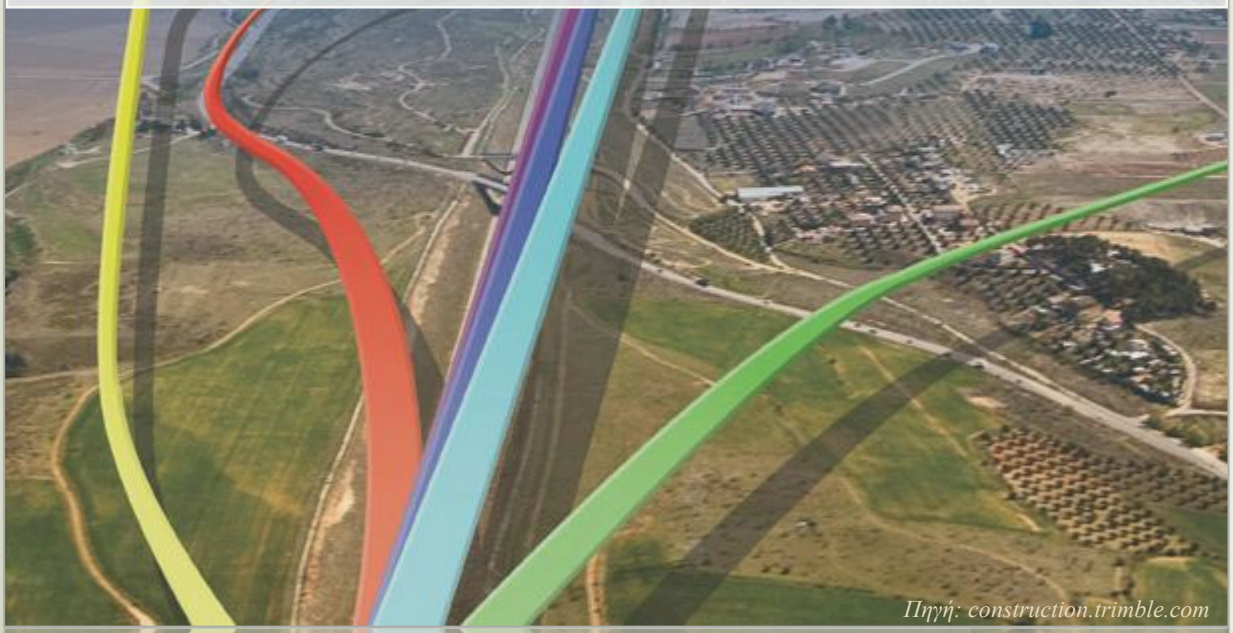
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΟΔΙΚΩΝ ΧΑΡΑΞΕΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Στέφανος, Σ. Πολίτης



Επιβλέπων : Κωνσταντίνος, Κεπαπτσόγλου
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ, 30/6/2016

NATIONAL TECHNICAL UNIVERISTY OF ATHENS

SCHOOL OF RURAL AND SURVEYING ENGINEERING
DEPARTMENT OF INFRASTRUCTURE AND RURAL DEVELOPMENT
LABORATORY OF TRANSPORTATION ENGINEERING

OPTIMIZATION OF HIGHWAY ALIGNMENTS

DIPLOMA THESIS

by

STEFANOS, S. POLITIS

Supervisor: Konstantinos, Kepaptsoglou
Assistant Professor N.T.U.A

Athens, 30/6/2016

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ

Βελτιστοποίηση Οδικών Χαράξεων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Στέφανος, Σ. Πολίτης

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος, Κεπαπτσόγλου
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 30η Ιουνίου 2016.

.....	.....	.....
Κωνσταντίνος, Κεπαπτσόγλου	Βασίλειος, Ψαριανός	Ιωάννα, Σπυροπούλου
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π	Καθηγητής Ε.Μ.Π	Επίκουρη Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

Αθήνα, 30/6/2016

.....
Στέφανος, Σ. Πολίτης
Διπλωματούχος Αγρονόμος και Τοπογράφος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Copyright © Στέφανος, Σ. Πολίτης, 2016.
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Στην αγαπημένη μου Βικτώρια

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκε στο πλαίσιο ολοκλήρωσης των προπτυχιακών σπουδών της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου με κύρια εμβάθυνση τη Συγκοινωνιακή Τεχνική, που οργανώνεται από τον Τομέα Έργων Υποδομής και Αγροτικής Ανάπτυξης.

Σκοπός της εργασίας είναι η ανασκόπηση της έρευνας στην εφαρμογή μεθόδων βελτιστοποίησης στην χάραξη οδών καθώς και η ανάπτυξη ενός συστήματος για τη βελτιστοποίηση χαράξεων με χρήση γενετικών αλγορίθμων. Αφορμή για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής ήταν ο προσωπικός προβληματισμός, που αναπτύχθηκε μέσα από το μάθημα-θέμα «Σχεδιασμός – Μελέτη και Λειτουργία Οδικών Έργων» ως προς τη δυνατότητα αυτοματοποίησης του γεωμετρικού σχεδιασμού των οδών, που να οδηγεί σε χαράξεις με ελάχιστο κόστος. Το βασικό γνωστικό υπόβαθρο για τη διαμόρφωση ενός τέτοιου προβλήματος βελτιστοποίησης προήλθε από το μάθημα «Επιχειρησιακή Έρευνα».

