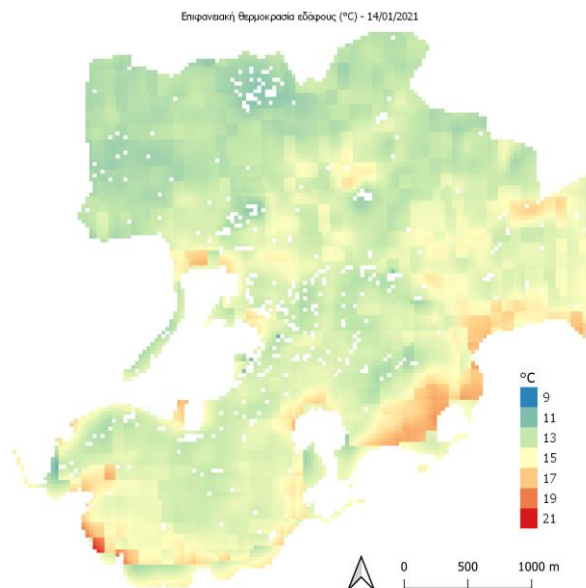
Τον Νοέμβριο η Ε.Θ.Ε. κυμαίνεται μεταξύ 14 °C - 26 °C (Εικόνα 34) ενώ τον Ιανουάριο του 2021 οι τιμές της Ε.Θ.Ε. είναι ακόμα χαμηλότερες (Εικόνα 35). Η ύπαρξη νεφών δυσκολεύει την εύρεση κατάλληλων δορυφορικών δεδομένων κατά τους χειμερινούς μήνες, για αυτό το λόγο στις χειμερινές εικόνες παρατηρούνται κάποια κενά στα δεδομένα.



Εικόνα 32. Χωρική κατανομή της Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 26/10/2020.

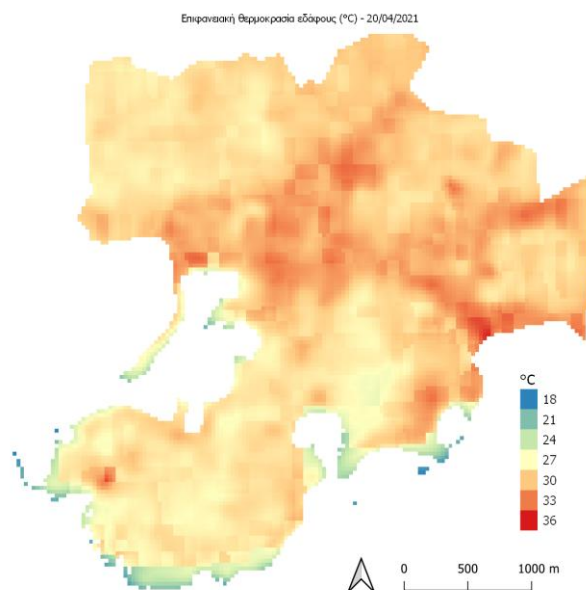


Εικόνα 33. Χωρική κατανομή της Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 27/11/2020.

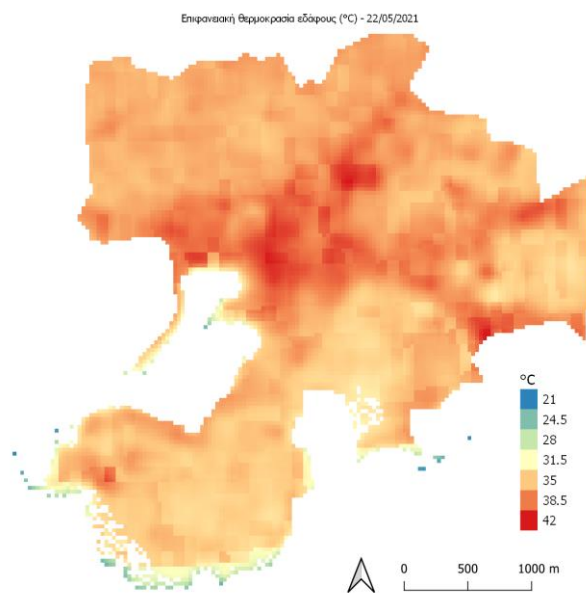


Εικόνα 34. Χωρική κατανομή της Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 14/01/2021.

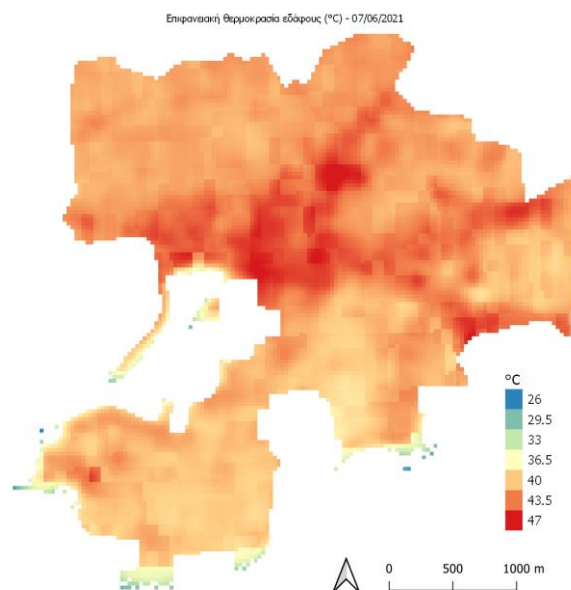
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης της Ε.Θ.Ε. για το 2021 (Εικόνες 36-41). Η ανάλυση των δεδομένων επιβεβαιώνει τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των δεδομένων του 2020 καθώς κατά τους θερινούς μήνες οι Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά φτάνουν σε πολύ υψηλά επίπεδα της τάξης των 50 °C, με τη χωρική κατανομή να είναι ομοιόμορφη.



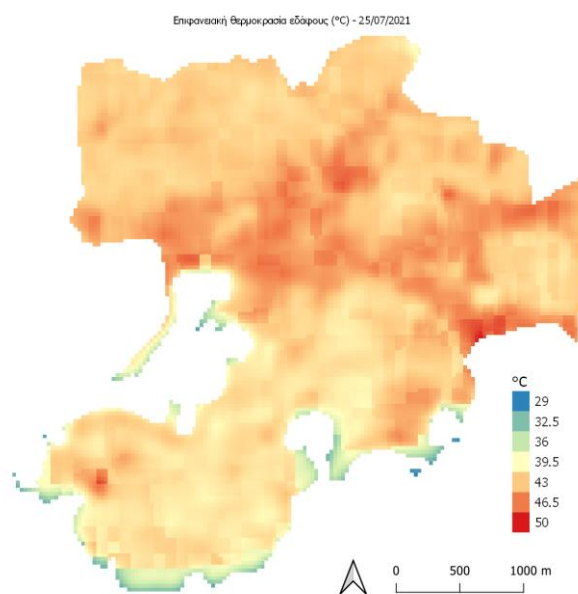
Εικόνα 35. Χωρική κατανομή της Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 20/04/2021.



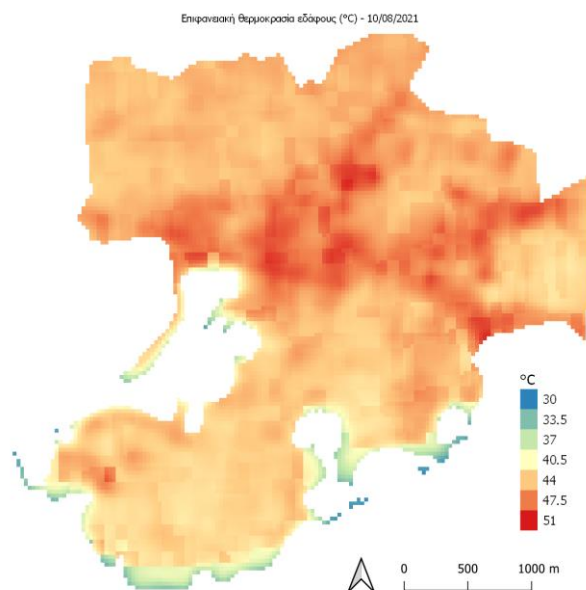
Εικόνα 36. Χωρική κατανομή της Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 22/05/2021.



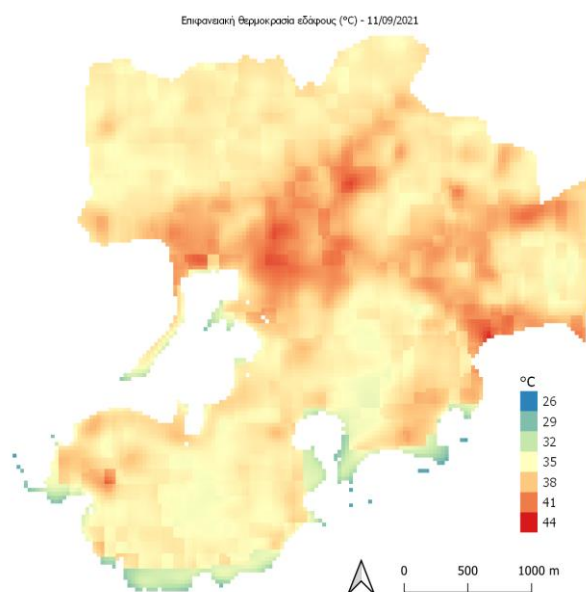
Εικόνα 37. Χωρική κατανομή της Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 07/06/2021.



Εικόνα 38. Χωρική κατανομή της Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 25/07/2021.



Εικόνα 39. Χωρική κατανομή της Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 10/08/2021.



Εικόνα 40. Χωρική κατανομή της Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 11/09/2021.

B2.3. Μελέτη της ενδοημερήσιας μεταβολής της Επιφανειακής Θερμοκρασίας Εδάφους

Βάσει των διαθέσιμων δορυφορικών συστημάτων, δεν είναι επί του παρόντος δυνατή η καθημερινή λήψη θερμικών εικόνων με την αναγκαία σε πολλές εφαρμογές υψηλή χωρική ανάλυση. Αυτό αποτελεί επακόλουθο της αντίστροφης σχέσης που παρουσιάζεται μεταξύ της χρονικής και της χωρικής διακριτικής ικανότητας των δορυφορικών εικόνων.

Συγκεκριμένα, οι δορυφόροι υψηλής χωρικής ευκρίνειας όπως οι δορυφόροι Landsat χαρακτηρίζονται από χαμηλή χρονική επαναληπτικότητα των λήψεων για μια συγκεκριμένη περιοχή (περίπου δύο εβδομάδες), ως αποτέλεσμα των ιδιοτήτων της δορυφορικής τροχιάς τους και των τεχνικών δυνατοτήτων των αισθητήρων που φέρουν. Αντίθετα, οι δορυφόροι που παρέχουν εικόνες με συχνότητα της τάξης των δύο εικόνων ανά ημέρα, χαρακτηρίζονται από τη σημαντικά μικρότερη χωρική ανάλυση (περίπου 1km) των παρατηρήσεων τους όπως οι δορυφόροι Sentinel 3.

