

Σχεδιασμός Χρήσεων Γης σε Ορεινές Περιοχές με Χρήση Γενετικών Αλγορίθμων

Π. Κολοκούσης, Δρ.Μηχ., Ε.ΔΙ.Π. - Ε.Μ.Π.

Μ. Λάζογλου, Μηχανικός Χωροταξίας και Ανάπτυξης, Υπ. Διδάκτωρ Α.Π.Θ.

Ε. Γαλανού, Δρ. Τηλεπισκόπησης, MSc Περιφερειακής Ανάπτυξης, ΜΕ.Κ.Δ.Ε. Ε.Μ.Π.

Ε. Δημοπούλου, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Περίληψη

Ο σχεδιασμός του χώρου και η οργάνωση των σχετικών δραστηριοτήτων, αποτελούν πολύπλοκες διαδικασίες που απαιτούν πολυπαραγοντική ανάλυση πολλών και συχνά αντικρουόμενων παραμέτρων. Στη διαδικασία αυτή, κεντρικό ρόλο έχει ο σχεδιασμός των χρήσεων γης καθώς ο τρόπος οργάνωσής τους συνδέεται με την ιστορική εξέλιξη, τις κοινωνικές δομές, το περιβαλλοντικό και γεωμορφολογικό υπόβαθρο, τον πολιτισμικό πλούτο και το παραγωγικό πρότυπο κάθε περιοχής. Ο σχεδιασμός των χρήσεων γης δεν αποτελεί τη δευτερεύουσα πλευρά ενός ρυθμιστικού μηχανισμού τοπικού χαρακτήρα, αλλά αποτελεί μια διαδικασία η οποία, αφενός προσδιορίζει την τοπική θεσμική ικανότητα για ανάπτυξη και αφετέρου περιορίζει ή προωθεί αναπτυξιακές προοπτικές (Μέλισας, 2007). Πρόκειται για μια διαδικασία ιδιαίτερα κρίσιμη για την προσέλκυση αναπτυξιακών πρωτοβουλιών, ιδιαίτερα για τις απομονωμένες περιοχές που συχνά αντιμετωπίζουν φαινόμενα αναπτυξιακής υστέρησης.

Οι πολυσύνθετες σχέσεις και αλληλεπιδράσεις που υπαισέρχονται και καθορίζουν τη διαδικασία του σχεδιασμού χρήσεων γης αναδεικνύουν την ανάγκη για ενσωμάτωση σύγχρονων τεχνολογιών κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού του χώρου. Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms), αποτελούν ένα δυναμικό εργαλείο που μπορεί να συμβάλλει θετικά στις πολυπαραμετρικές διαδικασίες σχεδιασμού του χώρου, αναζητώντας βέλτιστες λύσεις σύμφωνα με μαθηματικά προσδιορισμένα κριτήρια. Βασίζονται στη δημιουργία ενός πληθυσμού κωδικοποιημένων πιθανών λύσεων εφαρμόζοντας τεχνικές Εξελεγκτικού Προγραμματισμού και Γενετικής. Βασικά πλεονεκτήματα των Γενετικών Αλγορίθμων είναι πως μπορούν: α) να επιλύσουν προβλήματα σε εύλογο χρόνο και με ικανοποιητικό τρόπο, β) να συνδυαστούν με υφιστάμενα μοντέλα και συστήματα, γ) να προσαρμοστούν σε διαφορετικές επιστημονικές περιοχές (Γεωργόπουλος & Λυκοθανάσης, 1999). Στο πλαίσιο αυτό, είναι δυνατή η προβολή της συμπεριφοράς των παραμέτρων που σχετίζονται με το σχεδιασμό του χώρου, λαμβάνοντας υπόψη εναλλακτικά σενάρια ανάπτυξης και αξιολογώντας τις επιπτώσεις τους. Εξάλλου, οι Γενετικοί Αλγόριθμοι χαρτογραφούν άμεσα τα αποτελέσματα, διευκολύνοντας με τον τρόπο αυτό τους ειδικούς στη διαδικασία λήψης αποφάσεων.

Αντικείμενο του άρθρου αυτού είναι η διερεύνηση των δυνατοτήτων χρήσης του Γενετικού Αλγόριθμου NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) για τον εντοπισμό των βέλτιστων περιοχών για τη μελλοντική επέκταση του ορεινού οικισμού του Μετσόβου. Θεμελιώδεις παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη ειδικά για τις ορεινές περιοχές είναι τα μορφολογικά, τα λιθολογικά και τα υδρολογικά χαρακτηριστικά, ο ηλιασμός και οι άνεμοι, οι υφιστάμενες υποδομές, το σχετικό θεσμικό πλαίσιο, καθώς και οι συσχετίσεις και αλληλεπιδράσεις των υφιστάμενων χρήσεων/καλύψεων γης. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα να ληφθούν υπόψη οι περιοχές που ανήκουν στο Εθνικό Δίκτυο Προστατευόμενων Περιοχών καθώς και τα ιδιαίτερα πολιτισμικά χαρακτηριστικά της υπό εξέταση περιοχής. Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του αλγορίθμου δείχνουν ότι για τις ορεινές περιοχές, η

μορφολογία του εδάφους και η επικινδυνότητα για κατολισθήσεις συνιστούν καθοριστικά κριτήρια για τον εντοπισμό των περιοχών που είναι κατάλληλες για επέκταση. Συμπερασματικά, ο προτεινόμενος αλγόριθμος αποτελεί σημαντικό εργαλείο για την επιλογή της βέλτιστης λύσης ανάμεσα σε πολλές εναλλακτικές διαχείρισης των χρήσεων γης αλλά και γενικότερα στο πλαίσιο της ολοκληρωμένης ανάπτυξης των ορεινών κυρίως περιοχών (Ρόκος, 2001), συνεκτιμώντας και αξιολογώντας τις δράσεις και επιπτώσεις διαφόρων σεναρίων και μέτρων πολιτικής γης.

Λέξεις κλειδιά: Γενετικός αλγόριθμος, NSGA-II, Χρήσεις γης, Πολεοδομικός σχεδιασμός, Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών, Αντικειμενοστρεφής ταξινόμηση.

1. Εισαγωγή

Ο σχεδιασμός του χώρου και η οργάνωση των σχετικών δραστηριοτήτων, αποτελούν πολύπλοκες διαδικασίες που απαιτούν ανάλυση πολλών και πολλές φορές αντικρουόμενων παραμέτρων. Στη διαδικασία αυτή, κεντρικό ρόλο έχει ο σχεδιασμός των χρήσεων γης καθώς ο τρόπος οργάνωσής τους συνδέεται με την ιστορική εξέλιξη, τις κοινωνικές δομές, το περιβαλλοντικό υπόβαθρο, τον πολιτισμικό πλούτο και το παραγωγικό πρότυπο κάθε περιοχής. Ο σχεδιασμός των χρήσεων γης δεν αποτελεί τη δευτερεύουσα πλευρά ενός ρυθμιστικού μηχανισμού τοπικού χαρακτήρα, αλλά αποτελεί μια διαδικασία η οποία, αφενός προσδιορίζει την τοπική θεσμική ικανότητα για ανάπτυξη και αφετέρου περιορίζει ή προωθεί αναπτυξιακές προοπτικές (Μέλισσας, 2007). Πρόκειται για μια ιδιαίτερα κρίσιμη παράμετρο για την προσέλκυση αναπτυξιακών πρωτοβουλιών στις απομονωμένες περιοχές, οι οποίες συχνά αντιμετωπίζουν φαινόμενα αναπτυξιακής υστέρησης.

Οι πολυσύνθετες σχέσεις και αλληλεπιδράσεις οι οποίες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού χρήσεων γης επιβάλλουν την ενσωμάτωση σύγχρονων τεχνολογιών κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού του χώρου. Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (ΓΑ), αποτελούν ένα δυναμικό εργαλείο που μπορεί να συμβάλλει θετικά στις πολυπαραμετρικές διαδικασίες σχεδιασμού του χώρου, αναζητώντας αποδεκτές λύσεις σύμφωνα με σαφώς προσδιορισμένα μαθηματικά κριτήρια. Βασίζονται στη δημιουργία ενός πληθυσμού κωδικοποιημένων πιθανών λύσεων εφαρμόζοντας τεχνικές Εξελεγκτικού Προγραμματισμού και Γενετικής. Στο πλαίσιο αυτό, οι ΓΑ επιτρέπουν την προβολή της συμπεριφοράς των παραμέτρων που σχετίζονται με το σχεδιασμό του χώρου, λαμβάνοντας υπόψη εναλλακτικά σενάρια ανάπτυξης και αξιολογώντας τις επιπτώσεις τους, διευκολύνοντας με τον τρόπο αυτό τους σχετικούς επιστήμονες στη διαδικασία λήψης αποφάσεων.

Αντικείμενο του άρθρου αυτού είναι η διερεύνηση των δυνατοτήτων χρήσης του Γενετικού Αλγόριθμου Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II) για τον εντοπισμό των περιοχών που είναι οι καταλληλότερες για τη μελλοντική επέκταση του ορεινού οικισμού του Μετσόβου. Θεμελιώδεις παράμετροι που εξετάζονται είναι τα μορφολογικά, τα γεωλογικά και τα υδρολογικά χαρακτηριστικά, οι υφιστάμενες υποδομές, το σχετικό θεσμικό πλαίσιο, καθώς και οι συσχετίσεις και αλληλεπιδράσεις των υφιστάμενων χρήσεων/καλύψεων γης. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα να ληφθούν υπόψη οι περιοχές που ανήκουν στο Εθνικό Δίκτυο Προστατευόμενων Περιοχών καθώς και τα ιδιαίτερα πολιτισμικά χαρακτηριστικά της υπό εξέταση περιοχής.

2. Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση, Γενετικοί Αλγόριθμοι και μεθοδολογία Pareto

2.1 Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση

Τα προβλήματα που σχετίζονται με τον πραγματικό κόσμο, όπως είναι τα προβλήματα χωροταξικού και πολεοδομικού σχεδιασμού, συνδέονται με πολλούς και σύνθετους στόχους. Ως εκ τούτου, είναι επιτακτική ανάγκη διερεύνησης όλων των παραμέτρων που συνδέονται με τα υπό εξέταση προβλήματα καθώς σπάνια υπάρχει μια μοναδική λύση που ικανοποιεί το

σύνολο των στόχων που έχουν τεθεί. Αντιθέτως, οι εσωτερικές αντιφάσεις που υπάρχουν στα στοιχεία και τα φαινόμενα της κάθε φορά συγκεκριμένης φυσικής και της κοινωνικοοικονομικής πραγματικότητας, αλλά και των σχέσεων και των τάσεων μεταβολών τους, είναι σύμφυτες μ' αυτά, κι οριοθετούν την διαρκή πάλη ανάμεσα στο "καινούργιο" που γεννιέται κι αναπτύσσεται και στο παλιό (Ρόκος, 2001), και αυτό καθιστά αυτού του τύπου τα προβλήματα δυσεπίλυτα.

Η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση (multiobjective optimization) έχει ως στόχο να «εκτιμήσει τις πιθανές λύσεις που ικανοποιούν στο μέγιστο δυνατό βαθμό τους στόχους που έχουν τεθεί» (Huang et al., 2012), πραγματοποιώντας τον «καλύτερο δυνατό συμβιβασμό μεταξύ των στόχων που έχουν τεθεί» (Matthews et al., 2006).

Η επίλυση προβλημάτων πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας δυο τύπους μεθοδολογιών. Ο πρώτος τύπος είναι οι μεθοδολογίες που υπολογίζουν το σταθμισμένο άθροισμα των παραμέτρων, μετατρέποντας «τα προβλήματα που έχουν πολλούς στόχους σε προβλήματα με έναν στόχο, υπολογίζοντας το σταθμισμένο άθροισμα των βαρών των στόχων που συμμετέχουν στο πρόβλημα» (Huang et al., 2012). Οι μεθοδολογίες αυτές παρουσιάζουν καλύτερη αποδοτικότητα και αποτελεσματικότητα όταν: α) χρησιμοποιούνται για να επιλύσουν δομημένα προβλήματα τα οποία απαιτούν περιορισμένο συνδυασμό λύσεων και β) διαχειρίζονται μικρό αριθμό δεδομένων με συνέπεια να επαρκεί ένας περιορισμένος αριθμός επαναλήψεων της μεθοδολογίας για την επίλυση του υπό εξέταση πρόβληματος (Huang et al., 2012). Ωστόσο, αυτές οι μεθοδολογίες απαιτούν την ύπαρξη οργανωμένης γνώσης των δεδομένων που απαιτούνται για την επίλυση του προβλήματος (Huang et al., 2012; Aerts et al., 2003).

Ο δεύτερος τύπος μεθοδολογιών κατανομής των χρήσεων γης αφορά τις ευρετικές (heuristic) μεθοδολογίες (Balling, et al., 1999). Βασικό πλεονέκτημα αυτών των μεθοδολογιών είναι ότι επιτρέπουν τη διερεύνηση των σχέσεων που αναπτύσσονται μεταξύ των στόχων του υπό διερεύνηση προβλήματος (Huang et al., 2012). Στη βιβλιογραφία αναφέρονται πολλοί τύποι ευρετικών μεθόδων ανάμεσα στις οποίες οι σημαντικότερες είναι (Cao et al., 2012): οι αλγόριθμοι προσομοιωμένης απόπτωσης (simulated annealing), οι αλγόριθμοι σμήνους (ant algorithms), και οι ΓΑ (Goldberg et al., 1989; Holland, 1975). Οι ευρετικές μεθοδολογίες «μολονότι δεν μπορούν να εγνηθούν τη βέλτιστη λύση ενός προβλήματος, είναι σε θέση να δημιουργήσουν μια σχεδόν βέλτιστη λύση μέσα σε εύλογο χρονικό διάστημα» (Huang et al., 2012), προσομοιώνοντας φυσικά φαινόμενα και βιολογικές διαδικασίες (Huang et al., 2012).

2.2 Γενετικοί Αλγόριθμοι

Οι ΓΑ έχουν σημαίνοντα ρόλο ανάμεσα στις ευρετικές μεθόδους (Goldberg et al., 1989; Holland, 1975) καθώς είναι ικανοί: α) να επιλύσουν προβλήματα σε εύλογο χρόνο και με ικανοποιητικό τρόπο, β) να συνδυαστούν με υφιστάμενα μοντέλα και συστήματα, γ) να προσαρμοστούν σε διαφορετικές επιστημονικές περιοχές (Γεωργόπουλος & Λυκοθανάσης, 1999). Στο πλαίσιο αυτό, είναι δυνατή η προβολή της συμπεριφοράς των παραμέτρων που σχετίζονται με το σχεδιασμό του χώρου, λαμβάνοντας υπόψη εναλλακτικά σενάρια ανάπτυξης και αξιολογώντας τις επιπτώσεις τους. Εξάλλου, οι ΓΑ χαρτογραφούν άμεσα τα αποτελέσματα, διευκολύνοντας με τον τρόπο αυτό τους ειδικούς στη διαδικασία λήψης αποφάσεων.

Τα πλεονεκτήματα αυτά αποτελούν τους λόγους για τους οποίους τις τελευταίες δεκαετίες καταγράφονται στη βιβλιογραφία πλήθος ερευνητικών προσπαθειών αξιοποίησης των ΓΑ για την επίλυση προβλημάτων κατανομής χρήσεων γης (land-use allocation) (Jones et al., 2002). Ο Matthews (2001) χρησιμοποίησε με επιτυχία έναν πολυκριτηριακό ΓΑ για να αντιμετωπίσει ένα πρόβλημα κατανομής χρήσεων γης. Οι Niaraki και Kim (2009) σχεδίασαν και εφάρμοσαν έναν πολυκριτηριακό ΓΑ με στόχους την ελαχιστοποίηση της διάβρωσης του

εδάφους και τη μεγιστοποίηση των ωφελειών της βέλτιστης κατανομής χρήσεων γης στο Ιράν. Οι Huang et al. (2012) σχεδίασαν τον ΓΑ AIS-MOLA (Artificial Immune System for MultiObjective Land-use Allocation) για να πετύχουν τη διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων σε προβλήματα βέλτιστης κατανομής χρήσεων γης. Ο Eldrandaly (2010) συνέδεσε μια δικτυακή πλατφόρμα GIS με έναν ΓΑ (Gene Expression Programming) για να καταναίμει τρεις τύπους χρήσεων γης χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα. Οι Hajehforooshnia et al. (2011) προχώρησαν στη ζωνοποίηση των χρήσεων γης ενός καταφυγίου άγριας ζωής χρησιμοποιώντας τον ΓΑ Multi Objective Land Allocation. Οι Porta et al. (2013) σχεδίασαν και εφάρμοσαν ένα υβριδικό σύστημα που συνδυάζει ΓΑ με τη γλώσσα προγραμματισμού Java για να καταρτίσουν εναλλακτικά σενάρια κατανομής χρήσεων γης. Οι Shaygan et al. (2013) απέδειξαν ότι ο ΓΑ NSGA-II μπορεί να συναγωνιστεί σε αποδοτικότητα και χρόνο εκτέλεσης τον ΓΑ Goal Attainment MultiObjective Land Allocation.