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να απευθύνω θερμές ευχαριστίες στον κ. Κεπαπτσόγλου, Επίκουρο Καθηγητή Ε.Μ.Π. και επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αφ' ενός για την προθυμία του να αναλάβει την επίβλεψη της εργασίας και αφ' ετέρου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε σε όλο το διάστημα εκπόνησής της. Το άριστο κλίμα συνεργασίας, οι οδηγίες και κατευθύνσεις του ήταν καθοριστικές για την επίτευξη του τελικού αποτελέσματος. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ψαριανό, Καθηγητή Ε.Μ.Π. και διευθυντή του Εργαστηρίου Συγκοινωνιακής Τεχνικής της Σ.Α.Τ.Μ. για τις υποδείξεις του στα θέματα του γεωμετρικού σχεδιασμού των οδών και την παροχή χρήσιμου υλικού, αλλά και την κα. Σπυροπούλου, Επίκουρη Καθηγήτρια Ε.Μ.Π. για την υποστήριξή της και τη μετάδοση βασικών γνώσεων κυκλοφοριακής τεχνικής.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω, επίσης, σε συγγενείς, φίλους και συμφοιτητές, για όσα ανεκτίμητα μου έχουν προσφέρει στη διάρκεια των σπουδών μου και όχι μόνο. Η στήριξή τους και οι όμορφες στιγμές που έχουμε μοιραστεί αποτέλεσαν σημαντική συνδρομή στην φοιτητική μου πορεία.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την αδερφή μου, Δωροθέα, γιατί μου δίνει κίνητρο και ώθηση, ώστε να θέλω να γίνομαι καλύτερος. Τον πατέρα μου, Σταύρο, για τις δεκαετίες σκληρής εργασίας στο εξωτερικό, μακριά από την κατοικία του, προκειμένου να εξασφαλίσει τους απαραίτητους πόρους στην οικογένειά του. Τη μητέρα μου, Μαρία, γιατί αφιέρωσε ολοκληρωτικά τον εαυτό της στην ανατροφή μου.

Ολοκληρώνοντας τις σπουδές μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, θεωρώ την ελεύθερη πρόσβαση στην παρούσα εργασία ως ελάχιστη ανταμοιβή στην ελληνική κοινωνία για το υπέρτατο αγαθό της παιδείας, το οποίο μου προσέφερε άνευ χρηματικού αντιτίμου.

Στέφανος, Σ. Πολίτης

30/6/2016

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σχεδιασμός μιας οδού αποτελεί ένα ιδιαίτερα περίπλοκο πρόβλημα το οποίο μελετάται σε διαφορετικά επίπεδα. Αρχικά, σε μια ευρεία περιοχή μελέτης σχεδιάζονται και αξιολογούνται εναλλακτικές διαδρομές ενώ σε πιο προχωρημένα στάδια γίνεται λεπτομερής σχεδιασμός της οδικής χάραξης που επιλέχθηκε από την αξιολόγηση. Υπάρχουν αρκετά στοιχεία κόστους που σχετίζονται με τα οδικά έργα, τα οποία αφορούν κοινωνικοοικονομικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες ενώ σε τελικό στάδιο το σημαντικότερο ρόλο παίζει το κόστος κατασκευής. Η διαδικασία βασίζεται σε μια μέθοδο δοκιμής και λάθους η οποία υπόκειται σε μεγάλο πλήθος περιορισμών που απορρέουν από τις προδιαγραφές οδικού σχεδιασμού. Στις προδιαγραφές αυτές διαπιστώνονται αρκετές διαφορές ως προς τις επιλογές των μεγεθών των γεωμετρικών στοιχείων, ενώ έμφαση πρέπει να δίνεται στην οδική ασφάλεια.

Η συμβατική διαδικασία σχεδιασμού μιας χάραξης σύμφωνα με την υπάρχουσα πρακτική περιλαμβάνει σε μεγάλο βαθμό το στοιχείο της κριτικής. Για τον λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί αρκετά μαθηματικά πρότυπα βελτιστοποίησης με στόχο τη μείωση του χρόνου, του κόστους και των σφαλμάτων της διαδικασίας του συμβατικού οδικού σχεδιασμού. Η βελτιστοποίηση οδικών χαράξεων διαμορφώνεται ως το πρόβλημα εύρεσης μιας καμπύλης που συνδέει δύο σημεία με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους. Στην παρούσα εργασία εξετάζονται τα χαρακτηριστικά του προβλήματος της βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων και γίνεται εκτενής ανασκόπηση των υπαρχόντων προτύπων βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων. Μέσω της ανασκόπησης γίνεται η διαπίστωση πως τα περισσότερα πρότυπα αφορούν το προκαταρκτικό στάδιο μελέτης των οδών και υστερούν ως προς τις απαιτήσεις σχεδιασμού σε ένα πιο λεπτομερές επίπεδο. Για το λόγο αυτό αναπτύσσεται ένα καινοτόμο πρότυπο βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων, το οποίο ονομάζεται RoadEvolver και δομείται με τέτοιο τρόπο, ώστε να αποτυπώνει εκείνες τις αποφάσεις που καλείται να πάρει ένας μελετητής ως προς τη γεωμετρία της οδού και να σχεδιάζει αυτόματα χαράξεις στον τρισδιάστατο χώρο. Οι χαράξεις δεν περιγράφονται από μια ενιαία μαθηματική καμπύλη αλλά κάθε στοιχείο της χάραξη περιγράφεται με ξεχωριστές γεωμετρικές σχέσεις, όπως ακριβώς γίνεται και κατά τη συμβατική διαδικασία σχεδιασμού. Κύριο χαρακτηριστικό του προτύπου αποτελεί η ανεξαρτησία των μεταβλητών απόφασης οριζοντιογραφίας και μηκοτομής, οι οποίες συνδέονται μέσω περιορισμών για τον επιτυχή συνδυασμό τους. Επίσης εισάγονται νέες μεταβλητές απόφασης για τη ρεαλιστική αναπαράσταση της χάραξης με τη συμπερίληψη ασύμμετρων οριζοντιογραφικών καμπυλών. Μέσω της μεθόδου που ακολουθείται η χάραξη μπορεί να προσαρμοστεί καλύτερα στο φυσικό έδαφος αποφέροντας χαμηλότερο κόστος χωματουργικών εργασιών.