Επομένως, για να καλυφθεί το υπάρχον κενό μεταξύ χωρικής και χρονικής ανάλυσης απαιτείται η χρήση τεχνικών οι οποίες θα ενισχύουν τεχνητά τη χωρική διακριτική ικανότητα των ημερήσιων δορυφορικών εικόνων. Το σύνολο των τεχνικών με στόχο τη βελτίωση της χωρικής ανάλυσης των δορυφορικών (θερμικών) δεδομένων ορίζεται ως «υποκλιμάκωση» (downscaling).

Ειδικότερα για τη παρούσα μελέτη μελετήθηκε το θερμικό περιβάλλον του Δήμου Πειραιά με τη χρήση δορυφορικών δεδομένων Sentinel 3 για τους καλοκαιρινούς μήνες του 2020. Τα δεδομένα αυτά έχουν χαμηλή χωρική ανάλυση (1km x 1km) αλλά υψηλή χρονική ανάλυση αφού διέρχονται πάνω από την Ελλάδα καθημερινά ενώ παρέχουν και νυχτερινή λήψη (περίπου στις 23.00). Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την μελέτη του αστικού περιβάλλοντος καθώς τη νύχτα δεν υπάρχει η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία ώστε να θερμάνει το έδαφος, όμως οι ιδιότητες των δομικών υλικών συγκρατούν τη θερμότητα στο έδαφος με αποτέλεσμα την αργή απόψυξη του εδάφους των αστικών περιοχών σε σχέση με τις μη αστικές.

Για την βελτίωση της χωρικής ανάλυσης των δεδομένων Sentinel 3 εφαρμόστηκε η πιο διαδεδομένη τεχνική ενίσχυσης της χωρικής διακριτικής ικανότητας της επιφανειακής θερμοκρασίας που είναι η «στατιστική υποκλιμάκωση», ώστε τα δεδομένα να μετατραπούν σε χωρική ανάλυση 100m x 100m, ανάλυση που είναι αποδεκτή για τη μελέτη του θερμικού περιβάλλοντος του Δήμου Πειραιά.

Κατά τη μέθοδο αυτή, αναπτύσσεται μία παραμετρική εξίσωση μεταξύ της Ε.Θ.Ε. και μίας επιφανειακής παραμέτρου όπως ο κανονικοποιημένος δείκτης βλάστησης NDVI. Η

σχέση μεταξύ της επιφανειακής θερμοκρασίας και της επιλεγμένης προγνωστικής παραμέτρου αναπτύσσεται αρχικά σε χαμηλή χωρική ανάλυση. Κατόπιν, με τη θεώρηση ότι η ίδια σχέση διατηρείται σε σημαντικό βαθμό και σε καλύτερη κλίμακα — στην οποία υπάρχουν επίσης διαθέσιμα δεδομένα για την προγνωστική παράμετρο — και την εφαρμογή της αναπτυχθείσας σχέσης, παράγεται η χωρικά ενισχυμένη θερμική εικόνα. Στη διεθνή βιβλιογραφία εντοπίζονται αρκετές μελέτες στις οποίες η στατιστική υποκλιμάκωση θερμικών δορυφορικών εικόνων, έχει πραγματοποιηθεί αναπτύσσοντας μία παραμετρική εξίσωση μεταξύ της επιφανειακής θερμοκρασίας και του δείκτη NDVI.

Το σύνολο των δορυφορικών δεδομένων Sentinel 3 τα οποία χρησιμοποιήθηκαν αφορά περισσότερες **από 200 εικόνες**. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν ενδεικτικά επιλεγμένες ημέρες κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης όπου υπήρχαν υψηλής ποιότητας δεδομένα και για την ημέρα και για τη νύχτα (Πίνακας 4).

Πίνακας 5. Κατάλογος δορυφορικών δεδομένων Sentinel 3 που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη.

10/06/2020	Εικόνα 42
21/06/2020	Εικόνα 43
27/06/2020	Εικόνα 44
02/07/2020	Εικόνα 45
10/07/2020	Εικόνα 46
20/07/2020	Εικόνα 47
30/07/2020	Εικόνα 48
12/08/2020	Εικόνα 49
22/08/2020	Εικόνα 50
31/08/2020	Εικόνα 51

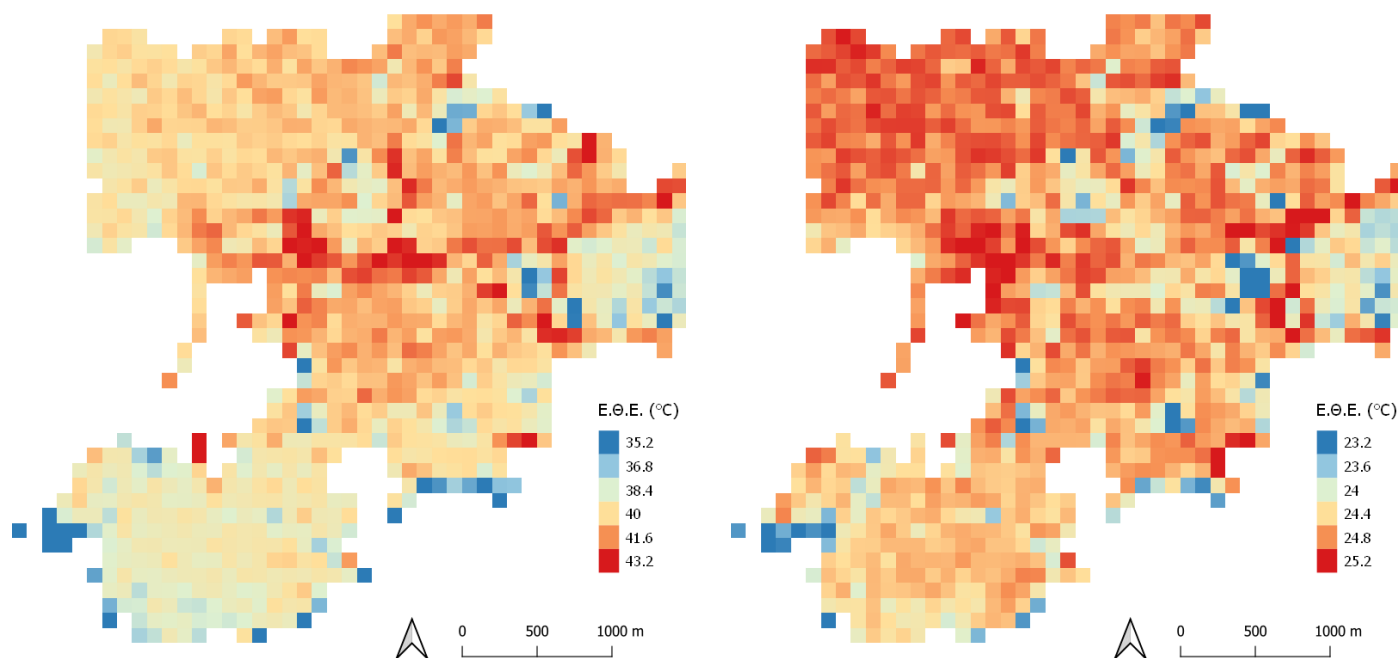
Στις επόμενες Εικόνες (42-51) παρουσιάζεται η Ε.Θ.Ε. (με διαφορετική χρωματική κλίμακα για την κάθε μια) για τις πρωινές και βραδινές λήψεις. Κατά τη διάρκεια της ημέρας και για το προαναφερθέν χρονικό διάστημα η μέγιστη θερμοκρασία που παρατηρήθηκε είναι 48.8°C και η ελάχιστη 35.2°C. Οι περιοχές με μέγιστες θερμοκρασίες εμφανίζονται στο κέντρο του Δήμου Πειραιά που χαρακτηρίζεται από εμπορικές και βιομηχανικές εγκαταστάσεις, καθώς επίσης και στην περιοχή γύρω από το λιμάνι, όπου τα υλικά απορροφούν περισσότερη ακτινοβολία και άρα θερμαίνονται περισσότερο. Μια αστική περιοχή που χαρακτηρίζεται σταθερά με χαμηλές Ε.Θ.Ε. εντοπίζεται στα ανατολικά του Σταδίου Καραϊσκάκη στο 3^ο δημοτικό διαμέρισμα.

Κατά τη διάρκεια της νύχτας η μέγιστη θερμοκρασία που παρατηρήθηκε είναι 31.5°C και η ελάχιστη 23°C. Οι περιοχές με μέγιστες θερμοκρασίες εμφανίζονται στο κέντρο του Δήμου Πειραιά αλλά στις πυκνοδομημένες αστικές περιοχές του 1^{ου} και 5^{ου} δημοτικού

διαμερίσματος. Οι υψηλές Ε.Θ.Ε. στη διάρκεια της νύχτας όταν και δεν υπάρχει θέρμανση από ηλιακή ακτινοβολία, υποδηλώνουν ότι τα υλικά κάλυψης γης εκπέμπουν θερμότητα και αργούν να ψυχθούν. Οι χαμηλότερες θερμοκρασίες παρουσιάζονται, όπως και την ημέρα, στα ανατολικά.

Επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους (°C) - 10/06/2020 πρωί

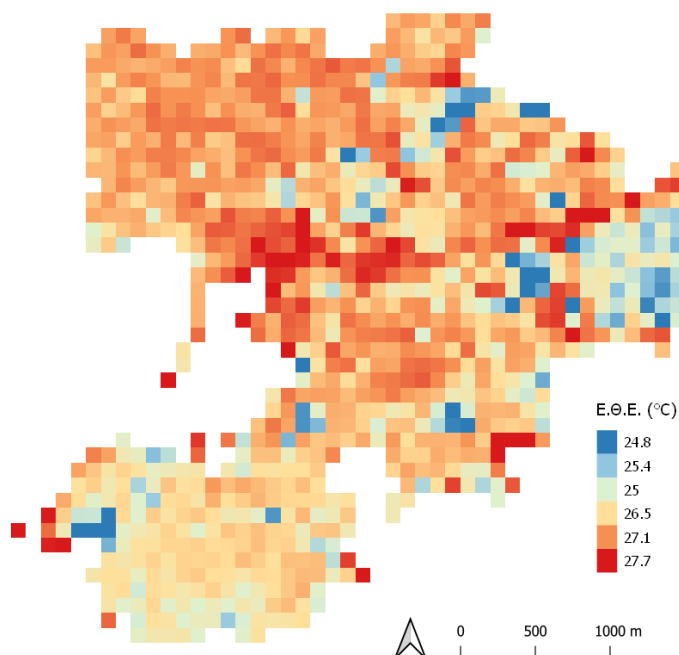
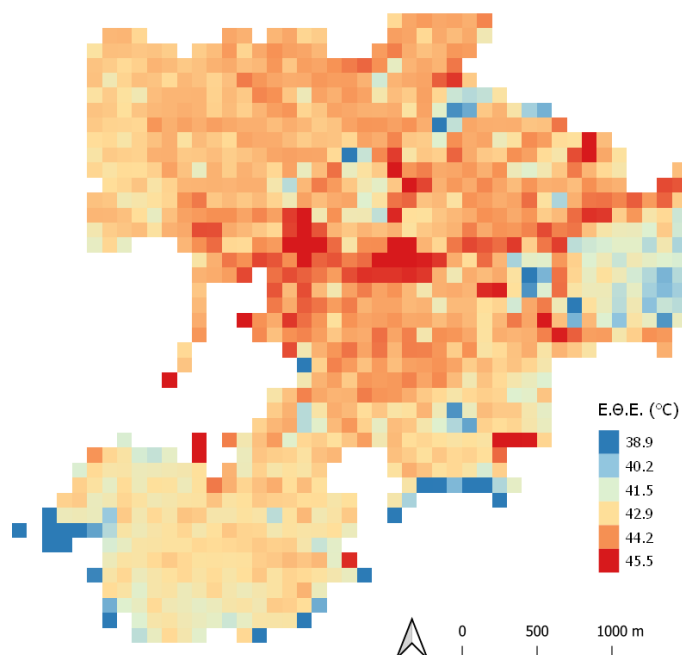
Επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους (°C) - 10/06/2020 βράδυ



Εικόνα 41. Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 10/06/2020 (αριστερά: πρωί, δεξιά: βράδυ).

Επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους (°C) - 21/06/2020 πρωί

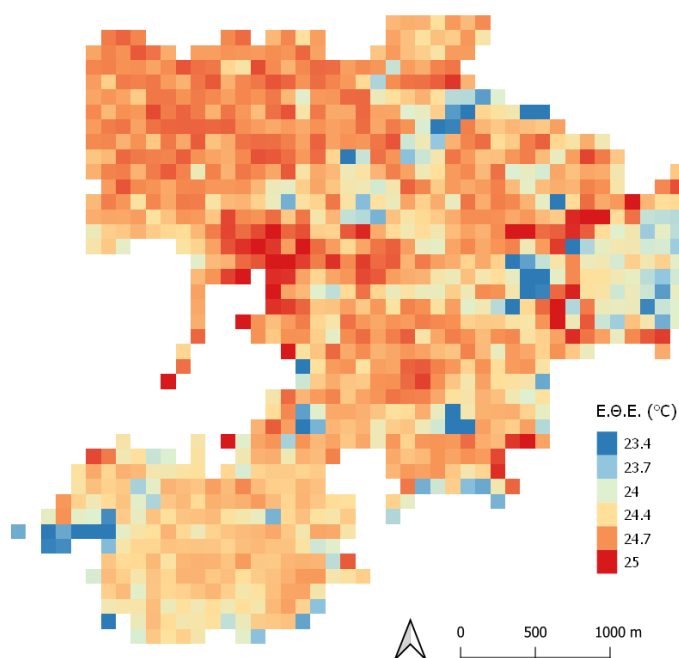
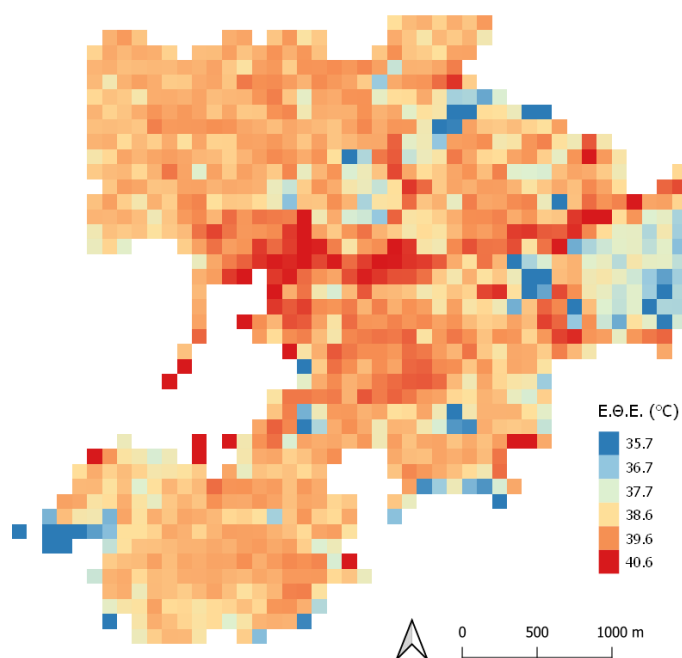
Επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους (°C) - 21/06/2020 βράδυ



Εικόνα 42. Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 21/06/2020 (αριστερά: πρωί, δεξιά: βράδυ).

Επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους (°C) - 27/06/2020 πρωί

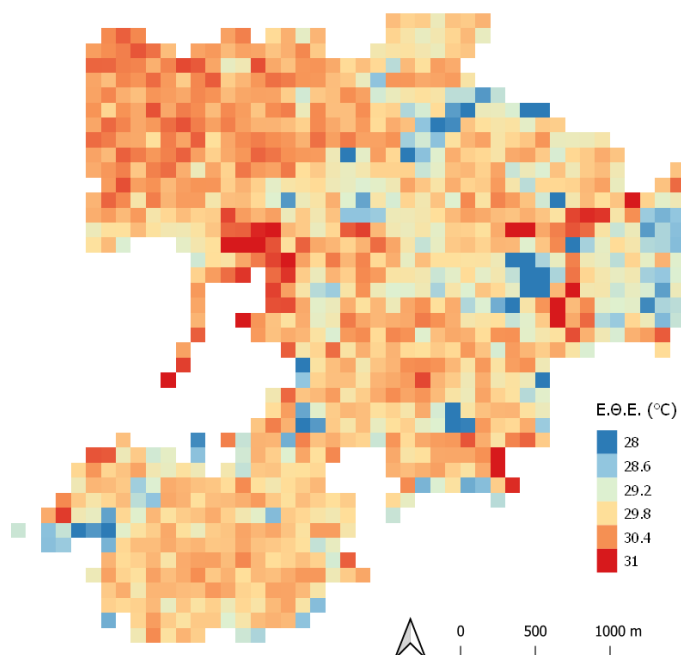
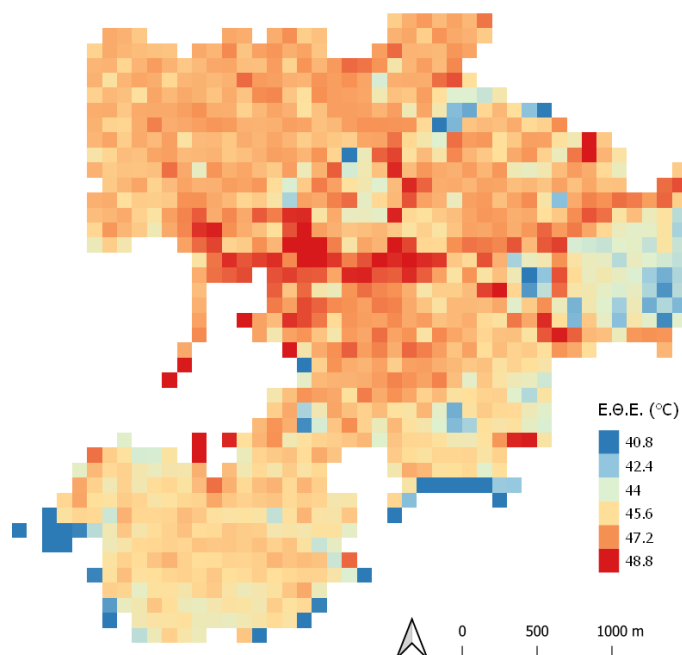
Επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους (°C) - 27/06/2020 βράδυ



Εικόνα 43. Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 27/06/2020 (αριστερά: πρωί, δεξιά: βράδυ).

Επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους (°C) - 02/07/2020 πρωί

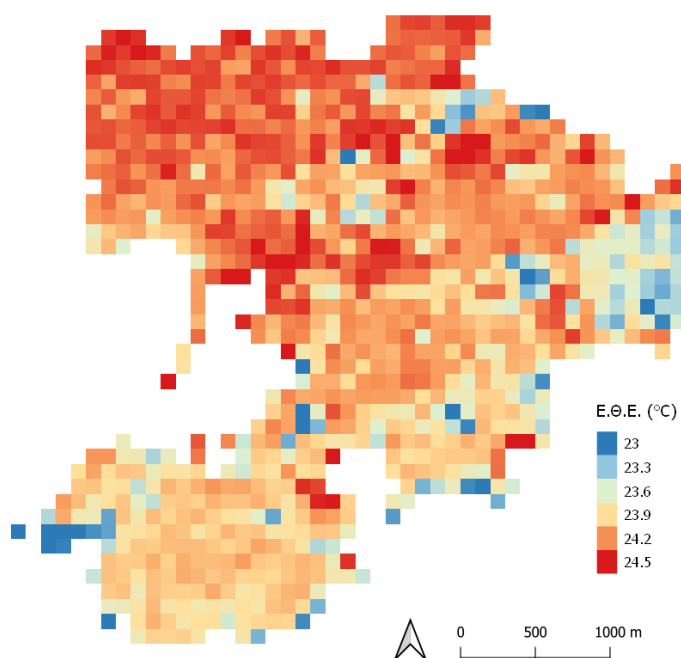
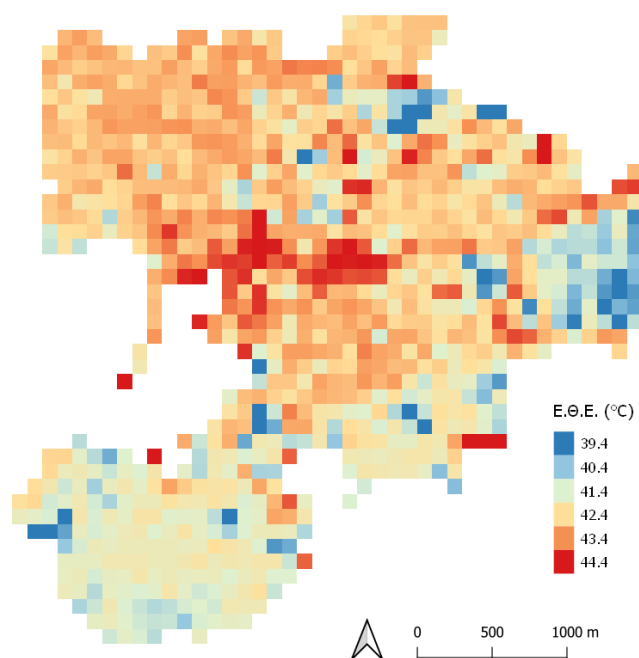
Επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους (°C) - 02/07/2020 βράδυ



Εικόνα 44. Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 02/07/2020 (αριστερά: πρωί, δεξιά: βράδυ).

Επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους (°C) - 10/07/2020 πρωί

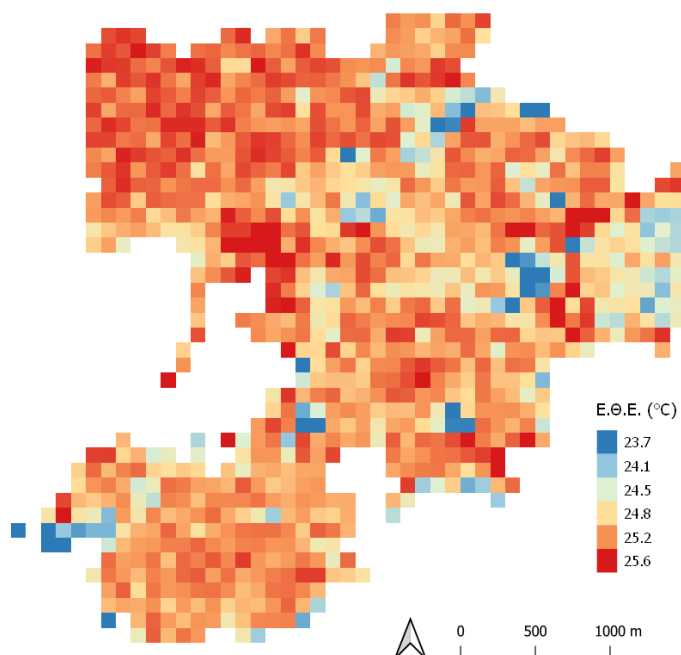
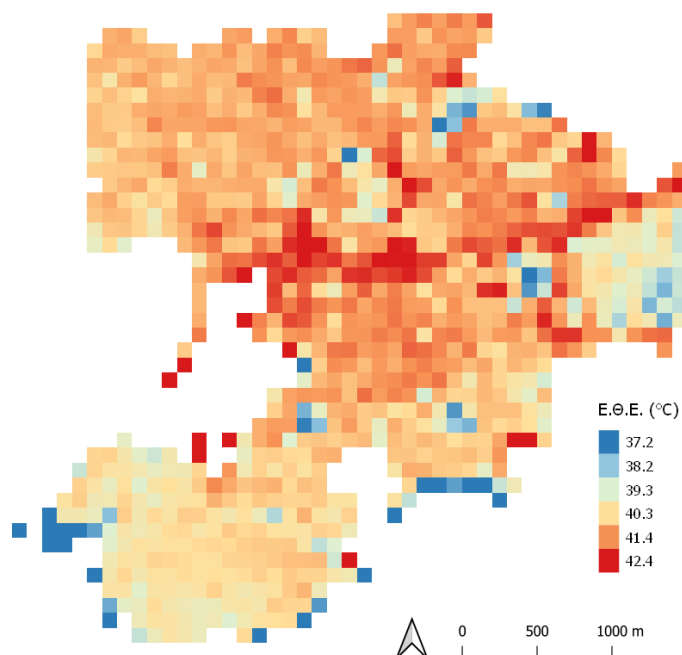
Επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους (°C) - 10/07/2020 βράδυ



Εικόνα 45. Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 10/07/2020 (αριστερά: πρωί, δεξιά: βράδυ).

Επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους (°C) - 20/07/2020 πρωί

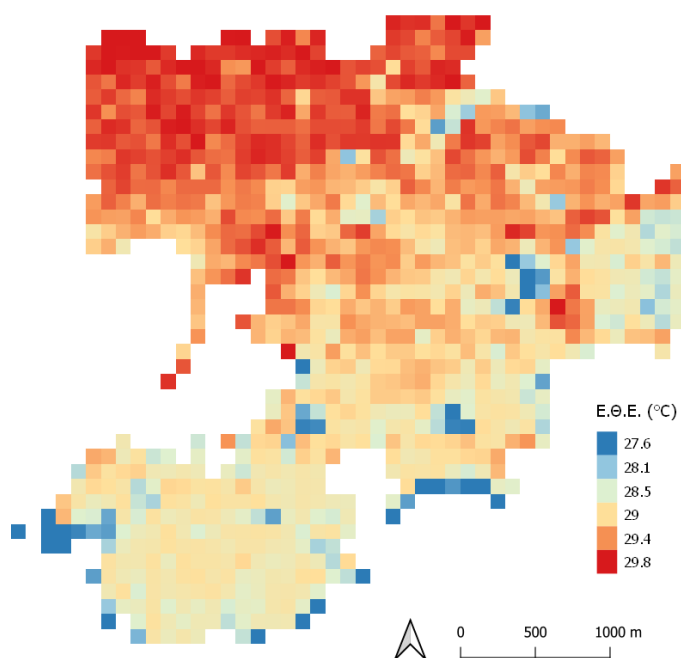
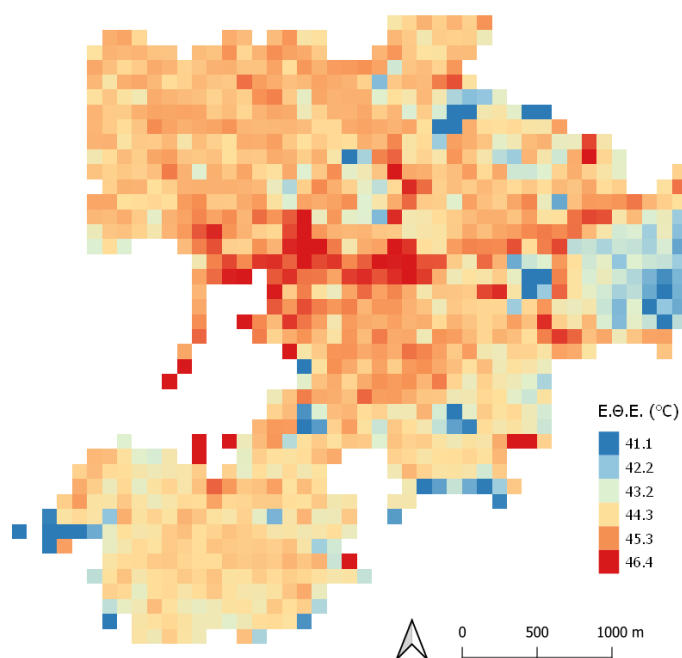
Επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους (°C) - 20/07/2020 βράδυ



Εικόνα 46. Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 20/07/2020 (αριστερά: πρωί, δεξιά: βράδυ).

Επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους (°C) - 30/07/2020 πρωί

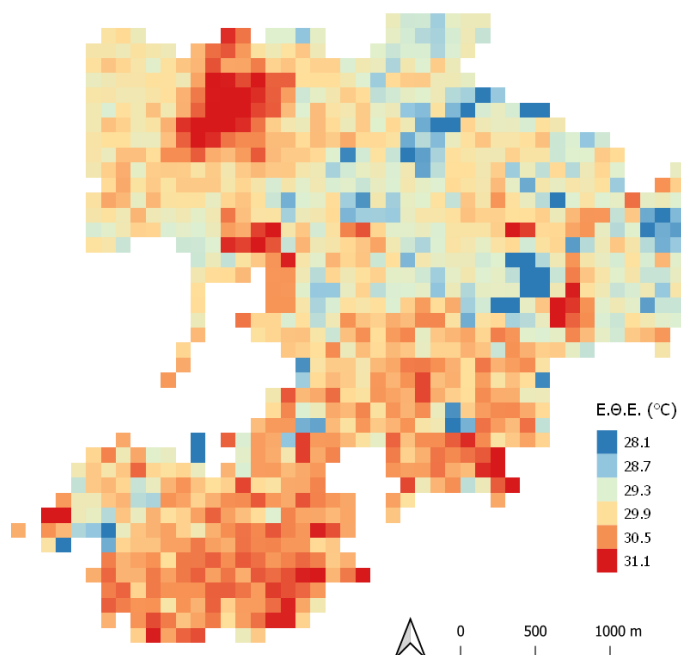
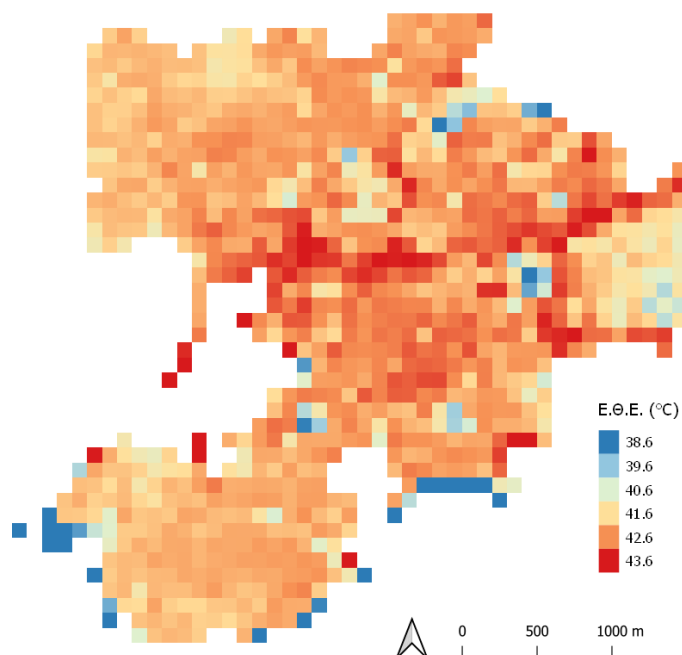
Επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους (°C) - 30/07/2020 βράδυ



Εικόνα 47. Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 30/07/2020 (αριστερά: πρωί, δεξιά: βράδυ).

Επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους (°C) - 12/08/2020 πρωί

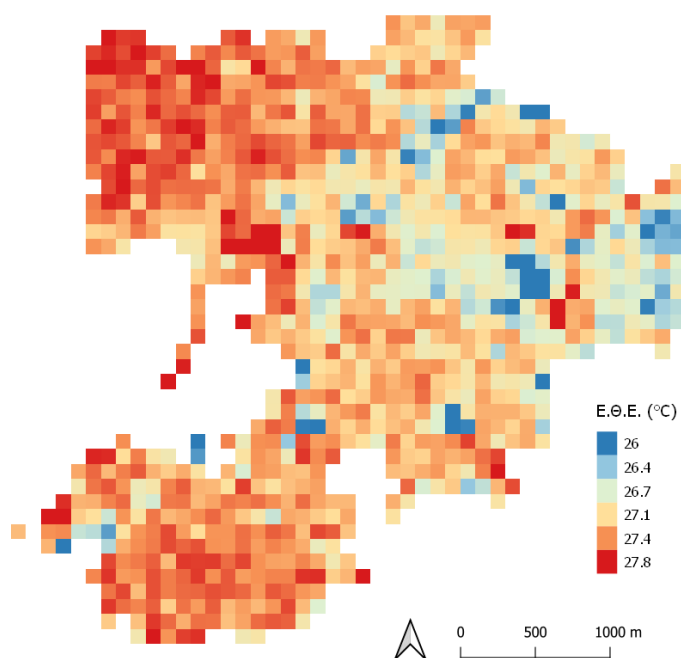
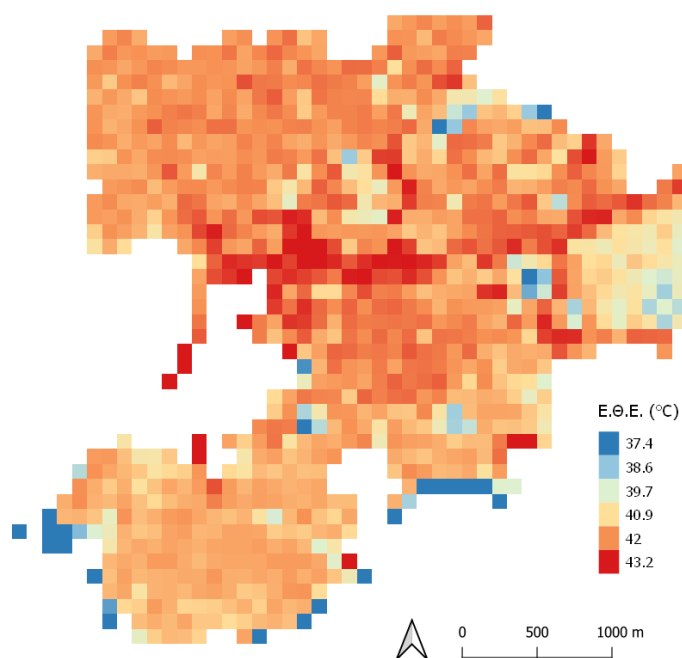
Επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους (°C) - 12/08/2020 βράδυ



Εικόνα 48. Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 12/08/2020 (αριστερά: πρωί, δεξιά: βράδυ).

Επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους (°C) - 22/08/2020 πρωί

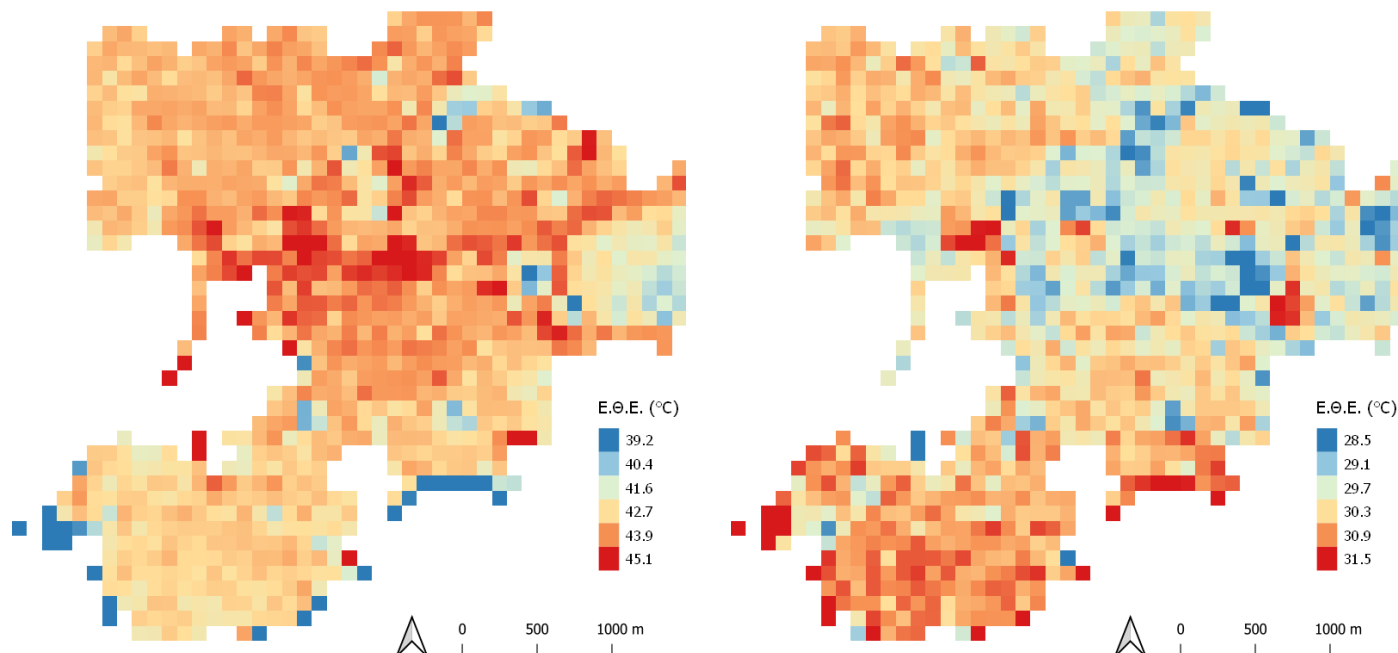
Επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους (°C) - 22/08/2020 βράδυ



Εικόνα 49. Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 22/08/2020 (αριστερά: πρωί, δεξιά: βράδυ).

Επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους (°C) - 31/08/2020 πρωί

Επιφανειακή θερμοκρασία εδάφους (°C) - 31/08/2020 βράδυ



Εικόνα 50. Ε.Θ.Ε. στο Δήμο Πειραιά την 31/08/2020 (αριστερά: πρωί, δεξιά: βράδυ).

B2.4. Εντοπισμός θερμικών αστικών ενοτήτων

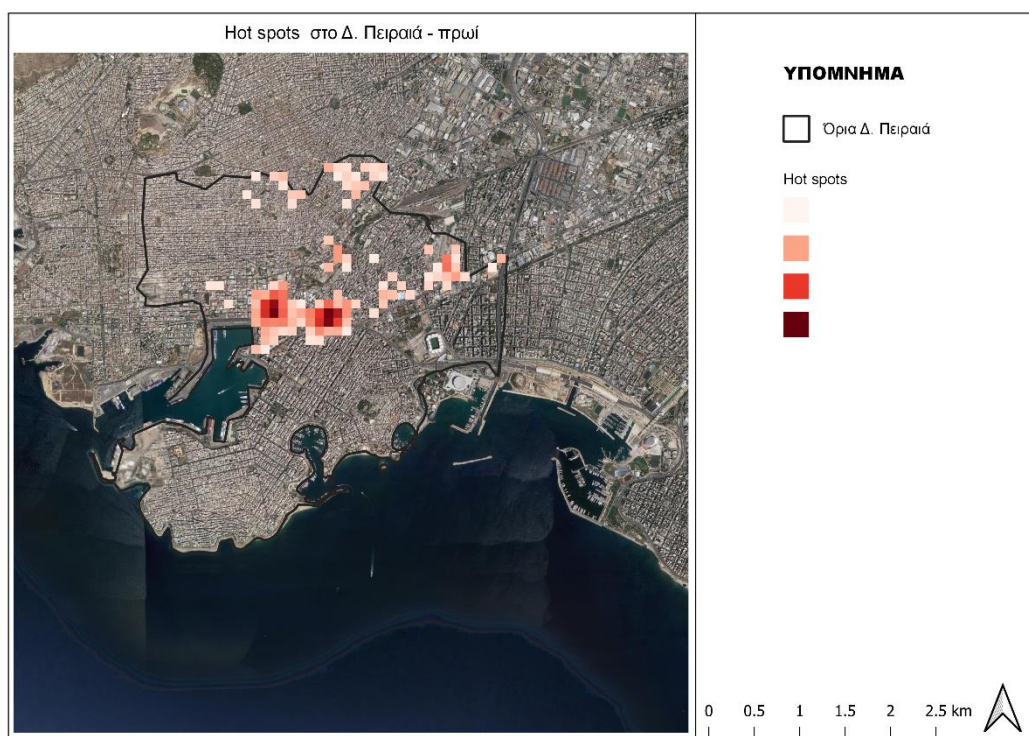
Η διαθεσιμότητα ημερήσιων δεδομένων Ε.Θ.Ε, επιτρέπει τη περαιτέρω στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων και συγκεκριμένα τον εντοπισμό περιοχών όπου εμφανίζονται συστηματικά υψηλές Ε.Θ.Ε (ενδοαστικές θερμικές νησίδες ή Hot Spots).. Η μεθοδολογία βασίζεται στον αλγόριθμο Getis-Ord που ουσιαστικά υπολογίζει τις τιμές z-score εξετάζοντας την Ε.Θ.Ε. κάθε περιοχής σε σχέση με την Ε.Θ.Ε. γειτονικών περιοχών. Οι τιμές z-score δείχνουν που συσσωρεύονται χωρικά οι υψηλές ή οι χαμηλές τιμές της Ε.Θ.Ε.. Επισημαίνεται πως μια περιοχή με υψηλή τιμή z-score παρουσιάζει ενδιαφέρον, αλλά μπορεί να μην είναι ένα στατιστικά σημαντικό Hot Spot.

Για να θεωρηθεί μια περιοχή, ως στατιστικά σημαντικό Hot Spot, εκτός του ότι πρέπει να έχει υψηλή τιμή, θα πρέπει και οι περιοχές που τη περιβάλλουν να έχουν εξίσου υψηλές τιμές Ε.Θ.Ε.. Το τοπικό άθροισμα για μια περιοχή και τις γειτονικές της, συγκρίνεται αναλογικά με το άθροισμα όλου του Δήμου Πειραιά. Όταν το τοπικό άθροισμα έχει πολύ μεγάλη απόκλιση από την μέση τιμή του Δήμου και όταν αυτή η διαφορά είναι πολύ μεγάλη για να είναι αποτέλεσμα τυχαίας πιθανότητας, προκύπτει ένα στατιστικά σημαντικό αποτέλεσμα hot spot.

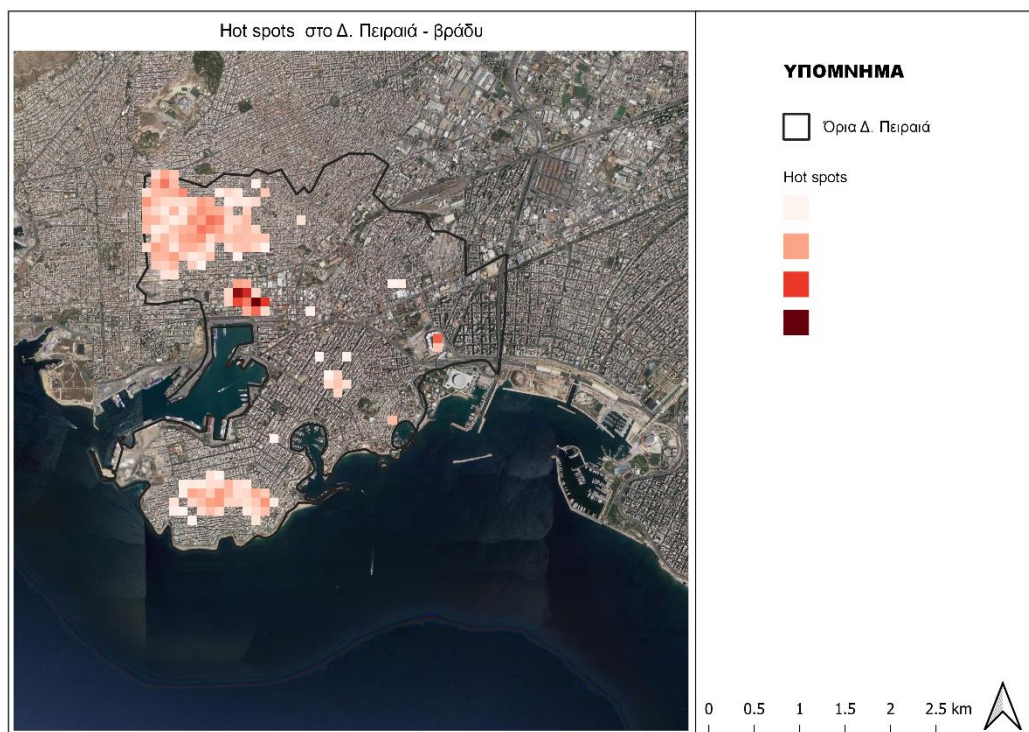
Η γνώση της παρουσίας και της έντασης των hot spots υποστηρίζει την κατάρτιση σχεδίων προσαρμογής στην αστική κλιματική αλλαγή καθώς δίνει σημαντικές πληροφορίες για τις περιοχές που πρέπει να έχουν προτεραιότητα κατά τον σχεδιασμό μέτρων μετριασμού της επιφανειακής θερμοκρασίας εδάφους αλλά και προσαρμογής στην αστική κλιματική αλλαγή.