2.3 Θεμελιώδεις έννοιες της μεθοδολογίας Pareto

Η κυριότερη μέθοδος υπολογισμού των πιθανών λύσεων ενός προβλήματος πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης καλείται κυριαρχία Pareto (Pareto optimality) (Pareto, 1971), ενώ η απεικόνιση των λύσεων αυτών καλείται μέτωπο Pareto (Pareto front) (Duh & Brown, 2007). Με άλλα λόγια, το μέτωπο Pareto απεικονίζει την κατανομή των πιθανών λύσεων ενός προβλήματος, η απόδοση των οποίων δεν μπορεί να διαφοροποιηθεί περαιτέρω δίχως να επηρεάσει αρνητικά τουλάχιστον έναν άλλο στόχο του υπό εξέταση προβλήματος (Duh & Brown, 2007).

Κρίσιμης σημασίας για τη διαμόρφωση ενός μετώπου Pareto είναι η έννοια της κυριαρχίας (dominance), που σημαίνει ότι «*μια εναλλακτική λύση κυριαρχεί επί μιας άλλης σε περίπτωση που παρουσιάζει καλύτερη απόδοση σε κάποιον από τους στόχους που έχει τεθεί και ταυτόχρονα εμφανίζει τουλάχιστον ίση απόδοση επί των υπολοίπων*» (Matthews et al., 2006). Μαθηματικά, σε ένα πρόβλημα με k στόχους μια λύση $X_A \in \Omega$ κυριαρχεί επί μιας άλλης $X_B \in \Omega$ εάν (Duh & Brown, 2007):

$$f_i(X_A) \geq f_i(X_B) \quad \forall i = 1, 2, \dots, k \text{ and } f_i(X_A) > f_i(X_B) \text{ for } i$$

όπου:

- $f_i(x)$ είναι η τιμή του στόχου i για μια λύση x
- X_A είναι μια λύση
- X_B είναι μια λύση
- k είναι οι στόχοι του αλγόριθμου

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία του μετώπου Pareto μια λύση χαρακτηρίζεται ως βέλτιστη όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία της κυριαρχίας επί των λύσεων που έχουν επιλεγεί (Duh & Brown, 2007).

3. Ο Γενετικός αλγόριθμός NSGA-II

Σε αυτήν την πρώτη φάση της έρευνάς μας, επιλέχθηκε η χρήση του γενετικού αλγορίθμου NSGA-II. Η επιλογή αυτή έγινε με βασικό γνώμονα τη δημοφιλία του σε παρόμοιες εφαρμογές αλλά και τη συστηματική επιλογή του από την επιστημονική κοινότητα ως μέτρο σύγκρισης, παρότι είναι γνωστό ότι δυσκολεύεται να ανταποκριθεί σε προβλήματα με περισσότερες από τρεις παραμέτρους (Fortin et al 2012, Deb et al 2012, Zhang et al 2007, Seada et al 2014).

Ο NSGA-II χρησιμοποιείται «για να πετύχει την ταξινόμηση του πληθυσμού βάσει συγκεκριμένων στόχων ακολουθώντας την μέθοδο της μη κυριαρχικής ταξινόμησης (non-dominated ranking method)» (Deb, 2001; Cao et al., 2001).

Οι στόχοι του NSGA-II είναι (Shaygan et al, 2013): i. η δημιουργία ενός πληθυσμού από άτομα (individuals), ii. η χρήση μιας μεθόδου για την κατάταξη (rank) και την ταξινόμηση (sort) των ατόμων, iii. η δημιουργία νέων σειρών απογόνων (offsprings), iv. ο συνδυασμός ατόμων και απογόνων για την κατάρτιση νέων προτύπων κατανομής (allocation patterns), v. η σχεδίαση ενός μετώπου Pareto μέσω του υπολογισμού της απόστασης μεταξύ των πιθανών λύσεων (crowding distance) στη νέα κατανομή.

Η απόσταση μεταξύ των πιθανών λύσεων είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την διαδικασία «εκτίμησης της πυκνότητας των λύσεων που περιβάλλουν μια συγκεκριμένη λύση» (Tapia & Coello, 2007) και αποτελεί μια κρίσιμη παράμετρο για τον NSGA-II (Srinivas & Deb, 1994; Liu et al., 2012).

Αρχικά, ο NSGA-II δημιουργεί ένα χρωμόσωμα για να περιγράψει τη λύση ενός προβλήματος, ενώ οι παράμετροι του προβλήματος συνθέτουν τα γονίδια του χρωμοσώματος (Datta et al., 2008). Η ολοκλήρωση των λειτουργιών του NSGA-II έχουν ως αποτέλεσμα το σχηματισμό ενός συνόλου χρωμοσωμάτων, τα οποία σχηματίζονται χρησιμοποιώντας τους τελεστές (operators) i. αρχικοποίησης (initialization), ii. ανασυνδυασμού (crossover) και iii. μετάλλαξης (mutation) του NSGA-II (Cao et al., 2012; Datta et al., 2008).

3.1 Τελεστής αρχικοποίησης

Η επιλογή του αρχικού πληθυσμού είναι κρίσιμης σημασίας για τον NSGA-II (Cao et al., 2012; Huang et al., 2012). Η σωστή προετοιμασία του χρωμοσώματος μειώνει τους απαιτούμενους χρόνους, βελτιώνει την αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου, καθιστά τη διαδικασία κατανομής ταχύτερη και πιο αποτελεσματική, -ιδιαίτερα σε μεγάλες περιπτώσεις αυξημένου όγκου δεδομένων-, ενώ παράλληλα διευκολύνει την επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων (Datta et al., 2008; Liu et al., 2012). Για τους λόγους αυτούς η καθοδήγηση του αλγορίθμου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίτευξη των βέλτιστων αποτελεσμάτων.

3.2 Τελεστής ανασυνδυασμού (crossover operator)

Ο τελεστής αυτός σχεδιάζει πρότυπα χρωμοσώματα «ανταλλάσσοντας τυχαία γονίδια μεταξύ δύο χρωμοσωμάτων» (Huang et al., 2012; Tapia & Coello, 2007). Πολλοί ερευνητές εργάζονται για τη δημιουργία δυσδιάστατων τελεστών επικεντρωμένων στην επίλυση προβλημάτων βέλτιστης κατανομής χωρικών δεδομένων (Datta et al., 2008; Huang et al., 2012; Shaygan et al, 2013; Cao et al., 2001) όμως, στην παρούσα εργασία, λόγω του μονοδιάστατου σχεδιασμού του χρωμοσώματος (βλ. Σχεδιασμός και υλοποίηση του μοντέλου), χρησιμοποιείται ένας τυπικός τελεστής ανασυνδυασμού δύο σημείων (Deb & Agrawal, 1994), τα χαρακτηριστικά του οποίου αναλύονται σε επόμενο κεφάλαιο.

3.3 Τελεστής μετάλλαξης (mutation operator)

Ο NSGA-II χρησιμοποιεί ένα τελεστή μετάλλαξης για τη δημιουργία απογόνων και για τη βελτίωση των απογόνων που δημιουργούνται από τον τελεστή ανασυνδυασμού. Ο τελεστής μετάλλαξης λειτουργεί «επιλέγοντας γονίδια και αλλάζει τις τιμές που παρουσιάζουν, επιχειρώντας να βρει ένα καλύτερο πρότυπο κατανομής βάσει των παραμέτρων του προβλήματος» (Tapia & Coello, 2007). Ερευνητές (Datta et al., 2008) έχουν προτείνει εξειδικευμένους τελεστές μετάλλαξης για την επίλυση προβλημάτων βέλτιστης κατανομής χρήσεων γης όμως, σε αυτή την εργασία, λόγω του μονοδιάστατου σχεδιασμού του χρωμοσώματος (βλ. Σχεδιασμός και υλοποίηση του μοντέλου), έχει χρησιμοποιηθεί ένας τυπικός τελεστής μετάλλαξης, ο οποίος ανταλλάσσει τις τιμές δύο τυχαία επιλεγμένων γονιδίων.

4. Μέθοδοι και Τεχνικές

4.1 Περιοχή μελέτης

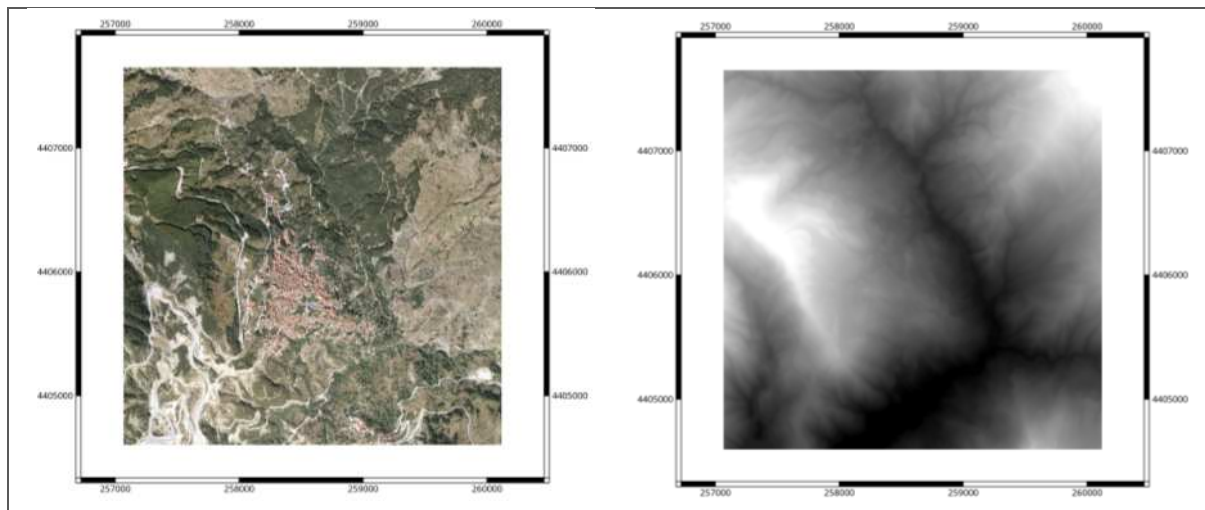
Περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας είναι ο οικισμός του Μετσόβου. Το Μέτσοβο είναι κωμόπολη της Ηπείρου, εδράζεται ανάμεσα στα βουνά της μεγαλύτερης οροσειράς της Ελλάδος. Είναι χτισμένο σε υψόμετρο 1.156 μέτρων στις πλαγιές της Πίνδου, στα όρια της Ηπείρου, της Θεσσαλίας και της Δυτικής Μακεδονίας. Αποτελεί κηρυγμένο παραδοσιακό οικισμό (Π.Δ. 19/9/75, ΦΕΚ 214Δ/1975), με έντονο το παραδοσιακό στοιχείο, και υψηλή τουριστική κίνηση. Ο πληθυσμός του σύμφωνα με την απογραφή του 2011 ανέρχεται σε 2.503 κατοίκους (ΕΣΥΕ, 2011).

Ανέκαθεν, το Μέτσοβο αποτελούσε το σημαντικότερο εμπορικό, διοικητικό και οικονομικό κέντρο της ευρύτερης περιοχής με αποτέλεσμα να αποτελεί την αναντίρρητη πρωτεύουσα του ομώνυμου, αρχικά Καποδιστριακού και πλέον Καλλικρατικού δήμου.

Στην ευρύτερη περιοχή του Μετσόβου απαντώνται τρεις περιοχές ενταγμένες στο δίκτυο Natura 2000, η Περιοχή Μετσόβου (Ανήλιο – Κατάρα) (GR2130006) ο Εθνικός Δρυμός Πίνδου (Βάλια Κάλντα) (GR1310003), και το Όρος Λάκμος ή Περιστέρι (GR2130007) (Φιλότις, 2016).

4.2 Δεδομένα

Τα βασικά πρωτογενή δεδομένα (**Εικόνα 1**) στα οποία βασίστηκε η εργασία ήταν ο ορθοφωτοχάρτης καθώς και το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (ΨΜΕ) της ΕΚΧΑ Α.Ε. Από τον ορθοφωτοχάρτη και το ΨΜΕ παρήχθησαν μία σειρά από δεδομένα τα οποία αξιοποιήθηκαν και παρουσιάζονται σταδιακά στην πορεία της εργασίας. Η έκταση της περιοχής μελέτης είναι περίπου 3 km² με τον οικισμό του Μετσόβου να βρίσκεται στο κέντρο της.



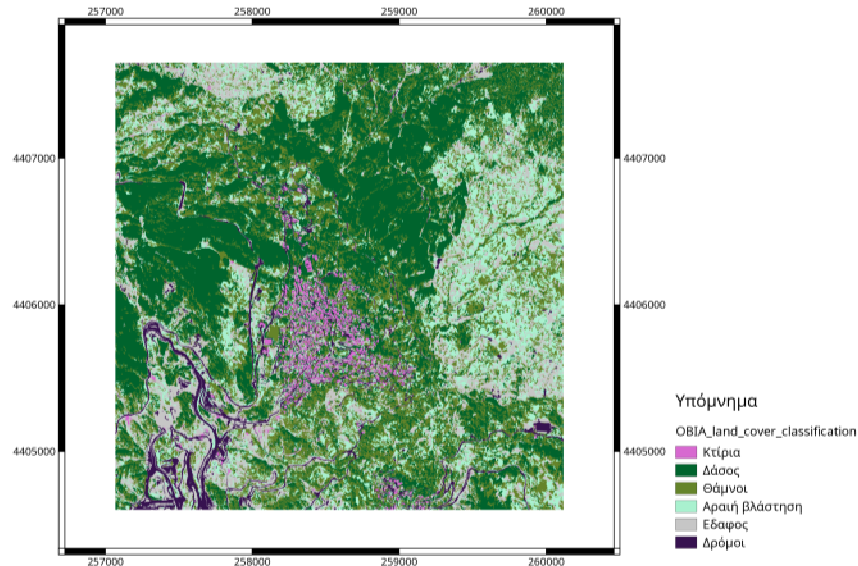
Εικόνα 1. Ο ορθοφωτοχάρτης και το ΨΜΕ της ΕΚΧΑ Α.Ε. για την περιοχή του οικισμού του Μετσόβου

Για την αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης, ελλείπει άλλων πολυφασματικών τηλεπισκοπικών δεδομένων πολύ υψηλής διακριτικής ικανότητας για την περιοχή, πραγματοποιήθηκε ταξινόμηση στον ορθοφωτοχάρτη με χρήση αντικειμενοστρεφούς ταξινόμησης. Η ταξινόμηση πραγματοποιήθηκε με χρήση του λογισμικού eCognition με στόχο τη δημιουργία χάρτη καλύψεων γης σε έξι θεματικές κατηγορίες: κτήρια, δάση, θάμνοι, αραιή βλάστηση, γυμνό έδαφος, και δρόμοι. Για την υλοποίηση της αντικειμενοστρεφούς ταξινόμησης πραγματοποιήθηκε αρχικά κατάτμηση με παραμέτρους $scale=50$, $colour=0.7$, $compactness=0.3$.

Η ταξινόμηση (**Εικόνα 2**) βασίστηκε αποκλειστικά σε φασματικά δείγματα από περιοχές εκπαίδευσης οι οποίες ελήφθησαν με φωτοερμηνεία επί της εικόνας, χωρίς επιπλέον χρήση κανόνων ασαφούς λογικής. Δεδομένου ωστόσο της πολύ μικρής έκτασης της περιοχής μελέτης καθώς και των πολύ λίγων και γενικών θεματικών κατηγοριών, η ακρίβεια της ταξινόμησης η οποία επετεύχθη, ήταν περίπου 94% (δείκτης kappa=0.923). Η αξιολόγηση

της ταξινόμησης, κατά την οποία δε λήφθηκε υπόψη η κατηγορία των δρόμων, πραγματοποιήθηκε με βάση περιοχές ελέγχου, οι οποίες ελήφθησαν επίσης με φωτοερμηνεία επί της εικόνας.

Επιπλέον, με φωτοερμηνεία επί του ορθοφωτοχάρτη ψηφιοποιήθηκαν το οδικό δίκτυο, το όριο του οικισμού και το βασικό υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής μελέτης.



Εικόνα 2. Αντικειμενοστρεφής ταξινόμηση του ορθοφωτοχάρτη της EKXA Α.Ε.