Για τη βελτιστοποίηση της οδικής χάραξης επιλέγεται η χρήση γενετικών αλγορίθμων, καθώς με βάση τη διερεύνηση των μεθόδων βελτιστοποίησης φαίνεται πως διαθέτουν τα απαραίτητα χαρακτηριστικά για την επίλυση του προβλήματος που περιγράφεται. Στη διαμόρφωση του προβλήματος χρησιμοποιείται πλήθος περιορισμών που απορρέουν από τις οδηγίες γεωμετρικού σχεδιασμού οδών και ο χρήστης του RoadEvolver καλείται να επιλέξει τους περιορισμούς που θα λάβει υπ' όψιν ανάλογα με τις ισχύουσες προδιαγραφές. Για τον έλεγχο του προτύπου έγιναν τρεις εφαρμογές με διαφορετικές παραμέτρους σχεδιασμού. Το σύστημα ανταποκρίθηκε στις απαιτήσεις επιβεβαιώνοντας, ότι χαράξεις με μεγαλύτερες ταχύτητες σχεδιασμού οδηγούν σε αποτελέσματα αυξημένου όγκου χωματισμών και κόστους. Για τον έλεγχο αξιοπιστίας του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν επίσης διαφορετικοί γενετικοί παράμετροι. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι με κατάλληλη επιλογή γενετικών παραμέτρων το σύστημα μπορεί να αποφύγει τοπικά βέλτιστες χαράξεις.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Οδοί, Δρόμοι, Οδικά έργα, Οδοποιία, Οδικές χαράξεις, Οδικός σχεδιασμός, Γεωμετρικός σχεδιασμός, Κόστος, οδών, Βελτιστοποίηση, Τρισδιάστατη χάραξη, Οριζοντιογραφική χάραξη, Κατακόρυφη χάραξη, Μεθευρετικοί αλγόριθμοι, Μεταευρευτικοί αλγόριθμοι, Γενετικοί αλγόριθμοι, Χωματουργικές εργασίες

ABSTRACT

Road planning and design is a very complex task which is analyzed at different levels. Initially, alternate highway corridors in a broad study area are evaluated, while in more advanced stages a detailed design of the highway alignment is produced. There are several cost components associated with highway projects, relating to socio-economic and environmental factors, while in the final stage the construction cost is considered most important. The design process is based on a trial and error method which is subject to a large number of restrictions related to road design specifications. Highway geometric design guidelines have different views concerning the size and consistency of geometric elements and give emphasis to road safety.

The conventional design process based on current practice involves to a great extent reviewing of the proposed alignment. For this reason several optimization models have been developed in order to reduce time, cost and errors associated with the conventional procedure. Highway alignment optimization is defined as the problem of finding a curve connecting two end points in order to minimize costs. In the present thesis, the characteristics of the problem of optimizing highway alignments are examined, while an extensive review of existing optimization models has been conducted. Through this research, it was found that the majority of the highway models are more suitable for the preliminary planning stage and do not meet the requirements of a more detailed design level. For this reason, in this thesis a novel optimization model, named RoadEvolver, has been developed. The model is structured in such a way that it makes it able to reflect the decisions of a designer has concerning the road geometry and produces automatically alignments in 3D space. The alignment is not represented by a single mathematical curve but instead each element is described by specific geometric calculations in the same way with the conventional approach. The main feature of this new model is the independence of the decision variables of the horizontal and vertical alignment of the highway. These elements are interconnected through the definition of several restrictions for their successful combination. Furthermore, for the realistic representation of the alignment extra decision variables have been introduced, which enable the automatic design of asymmetric horizontal curves. This method produces an alignment that can be adjusted more accurately to the terrain yielding lower earthwork costs.

By investigating optimization methods, it was found that genetic algorithms seem to possess the necessary characteristics for the optimization of highway alignments. The user of RoadEvolver may select from a pool of design constraints arising from the highway geometric design guidelines which have been formulated for that reason. The system was tested in three case studies with different design parameters. The results confirmed that alignments with higher design speed lead to increased earthwork costs. Different values of the genetic parameters were also tested and the analysis revealed that with proper selection of these values, the solution could avoid local optimum alignments.

KEY WORDS

Highways, Roads, Highway projects, Highway engineering, Road design, Geometric design, Highway cost, Highway alignment, Horizontal alignment, Vertical alignment, 3D alignment, Optimization, Metaheuristics, Genetic algorithms, Earthworks