Στην Εικόνα 52 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης για τις πρωινές ώρες. Με πιο σκούρο χρώμα έχουν καλυφθεί οι περιοχές με πιο υψηλές Ε.Θ.Ε. δηλαδή hot spots με μεγαλύτερη ένταση. Αντίστοιχα περιοχές με πιο ανοικτό χρώμα αποτελούν hot spots μικρότερης έντασης.

Στην Εικόνα 53 χαρτογραφούνται τα νυχτερινά hot spots. Παρατηρείται ότι εντοπίζονται σε διαφορετικά σημεία του δήμου και είναι άμεσα συνδεδεμένα με την υψηλή πυκνότητα δόμησης.



Εικόνα 51. Hot spots κατά τις πρωινές ώρες στο Δήμο Πειραιά.



Εικόνα 52. Hot spots κατά τις νυχτερινές ώρες στον Δήμο Πειραιά.

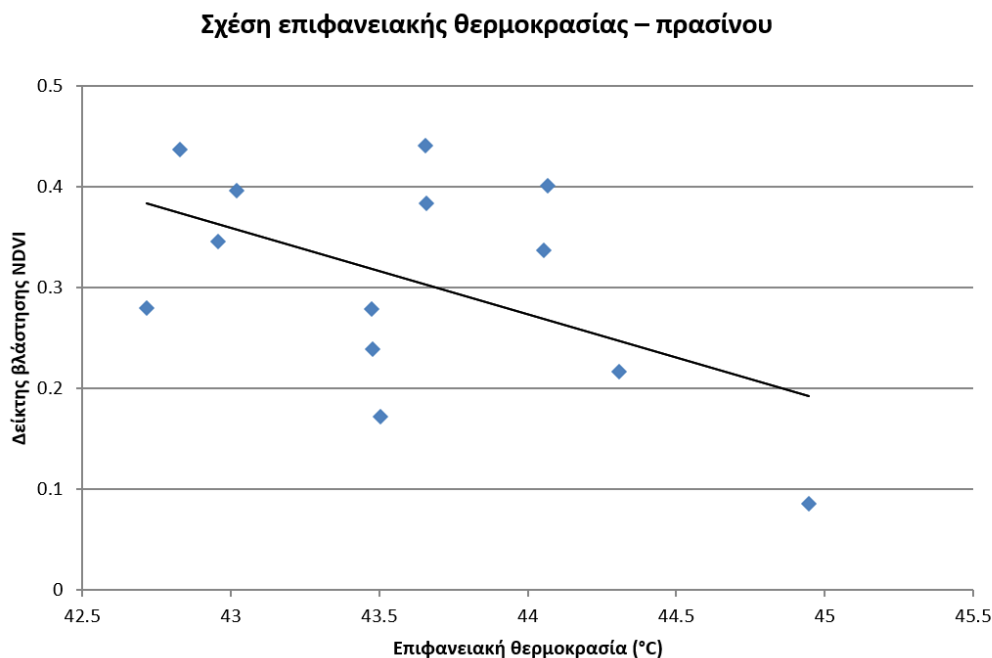
B2.5. Σχέση Επιφανειακής Θερμοκρασίας Εδάφους και αστικού πρασίνου στο Δήμο Πειραιά

Στα πλαίσια της μελέτης και των αποτελεσμάτων που έχουν ήδη παρουσιαστεί, εξετάστηκε η σχέση μεταξύ Ε.Θ.Ε. και αστικού πρασίνου στο Δήμο Πειραιά. Πολλά από τα μέτρα και τις δράσεις προσαρμογής στην αστική κλιματική αλλαγή καθώς και μετριασμού της, βασίζονται σε λύσεις με βάση το πράσινο (Nature based solutions). Κατά συνέπεια, η σχέση Ε.Θ.Ε. – πρασίνου αξίζει να διερευνηθεί έστω και αν ο Δήμος Πειραιά εμφανίζει ιδιαίτερα περιορισμένη κάλυψη πρασίνου.

Για τον εντοπισμό αστικού πρασίνου χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το πρόγραμμα Urban Atlas της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Το Urban Atlas αποτελεί μια χαρτογράφηση των χρήσεων και κάλυψης γης περίπου 700 ευρύτερων αστικών περιοχών της Ευρώπης. Παράγεται από υψηλής ανάλυσης δεδομένα τηλεπισκόπησης, τοπογραφικούς χάρτες και επιπλέον πηγές βοηθητικών δεδομένων, με τελική χωρική κλίμακα 1:10000. Από τις κατηγορίες χρήσεων γης που έχει το πρόγραμμα, επιλέχθηκε η κατηγορία «Αστικό πράσινο» (Green urban areas) ώστε να απομονωθούν τα σημεία του Δήμου Πειραιά με παρουσία βλάστησης που χρησιμοποιούνται ως πάρκα ή πλατείες. Σε αυτά τα σημεία

υπολογίστηκε ο κανονικοποιημένος δείκτης βλάστησης NDVI και εξετάστηκε η γραμμική συσχέτιση του με την Ε.Θ.Ε.

Τα αποτελέσματα της συσχέτισης της Ε.Θ.Ε. με το δείκτη βλάστησης NDVI στα συγκεκριμένα σημεία εμφανίζονται στην Εικόνα 54. Ουσιαστικά επιβεβαιώνεται μία αρνητική συσχέτιση: αύξηση του πρασίνου οδηγεί σε μείωση της Ε.Θ.Ε. και αντίστροφα.



Εικόνα 53. Γραμμική συσχέτιση Ε.Θ.Ε. και δείκτη NDVI για τις περιοχές με πράσινο.

B2.6 Προσομοίωση της θερμοκρασίας του αέρα με τη χρήση μικροκλιματικού μοντέλου

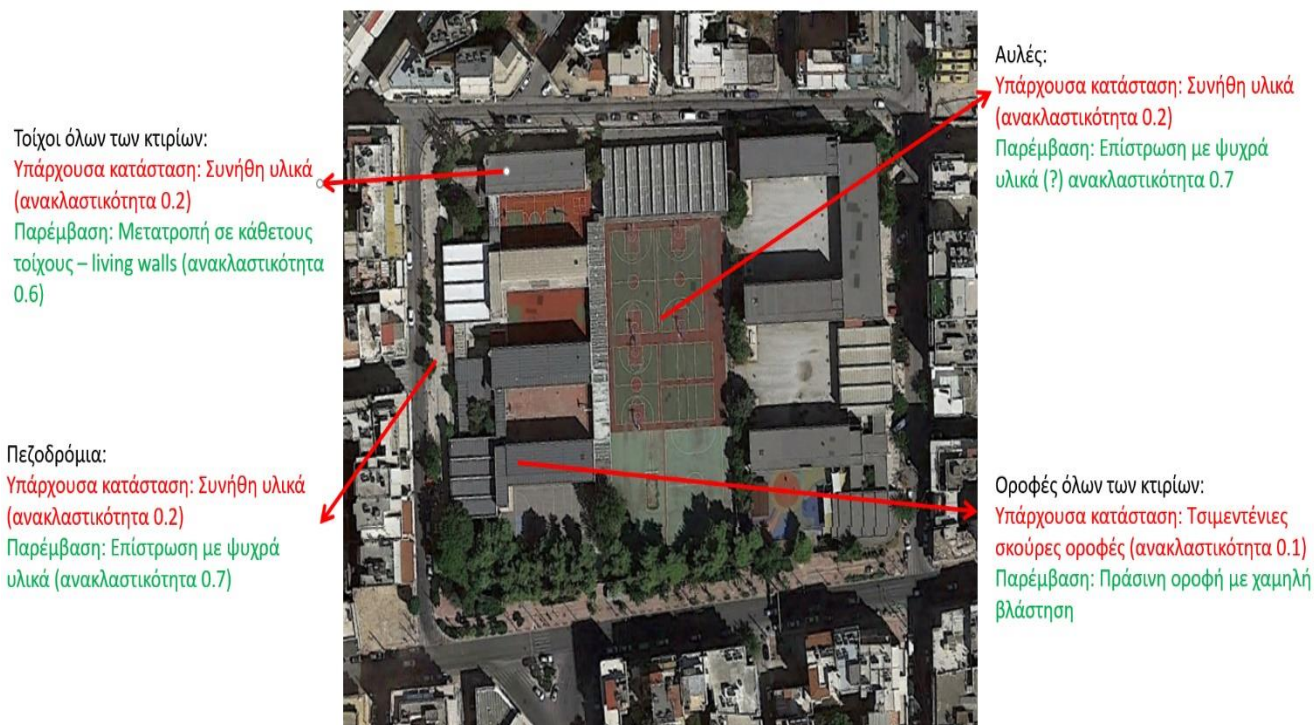
Στα πλαίσια της υποστήριξης του Πιλοτικού Μηχανισμού με καινοτόμα προϊόντα έρευνας, η ομάδα έργου προσέθεσε στα παραδοτέα και τις μικροκλιματικές προσομοιώσεις της θερμοκρασίας του αέρα που πραγματοποιήθηκαν για το σχολικό συγκρότημα που φιλοξενεί τα Ράλλεια Πειραματικά σχολεία (Εικόνα 55).

Για τη πειραματική προσομοίωση της θερμοκρασίας του αέρα στην ευρύτερη περιοχή του σχολικού συγκροτήματος χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ENVIMET ενώ οι μετεωρολογικές συνθήκες αφορούν μια καλοκαιρινή ημέρα καύσωνα. Οι παρεμβάσεις που προσομοιώθηκαν αποτυπώνονται στην Εικόνα 56.