4.3 Σχεδιασμός και υλοποίηση του μοντέλου

Το προσαρμοσμένο μοντέλο NSGA-II σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε σε ansi C με βάση τα προγράμματα των Deb et al (2002) τα οποία διατίθενται ελεύθερα στην ιστοσελίδα τους (Kanpur Genetic Algorithms Laboratory 2016). Τα προγράμματα αυτά, τα οποία ήταν γραμμένα για μαθηματικά προβλήματα, τροποποιήθηκαν σημαντικά, ώστε να λειτουργούν με ταξινομήσεις τηλεπισκοπικών απεικονίσεων, τηλεπισκοπικά δεδομένα και άλλα θεματικά επίπεδα πληροφορίας Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (ΓΣΠ) σε ψηφιδωτή (raster) μορφή.

Η βασική ιδέα για το σχεδιασμό του μοντέλου είναι ότι μία γεωγραφική περιοχή η οποία απαρτίζεται από συγκεκριμένες στοιχειώδεις επιφάνειες (land-use parcels) και καλύπτεται από διάφορες χρήσεις/καλύψεις γης μπορεί να θεωρηθεί ως ένα χρωμόσωμα. Επιπλέον, κάθε μία από τις στοιχειώδεις αυτές επιφάνειες (land-use parcels) μπορούν να θεωρηθούν ότι αποτελούν τα γονίδια του χρωμοσώματος. Στην περίπτωση την οποία εξετάζουμε ένα σύνολο n στηλών ($n=151$) και m γραμμών ($m=151$) με χωρική διάσταση 20×20 μέτρα έκαστο, αποτελούν το σύνολο της υπό εξέταση γεωγραφικής περιοχής, η οποία περιλαμβάνει τον οικισμό του Μετσόβου και εκτείνεται τουλάχιστο 500 μέτρα γύρω από αυτόν (Εικόνα 1). Έτσι, αν ληφθούν υπόψη όλες οι στοιχειώδεις επιφάνειες, θα δημιουργούσαμε ένα χρωμόσωμα $151 \times 151 = 22801$ γονιδίων και κάθε γονίδιο, κωδικοποιημένο ως δυαδική (binary) μεταβλητή, θα είχε τόσα bits όσες είναι οι κατηγορίες χρήσης/κάλυψης γης (Shaygan et al, 2013):

$$Land = \begin{bmatrix} lu_{11} & \cdots & lu_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ lu_{1m} & \cdots & lu_{mn} \end{bmatrix}$$

όπου: Land είναι το χρωμόσωμα και

$lu_{i,j}$ είναι οι στοιχειώδεις επιφάνειες χρήσης/κάλυψης γης (land-use parcels)

Κάθε στοιχειώδης χωρική επιφάνεια (εικονοστοιχείο) του χάρτη χρήσεων/καλύψεων γης θεωρείται ως μία δυαδική (binary) μεταβλητή $lu_{i,j}$ και κάθε κατηγορία χρήσης/κάλυψης γης είναι μία μεταβλητή απόφασης lu (Shaygan et al, 2013):

$$lu \in LU, LU = \{1,2,3,4,5\}$$

όπου: 1 = οικισμός
2 = δάση
3 = θαμνώδεις περιοχές
4 = αραιή βλάστηση / γυμνό έδαφος
5 = δρόμοι

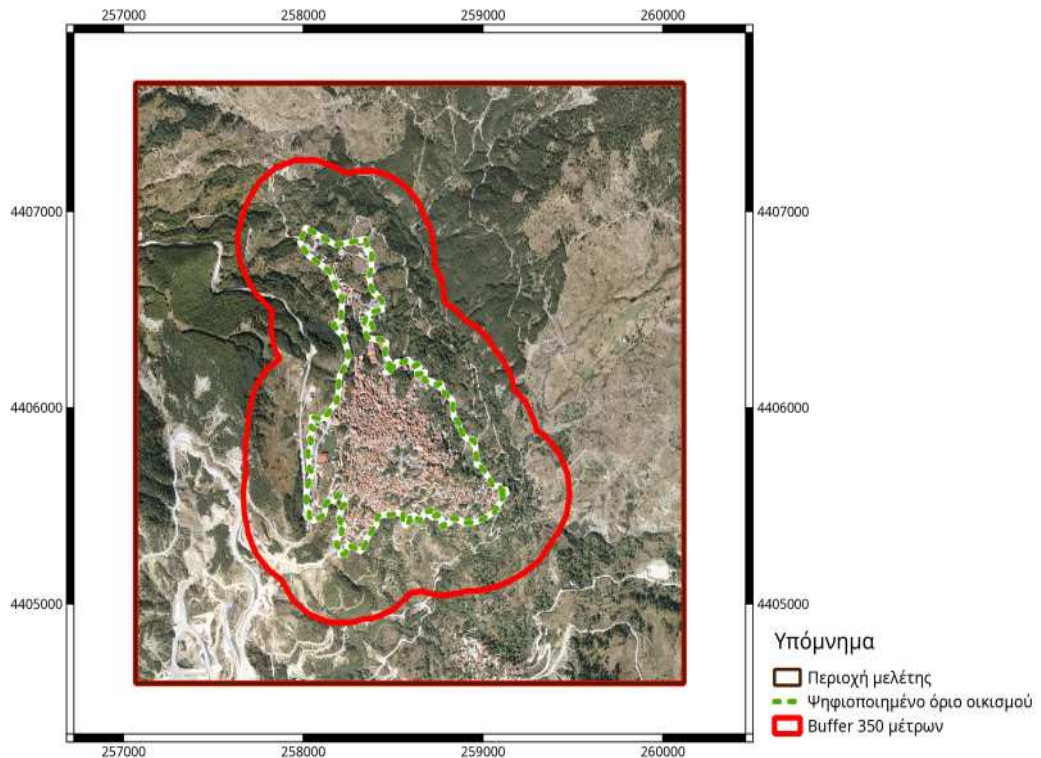
Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί ότι στη συγκεκριμένη εργασία το χρωμόσωμα σχεδιάστηκε να είναι μονοδιάστατο και όχι διδιάστατο. Έτσι, όλες οι στοιχειώδεις επιφάνειες, οι οποίες κωδικοποιούνται ως γονίδια, είναι σε σειρά ανεξάρτητα από τη χωρική τους θέση. Ωστόσο, αποθηκεύεται και η χωρική θέση κάθε στοιχειώδους επιφάνειας (pixel). Με αυτόν τον τρόπο ο αλγόριθμος NSGA-II εφαρμόζεται σε μονοδιάστατα χρωμοσώματα, το οποίο συνεπάγεται πιο απλή και σημαντικά ταχύτερη εκτέλεση του αλγορίθμου, ενώ οι αντικειμενικές συναρτήσεις και οι περιορισμοί εφαρμόζονται σε δύο διαστάσεις, λαμβάνοντας υπόψη τη χωρική διάσταση του προβλήματος. Εξαιτίας αυτού του τρόπου σχεδίασης του χρωμοσώματος δεν ήταν δυνατό να χρησιμοποιηθεί διδιάστατος τελεστής ανασυνδυασμού και για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε ο τελεστής ανασυνδυασμού των δύο σημείων (Deb et al, 1994).

Κατά την υλοποίηση του αλγορίθμου, έγιναν βασικές βελτιστοποιήσεις και ορίστηκαν κάποιες χρήσιμες πρόσθετες λειτουργίες. Με στόχο τη βελτιστοποίηση της ταχύτητας εκτέλεσης του αλγορίθμου και τη μείωση του πληθυσμού (για μείωση της χρήσης της μνήμης του υπολογιστή), δεν εισάγονται στον αρχικό πληθυσμό όλα τα pixel του θεματικού χάρτη. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εξαιρέσει τα pixel τα οποία αντιστοιχούν σε κατηγορία χρήσης /κάλυψης γης η οποία θα πρέπει να παραμείνει αμετάβλητη (π.χ. νερά, δρόμοι κλπ). Επιπρόσθετα, δίνεται η δυνατότητα να “κλειδωθούν” κάποιες κατηγορίες, και παρότι ο γενετικός αλγόριθμος θα τις δημιουργεί, τα ήδη υπάρχοντα pixels αυτών των κατηγοριών παραμένουν αμετάβλητα (π.χ. υπάρχων οικισμός, δάσος). Τα υπάρχοντα pixel αυτών των κατηγοριών επίσης εξαιρούνται από τον πληθυσμό των γονιδίων.

Καθώς η αρχικοποίηση του πληθυσμού των γονιδίων είναι πολύ σημαντική για την γρήγορη σύγκλιση του αλγορίθμου, ο αρχικός πληθυσμός δεν είναι τυχαίος αλλά διαβάζεται απευθείας από το θεματικό χάρτη της υφιστάμενης κατάστασης (ταξινόμηση). Μια επιπλέον σημαντική λειτουργία η οποία προστέθηκε είναι η δυνατότητα να εισάγονται επιπλέον επίπεδα χωρικής πληροφορίας ΓΣΠ σε ψηφιδωτή (raster) μορφή. Τα επίπεδα αυτά αξιοποιούνται: α) για την υλοποίηση των αντικειμενικών συναρτήσεων (π.χ. χάρτης αποστάσεων από δρόμους, χάρτης προσανατολισμού πρηνών, ηλιασμού κλπ), β) για την εφαρμογή των περιορισμών (π.χ. χάρτης κλίσεων πρηνών, περιοχές αποκλεισμού κλπ), και γ) μάσκες για περιοχές οι οποίες θα πρέπει να παραμείνουν αμετάβλητες και συνεπώς εξαιρούνται από τον πληθυσμό.

Για την περίπτωση της επέκτασης του οικισμού του Μετσόβου η βασική ιδέα ήταν να αναδειχθεί το βέλτιστο σενάριο επέκτασης του οικισμού με χρήση του προσαρμοσμένου αλγορίθμου NSGA-II, ο οποίος αναπτύχθηκε, λαμβάνοντας υπόψη κατάλληλους (για τη συγκεκριμένη περίπτωση σχεδιασμού) παράγοντες και εφαρμόζοντας κατάλληλες αντικειμενικές συναρτήσεις και περιορισμούς, Η υφιστάμενη κατάσταση του οικισμού και της περιβάλλουσας περιοχής αποτέλεσαν τον αρχικό πληθυσμό των γονιδίων, τα οποία καθορίστηκαν απευθείας από την ταξινόμηση του ορθοφωτοχάρτη της ΕΚΧΑ Α.Ε. Η κατηγορία των δρόμων εξαιρέθηκε από τον πληθυσμό, δεδομένου ότι δεν είναι λογικό να μετατραπούν οι δρόμοι σε οικισμό. Επιπλέον, αξιοποιώντας μία μάσκα από το

ψηφιοποιημένο όριο του οικισμού του Μετσόβου (**Εικόνα 3**), ο υφιστάμενος οικισμός εξαιρέθηκε από τον πληθυσμό, καθώς δεν νοείται επέκταση εντός του οικισμού. Τέλος, θεωρήθηκε θεμιτό η επέκταση του οικισμού να γίνει εντός συγκεκριμένης ζώνης (buffer) γύρω από αυτόν, η οποία καθορίστηκε στα 350 μέτρα. Το όριο αυτό (**Εικόνα 3**) θεωρήθηκε επαρκές, καθώς ο στόχος που τέθηκε ήταν μία αύξηση της έκτασης του οικισμού κατά 10%. Τυχόν μεγαλύτερη ζώνη επέκτασης θα περιλάμβανε και μέρος του γειτονικού οικισμού του Ανηλίου. Όλες οι στοιχειώδεις επιφάνειες χρήσης/κάλυψης γης (pixels) εκτός του ορίου, εξαιρέθηκαν επίσης από τον πληθυσμό. Με όλες αυτές τις εξαιρέσεις ο αρχικός πληθυσμός των 22801 γονιδίων περιορίστηκε σε 2928, δηλ στο 13% του αρχικού πληθυσμού. Αυτό συνεπάγεται πολύ μικρότερες απαιτήσεις σε μνήμη αλλά και πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα επεξεργασίας.



Εικόνα 3. Το όριο μέσα στο οποίο περιορίστηκε η πιθανή επέκταση του οικισμού

Η κατηγορία του οικισμού “κλειδώθηκε”, έτσι ώστε τυχόν ήδη υπάρχοντα κτίρια έξω από το όριο του οικισμού να παραμείνουν αμετάβλητα. Σε αρκετές από τις δοκιμές “κλειδώθηκε” και η κατηγορία του δάσους, έτσι ώστε να μη δημιουργηθεί οικισμός εντός δασικής περιοχής. Πολλά επιπλέον ψηφιδωτά επίπεδα πληροφορίας ΓΣΠ εισήχθησαν στον αλγόριθμο και παρουσιάζονται σε επόμενη ενότητα, η οποία εστιάζεται στη χρήση τους για τον ορισμό συγκεκριμένων αντικειμενικών συναρτήσεων και περιορισμών.

Όσον αφορά στις παραμέτρους εκτέλεσης των αλγορίθμων, ο πληθυσμός των γονιδίων (όπως έχει προαναφερθεί) διαβάζεται απευθείας από την ταξινόμηση αφού πρώτα εξαιρεθούν pixels που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες κατηγορίες ή με βάση μάσκες. Το μέγιστο μέγεθος του πληθυσμού εξαρτάται από τη φυσική μνήμη του υπολογιστή, καθώς η εκτέλεση του αλγορίθμου με χρήση εικονικής μνήμης (swap) θα αύξανε δραματικά το χρόνο επεξεργασίας. Οι τελεστές ανασυνδυασμού και μετάλλαξης καθορίζονται από το χρήστη, αν και ο βέλτιστος τελεστής μετάλλαξης ισούται με $1/(\text{συνολικός αριθμός bits})$. Ο αριθμός επαναλήψεων του αλγορίθμου επίσης καθορίζεται από το χρήστη, ο οποίος πρέπει με βάση τα αποτελέσματα να κρίνει πότε είναι λογικό να σταματήσει ο αλγόριθμος. Παρότι υπάρχει σχετικά εύκολος αυτοματοποίησης για το πότε θα σταματάει ο αλγόριθμος, με βάση το ρυθμό

βελτιστοποίησης των αντικειμενικών συναρτήσεων (Εικόνα 9), δεν υλοποιήθηκε σε αυτή την πρώτη φάση της έρευνας, εξαιτίας της ανάγκης πειραματισμού όσον αφορά στη συνεισφορά του πλήθους των γενεών στο τελικό αποτέλεσμα. Η εκτέλεση του αλγορίθμου πραγματοποιήθηκε με ένα υπολογιστή με Core Duo E8400 επεξεργαστή Processor @ 3.0 GHz και 8.0 GB RAM σε λειτουργικό σύστημα linux. Ο πληθυσμός των γονιδίων ήταν 2928 το καθένα από τα οποία είχε 4 bits (4 ενεργές κατηγορίες). Ο βέλτιστος τελεστής μετάλλαξης ήταν 0.000085 και ήταν αυτός που χρησιμοποιήθηκε, ενώ δοκιμάστηκαν και μερικοί άλλοι (π.χ. 0.000024, 0.000049, 0.000170) οι οποίοι δεν έδωσαν καλύτερα αποτελέσματα. Ο τελεστής ανασυνδυασμού που χρησιμοποιήθηκε ήταν από 0.7 ως 1, οι μεταβολές του οποίου δεν εισήγαγαν πολύ σημαντικές αλλαγές. Μεγαλύτερες τιμές ωστόσο επέφεραν σχετικά πιο γρήγορη σύγκλιση του αλγορίθμου.

4.4 Αντικειμενικές συναρτήσεις και περιορισμοί

Για κάθε πρόβλημα το οποίο αντιμετωπίζεται με χρήση γενετικών αλγορίθμων, πρέπει να χρησιμοποιηθούν κατάλληλες αντικειμενικές συναρτήσεις και περιορισμοί. Οι αντικειμενικές συναρτήσεις οι οποίες θεωρήθηκαν ότι είναι σκόπιμο να χρησιμοποιηθούν για την περίπτωση της επέκτασης ενός ορεινού οικισμού ήταν: 1) επικινδυνότητα κατολίσθησης (landslide risk), 2) ηλιασμός (insolation), 3) θέα (skyview), 4) απόσταση από οδικό δίκτυο (road distance), 5) απόσταση από οικισμό (urban distance), 6) καταλληλότητα προσανατολισμού πρανών (aspect suitability), 7) συμπαγότητα (compactness), 8) απόσταση από άλλα μέλη της κατηγορίας (cluster distance), και 9) καταλληλότητα μετατροπής χρήσης/κάλυψης γης (transformation suitability). Στις πολλές δοκιμές, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν, οι αντικειμενικές αυτές συναρτήσεις χρησιμοποιήθηκαν είτε όλες, ή μέρος αυτών ή συνδυασμοί αυτών. Οι περιορισμοί οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν ήταν: 1) ελάχιστο και μέγιστο ποσοστό αύξησης της έκτασης του οικισμού, 2) μέγιστη επιτρεπόμενη κλίση πρανών, και 3) μη δημιουργία οικισμού σε περιοχές αποκλεισμού. Εξαιτίας της μη συμβατής κλίμακας των δεδομένων του Natura 2000 και ελλείψει άλλων δεδομένων προστατευόμενων περιοχών, ως περιοχές αποκλεισμού τέθηκαν μόνο οι περιοχές 50 μέτρα εκατέρωθεν των ρεμάτων και των ποταμών.