Περιεχόμενα

1 Εισαγωγή 1

1.1 Γενική ανασκόπηση 2

1.2 Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας 3

1.2.1 Συνεισφορά 3

1.3 Μεθοδολογία 5

1.4 Δομή διπλωματικής εργασίας 6

ΜΕΡΟΣ Α': ΟΔΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

2 Οδικά Έργα 11

2.1 Μελέτη σκοπιμότητας 11

2.1.1 Κυκλοφοριακή μελέτη 11

2.2 Γεωλογική και εδαφοτεχνική μελέτη 12

2.3 Μελέτη της οδού 12

2.3.1 Μελέτη αναγνώρισης 13

2.3.2 Προμελέτη 13

2.3.3 Οριστική μελέτη - Μελέτη εφαρμογής 14

2.4 Κατασκευή οδικού έργου 15

2.5 Οικονομικά στοιχεία οδικών έργων 15

2.5.1 Κόστος μελετών και διοικητικά κόστη 15

2.5.2 Κόστος κατασκευής 16

2.5.3 Κόστος συντήρησης 17

2.5.4 Κόστος χρηστών 18

2.5.5 Περιβαλλοντικό και κοινωνικό κόστος 19

2.6 Σχέση κόστους και διαμόρφωσης της χάραξης 19

3 Χαράξεις Οδών 21

3.1 Στοιχεία οδικών χαράξεων 21

3.1.1 Ισοκλινής της χάραξης 21

3.1.2 Πολυγωνική της χάραξης 22

3.2 Ταχύτητες 22

3.2.1 Μέση ταχύτητα 22

3.2.2 Ταχύτητα μελέτης 23

3.2.3 Λειτουργική ταχύτητα 26

3.2.4 Επιτρεπόμενη ταχύτητα 29

3.2.5 Σχέση καθοριστικών ταχυτήτων 29

3.3 Δυναμική κίνησης οχημάτων 29

3.3.1 Πρόσφυση οδοστρώματος 30

3.3.2 Κριτική θεώρηση της εφαρμοζόμενης θεωρίας δυναμικής της κίνησης 31

3.4 Οριζοντιογραφία 32

3.4.1 Ευθυγραμμία 32

3.4.2 Κυκλικό τόξο 33

3.4.3 Τόξα συναρμογής 33

3.5 Μηκοτομή *35*
3.5.1 Κατά μήκος κλίσεις 35
3.5.2 Τόξα στρογγύλευσης 36

3.6 Ορατότητα *36*
3.6.1 Τα μήκη ορατότητας στον σχεδιασμό της οδού 37
3.6.2 Υπάρχον μήκος ορατότητας 38

3.7 Προδιαγραφές σχεδιασμού οδών *39*
3.7.1 Γερμανικές οδηγίες σχεδιασμού οδών 39
3.7.2 Ελβετικές οδηγίες σχεδιασμού οδών 40
3.7.3 Ελληνικές οδηγίες σχεδιασμού οδών 41
3.7.4 Οδηγίες σχεδιασμού οδών των Η.Π.Α. 43

4 Χάραξη στον Χώρο 45

4.1 Αρχές χάραξης της οδού στον χώρο *45*
4.1.1 Ανεξάρτητες χαράξεις 45
4.1.2 Εποπτικότητα και οπτική καθοδήγηση 46
4.1.3 Ισορροπία μεγεθών στοιχείων οριζοντιογραφίας και μηκοτομής 46
4.1.4 Αλληλουχία στοιχείων στην οριζοντιογραφία 46
4.1.5 Αλληλουχία στοιχείων στη μηκοτομή 46
4.1.6 Σύμπτωση σημείων καμπής οριζοντιογραφίας και μηκοτομής 47
4.1.7 Σύμπτωση σημείων τομής εφαπτομένων 47
4.1.8 Μέγιστος αριθμός θλάσεων στο οπτικό πεδίο του οδηγού 47

4.2 Χαρακτηριστικά προβλήματα της οδού στον χώρο *48*
4.2.1 Παρατεταμένες ευθυγραμμίες σταθερής κατά μήκος κλίσης 48
4.2.2 Οπτικές θλάσεις 49
4.2.3 Προοπτικές παραμορφώσεις 52
4.2.4 Κυματισμός και απόκρυψη τμημάτων οδού 54

4.3 Σύνοψη απαιτήσεων χάραξης οδού στον χώρο *56*

5 Στοιχεία Ασφάλειας 59

5.1 Στοιχεία ανθρώπινου παράγοντα *59*
5.1.1 Χρόνος αντίδρασης 60
5.1.2 Προτεραιότητα στην παρεχόμενη πληροφόρηση 60
5.1.3 Προσδοκίες των οδηγών 60
5.1.4 Σχεδιασμός της οδού λαμβάνοντας υπόψη τις ανάγκες των χρηστών της 61
5.1.5 Παράγοντες επιλογής ταχύτητας κίνησης οχημάτων 62

5.2 Ομοιομορφία στον σχεδιασμό των οδών *63*
5.2.1 Ομοιομορφία στη διατομή της οδού 63
5.2.2 Ομοιομορφία στις λειτουργικές ταχύτητες 64
5.2.3 Ομοιομορφία στον φόρτο ενασχόλησης του οδηγού 65

ΜΕΡΟΣ Β': ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

6 Προβλήματα και Μέθοδοι 69

6.1 Γενικά *69*
6.1.1 Λήψη αποφάσεων 69

6.2 Προβλήματα *70*
6.2.1 Ταξινόμηση προβλημάτων βελτιστοποίησης 70
6.2.2 Μαθηματικό πρότυπο βελτιστοποίησης 71

6.3 Μέθοδοι ... *72*
6.3.1 Αιτιοκρατικοί αλγόριθμοι ... 73
6.3.2 Στοχαστικοί αλγόριθμοι ... 73

6.4 Κλασσικές μέθοδοι ... *74*
6.4.1 Μέθοδοι βασισμένες στο λογισμό ... 74
6.4.2 Απαριθμητικές μέθοδοι ... 75
6.4.3 Μέθοδοι επαναληπτικής αναζήτησης ... 75
6.4.4 Δυναμικός προγραμματισμός ... 75
6.4.5 Μέθοδοι διαμερισμού και φραγής ... 76
6.4.6 Επισκόπηση ... 76