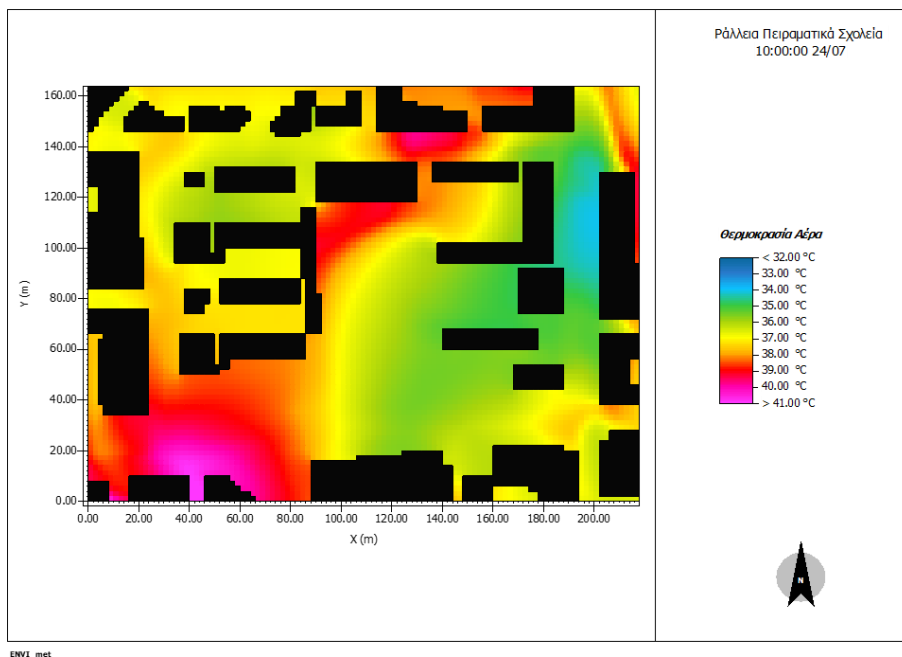
Εικόνα 54. Περιοχή προσομοίωσης.

Περιοχή προσομοίωσης και παρεμβάσεις

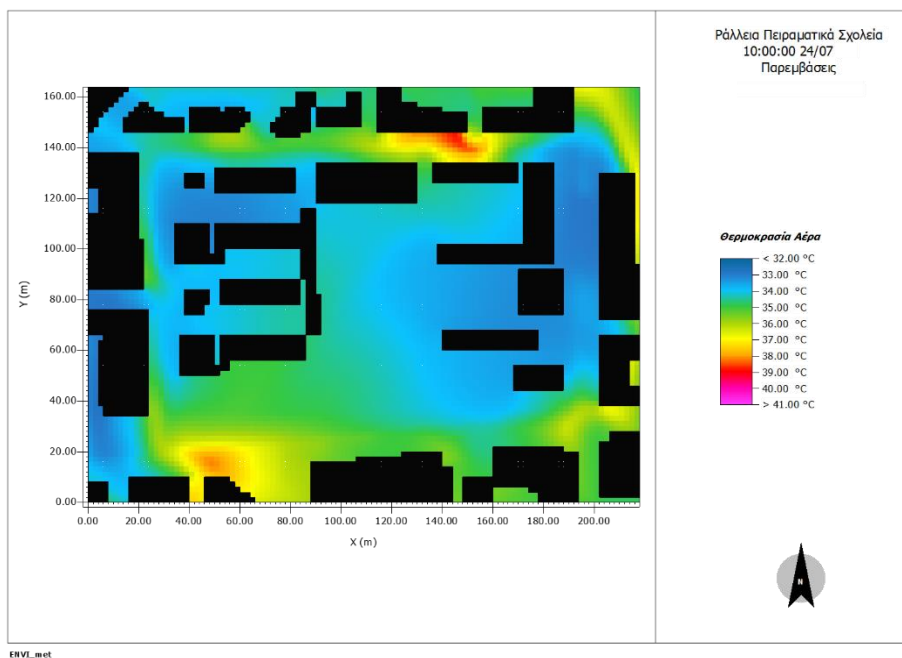


Εικόνα 55. Παρεμβάσεις που προσομοιώθηκαν

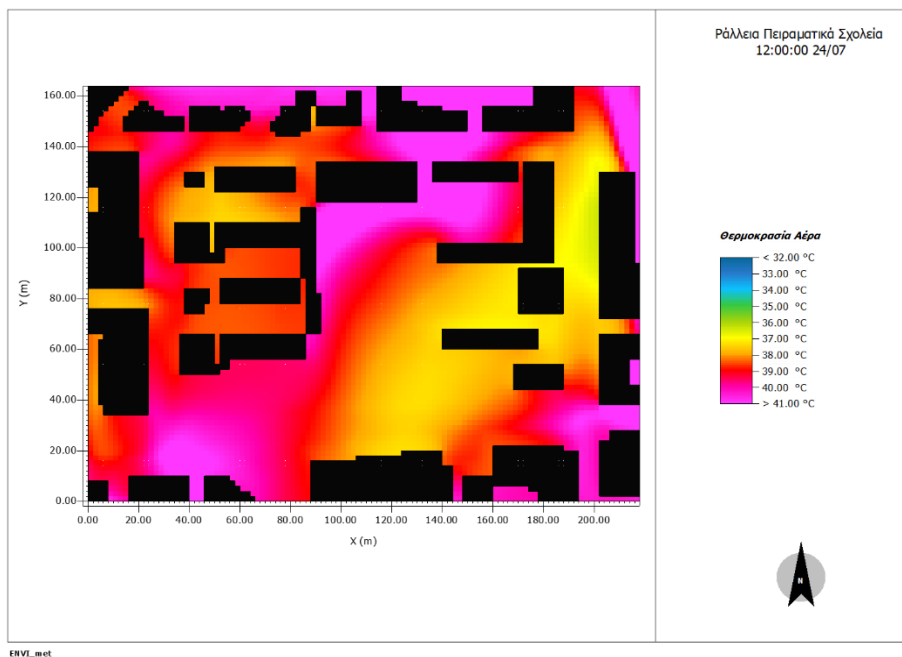
Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων εμφανίζονται στις Εικόνες 57 -66. Οι Εικόνες εμφανίζονται για διακριτές ώρες της ημέρας και ως δίδυμα, δηλαδή η κατανομή της θερμοκρασίας αέρα πριν και μετά τις παρεμβάσεις. Όπως διαπιστώνεται από τη σύγκριση των Εικόνων (για την ίδια ώρα), η θερμοκρασία αέρα μετά τις παρεμβάσεις μειώνεται τόσο στο σχολικό συγκρότημα όσο και περιμετρικά αυτού, γεγονός που σημαίνει ότι διαμορφώνεται μία «ψυχρή» ενότητα εντός του αστικού ιστού.



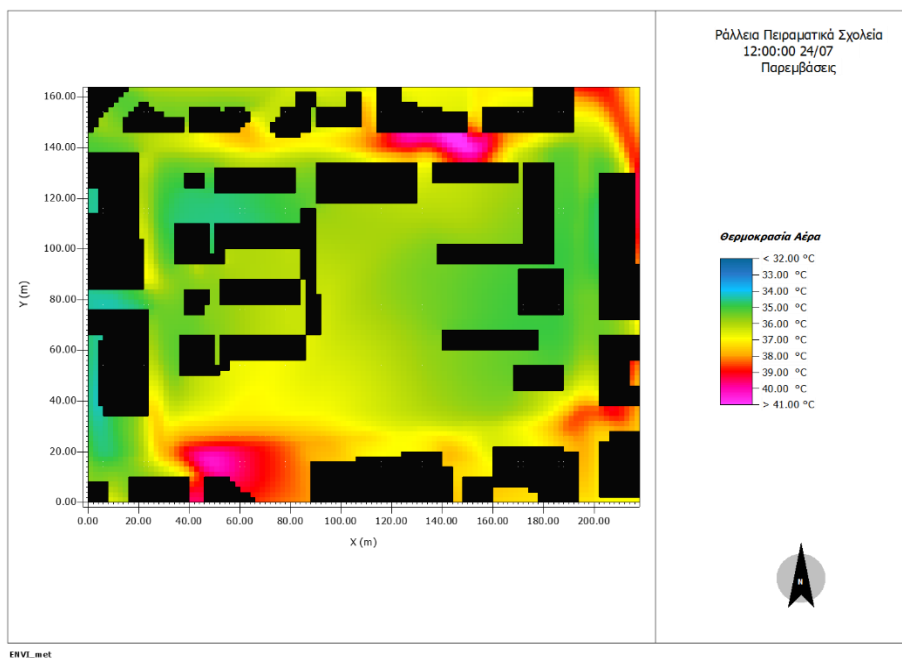
Εικόνα 56. Θερμοκρασία αέρα στις 10.00 (χωρίς παρεμβάσεις).



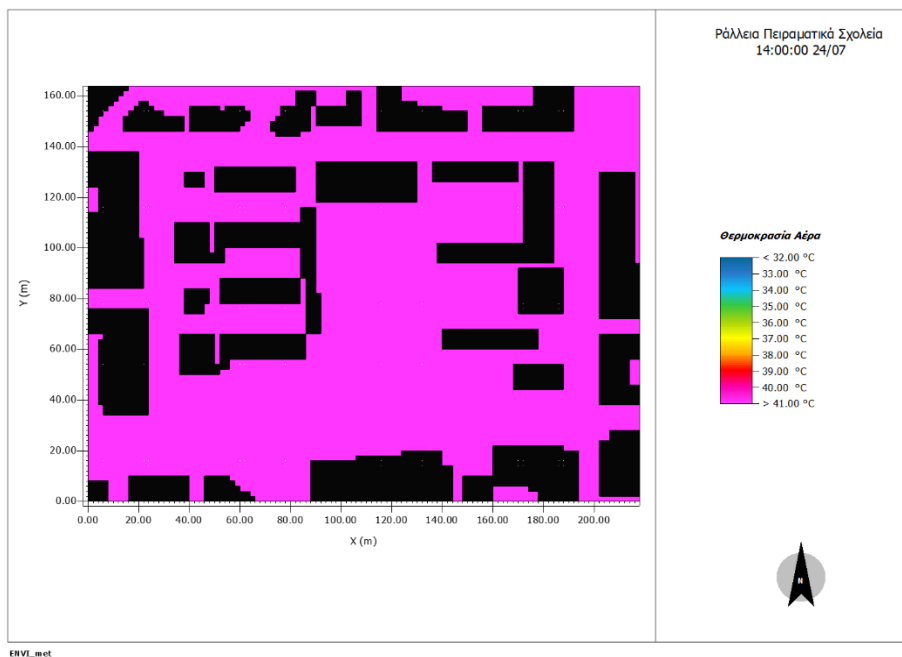
Εικόνα 57. Θερμοκρασία αέρα στις 10.00 (με παρεμβάσεις).



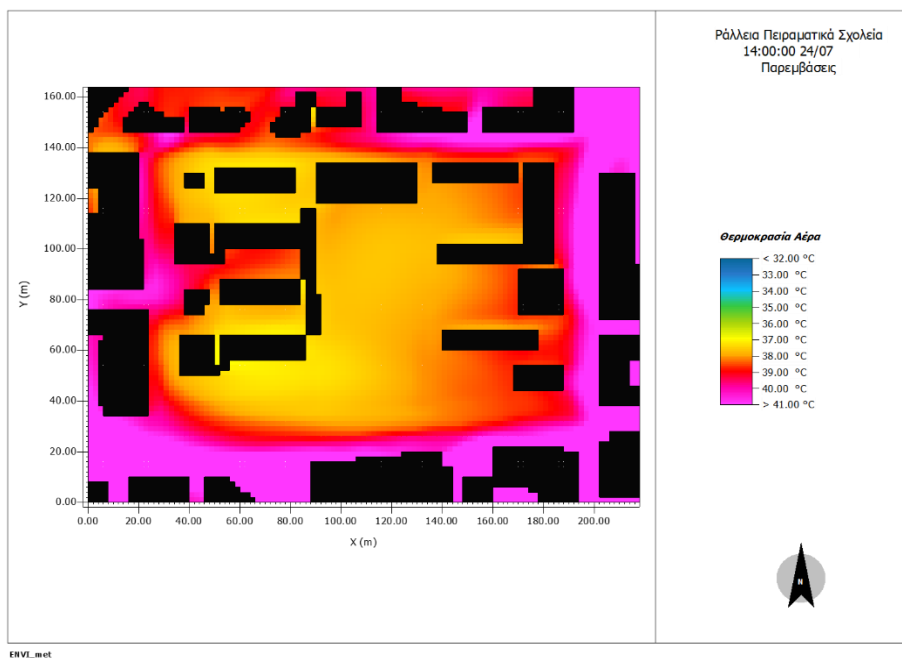
Εικόνα 58. Θερμοκρασία αέρα στις 12.00 (χωρίς παρεμβάσεις).