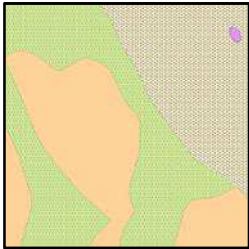

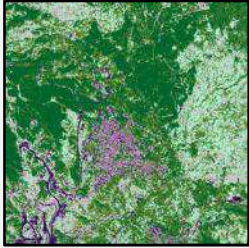
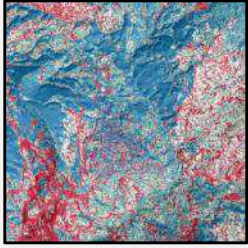
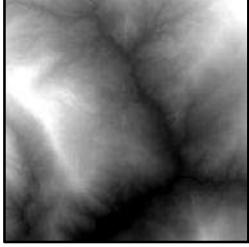
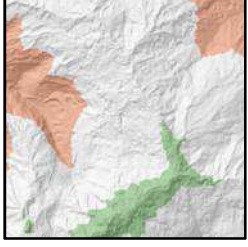
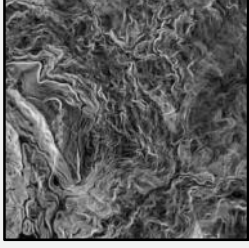
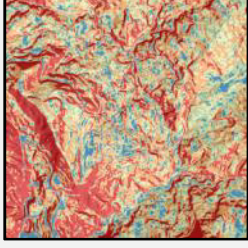
Κατά τη διαδικασία της εκτέλεσης ο γενετικός αλγόριθμος δημιουργεί σε κάθε ανακύκλωση μία νέα κατανομή χρήσεων/καλύψεων γης σε όλη την περιοχή, αλλά ενδιαφέρον έχει η αξιολόγηση μόνο των νέων εστιών οικισμού. Για την αξιολόγηση αυτή οι αντικειμενικές συναρτήσεις μπορούν να εφαρμοστούν είτε μόνο στα pixel του προτεινόμενου νέου οικισμού, ή σε όλα τα pixel των νέων προτεινόμενων κατηγοριών χρήσης/κάλυψης γης. Οι δοκιμές έδειξαν ότι καλό είναι τουλάχιστο κάποιες από τις αντικειμενικές συναρτήσεις να εφαρμόζονται σε όλες τις κατηγορίες. Ο αλγόριθμος έχει δομηθεί έτσι ώστε να προσπαθεί να μειώσει όλες τις αντικειμενικές συναρτήσεις, κι αν κάποια συνάρτηση έπρεπε να αυξηθεί (π.χ. ηλιασμός, θέα), τότε εφαρμόστηκε η αρνητική συνάρτηση.

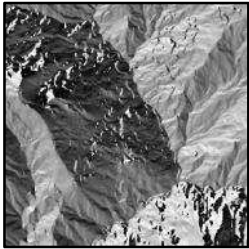
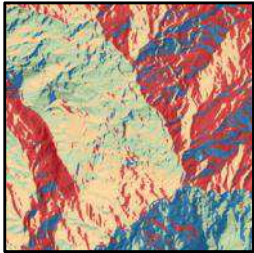
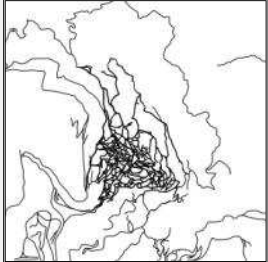
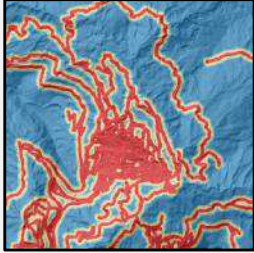
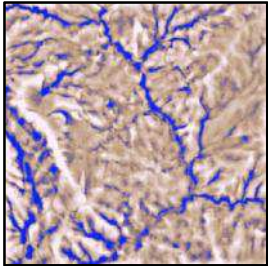
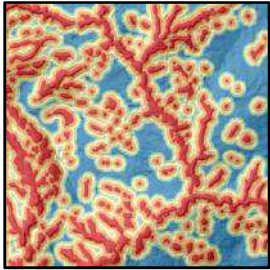
4.4.1 Αντικειμενικές συναρτήσεις

4.4.1.1 Κίνδυνος κατολίσθησης (landslide risk)

Για την αντικειμενική αυτή συνάρτηση ήταν απαραίτητη η δημιουργία ενός χάρτη επικινδυνότητας για εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων. Ο χάρτης αυτός δημιουργήθηκε με βάση τη μεθοδολογία που περιγράφεται από τους Γαλανού κ.α. (2010) καθώς και Φαρμακάκη (2011). Η μεθοδολογία αυτή παράγει ένα χάρτη επικινδυνότητας για κατολισθήσεις λαμβάνοντας υπόψη τη λιθολογία, τη φυτοκάλυψη, το υψόμετρο, τις κλίσεις και τους προσανατολισμούς των πρανών, και τις αποστάσεις από το οδικό δίκτυο και τους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου. Η πληροφορία για τη φυτοκάλυψη αντλήθηκε από την ταξινόμηση του ορθοφωτοχάρτη της ΕΚΧΑ Α.Ε., η λιθολογία της περιοχής από το σχετικό χάρτη του ΙΓΜΕ (κλ. 1/50.000), το υψόμετρο από το ΨΜΕ της ΕΚΧΑ Α.Ε., οι κλίσεις και οι προσανατολισμοί των πρανών υπολογίστηκαν από το ΨΜΕ της ΕΚΧΑ Α.Ε., οι αποστάσεις

από το οδικό δίκτυο υπολογίστηκαν με βάση τους ψηφιοποιημένους με φωτοερμηνεία δρόμους της περιοχής, και τέλος, οι αποστάσεις από τους βασικούς κλάδους του υδρογραφικού δικτύου υπολογίστηκαν με βάση τα βασικά ρέματα όπως αυτά αναδεικνύονται με τον δείκτη Topographical Position Index (TPI) υπολογισμένο επί του ΨΜΕ της ΕΚΧΑ Α.Ε. Σύμφωνα με τον γεωλογικό χάρτη του ΙΓΜΕ σχεδόν σε όλη την έκταση της περιοχής εμφανίζεται φλύσχη διαφόρων τύπων. Για τον φλύσχη όλων των τύπων δόθηκε ο μέγιστος βαθμός επικινδυνότητας. Για κάθε έναν από τους παράγοντες κινδύνου δημιουργείται ένας επιμέρους χάρτης επικινδυνότητας για κατολισθήσεις, με βάση τις τιμές επικινδυνότητας που παρουσιάζει ο **Πίνακας 1**, και ο τελικός χάρτης παράγεται με γραμμικό συνδυασμό των επιμέρους χαρτών με βάση τα βάρη που παρουσιάζει ο **Πίνακας 2**.

Παράγοντας	Τάξη	Βαθμός επικινδυνότητας	Επιμέρους χάρτης επικινδυνότητας
Λιθολογία 	Αλλουβιακοί σχηματισμοί – Φλύσχη	5	
	Σχιστόλιθοι	4	
	Οφειόλιθοι	2	
	Μεσοζωικοί ασβεστόλιθοι	1	
Φυτοκάλυψη 	Δάση	1	
	Θάμνοι	2	
	Χορτολιβαδικές εκτάσεις	3	
	Χέρσα γη / Δρόμοι	5	
Υψόμετρο 	0-700 μέτρα	1	
	700-1000	2	
	1000-1300	3	
	1300-1600	4	
	>1600	5	
Κλίσεις πρανών 	0-5 %	0	
	6-10	1	
	11-15	2	
	16-20	3	
	21-30	4	
	>30	5	

Προσανατολισμοί πρανών (λαμβάνοντας υπόψη τις ήδη εκδηλωθείσες κατολισθήσεις) 	Βόρειος	1	
	Ανατολικός	2	
	Νότιος	4	
	Δυτικός	5	
Απόσταση από οδικό δίκτυο 	0-20 μέτρα	5	
	21-40	3	
	41-60	1	
	>60	0	
Απόσταση από κλάδο υδρογραφικού δικτύου 	0-50 μέτρα	5	
	50-100	3	
	100-150	1	
	>150	0	

Πίνακας 1. Βαθμός επικινδυνότητας κάθε επιμέρους παράγοντα επικινδυνότητας για κατολίπηση

Παράγοντας	Βάρος
Κλίση πρανών	0.3
Λιθολογία	0.25
Φυτοκάλυψη	0.15
Απόσταση από κλάδο υδρογραφικού δικτύου	0.1
Απόσταση από οδικό δίκτυο	0.1
Υψόμετρο	0.05
Προσανατολισμός πρανών	0.05

Πίνακας 2. Πίνακας βαρών επιμέρους παραγόντων

Ο τελικός χάρτης επικινδυνότητας για κατολισθήσεις σε 5 κατηγορίες κινδύνου υπολογίζεται με βάση τον τύπο:

$$R_a = \sum_{i=1}^n W_i X_i$$

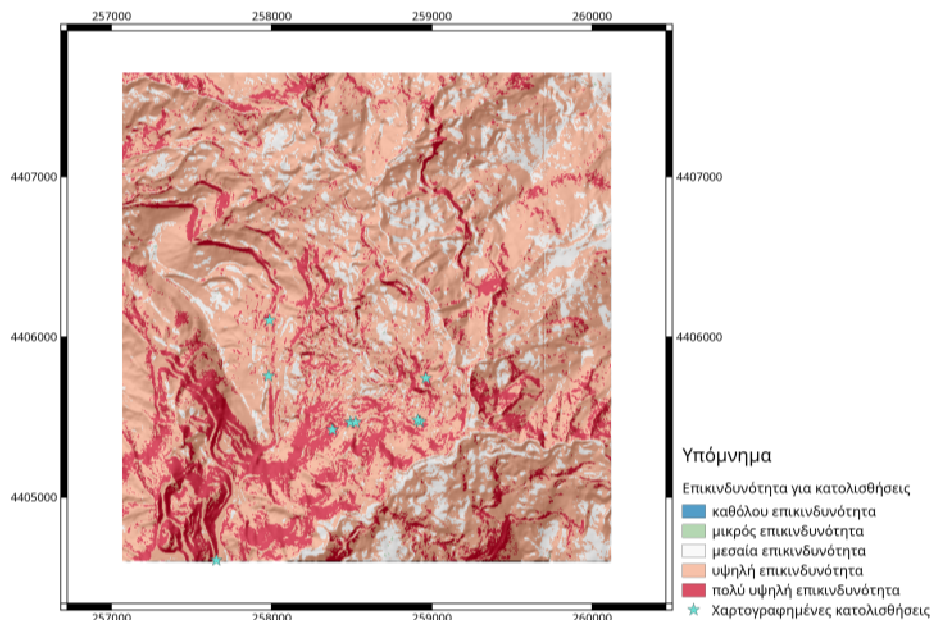
όπου:

R_a : η επικινδυνότητα για κατολισθήσεις στο εικονοστοιχείο a του τελικού χάρτη επικινδυνότητας για κατολισθήσεις

W_i : το βάρος του παράγοντα i (**Πίνακας 2**)

X_i : η τιμή επικινδυνότητας του παράγοντα i για το εικονοστοιχείο a (**Πίνακας 1**)

Στην **Εικόνα 4** παρουσιάζεται ο τελικός χάρτης επικινδυνότητας για κατολισθήσεις με 5 κατηγορίες κινδύνου. Κάποιες πρόσφατες κατολισθήσεις και καθιζήσεις, οι οποίες χαρτογραφήθηκαν, επιτέθηκαν σε αυτόν τον χάρτη και εμπίπτουν όλες στο μέγιστο βαθμό επικινδυνότητας για κατολισθήσεις. Είναι σημαντικό ωστόσο να αναφερθεί ότι ο ελάχιστος βαθμός επικινδυνότητας σχεδόν σε όλη την περιοχή μελέτης είναι η μεσαία κατηγορία. Ολόκληρη η διαδικασία παραγωγής του χάρτη αυτού πραγματοποιήθηκε με χρήση του ελεύθερου λογισμικού QGIS.



Εικόνα 4. Χάρτης επικινδυνότητας για κατολισθήσεις

Ο χάρτης αυτός διαβάζεται ως raster επίπεδο πληροφορίας από τον αλγόριθμο και η αντικειμενική συνάρτηση για την επικινδυνότητα για κατολισθήσεις ορίστηκε ως:

$$Z_1 = \min \sum_{i=1}^p R_i c w_i$$

όπου:

R_i : η επικινδυνότητα για κατολισθήσεις στο εικονοστοιχείο i σύμφωνα με το χάρτη επικινδυνότητας για κατολισθήσεις

$c w_i$: ο συντελεστής της εκάστοτε κατηγορίας όσον αφορά την επικινδυνότητα για κατολισθήσεις (-1 έως 1). Αρνητικές τιμές συνεπάγονται αντιστροφή της συνάρτησης.

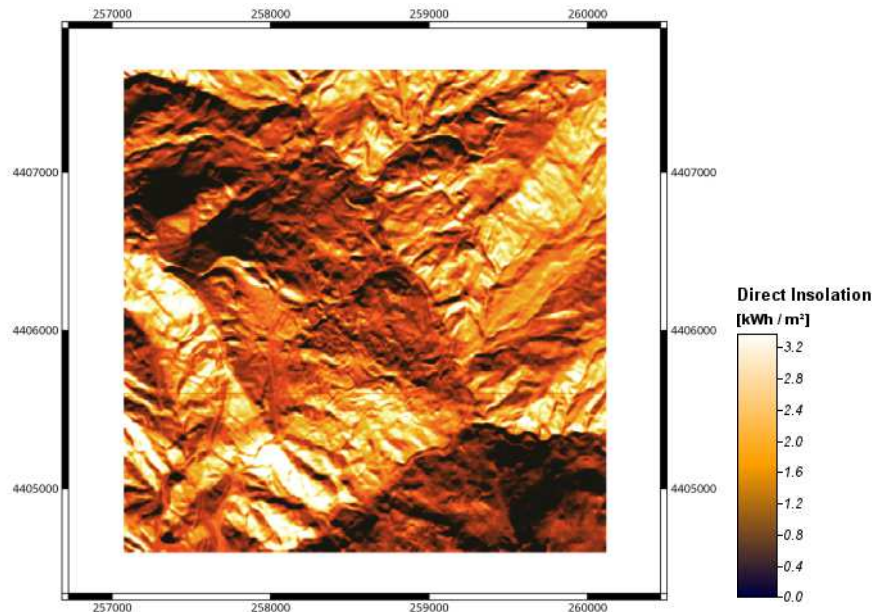
p : ο συνολικός πληθυσμός των στοιχειωδών επιφανειών χρήσης/κάλυψης της (εικονοστοιχείων ή γονιδίων)

Σχεδόν σε όλες τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν για το συντελεστή $c w$ τέθηκαν οι τιμές $c w=1$ για οικισμό/αραϊή βλάστηση/γυμνό έδαφος, $c w=0.5$ για θαμνώδεις περιοχές και $c w=0.3$ για δάση. Οι τιμές αυτές επιλέχθηκαν με βάση την επικινδυνότητα κάθε κάλυψης για

κατολίσθηση, ενώ ειδικά στην κατηγορία οικισμός δόθηκε η μέγιστη τιμή ώστε να αποφευχθούν κατά τη χωροθέτηση του νέου οικισμού οι περιοχές υψηλής επικινδυνότητας για κατολισθήσεις.

4.4.1.2 Ηλιασμός (insolation)

Ο ηλιασμός (προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια) είναι ιδιαίτερα σημαντικός για τις ορεινές περιοχές και λαμβάνεται πάντα υπόψη στο σχετικό πολεοδομικό αλλά και αρχιτεκτονικό σχεδιασμό. Για την υλοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης του ηλιασμού δημιουργήθηκε από το ΨΜΕ με χρήση του ελεύθερου λογισμικού SAGA GIS ένας χάρτης ηλιασμού (**Εικόνα 5**) για τη μικρότερη μέρα του χρόνου (21 Δεκεμβρίου).