6.5 Ευρετικές μέθοδοι ... *76*
6.5.1 Κατηγορίες ευρετικών μεθόδων ... 77
6.5.2 Άπληστοι αλγόριθμοι ... 78
6.5.3 Προσεγγιστικοί αλγόριθμοι ... 79
6.5.4 Τοπική αναζήτηση ... 79
6.5.5 Ποιότητα επίλυσης ... 80
6.5.6 Αρχικές λύσεις ... 81

6.6 Μεθευρετικές μέθοδοι ... *81*
6.6.1 Ιδιότητες ... 82
6.6.2 Εντατικοποίηση και διαφοροποίηση ... 83
6.6.3 Κατηγορίες μεθευρετικών αλγορίθμων ... 84
6.6.4 Ατομικοί αλγόριθμοι ... 86

6.7 Μεθευρετικοί αλγόριθμοι εμπνευσμένοι από τη φύση ... *87*
6.7.1 Αλγόριθμοι βασισμένοι στη φυσική και τη χημεία ... 88
6.7.2 Αλγόριθμοι βασισμένοι στη βιολογία ... 88
6.7.3 Άλλοι αλγόριθμοι ... 92

6.8 Γενετικοί αλγόριθμοι ... *93*
6.8.1 Βήματα εκτέλεσης γενετικών αλγορίθμων ... 94
6.8.2 Κωδικοποίηση της λύσης ... 94
6.8.3 Κατάρτιση αρχικού πληθυσμού ... 95
6.8.4 Αποτίμηση πληθυσμού μέσω συνάρτησης καταλληλότητας ... 95
6.8.5 Επιλογή ... 95
6.8.6 Διασταύρωση ... 95
6.8.7 Μετάλλαξη ... 95
6.8.8 Αντικατάσταση ... 96
6.8.9 Πλεονεκτήματα γενετικών αλγορίθμων ... 96
6.8.10 Σύγκριση γενετικών αλγορίθμων και άλλων τεχνικών βελτιστοποίησης ... 97

7 Βελτιστοποίηση και Οδικά Έργα ... 99

7.1 Βελτιστοποίηση χωματουργικών εργασιών οδών ... *99*

7.2 Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων ... *103*

7.3 Βελτιστοποίηση κατακόρυφης χάραξης ... *105*
7.3.1 Αριθμητική αναζήτηση για τη μηκοτομή ... 105
7.3.2 Δυναμικός προγραμματισμός για τη μηκοτομή ... 110
7.3.3 Πλήρης απαρίθμηση ... 114
7.3.4 Γραμμικός προγραμματισμός ... 115
7.3.5 Μικτός ακέραιος προγραμματισμός για τη μηκοτομή ... 117
7.3.6 Τοπική αναζήτηση με ακέραιο προγραμματισμό για τη μηκοτομή ... 119
7.3.7 Γενετικοί αλγόριθμοι για τη μηκοτομή ... 120

7.3.8 Προσομοιωμένη ανόπτηση 122
7.3.9 Κριτική θεώρηση βελτιστοποίησης κατακόρυφης χάραξης 123

7.4 Βελτιστοποίηση οριζοντιογραφικής χάραξης 124
7.4.1 Δικτυακή βελτιστοποίηση για την οριζοντιογραφία 124
7.4.2 Λογισμός μεταβολών 128
7.4.3 Μικτός ακέραιος προγραμματισμός για την οριζοντιογραφία 129
7.4.4 Τοπική αναζήτηση με ακέραιο προγραμματισμό για την οριζοντιογραφία 130

7.5 Ταυτόχρονη βελτιστοποίηση τρισδιάστατων χαράξεων 131
7.5.1 Δυναμικός προγραμματισμός στις τρεις διαστάσεις 132
7.5.2 Αριθμητική αναζήτηση στις τρεις διαστάσεις 135
7.5.3 Ευρετική αναζήτηση με μετασχηματισμό απόστασης 136
7.5.4 Γενετικοί αλγόριθμοι στις τρεις διαστάσεις 138
7.5.5 Περιορισμένη αναζήτηση 143
7.5.6 Νοημοσύνη σμήνους 143
7.5.7 Πολλαπλοί στόχοι 144
7.5.8 Κριτική θεώρηση ταυτόχρονης βελτιστοποίησης τρισδιάστατης χάραξης 145

7.6 Βελτιστοποίηση τρισδιάστατης χάραξης δύο σταδίων 145
7.6.1 Αριθμητική αναζήτηση δύο σταδίων 146
7.6.2 Δικτυακή βελτιστοποίηση δύο σταδίων 147
7.6.3 Γενετικοί αλγόριθμοι δύο σταδίων 148
7.6.4 Τοπική αναζήτηση με μικτό ακέραιο προγραμματισμό δύο σταδίων 149
7.6.5 Διακριτοί αλγόριθμοι 150

7.7 Αξιολόγηση προσεγγίσεων 151

7.8 Κριτήρια ικανοποιητικών προτύπων 152

7.9 Εφαρμογή προτύπων βελτιστοποίησης χαράξεων 154
7.9.1 Το σύστημα HOPS 154
7.9.2 Λογισμικό Quantm 156
7.9.3 Λογισμικό Infraworks 157

ΜΕΡΟΣ Γ': ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΡΟΤΥΠΟΥ

8 Ορισμοί και Ιδιότητες 161

8.1 Ορισμοί 161

8.2 Ιδιότητες 163

8.3 Γενικό μαθηματικό πρότυπο βελτιστοποίησης χαράξεων 165

8.4 Αναπαράσταση χάραξης 169

8.5 Μορφή χωρικών δεδομένων 170

9 Υπολογισμοί 173

9.1 Τύπος υψομετρικών δεδομένων περιοχής μελέτης 173

9.2 Μεταβλητές απόφασης 174
9.2.1 Μεταβλητές απόφασης για την οριζοντιογραφική χάραξη 175
9.2.2 Μεταβλητές απόφασης για την κατακόρυφη χάραξη 175