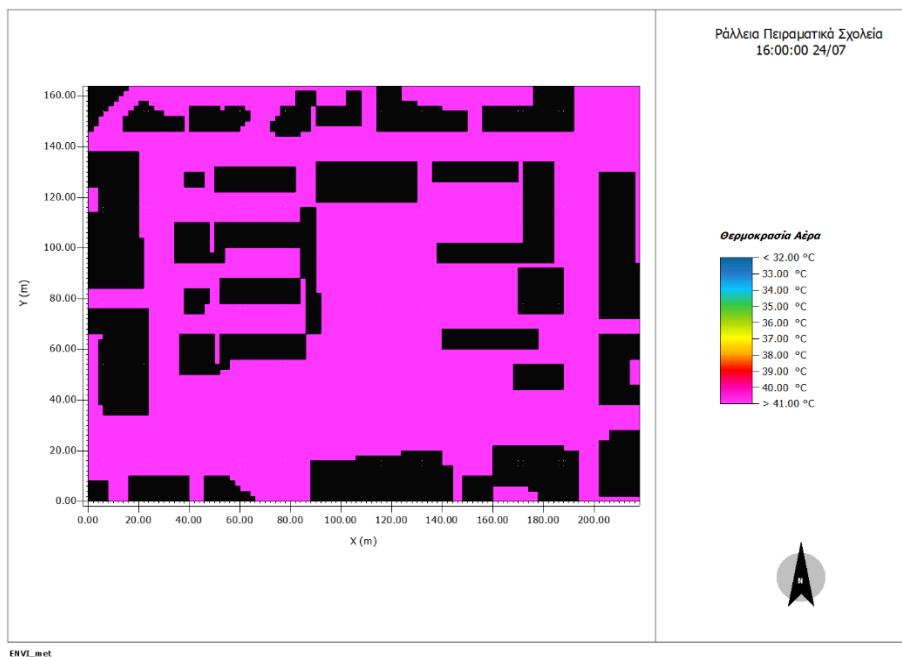
Εικόνα 59. Θερμοκρασία αέρα στις 12.00 (με παρεμβάσεις).



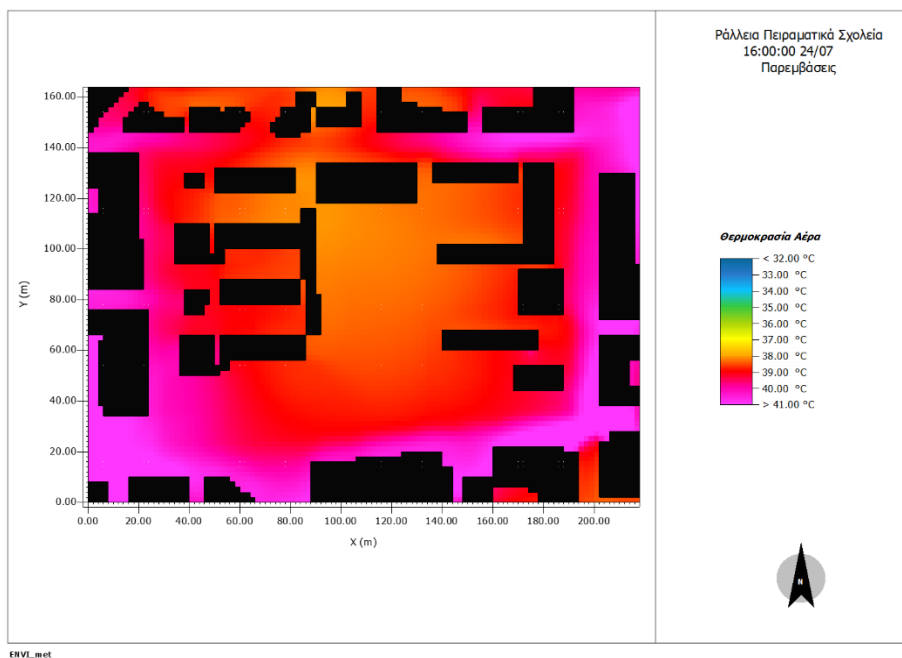
Εικόνα 60. Θερμοκρασία αέρα στις 14.00 (χωρίς παρεμβάσεις).



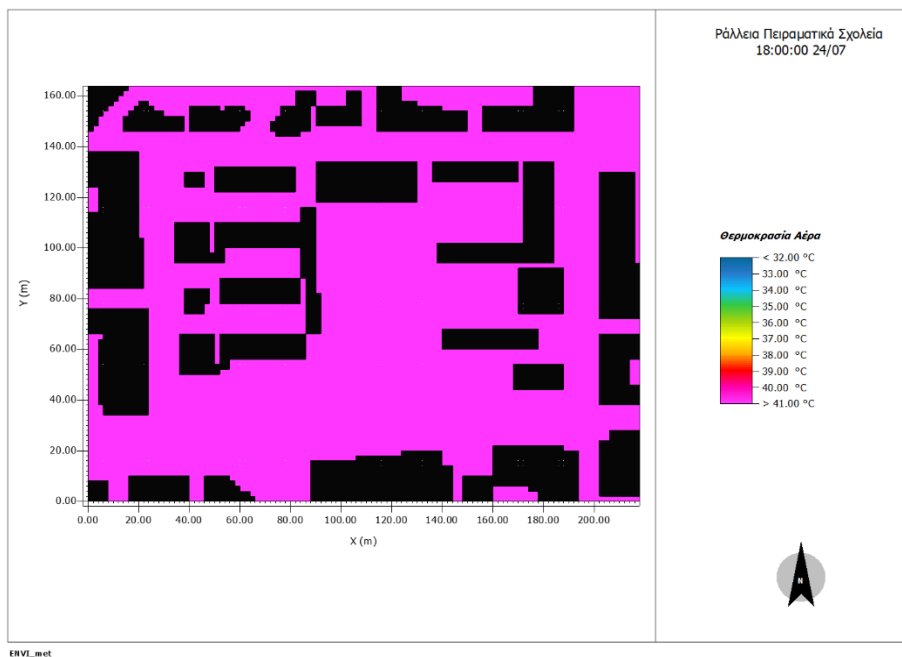
Εικόνα 61. Θερμοκρασία αέρα στις 14.00 (με παρεμβάσεις).



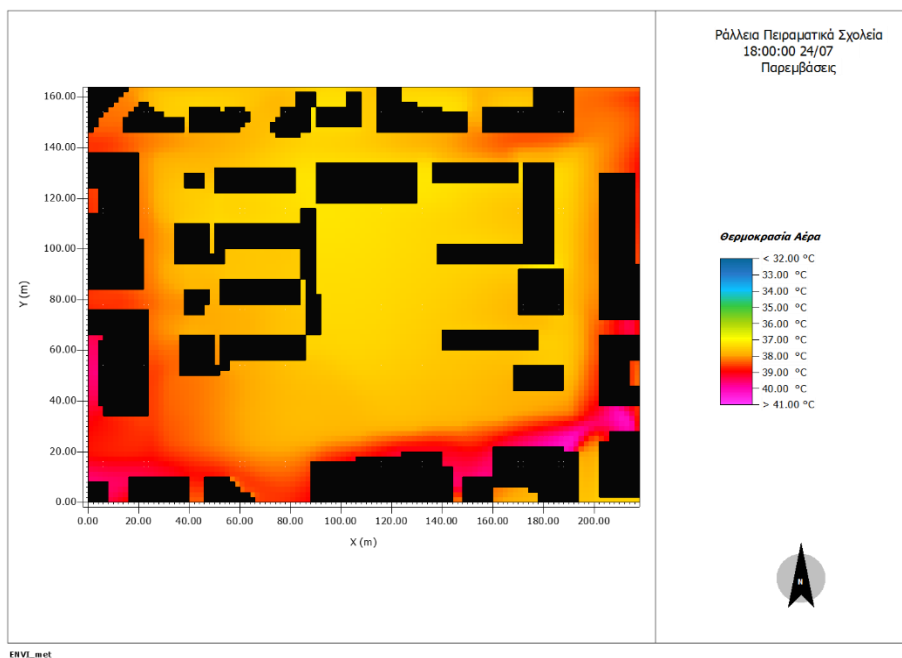
Εικόνα 62. Θερμοκρασία αέρα στις 16.00 (χωρίς παρεμβάσεις).



Εικόνα 63. Θερμοκρασία αέρα στις 16.00 (με παρεμβάσεις).



Εικόνα 64. Θερμοκρασία αέρα στις 18.00 (χωρίς παρεμβάσεις).



Εικόνα 65. Θερμοκρασία αέρα στις 18.00 (με παρεμβάσεις).

Γ. Καταληκτικά σχόλια

Η παρούσα έκθεση αφορά το Παραδοτέο 1 «Αποτύπωση της κάλυψης γης σε υψηλή χωρική ανάλυση – Εντοπισμός θερμών αστικών ενοτήτων» του έργου «ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ» το οποίο υποστηρίζει την ανάπτυξη σχεδίων προσαρμογής στην αστική κλιματική αλλαγή.

Στην έκθεση περιγράφονται οι περιβαλλοντικοί δείκτες «Κάλυψη Γης» και «Επιφανειακή Θερμοκρασία Εδάφους» που αποτελούν συμβατική υποχρέωση, καθώς και επιπλέον περιβαλλοντικοί δείκτες όπως «Βλάστηση», «Πυκνότητα Δόμησης» και «Κατανομή ενδοαστικών θερμικών νησίδων».

Επιπροσθέτως επιχειρήθηκε συμπληρωματικά των συμβατικών υποχρεώσεων, η προσομοίωση της θερμοκρασίας αέρα σε επιλεγμένο σχολικό συγκρότημα του Δήμου Πειραιά ώστε να διαμορφωθεί ο δείκτης «Δυναμικό Δροσισμού (Cooling Potential)», που αφορά στη μείωση της θερμοκρασίας αέρα και επιφάνειας εδάφους σε επιλεγμένες αστικές ενότητες μέσω συγκεκριμένων βιοκλιματικών και άλλων παρεμβάσεων.

Με την ολοκλήρωση του Παραδοτέου 2 του έργου, θα συμπληρωθεί και ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός του εργαλείου μέτρησης περιβαλλοντικών δεικτών προς εφαρμογή στο Δήμο Πειραιά.