Εικόνα 5. Χάρτης προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας στις 21 Δεκεμβρίου

Ο χάρτης αυτός διαβάζεται ως raster επίπεδο πληροφορίας από τον αλγόριθμο και η αντικειμενική συνάρτηση για τον ηλιασμό ορίστηκε ως:

$$Z_2 = \max \sum_{i=1}^p \text{Insol}_i c w_i$$

όπου:

- Insol_i: ο ηλιασμός στο εικονοστοιχείο *i* σύμφωνα με το χάρτη ηλιασμού,
- cw_i: ο συντελεστής της εκάστοτε κατηγορίας όσον αφορά τον ηλιασμό (-1 έως 1)
- p: ο συνολικός πληθυσμός των στοιχειωδών επιφανειών χρήσης/κάλυψης γης (εικονοστοιχείων)

Σχεδόν σε όλα τα πειράματα η αντικειμενική αυτή συνάρτηση χρησιμοποιήθηκε μόνο για την κατηγορία του οικισμού. Συνεπώς, είναι σαν να έχουμε θέσει cw=1 για τον οικισμό και cw=0 για όλες τις άλλες κατηγορίες.

4.4.1.3 Θέα (skyview)

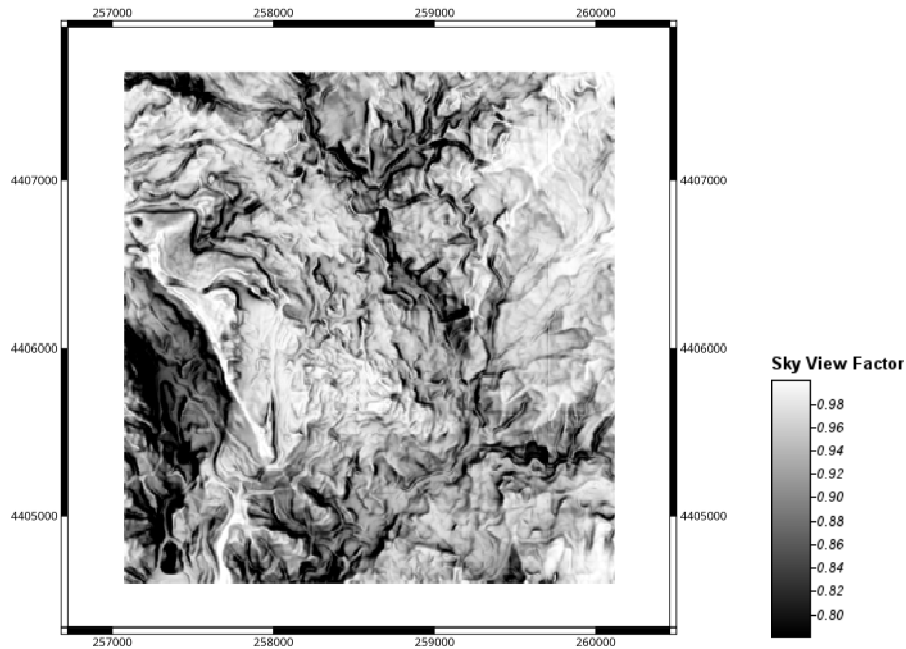
Η θέα αποτελεί επίσης ένα σημαντικό παράγοντα ο οποίος λαμβάνεται υπόψη κατά το πολεοδομικό αλλά και τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό και έχει ιδιαίτερη σημασία για τις ορεινές περιοχές. Για την υλοποίηση μίας αντικειμενικής συνάρτησης για τη θέα δημιουργήθηκε από το ΨΜΕ με χρήση του ελεύθερου λογισμικού SAGA GIS ένα χάρτης Sky-View factor (**Εικόνα 6**), ο οποίος φανερώνει σε κάθε θέση το εύρος του οπτικού πεδίου.

Ο χάρτης αυτός διαβάζεται ως raster επίπεδο πληροφορίας από τον αλγόριθμο και η αντικειμενική συνάρτηση για τη θέα ορίστηκε ως:

$$Z_3 = \max \sum_{i=1}^p SV_i cw_i$$

όπου:

SV_i : το εύρος πεδίου στο εικονοστοιχείο i σύμφωνα με το χάρτη skyview,
 cw_i : ο συντελεστής της εκάστοτε κατηγορίας όσον αφορά τη θέα (-1 έως 1), και
 p : ο συνολικός πληθυσμός των στοιχειωδών επιφανειών χρήσης/κάλυψης γης (εικονοστοιχείων)

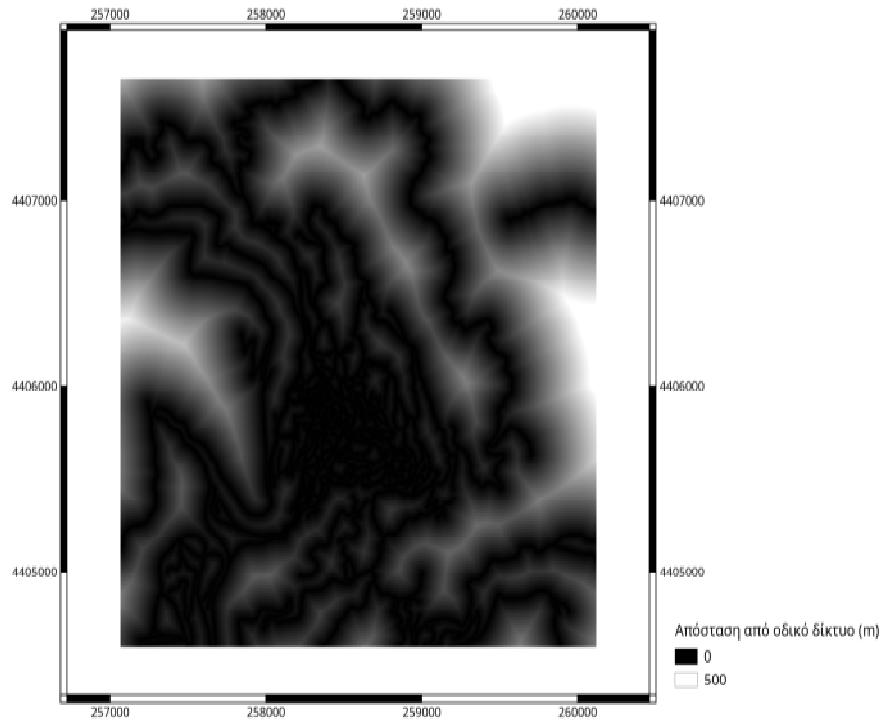


Εικόνα 6. Χάρτης εύρους θέασης

Σχεδόν σε όλα τα πειράματα η αντικειμενική αυτή συνάρτηση χρησιμοποιήθηκε μόνο για την κατηγορία του οικισμού. Συνεπώς, είναι σαν να έχουμε θέσει $cw=1$ για τον οικισμό και $cw=0$ για όλες τις άλλες κατηγορίες. Επίσης, στα περισσότερα πειράματα χρησιμοποιήθηκε μία μεικτή αντικειμενική συνάρτηση, ηλιασμός+θέα (insolation+skyview) δίνοντας μάλιστα διαφορετικά βάρη στους δύο παράγοντες.

4.4.1.4 Απόσταση από οδικό δίκτυο (road distance)

Η προσβασιμότητα για ένα οικισμό είναι μία προφανής ανάγκη και παρότι μπορούν να κατασκευαστούν νέοι δρόμοι είναι λογικό από οικονομικής άποψης να αξιοποιούνται οι ήδη υπάρχοντες. Έτσι, η αντικειμενική συνάρτηση της απόστασης από οδικό δίκτυο επιδιώκει τη δημιουργία νέου οικισμού κοντά στο ήδη υπάρχον οδικό δίκτυο. Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκε χάρτης αποστάσεων από το οδικό δίκτυο (**Εικόνα 7**) στο ελεύθερο λογισμικό QGIS.



Εικόνα 7. Χάρτης αποστάσεων από οδικό δίκτυο

Ο χάρτης αυτός διαβάζεται ως raster επίπεδο πληροφορίας από τον αλγόριθμο και η αντικειμενική συνάρτηση για την απόσταση από οδικό δίκτυο ορίστηκε ως:

$$Z_4 = \min \sum_{i=1}^p RD_i cw_i$$

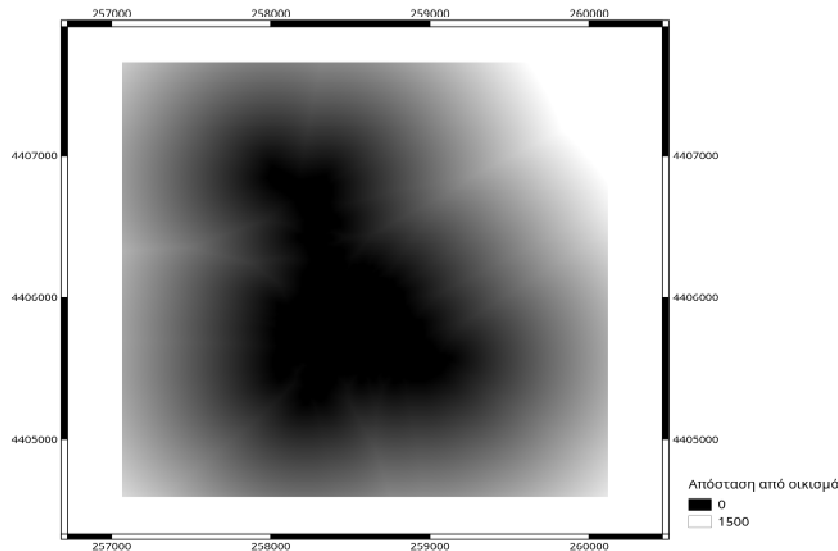
όπου:

- RD_i: η απόσταση του εικονοστοιχείου i από τον πλησιέστερο δρόμο,
- cw_i: ο συντελεστής της εκάστοτε κατηγορίας όσον αφορά την απόσταση από το οδικό δίκτυο (-1 έως 1), και
- p: ο συνολικός πληθυσμός των στοιχειωδών επιφανειών χρήσης/κάλυψης γης (εικονοστοιχείων)

Σε κάποια από τα πειράματα η αντικειμενική αυτή συνάρτηση χρησιμοποιήθηκε μόνο για την κατηγορία του οικισμού (δηλ. cw=1 για τον οικισμό και cw=0 για όλες τις άλλες κατηγορίες). Στα υπόλοιπα πειράματα οι συντελεστές που τέθηκαν ήταν: cw=1 για τον οικισμό (με στόχο να επιτευχθεί η ελάχιστη απόσταση από το οδικό δίκτυο), cw=0.5 για αραιή βλάστηση/γυμνό έδαφος (μικρή απόσταση από οδικό δίκτυο), cw= -0.5 για τις θαμνώδεις περιοχές (μεγάλη απόσταση από οδικό δίκτυο), cw= -1 για δάση (μέγιστη απόσταση από οδικό δίκτυο).

4.4.1.5 Απόσταση από οικισμό (urban distance)

Η επέκταση του οικισμού είναι προφανές ότι θα πρέπει να είναι όσο το δυνατό κοντύτερα στον υπάρχοντα οικισμό. Βέβαια ούτως ή άλλως η επέκταση θα βρίσκεται εντός του buffer των 350 μέτρων αλλά σε κάθε περίπτωση μία αντικειμενική συνάρτηση για τη μείωση της απόστασης από τον υπάρχοντα οικισμό θεωρήθηκε σκόπιμη. Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκε χάρτης αποστάσεων από τον υπάρχοντα οικισμό (**Εικόνα 8**) στο ελεύθερο λογισμικό QGIS.



Εικόνα 8. Χάρτης αποστάσεων από οικισμό

Ο χάρτης αυτός διαβάζεται ως raster επίπεδο πληροφορίας από τον αλγόριθμο και η αντικειμενική συνάρτηση για την απόσταση από οικισμό ορίστηκε ως:

$$Z_5 = \min \sum_{i=1}^p UD_i cw_i$$

όπου:

- UD_i: η απόσταση του εικονοστοιχείου *i* από το πλησιέστερο σημείο του υπάρχοντα οικισμού,
- cw_i: ο συντελεστής της εκάστοτε κατηγορίας όσον αφορά την απόσταση από τον υφιστάμενο οικισμό (-1 έως 1), και
- p*: ο συνολικός πληθυσμός των στοιχειωδών επιφανειών χρήσης/κάλυψης γης (εικονοστοιχείων)

Η αντικειμενική αυτή συνάρτηση χρησιμοποιήθηκε κυρίως στα αρχικά πειράματα και μόνο για την κατηγορία του οικισμού (cw=1 για τον οικισμό και cw=0 για όλες τις άλλες κατηγορίες). Στα περισσότερα ωστόσο πειράματα η αντικειμενική αυτή συνάρτηση δε χρησιμοποιήθηκε καθόλου, καθώς δε φάνηκε να προσφέρει κάτι σημαντικό στα αποτελέσματα για τη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης και με τον περιορισμό του buffer των 350 μέτρων που είχε τεθεί.

4.4.1.6 Καταλληλότητα προσανατολισμού πρανών (aspect suitability)

Στις ορεινές περιοχές είναι σκόπιμο ο οικισμός να μην είναι εκτεθειμένος στους ψυχρούς ανέμους και αυτό λαμβάνεται πάντα υπόψη στον πολεοδομικό και τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό. Στην περιοχή μελέτης οι ψυχροί άνεμοι πνέουν κυρίως από βόρειες-βορειοδυτικές κατευθύνσεις και για το λόγο αυτό δημιουργήθηκε μία αντικειμενική συνάρτηση η οποία να ευνοεί τη δημιουργία του νέου οικισμού σε περιοχές που να μην είναι εκτεθειμένες σε αυτούς τους ανέμους. Η αντικειμενική συνάρτηση αυτή βασίστηκε στο χάρτη προσανατολισμού των πρανών και είχε τη μορφή:

$$Z_6 = \max \sum_{i=1}^p AS_i cw_i$$

όπου:

- AS_i: η καταλληλότητα του προσανατολισμού του πρανούς του εικονοστοιχείου *i*. Ο **Πίνακας 3** παρουσιάζει τους βαθμούς καταλληλότητας που χρησιμοποιήθηκαν.

- cw_i : ο συντελεστής της εκάστοτε κατηγορίας όσον αφορά την καταλληλότητα του προσανατολισμού των πρανών για αυτήν (-1 έως 1), και
 p : ο συνολικός πληθυσμός των στοιχειωδών επιφανειών χρήσης/κάλυψης γης (εικονοστοιχείων)

Σε όλα τα πειράματα η αντικειμενική αυτή συνάρτηση χρησιμοποιήθηκε μόνο για την κατηγορία του οικισμού ($cw=1$ για τον οικισμό και $cw=0$ για όλες τις άλλες κατηγορίες).

Πίνακας καταλληλότητας προσανατολισμού	
Προσανατολισμός	Βαθμός καταλληλότητας
315°-55° (βόρειος)	1
270°-315° (δυτικός-βορειοδυτικός)	1.5
225°-270° (δυτικός-νοτιοδυτικός)	2
135°-225° (νότιος)	3
55°-135° (ανατολικός)	2

Πίνακας 3. Βαθμός καταλληλότητας προσανατολισμού

4.4.1.7 Συμπαγότητα (compactness)

Ο όρος συμπαγότητα, όπως χρησιμοποιείται σε αυτήν την εργασία, εμπεριέχει δύο ξεχωριστές έννοιες, την γειτνίαση και την συμβατότητα. Η γειτνίαση επιδιώκει τα κελιά της ίδιας χρήσης/κάλυψης γης να συνδέονται, ενώ η συμβατότητα επιδιώκει τη δημιουργία ομάδων κατηγοριών χρήσης/κάλυψης γης οι οποίες είναι συμβατές μεταξύ τους (Cao et al, 2012, Lazoglou et al, 2016). Η συμπαγότητα ενισχύει την προσβασιμότητα, προωθεί την κοινωνική ισότητα (Bramley et al, 2009), οδηγεί σε μείωση της κατανάλωσης ενέργειας (Cao et al, 2012) και συμβάλει στην ορθολογικότερη αξιοποίηση των φυσικών διαθεσίμων (Williams, 1999).