9.3 Παράμετροι εισαγωγής 176

9.4 Υπολογισμοί οριζοντιογραφικής χάραξης 177
9.4.1 Κύρια πολυγωνική 177

9.4.2 Χαρακτηριστικά σημεία του άξονα της οδού 178
9.4.3 Δευτερεύουσα πολυγωνική 180
9.4.4 Γεωμετρικά στοιχεία οριζοντιογραφικών καμπυλών 180
9.4.5 Συνολικό μήκος της χάραξης 189
9.4.6 Γωνίες διεύθυνσης 189
9.4.7 Θέσεις κορυφών και χαρακτηριστικών σημείων κατά την οριζοντιογραφία 191

9.5 Υπολογισμοί κατακόρυφης χάραξης 194
9.5.1 Πολυγωνική μηκοτομής 194
9.5.2 Γεωμετρικά στοιχεία κατακόρυφων καμπυλών 196
9.5.3 Θέσεις κορυφών και χαρακτηριστικών σημείων κατά τη μηκοτομή 198

9.6 Υπολογισμοί σημείων πύκνωσης 200
9.6.1 Αριθμός σημείων πύκνωσης 200
9.6.2 Χιλιομετρικές θέσεις σημείων πύκνωσης 201
9.6.3 Υψόμετρα ερυθράς οδού στα σημεία πύκνωσης 201
9.6.4 Συντεταγμένες σημείων πύκνωσης κατά την οριζοντιογραφία 202
9.6.5 Εύρεση υψομέτρου εδάφους στο σημείο πύκνωσης 206

9.7 Υπολογισμοί χωματισμών 207
9.7.1 Εμβαδόν εκσκαφών και επιχωμάτων 208
9.7.2 Όγκοι χωματισμών 209

9.8 Συνάρτηση στόχου 211

10 Περιορισμοί 213

10.1 Οριζοντιογραφική χάραξη 213
10.1.1 Κύρια πολυγωνική γραμμή 213
10.1.2 Ακτίνα κυκλικού τόξου 216
10.1.3 Μήκος κυκλικού τόξου 218
10.1.4 Παράμετροι τόξων συναρμογής 219
10.1.5 Μήκος τόξου συναρμογής 221
10.1.6 Μήκος οριζοντιογραφικής καμπύλης 224
10.1.7 Ελάχιστο μήκος ευθυγραμμίας μεταξύ ομόρροπων καμπυλών 224

10.2 Κατακόρυφη χάραξη 225
10.2.1 Πολυγωνική γραμμή μηκοτομής 225
10.2.2 Κατά μήκος κλίση 227
10.2.3 Μήκος ορατότητας για στάση 228
10.2.4 Μήκος κατακόρυφης καμπύλης 229
10.2.5 Παράμετρος κατακόρυφης καμπύλης 232
10.2.6 Κατασκευαστικοί περιορισμοί 233

10.3 Συνδυασμός οριζοντιογραφίας και μηκοτομής 235
10.3.1 Μέγιστο μήκος ευθυγραμμίας σταθερής κλίσης 235
10.3.2 Θέση κατακόρυφων και οριζοντιογραφικών καμπυλών 235
10.3.3 Σύμπτωση σημείων καμπής 236
10.3.4 Σύμπτωση σημείων τομής εφαπτομένων 236
10.3.5 Προοπτική παραμόρφωση 236

ΜΕΡΟΣ Δ': ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

11 Δεδομένα και Λογισμικό 239

11.1 Γενικά 239

11.2 Επεξεργασία στο AutoCAD 240

11.3 Επεξεργασία στο ArcGIS ... *240*
11.3.1 Χωρική παρεμβολή ... 240

11.4 Επεξεργασία στο Excel ... *242*

11.5 Τεχνικά στοιχεία ψηφιακού μοντέλου εδάφους ... *242*

11.6 Λογισμικό Evolver ... *244*
11.6.1 Ορισμός συνάρτησης στόχου μεταβλητών απόφασης και περιορισμών ... 244
11.6.2 Ρυθμίσεις μεθόδων επίλυσης και ομαδοποίησης μεταβλητών ... 245
11.6.3 Γενικές ρυθμίσεις ... 246
11.6.4 Επίβλεψη διαδικασίας επίλυσης ... 247
11.6.5 Αναφορά βελτιστοποίησης ... 249
11.6.6 Ταχύτητα υπολογισμού ... 249

12 Παράμετροι και Αποτελέσματα ... 251

12.1 Εισαγωγή παραμέτρων ... *251*
12.1.1 Παράμετροι σχεδιασμού ... 251
12.1.2 Παράμετροι πεδίων αναζήτησης ... 252
12.1.3 Γενετικές παράμετροι ... 253

12.2 Εφαρμογή προτύπου βελτιστοποίησης χάραξης ... *254*
12.2.1 Αρχικά δεδομένα και υπολογισμοί ... 254
12.2.2 Βελτιστοποίηση οριζοντιογραφικής χάραξης ... 255
12.2.3 Βελτιστοποίηση κατακόρυφης χάραξης ... 260
12.2.4 Τελικό κόστος και όγκοι χωματισμών ... 263
12.2.5 Αποτελέσματα μεταβλητών απόφασης ... 263