Ο ακόλουθος μαθηματικός τύπος (Shaygan et al, 2013, Lazoglou et al, 2016) συνοψίζει τον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης της συμπαγότητας:

$$Z_7 = \max \left\{ a \left[\sum_{i-d}^{i+d} \sum_{j-d}^{j+d} Com_{cc'} \right] + b \left[\sum_{i-d}^{i+d} \sum_{j-d}^{j+d} Con_c \right] \right\}$$

όπου:

- $Com_{cc'}$: είναι η συμβατότητα της κατηγορίας c με την κατηγορία c' (**Πίνακας 4**)
 Con_c : είναι ο αριθμός των κελιών γύρω από το κελί (i,j) τα οποία ανήκουν την ίδια κατηγορία με αυτό, και
 d : είναι η ακτίνα γύρω από το κεντρικό κελί μέσα στην οποία ο αλγόριθμος δουλεύει
 a, b : τα βάρη με τα οποία συμμετέχουν οι δύο υποσυναρτήσεις

Κατηγορίες	Οικισμός	Δάσος	Θάμνοι	Αραιή βλάστηση ή γυμνό έδαφος	Δρόμοι
Οικισμός	3	0.5	1	2	2
Δάσος	0.5	3	2	1	0.5
Θάμνοι	1	2	3	2	1
Αραιή βλάστηση ή γυμνό έδαφος	2	1	2	3	2
Δρόμοι	2	0.5	1	2	3

Πίνακας 4. Συμβατότητα μεταξύ κατηγοριών

Ο πίνακας συμβατότητας των κατηγοριών δημιουργήθηκε μετά από μελέτη της βιβλιογραφίας (Cao et al, 2012, Lazoglou et al, 2016) αλλά και πειραματισμό.

Στο προσαρμοσμένο μοντέλο NSGA-II, το οποίο αναπτύχθηκε, η απόσταση d μπορεί να επιλεγεί ξεχωριστά για κάθε μία από τις δύο υποσυναρτήσεις. Η τιμή $d=3$ για τη γειννίαση και $d=1$ για τη συμβατότητα έδωσαν τα καλύτερα αποτελέσματα στη συγκεκριμένη μελέτη. Ακόμα καλύτερα ωστόσο αποτελέσματα, για την υπό μελέτη περίπτωση επέκτασης οικισμού, προέκυψαν δίνοντας μικρότερο βάρος ή και μηδενισμό του βάρους συμμετοχής της υποσυναρτήσης της συμβατότητας. Ο λόγος είναι ότι αυτή η υποσυναρτήση ευνοούσε και εγκλώβιζε τη δημιουργία του νέου οικισμού σε περιοχές αραιής βλάστησης/γυμνού εδάφους, επικρατώντας έτσι περισσότερο από άλλους πιο σημαντικούς παράγοντες (π.χ. επικινδυνότητα για κατολισθήσεις).

4.4.1.8 Απόσταση από άλλα μέλη της κατηγορίας (cluster distance)

Παρά τη χρήση της αντικειμενικής συνάρτησης της συμπαγότητας, ο αλγόριθμος έτεινε να δημιουργεί πολλές κοιτίδες οικισμού περιφερειακά του υφιστάμενου οικισμού. Για να αναγκάσουμε τον αλγόριθμο να δημιουργήσει πιο συμπαγείς εστίες οικισμού, προστέθηκε μία επιπλέον αντικειμενική συνάρτηση στο προσαρμοσμένο μοντέλο NSGA-II, το οποίο αναπτύχθηκε. Αυτή επιδιώκει τα κελιά των κατηγοριών στις οποίες εφαρμόζεται να απέχουν όσο το δυνατό λιγότερο μεταξύ τους (Ευκλείδεια απόσταση). Προφανώς αυτή η συνάρτηση εφαρμόστηκε μόνο στα κελιά της κατηγορίας οικισμός.

$$Z_8 = \min \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^{pc} \sum_{k=j+1}^{pc} ED_{jk}$$

όπου:

- ED_{jk} : το άθροισμα των Ευκλείδειων αποστάσεων του εικονοστοιχείου j από όλα τα υπόλοιπα εικονοστοιχεία k τα οποία ανήκουν στην ίδια κατηγορία i ,
- c : ο αριθμός των κατηγοριών στις οποίες εφαρμόζεται η συνάρτηση, και
- pc : ο συνολικός πληθυσμός των στοιχειωδών επιφανειών χρήσης/κάλυψης γης (εικονοστοιχείων) της κατηγορίας i

4.4.1.9 Καταλληλότητα μετατροπής χρήσης/κάλυψης γης (transformation suitability)

Η αντικειμενική αυτή συνάρτηση βελτιστοποιεί τη μεταβολή της χρήσης γης από την υφιστάμενη κατάσταση σε μία νέα χρήση/κάλυψη γης (Yuan et al, 2014). Στην περίπτωση της παρούσας μελέτης, η συνάρτηση αυτή χρησιμοποιήθηκε κυρίως για τη μη μεταβολή των δασών σε θάμνους ή αραιή βλάστηση και αντιστρόφως. Όλες αυτές οι κατηγορίες ωστόσο επιτρέπεται να μετατραπούν σε οικισμό με μειωμένο βαθμό καταλληλότητας στη μεταβολή του δάσους σε οικισμό. Η αντικειμενική αυτή συνάρτηση προσδιορίζεται από τον τύπο:

$$Z_9 = \max \sum_{i=1}^P Suit_{cc'}$$

όπου:

- $Suit_{cc'}$: η καταλληλότητα μεταβολής της χρήσης κάλυψης γης c σε c' . Ο Πίνακας 5 παρουσιάζει τους βαθμούς καταλληλότητας που χρησιμοποιήθηκαν.
- p : ο συνολικός πληθυσμός των στοιχειωδών επιφανειών χρήσης/κάλυψης γης (εικονοστοιχείων)

Κατηγορίες από (κάθετα) προς (οριζόντια)	Οικισμός	Δάσος	Θάμνοι	Αραιή βλάστηση ή γυμνό έδαφος
Οικισμός	2	0	0	0
Δάσος	1	2	0	0
Θάμνοι	2	0	2	0
Αραιή βλάστηση ή γυμνό έδαφος	2	0	0	2

Πίνακας 5. Βαθμοί καταλληλότητας μετατροπής μίας κατηγορίας σε άλλη

4.4.2 Περιορισμοί

Οι περιορισμοί, οι οποίοι τίθενται κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου, είναι πιο αυστηρά κριτήρια για το κατά πόσο μία λύση θα είναι αποδεκτή ή όχι. Έτσι, αν δεν πληρούνται τα όρια τα οποία τίθενται από τους περιορισμούς οι προτεινόμενες λύσεις απορρίπτονται. Κάθε περιορισμός υπολογίζεται για κάθε εικονοστοιχείο και υπάρχουν δύο επιλογές, να είναι αυστηρός, οπότε η λύση απορρίπτεται έστω κι αν μόνο ένα εικονοστοιχείο δεν τον πληροί, ή να είναι χαλαρός, οπότε δίνεται η δυνατότητα μερικά λίγα εικονοστοιχεία να μην τον πληρούν. Από τους τέσσερις περιορισμούς που τέθηκαν στην παρούσα μελέτη, μόνο αυτός που αφορά στις κλίσεις του εδάφους ήταν χαλαρός με ανοχή 5%, επί του συνόλου των νέων εικονοστοιχείων οικισμού.

4.4.2.1 Όριο οικισμού

Ο πιο βασικός από τους περιορισμούς που τέθηκαν αφορούσε στο ποσοστό αύξησης του υπάρχοντος οικισμού. Αυτό αποφασίστηκε να οριστεί για την περίπτωση της παρούσας μελέτης στο 10% και έτσι τέθηκαν δύο περιορισμοί: α) το ποσοστό να είναι μεγαλύτερο από 8%, και β) το ποσοστό της αύξησης να είναι μικρότερο από 12%, αφήνοντας έτσι ένα περιθώριο ευελιξίας στον αλγόριθμο. Οι δύο αυτοί περιορισμοί c1 και c2 προσδιορίζονται με βάση τις παρακάτω ανισότητες:

$$c1: \sum_{i=1}^P Urb_i \leq Urb^{init} \times \frac{q\%}{100}$$

$$c2: \sum_{i=1}^P Urb_i \geq Urb^{init} \times \frac{p\%}{100}$$

όπου:

- Urb^{init}: ο αρχικός αριθμός των εικονοστοιχείων του υφιστάμενου οικισμού
- Urb_i: το εκάστοτε νέο εικονοστοιχείο οικισμού (πέραν του υφιστάμενου)
- q και p: το μέγιστο (12%) και το ελάχιστο (8%) ποσοστό αύξησης της έκτασης του οικισμού αντίστοιχα
- p: ο συνολικός πληθυσμός των νέων στοιχειωδών επιφανειών χρήσης/κάλυψης γης (εικονοστοιχείων)

4.4.2.2 Κλίσεις

Είναι σκόπιμο να τίθενται όρια όσον αφορά τις κλίσεις του εδάφους για όλες τις νέες χρήσεις/καλύψεις γης που δημιουργεί ο γενετικός αλγόριθμος. Στην περίπτωση της παρούσας μελέτης ωστόσο, ο περιορισμός αρκεί να τεθεί στα νέα εικονοστοιχεία οικισμού που προκύπτουν, και άρα να μην επιτρέπεται η δημιουργία οικισμού όταν η κλίση είναι πολύ μεγάλη. Εδώ το όριο που τέθηκε ήταν το 35% και για την υλοποίηση του περιορισμού αυτού, ο χάρτης κλίσεων εισάγεται στον αλγόριθμο ως ένα επιπλέον επίπεδο πληροφορίας.

$$c3: Slope_i \leq Slope_{lu}^{max}$$

όπου:

- $Slope_{lu}^{max}$: η μέγιστη επιτρεπόμενη κλίση για τη χρήση/κάλυψη γης lu (αυτός ο περιορισμός εφαρμόστηκε μόνο στην κατηγορία οικισμός)
- $Slope_i$: η κλίση του εδάφους στο εκάστοτε νέο εικονοστοιχείο

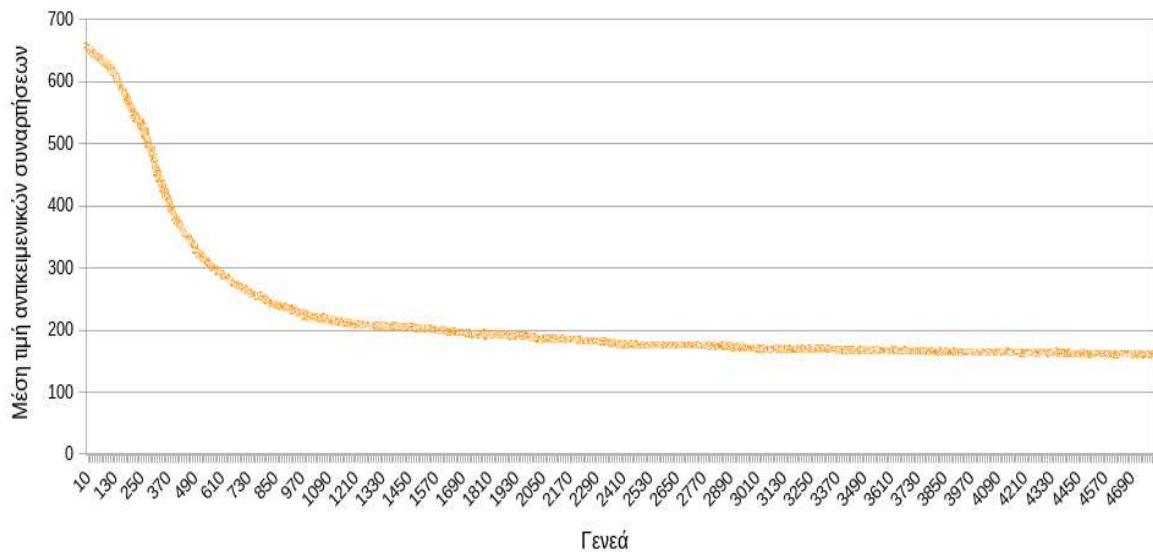
4.4.2.3 Περιοχές αποκλεισμού

Σε κάθε περίπτωση σχεδιασμού ανάπτυξης, τίθενται περιορισμοί λόγω προστατευόμενων ή ακατάλληλων περιοχών. Εδώ θα έπρεπε να τεθούν περιορισμοί όσον αφορά τους εθνικούς δρυμούς, τα εθνικά πάρκα, καταφύγια άγριων ζώων κλπ, αλλά δεν υπήρχαν κατάλληλης κλίμακας δεδομένα τα οποία θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν. Έτσι, ο μοναδικός περιορισμός που τέθηκε ήταν η απόσταση των νέων εστιών οικισμού τουλάχιστον 50 μέτρα από οποιοδήποτε βασικό κλάδο υδρογραφικού δικτύου. Ο περιορισμός αυτός (c4) υλοποιήθηκε με μία κατάλληλη μάσκα, η οποία δημιουργήθηκε με χρήση buffers 50 μέτρων εκατέρωθεν των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου (όπως αυτοί έχουν αναδειχθεί από τον δείκτη TPI), και εισήχθη στον αλγόριθμο ως ένα επιπλέον επίπεδο πληροφορίας. Αν ο αλγόριθμος δημιουργεί οικισμό σε περιοχή όπου η μάσκα έχει τιμή 1, αμέσως επισημαίνεται η παράβαση και η συγκεκριμένη λύση δε γίνεται αποδεκτή.

5. Αποτελέσματα

Ο προσαρμοσμένος αλγόριθμος NSGA-II, ο οποίος αναπτύχθηκε, ρυθμίστηκε να τρέχει για 5.000 ως 30.000 επαναλήψεις για να βελτιστοποιήσει τις αντικειμενικές συναρτήσεις και να διαχειριστεί τους περιορισμούς που τέθηκαν. Πραγματοποιήθηκαν πολλές δοκιμές (περίπου 100) με διαφορετικούς συνδυασμούς αντικειμενικών συναρτήσεων και στην πορεία αποδείχθηκε ότι οι 2.000 ως 5.000 επαναλήψεις ήταν συνήθως αρκετές για να προκύψει η μέγιστη δυνατή βελτιστοποίηση των συναρτήσεων ενώ επιπλέον επαναλήψεις δεν προσέφεραν κάποια βελτίωση. Υπήρξαν ωστόσο λίγες περιπτώσεις όπου ακόμα και μετά τις 20.000 επαναλήψεις υπήρχε μία σχετική βελτίωση. Όπως έχει ήδη αναφερθεί ο αλγόριθμος έχει αναπτυχθεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να προσπαθεί να μειώσει όλες τις αντικειμενικές συναρτήσεις, και αν κάποια από αυτές έπρεπε να μεγιστοποιηθεί τότε χρησιμοποιήθηκε η αντίθετή της. Η **Εικόνα 9** παρουσιάζει ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της μείωσης της μέσης τιμής όλων των αντικειμενικών συναρτήσεων που χρησιμοποιήθηκαν συναρτήσει της γενεάς. Αντίστοιχη ήταν η πορεία της μείωσης σε όλες τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν. Επιπλέον, η **Εικόνα 10** παρουσιάζει τη σταδιακή επίτευξη της δημιουργίας ενός μετώπου Pareto (Pareto front) από τις διαρκώς βελτιούμενες λύσεις για διάφορους συνδυασμούς των αντικειμενικών συναρτήσεων, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για το αποτέλεσμα που παρουσιάζεται στην **Εικόνα 12**. Στα περισσότερα από τα πειράματα η πρώτη λύση επιτεύχθηκε κατά τη γενεά 150 με 200. Στην **Εικόνα 10** τα κόκκινα σημεία αντιπροσωπεύουν τον πληθυσμό των επικρατούντων χρωμοσωμάτων (αποδεκτών λύσεων) της γενεάς 250, τα πορτοκαλί σημεία τις αποδεκτές λύσεις κατά τη γενεά 500, και τα γκρι σημεία τις αποδεκτές λύσεις της γενεάς 5000. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί στα διαγράμματα, όσο προχωρούν οι γενεές οι λύσεις που προκύπτουν είναι περισσότερες, διαρκώς βελτιώνουν τις αντικειμενικές συναρτήσεις, και τελικά δημιουργούν το μέτωπο Pareto, το οποίο δεν μεταβάλλεται σημαντικά όσες γενεές επιπλέον και αν προστεθούν. Η διασπορά στο μέτωπο Pareto οφείλεται κυρίως στο μεγάλο πληθυσμό των επικρατούντων χρωμοσωμάτων (βελτιστοποιημένων λύσεων) που το απαρτίζουν (περίπου 2000). Όπως έχει ήδη ωστόσο προαναφερθεί, ο αλγόριθμος NSGA-II δεν ανταποκρίνεται πάντα σε προβλήματα με περισσότερες από τρεις αντικειμενικές συναρτήσεις και ως εκ τούτου σε πολλά πειράματα υπήρξαν συνδυασμοί αντικειμενικών συναρτήσεων για τους οποίους το μέτωπο Pareto δεν επιτεύχθηκε. Στις προοπτικές της εργασίας αυτής είναι η χρήση άλλων προτεινόμενων αλγορίθμων πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, οι οποίοι μπορούν να διαχειριστούν

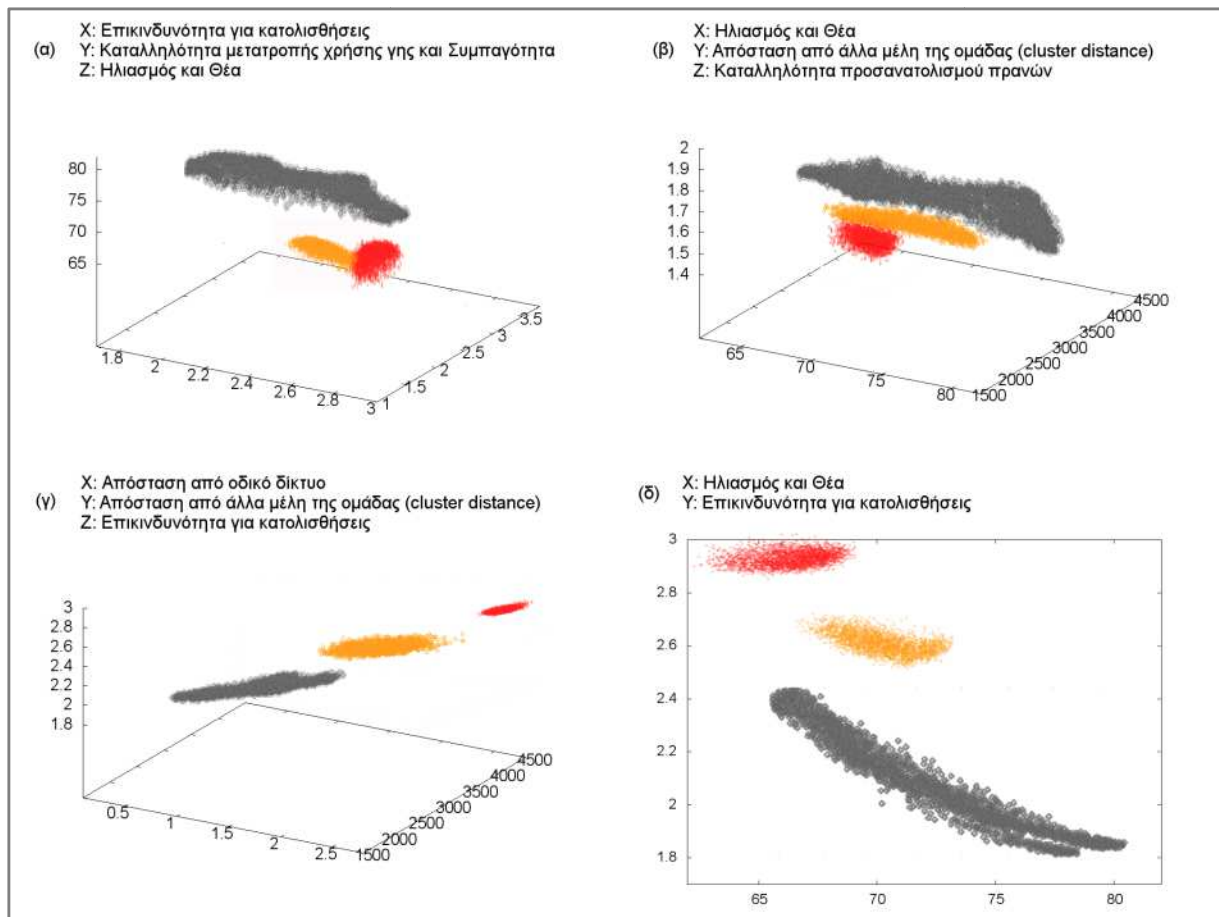
αποδοτικότερα περισσότερες παραμέτρους, και η σύγκρισή τους με τα αποτελέσματα του NSGA-II.



Εικόνα 9. Η πορεία της μείωσης του μέσου όρου των αντικειμενικών συναρτήσεων συναρτήσει της γενεάς

Τα αποτελέσματα διέφεραν ανάλογα με τις αντικειμενικές συναρτήσεις που συμμετείχαν, και γενικά παρατηρήθηκε μια εμμονή του αλγόριθμου να προτείνει επέκταση στο νότιο και νοτιοδυτικό κομμάτι του οικισμού. Στο σημείο αυτό παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα πιο ενδιαφέροντα αποτελέσματα.

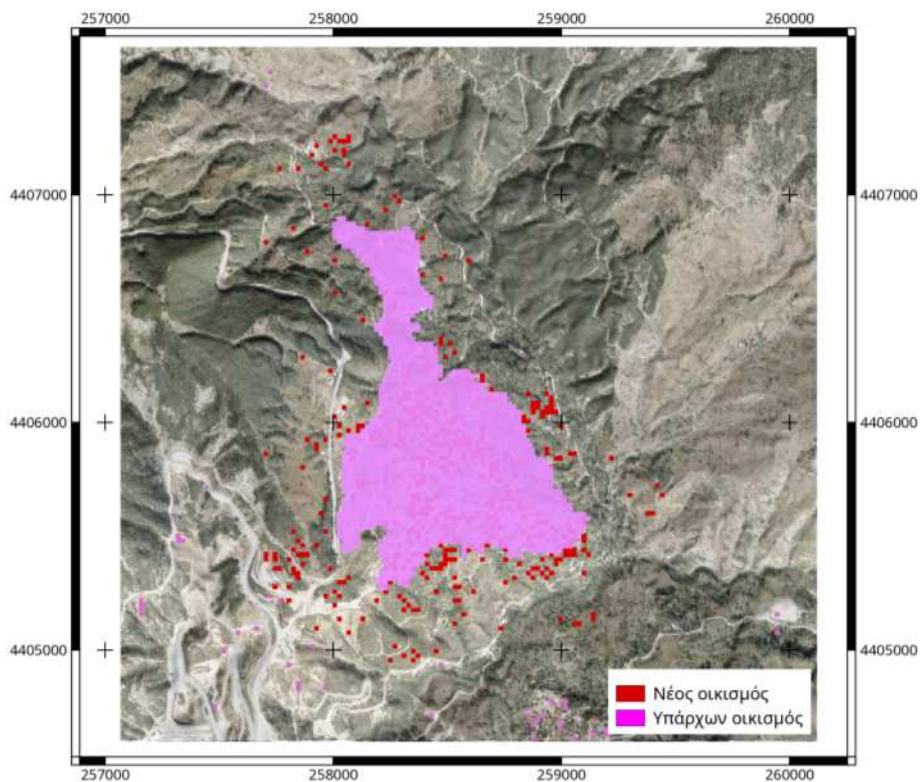
Η **Εικόνα 11** παρουσιάζει ένα τυπικό αποτέλεσμα όταν οι αντικειμενικές συναρτήσεις που τέθηκαν αφορούσαν μόνο την κατηγορία του οικισμού, ενώ στις άλλες κατηγορίες δεν είχαν τεθεί αντικειμενικές συναρτήσεις και συνεπώς τα εικονοστοιχεία που παράγαγε ο αλγόριθμος για αυτές δε συνέβαλλαν στη σύγκλιση του αλγόριθμου. Για το σκοπό αυτό εφαρμόστηκαν αντικειμενικές συναρτήσεις και στις άλλες κατηγορίες πέραν του οικισμού, με τον τρόπο που έχει ήδη προαναφερθεί στη σχετική παράγραφο περιγραφής της κάθε αντικειμενικής συνάρτησης.



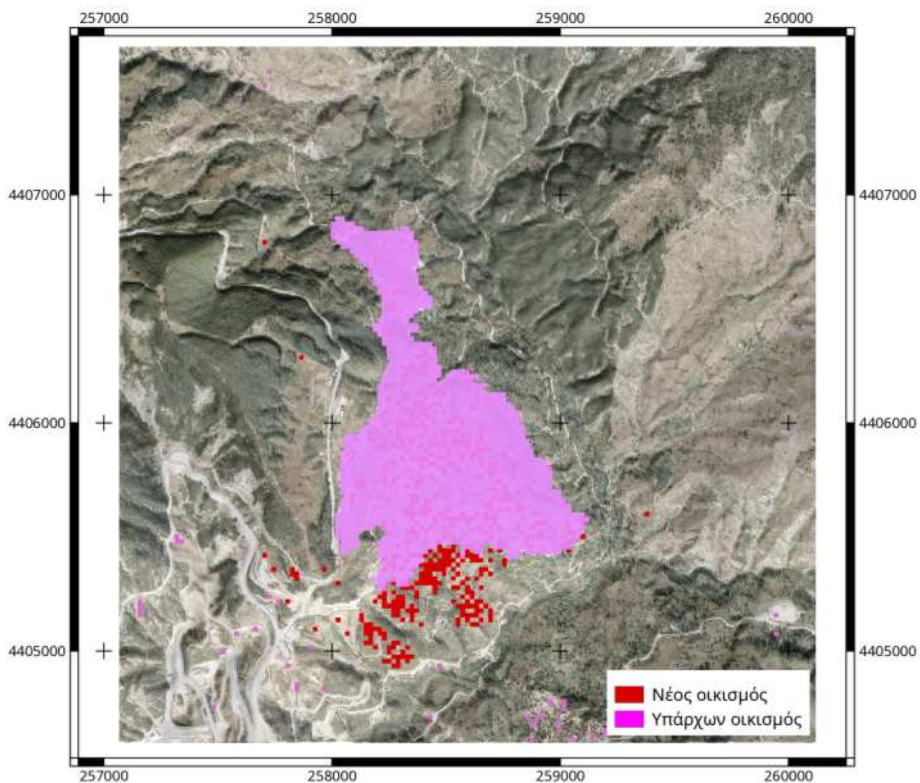
Εικόνα 10. Τυπική σταδιακή δημιουργία μετώπου Pareto κατά την εξέλιξη του γενετικού αλγορίθμου

Οι επόμενες εικόνες παρουσιάζουν πιο ενδιαφέροντα αποτελέσματα δεδομένου ότι οι νέες κοιτίδες της προτεινόμενης επέκτασης του οικισμού είναι πολύ περισσότερο συμπαγείς. Σε αυτό συνέβαλλε κυρίως η αντικειμενική συνάρτηση της Ευκλείδειας απόστασης αλλά και το γεγονός ότι μπήκαν συναρτήσεις σε όλες τις κατηγορίες. Σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις κατά τις οποίες η κατηγορία του δάσους διατηρήθηκε κλειδωμένη (δηλ. το δάσος δε μπορούσε να μετατραπεί σε οικισμό), ο αλγόριθμος πρότεινε την επέκταση του οικισμού στη νότια και σε μερικές περιπτώσεις τη νοτιοδυτική πλευρά του υφιστάμενου οικισμού (**Εικόνα 12**). Με την κατηγορία του δάσους ελεύθερη (δηλ. το δάσος να μπορεί να μετατραπεί σε οικισμό) η επέκταση του οικισμού φαίνεται να είναι προτιμότερη νοτιοδυτικά αλλά και βορειοδυτικά (**Εικόνα 13**), ενώ μειώνοντας το βάρος της αντικειμενικής συνάρτησης του ηλιασμού και ενισχύοντας εκείνη της θέας ο αλγόριθμος πρότεινε μικρή επέκταση στα νοτιοδυτικά και περισσότερες επεκτάσεις στο βόρειο κομμάτι του υφιστάμενου οικισμού (Εικόνα 14). Μέσα από το σύνολο των πειραμάτων διαπιστώθηκε ότι η μορφολογία του εδάφους της περιοχής, η οποία καθορίζει τέσσερις από τις παραμέτρους που ελήφθησαν υπόψη (ηλιασμός, θέα, προσανατολισμοί πρανών, κλίσεις πρανών), καθώς και η επικινδυνότητα για κατολισθήσεις, η οποία επίσης σε μεγάλο βαθμό καθορίζεται από τη μορφολογία του εδάφους, είναι εκείνοι οι παράγοντες που κυρίως καθορίζουν τα αποτελέσματα.

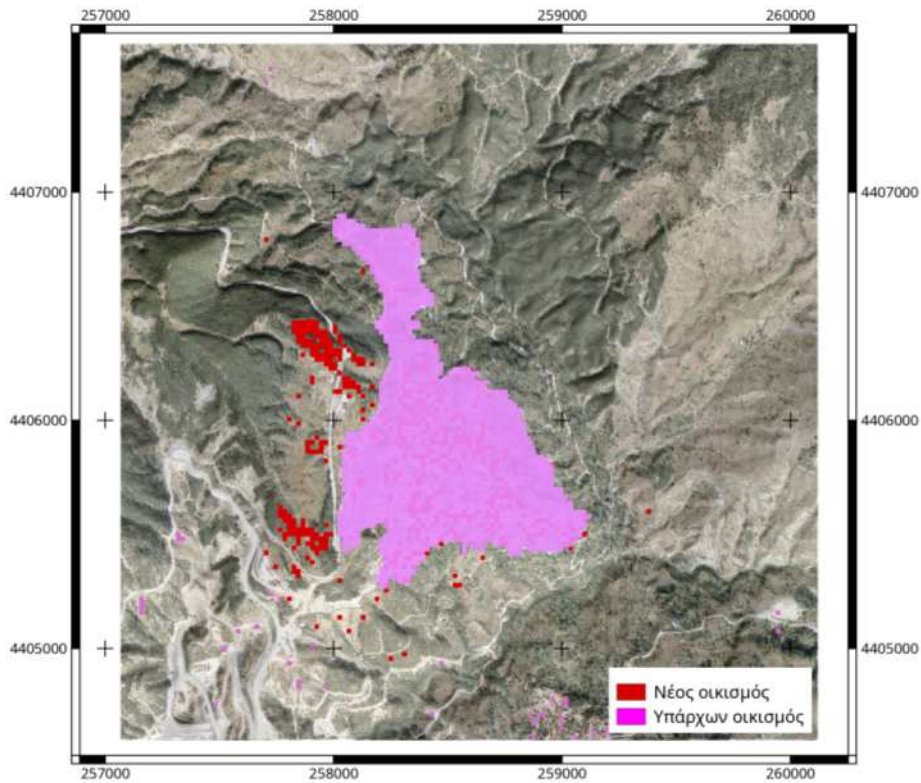
Ένα μεγάλο πλήθος (2000 περίπου) βελτιστοποιημένων λύσεων βρίσκεται κάθε φορά γύρω από το μέτωπο Pareto και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επιλογή της βέλτιστης λύσης, λαμβάνοντας υπόψη τις ειδικές ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής και του ενδιαφερόμενου χρήστη (Cao et al, 2011).



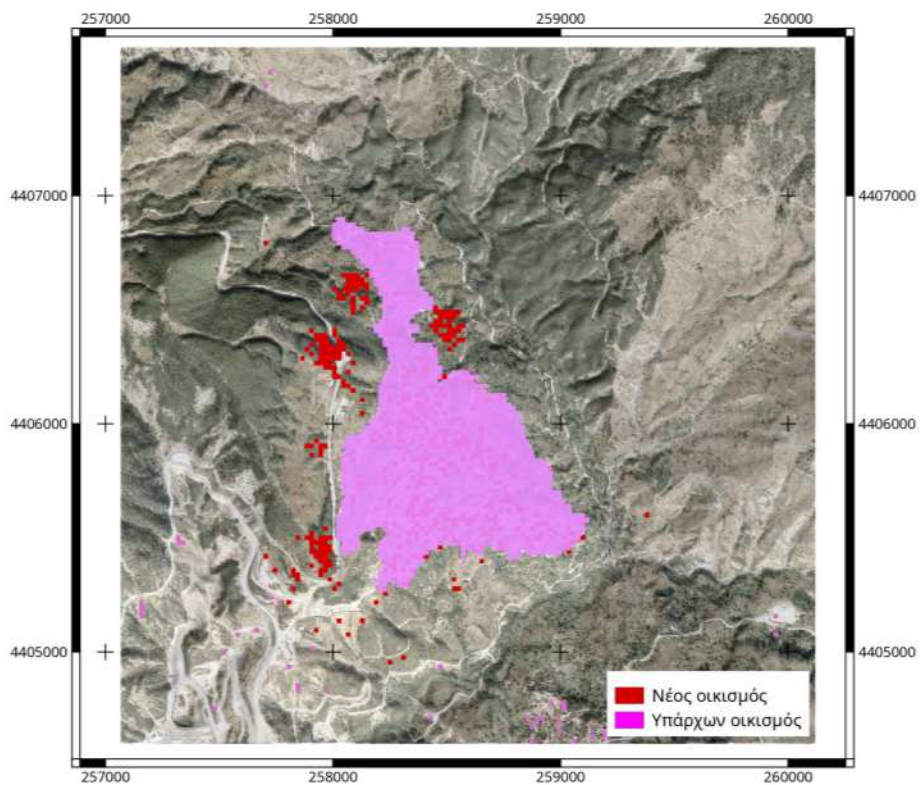
Εικόνα 11. Αποτέλεσμα με χρήση αντικειμενικών συναρτήσεων μόνο για την κατηγορία του οικισμού και “κλειδωμένη” τη δασική περιοχή



Εικόνα 12. Αποτέλεσμα με χρήση αντικειμενικών συναρτήσεων για όλες τις κατηγορίες, συναρτήσεις ηλιασμού και θέας με ίσο βάρος και “κλειδωμένη” τη δασική περιοχή



Εικόνα 13. Αποτέλεσμα με χρήση αντικειμενικών συναρτήσεων για όλες τις κατηγορίες, συναρτήσεις ηλιασμού και θέας με ίσο βάρος και ελεύθερη τη δασική περιοχή (το δάσος μπορεί να μετατραπεί σε οικισμό)



Εικόνα 14. Αποτέλεσμα με χρήση αντικειμενικών συναρτήσεων για όλες τις κατηγορίες, συναρτήσεις ηλιασμού και θέας με τριπλάσιο βάρος στη θέα και ελεύθερη τη δασική περιοχή (το δάσος μπορεί να μετατραπεί σε οικισμό).