13 Ανάλυση και Αξιολόγηση ... 265

13.1 Ανάλυση ευαισθησίας γενετικών παραμέτρων ... *265*
13.1.1 Μέγεθος πληθυσμού ... 265
13.1.2 Αρχική επίλυση ... 266
13.1.3 Βαθμός διασταύρωσης ... 268
13.1.4 Βαθμός μετάλλαξης ... 270
13.1.5 Αρχική επίλυση και γενετικές παράμετροι ... 272

13.2 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων σχεδιασμού ... *273*
13.2.1 Δεύτερη εφαρμογή μεθοδολογίας ... 273
13.2.2 Τρίτη εφαρμογή μεθοδολογίας ... 275
13.2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων με διαφορετικές παραμέτρους σχεδιασμού ... 277

13.3 Αξιολόγηση βάσει κριτηρίων ικανοποιητικών προτύπων ... *278*

14 Συμπεράσματα ... 283

14.1 Σύνοψη αποτελεσμάτων ... *283*

14.2 Συνολικά συμπεράσματα ... *284*

14.3 Προτάσεις αξιοποίησης προτύπου ... *286*

14.4 Περαιτέρω έρευνα ... *287*
14.4.1 Προτυποποίηση γεωμετρικού σχεδιασμού οδών ... 287
14.4.2 Συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών και δεδομένα ... 288
14.4.3 Υπολογισμός κόστους ... 288
14.4.4 Πρότυπο βελτιστοποίησης και μέθοδοι επίλυσης ... 289

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1.1: Στάδια εκπόνησης της εργασίας 5
Σχήμα 1.2: Δομή διπλωματικής εργασίας 6
Σχήμα 2.1: Χάραξη οδού εντός οδικού διαδρόμου 14
Σχήμα 2.2: Ανάλυση κόστους κατασκευής οδών 16
Σχήμα 3.1: Παράδειγμα μεταβολής χρόνου διαδρομής σε σχέση με μέση ταχύτητα 23
Σχήμα 3.2: Καμπύλη χωρίς τόξο συναρμογής και καμπύλη με τόξο συναρμογής 34
Σχήμα 3.3: Τρισδιάστατο μήκος ορατότητας 37
Σχήμα 4.1: Μη ικανοποιητική ένταξη της οδού στον περιβάλλοντα χώρο 46
Σχήμα 4.2: Μέγιστος αριθμός θλάσεων στο οπτικό πεδίο σε οριζοντιογραφία και μηκοτομή 48
Σχήμα 4.3: Ευθυγραμμία με σταθερή κατά μήκος κλίση 49
Σχήμα 4.4: Ευθυγραμμία σε κοίλωμα 49
Σχήμα 4.5: Αποφυγή οπτικής θλάσης με τη χρησιμοποίηση καμπύλης μεγαλύτερης ακτίνας 50
Σχήμα 4.6: Οπτική θλάση σε οριζοντιογραφική καμπύλη 50
Σχήμα 4.7: Οπτική θλάση σε κοίλωμα μικρού μήκους μεταξύ τμημάτων με σταθερή κλίση 51
Σχήμα 4.8: Οπτική θλάση σε κοίλωμα μικρού μήκους σε οριζοντιογραφική καμπύλη 51
Σχήμα 4.9: Αποφυγή οπτικής θλάσης σε κοίλωμα 51
Σχήμα 4.10: Επαλληλία οριζοντιογραφική καμπύλης με κοίλωμα 52
Σχήμα 4.11: Επαλληλία οριζοντιογραφική καμπύλης με κύρτωμα 53
Σχήμα 4.12: Παραπλανητική εντύπωση κυρτώματος μεταξύ διαδοχικών κοίλων καμπυλών 54
Σχήμα 4.13: Παραπλανητική εντύπωση κοιλώματος μεταξύ διαδοχικών κυρτών καμπυλών 54
Σχήμα 4.14: Κυματισμός σε οριζοντιογραφική καμπύλη 55
Σχήμα 4.15: Ευθυγραμμία σε κύρτωμα 55
Σχήμα 4.16: Βύθισμα της οδού 56
Σχήμα 4.17: Άλμα της οδού 56
Σχήμα 5.1: Σχέση αντικειμενικής και υποκειμενικής ασφάλειας 62
Σχήμα 5.2: Διατήρηση ομοιόμορφης διατομής οδού 64
Σχήμα 5.3: Επιτρεπτές αλληλουχίες κυκλικών τόξων και ευθυγραμμιών 65
Σχήμα 5.4: Ασφαλής και μη ασφαλής φόρτος ενασχόλησης του οδηγού 65
Σχήμα 6.1: Μέθοδοι βελτιστοποίησης 73
Σχήμα 6.2: Πολυεπίπεδη ταξινόμηση μεθευρετικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης 84
Σχήμα 6.3: Ταξινόμηση αλγορίθμων εμπνευσμένων από τη φύση 88
Σχήμα 6.4: Βήματα εκτέλεσης γενετικών αλγορίθμων 96
Σχήμα 7.1: Όρυγμα και επίχωμα κατά τη μηκοτομή 100
Σχήμα 7.2: Γραμμικό μοναδιαίο κόστος εγκατάστασης και εκσκαφής από δανειοθάλαμο 101
Σχήμα 7.3: Μηκοτομή οδού με εμπόδιο 102
Σχήμα 7.4: Αποστάσεις δανειοθαλάμων και εγκαταστάσεων ανάμιξης από σημεία πύκνωσης 103
Σχήμα 7.5: Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων 103
Σχήμα 7.6: Η θέση της βελτιστοποίησης χάραξης στον οδικό σχεδιασμό 104
Σχήμα 7.7: Διαδικασία ομαλοποίησης γραμμής εδάφους 106
Σχήμα 7.8: Διαμόρφωση προκαταρκτικής χάραξης 107
Σχήμα 7.9: Διόρθωση συνέχειας και σημείων υποχρεωτικής διέλευσης 107
Σχήμα 7.10: Αποστάσεις της ερυθράς της οδού από τη γραμμή εδάφους στα σημεία πύκνωσης 108
Σχήμα 7.11: Προσαρμογή κατακόρυφων καμπυλών και διατομές οδού σε εκσκαφή 108
Σχήμα 7.12: Γεωμετρία του διακριτού προτύπου δυναμικού προγραμματισμού 112
Σχήμα 7.13: Μηκοτομή προτύπου δυναμικού προγραμματισμού 113
Σχήμα 7.14: Μηκοτομή οδού τριών εφαπτόμενων τμημάτων 115
Σχήμα 7.15: Μηκοτομή πολυωνυμικών κατακόρυφων χαράξεων 116
Σχήμα 7.16: Μηκοτομή χαράξεων τετραγωνικών spline με διορθωμένους περιορισμούς 117
Σχήμα 7.17: Παράδειγμα συνάρτησης κόστους 118
Σχήμα 7.18: Αναπαράσταση κατακόρυφης χάραξης με τετραγωνική spline 118