Είναι δυνατό να μελετήσει κανείς διαφορετικά σενάρια, για το ποια λύση είναι η καλύτερη για την εκάστοτε περιοχή μελέτης και είναι πιθανό ο χρήστης να μην επιλέξει μία λύση ισοβαρή προς όλες τις αντικειμενικές συναρτήσεις, αλλά να δώσει περισσότερο βάρος σε κάποια από αυτές, δεδομένων των ειδικών συνθηκών του προβλήματος. Για παράδειγμα, είναι πολύ λογικό στην περίπτωση της επέκτασης ενός ορεινού οικισμού να δοθεί πρωτίστως βάρος στην ασφάλεια και άρα στην όσο το δυνατό μικρότερη επικινδυνότητα για κατολισθήσεις και μετά στις άλλες παραμέτρους του προβλήματος. Αν και πραγματοποιήθηκαν πειράματα κατά τα οποία επιλέχθηκαν βέλτιστες λύσεις, οι οποίες ικανοποιούσαν περισσότερο συγκεκριμένες αντικειμενικές συναρτήσεις (όπως π.χ. επικινδυνότητα για κατολισθήσεις), τα αποτελέσματα δεν διαφοροποιούνταν σημαντικά. Έτσι, στη συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκε να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα με την ισοβαρή προς όλες τις παραμέτρους βέλτιστη λύση, η οποία συνήθως είναι και η πιο ισορροπημένη (Cao et al, 2011).

6. Συμπεράσματα

Οι ευρετικές (heuristic) μεθοδολογίες, όπως οι ΓΑ, έχουν τη δυνατότητα να πραγματοποιούν πολυπαραγοντική ανάλυση των πολλών και συχνά αντικρουόμενων παραμέτρων που απαιτούν ο σχεδιασμός του χώρου και η οργάνωση των σχετικών δραστηριοτήτων. Σε αυτήν την εργασία παρουσιάστηκε ένας ευρετικός αλγόριθμος για την επιλογή της βέλτιστης πιθανής επέκτασης ενός ορεινού οικισμού, και πιο συγκεκριμένα του οικισμού του Μετσόβου. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος αποτελεί μία εκδοχή του NSGA-II προσαρμοσμένου στις ιδιαίτερες ανάγκες του συγκεκριμένου προβλήματος.

Η αποτελεσματικότητα του προσαρμοσμένου NSGA-II αλγορίθμου, ο οποίος αναπτύχθηκε, πιστοποιήθηκε στο συγκεκριμένο πρόβλημα διαχείρισης/πολιτικής γης χρησιμοποιώντας τις πιο πολλές από τις βασικές παραμέτρους για τη βέλτιστη επέκταση ενός ορεινού οικισμού. Οι παράμετροι που ελήφθησαν υπόψη ήταν: 1) η επικινδυνότητα κατολίσθησης, 2) ο ηλιασμός, 3) η θέα, 4) η απόσταση από το οδικό δίκτυο, 5) η απόσταση από υφιστάμενο οικισμό, 6) η καταλληλότητα προσανατολισμού πρανών (αποφυγή ψυχρών ανέμων), 7) η συμπαγότητα, 8) η ελαχιστοποίηση της απόστασης των νέων κοιτίδων του οικισμού, και 9) η καταλληλότητα μετατροπής χρήσης/κάλυψης γης. Επιπλέον, περιορισμοί τέθηκαν για το μέγεθος της επέκτασης, τις μέγιστες επιτρεπόμενες κλίσεις αλλά και συγκεκριμένες περιοχές αποκλεισμού χωροθέτησης νέου οικισμού. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι, ο αλγόριθμος κατάφερε να λειτουργήσει αποτελεσματικά ακόμα και με χρήση όλων των παραμέτρων και περιορισμών δίνοντας ρεαλιστικές προτάσεις επέκτασης του οικισμού, ενώ καθοριστική για το αποτέλεσμα είναι η μεταβολή των βαρών στις παραμέτρους με βάση τις ιδιαιτερότητες της περιοχής.

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος αποτελεί σημαντικό εργαλείο για την επιλογή της βέλτιστης λύσης ανάμεσα σε πολλές εναλλακτικές διαχείρισης των χρήσεων γης, αλλά και γενικότερα στο πλαίσιο της ολοκληρωμένης ανάπτυξης των ορεινών κυρίως περιοχών (Ρόκος Δ., 2001), συνεκτιμώντας και αξιολογώντας τις δράσεις και επιπτώσεις διαφόρων σεναρίων και μέτρων πολιτικής γης.

Στις προοπτικές της εργασίας αυτής είναι η χρήση άλλων προτεινόμενων αλγορίθμων πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, οι οποίοι μπορούν να διαχειριστούν αποδοτικότερα περισσότερες παραμέτρους, και η σύγκρισή τους με τα αποτελέσματα του NSGA-II.

Ευχαριστίες

Η μελέτη αυτή υποστηρίχθηκε "Υποτροφίες Αριστείας Ι.Κ.Υ. Μεταπτυχιακών Σπουδών στην Ελλάδα – Πρόγραμμα Siemens". Ευχαριστούμε την ΕΚΧΑ Α.Ε. για τα δεδομένα καθώς και τον κ. Μάριο Κοφινά, μέλος ΕΤΕΠ του ΜΕ.Κ.Δ.Ε. του Ε.Μ.Π. για τη χαρτογράφηση των πρόσφατων κατολισθητικών φαινομένων και καθιζήσεων στην περιοχή του Μετσόβου.

Βιβλιογραφία

- Aerts, J.C., Eisinger, E., Heuvelink, G. and Stewart, T.J., “Using Linear Integer Programming for Multi-Site Land-Use Allocation”. *Geographical Analysis*, 35: 148-169, 2003.
- Balling, R.J., Taber, J.T., Brown, M.R. and Day, K., “Multiobjective Urban Planning Using Genetic Algorithm”. *Journal of Urban Planning and Development*, 125: 86-99, 1999.
- Bramley, G. and Power, S. “Urban form and social sustainability: The role of density and housing type”. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 36: 30-48, 2009.
- Cao, K., Batty, M., Huang, B., Liu, Y., Yu, L. and Chen, J., “Spatial Multi-Objective Land Use Optimization: Extensions to the Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II”. *International Journal of Geographical Information Science*, 25: 1949-1969, 2011.
- Cao, K., Huang, B., Wang, S. and Lin, H., “Sustainable Land Use Optimization Using Boundary-Based Fast Genetic Algorithm”. *Computers, Environment and Urban Systems*, 36: 257-269, 2012.
- Γαλανού Ε., Κολοκούσης Π., “Δημιουργία χάρτη ζωνών επικινδυνότητας για εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων στην ορεινή Νάξο με χρήση της μεθοδολογίας της τηλεπισκόπησης σε περιβάλλον γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών”, 6^ο Διεπιστημονικό Διαπανεπιστημιακό Συνέδριο του Ε.Μ.Π. και του ΜΕ.Κ.Δ.Ε. του Ε.Μ.Π., Μέτσοβο, 2010.
- Γεωργόπουλος, Ε.Φ., Λυκοθανάσης, Σ.Δ., “Εισαγωγή στους Γενετικούς Αλγόριθμους”. Πανεπιστήμιο Πατρών Πολυτεχνική Σχολή, Πάτρα, 1999.
- Datta, D., Fonseca, C.M. and Deb, K., “A Multi-Objective Evolutionary Algorithm to Exploit the Similarities of Resource Allocation Problems”. *Journal of Scheduling*, 11: 405-419, 2008.
- Deb, K. and Agrawal, R.B., “Simulated Binary Crossover for Continuous Search Space”. *Complex Systems*, 9: 115-148, 1994.
- Deb, K., “Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms”. John Wiley & Sons Ltd., New York, 2001.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. and Meyarivan, T.A.M.T. “A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II”. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6: 182-197, IEEE, 2002.
- Deb K. and Jain H., “Handling many-objective problems using an improved NSGA-II procedure”. In *Evolutionary Computation (CEC), 2012 IEEE Congress on*, pages 1–8, June 2012.
- Duh, J. D. and Brown, D.G., “Knowledge-Informed Pareto Simulated Annealing for Multi-Objective Spatial Allocation”. *Computers, Environment and Urban Systems*, 31: 253-281, 2007.
- Eldrandaly, K., “A GEP-Based Spatial Decision Support System for Multisite Land Use Allocation”. *Applied Soft Computing*, 10: 694-702, 2010.
- Goldberg, D.E., “Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning”. Addison-Wesley, Reading, 1989.
- Fortin F.-A. and Parizeau M., “Revisiting the NSGA-II Crowding-Distance Computation”, *Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO)*, 2013.
- Hajehforooshnia, S., Soffianian, A., Mahiny, A.S. and Fakheran, S., “Multi Objective Land Allocation (MOLA) for Zoning Ghamishloo Wildlife Sanctuary in Iran”. *Journal for Nature Conservation*, 19: 254-262, 2011.
- Holland, J.H., “Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology”, *Control, and Artificial Intelligence*. University of Michigan Press, Michigan, 1975.

- Huang, K., Liu, X., Li, X. and Liang, J., "An Improved Artificial Immune System for Seeking the Pareto Front of Land-Use Allocation Problem in Large Areas". *International Journal of Geographical Information Science*, 27: 922-946, 2012.
- Jones, D.F., Mirrazavi, S.K. and Tamiz, M., "Multi-Objective Meta-Heuristics: An Overview of the Current State-of-the-Art". *European Journal of Operational Research*, 137: 1-9, 2002.
- Kanpur Genetic Algorithms Laboratory. Διαθέσιμο στο <http://www.iitk.ac.in/kangal/index.shtml>, τελευταία προσπέλαση 16/02/2016.
- Lazoglou M., Kolokoussis P., Dimopoulou E., "Investigating the Use of a Modified NSGA-II Solution for Land-Use Planning in Mediterranean Islands", *Journal of Geographic Information System*, 2016, 8: 369-386, Published Online June 2016 in SciRes. <http://www.scirp.org/journal/jgis>, <http://dx.doi.org/10.4236/jgis.2016.83032>
- Liu, Y., Liu, D., Liu, Y., He, J., Jiao, L., Chen, Y. and Hong, X., "Rural Land Use Spatial Allocation in the Semiarid Loess Hilly Area in China: Using a Particle Swarm Optimization Model Equipped with Multi-Objective Optimization Techniques". *Science China Earth Sciences*, 55: 1166-1177, 2012.
- Matthews, K.B., "Applying Genetic Algorithms to Multi-Objective Land-Use Planning". Doctoral Dissertation, The Robert Gordon University, Aberdeen, 2001.
- Matthews, K.B., Buchan, K., Sibbald, A.R. and Craw, S., "Combining Deliberative and Computer-Based Methods for Multi-Objective Land-Use Planning". *Agricultural Systems*, 87: 18-37, 2006.
- Μέλισσας Δ., "Οι χρήσεις γης και το γενικό πολεοδομικό σχέδιο", Εκδόσεις Σάκκουλα, Αθήνα, 2007.
- Niaraki, A.S. and Kim, K., "Ontology Based Personalized Route Planning System Using a Multi-Criteria Decision Making Approach". *Expert Systems with Applications*, 36: 2250-2259, 2009.
- Pareto, V., "Manual of Political Economy". Macmillan Publishers, New York, 1971.
- Porta, J., Parapar, J., Doallo, R., Rivera, F.F., Santé, I. and Crecente, R., "High Performance Genetic Algorithm for Land Use Planning". *Computers, Environment and Urban Systems*, 37: 45-58, 2013.
- Ρόκος Δ., "Η Ολοκληρωμένη Ανάπτυξη στις Ορεινές Περιοχές. Θεωρία και Πράξη.", 3ο Διεπιστημονικό Δαπανεπιστημιακό Συνέδριο του Ε.Μ.Π., Μέτσοβο, Ιούνιος 2001.
- Seada H., Deb K., "U-NSGA-III: A Unified Evolutionary Algorithm for Single, Multiple, and Many-Objective Optimization", *Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO)*, 2014.
- Shaygan D., M., Alimohammadi, A., Mansourian, A., Govara, Z.S. and Kalami, S.M., "Spatial Multi-Objective Optimization Approach for Land Use Allocation Using NSGA-II". *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7: 906-916, 2013.
- Srinivas, N. and Deb, K., "Multi objective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms". *Evolutionary Computation*, 2, 221-248, 1994.
- Tapia, M.G.C. and Coello, C.A.C., "Applications of Multi-Objective Evolutionary Algorithms in Economics and Finance: A Survey". *Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation*, Singapore, 25-28 September 2007, pp. 532-539, 2007
- Williams, K. "Urban intensification policies in England: problems and contradictions". *Land Use Policy*, 16: 167-178, 1999.

- Yuan, M., Liu, Y., He, J. and Liu, D. “Regional land-use allocation using a coupled MAS and GA model: from local simulation to global optimization, a case study in Caidian District, Wuhan, China”. *Cartography and Geographic Information Science*, 41: 363-378, 2014.
- Zhang Q. and Li H., “MOEA/D: A multi objective evolutionary algorithm based on decomposition,” *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, vol. 11, no. 6, pp. 712–731, 2007.
- Φαρμακάκη Α., “Χάρτες επικινδυνότητας για την πρόληψη κατολισθητικών φαινομένων”, Στα πρακτικά της διημερίδας “Η συμβολή του ΕΜΠ στην ολοκληρωμένη ανάπτυξη του Δήμου Μετσόβου”, σελ. 185-192, Μηλιά, Ιούλιος 2011.
- Φιλότις-Βάση Δεδομένων για την Ελληνική Φύση, Διαθέσιμο στο <https://filotis.itia.ntua.gr/>, τελευταία προσπέλαση 16/07/2016.

Applying Genetic Algorithms for Land Use Planning in Mountain Areas

P. Kolokoussis, Dr. Eng., School of Rural & Surveying Engineering, NTUA

M. Lazoglou, PhD candidate, School of Civil Engineering, AUTH

I. Galanos, PhD in Remote Sensing, MSc in Regional Development, MIRC, NTUA.

E. Dimopoulou, Associate Professor, School of Rural & Surveying Engineering, NTUA

Abstract

Decision making in spatial planning requires analyzing many and often conflicting parameters. Land-use planning has a key role in this process because the way land-uses are structured is directly related to the historical, social, cultural, environmental background of an area and its model of development. Land-use planning is an issue of great importance for attracting development initiatives in less-favoured areas whose development process is rather slow.

The complex interactions recorded in less-favoured areas require the integration of modern technologies in the process of land-use planning, because this kind of problems present substantial computational complexity while a plethora of possible solution-combinations should be assessed; and complex interactions amongst the possible land-uses should be investigated. In this context, Genetic Algorithms provide a powerful tool that can positively contribute to this challenge, through seeking acceptable solutions in accordance to the objectives defined.

This article explores the potential use of the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) to identify the most appropriate/suitable areas for future expansion of the mountainous settlement of Metsovo. For this scope the Genetic Algorithm was programmed to analyze the morphological, lithological and hydrological background of the area, the existing infrastructure, the legal framework and the relationships and interactions developed among the existing land uses.

The results show that the adapted NSGA-II algorithm performs sufficiently and can contribute in solving this kind of problems. Regarding the future urban expansion of the settlement of Metsovo, geomorphology and landslide risk are acknowledged as the most critical factors. The proposed algorithm could be used for exploring various scenarios for future urban expansion of mountainous settlements, contributing in this way to their integrated development.