Σχήμα 7.19: Προσέγγιση για τον υπολογισμό των χωματισμών 119
Σχήμα 7.20: Βελτιστοποιημένη κατακόρυφη χάραξη και διάγραμμα ταχυτήτων 119
Σχήμα 7.21: Κόστος σε σχέση με διαφορά υψομέτρου ερυθράς οδού και γραμμής εδάφους 120
Σχήμα 7.22: Οριζοντιογραφία οδού με περιοχές ετερογενών και ακατάλληλων εδαφικών υλικών 122
Σχήμα 7.23: Παραγωγή αρχικής χάραξης και βελτιστοποιημένη κατακόρυφη χάραξη 123
Σχήμα 7.24: Επιφάνειες κόστους σε υπεραστικές και αστικές περιοχές 125
Σχήμα 7.25: Βασικά στοιχεία του συστήματος GCARS 126
Σχήμα 7.26: Προσέγγιση των Athanassoulis & Calogero και των Craine & Heatherington 127
Σχήμα 7.27: Σύγκριση ταχυτήτων κατά μήκος της χάραξης πριν και μετά τη βελτιστοποίηση 130
Σχήμα 7.28: Ζώνη ενδιαφέροντος και πλέγμα 133
Σχήμα 7.29: Προοπτική απεικόνιση αρχικών σταδίων δυναμικού προγραμματισμού 133
Σχήμα 7.30: Τρισδιάστατο πλέγμα αναζήτησης σε προοπτική και επίπεδη απεικόνιση 134
Σχήμα 7.31: Τελικές εναλλακτικές που αποκλίνουν από τα σημεία του πλέγματος 134
Σχήμα 7.32: Τρισδιάστατη χάραξη οδού σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων 135
Σχήμα 7.33: Μετατροπή ευθυγράμμων τμημάτων σε καμπύλη χάραξη και εναλλακτικές χαράξεις 136
Σχήμα 7.34: Εναλλακτικές χαράξεις υπό τον περιορισμό μέγιστης κλίσης 137
Σχήμα 7.35: Ομαλοποίηση κατακόρυφης χάραξης 137
Σχήμα 7.36: Αναπαράσταση χάραξης με ευθύγραμμα τμήματα 138
Σχήμα 7.37: Γονότυπος αναπαράστασης μεταβλητών απόφασης προτύπου ΗΑΟ 139
Σχήμα 7.38: Εξάρτηση κορυφών μηκοτομής ως προς οριζοντιογραφική χάραξη 139
Σχήμα 7.39: Εφικτές τιμές πεδίου αναζήτησης 140
Σχήμα 7.40: Δομή ενσωματωμένου προτύπου ΗΑΟ με σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών 141
Σχήμα 7.41: Προοπτική απεικόνιση τρισδιάστατης χάραξης 145
Σχήμα 7.42: Οπισθόδρομη χάραξη και ορθογώνιο πλέγμα δυναμικού προγραμματισμού 148
Σχήμα 7.43: Πλέγμα φατνίων τετραγώνων, κηρήθρας και ελλείψεων υπερβολών 148
Σχήμα 7.44: Βελτιστοποιημένη οριζοντιογραφία και μηκοτομή 149
Σχήμα 7.45: Τρισδιάστατος οδικός διάδρομος 150
Σχήμα 7.46: Αναπαράσταση οριζοντιογραφικής χάραξης και μεταβλητές απόφασης 150
Σχήμα 7.47: Εναλλακτικοί οδικοί διάδρομοι 151
Σχήμα 8.1: Οριζοντιογραφική και κατακόρυφη χάραξη 162
Σχήμα 8.2: Μη οπισθόδρομη και οπισθόδρομη χάραξη 165
Σχήμα 8.3: Αναπαράσταση χάραξης με τρισδιάστατη spline 170
Σχήμα 8.4: Χωρικά δεδομένα με μορφή πλέγματος και ισοϋψών καμπυλών 170
Σχήμα 9.1: Αναπαράσταση περιοχής μελέτης με κάνναβο 174
Σχήμα 9.2: Κύρια πολυγωνική, άξονας οδού και χαρακτηριστικά σημεία οριζοντιογραφίας 179
Σχήμα 9.3: Γεωμετρικά μεγέθη οριζοντιογραφικής καμπύλης 180
Σχήμα 9.4: Δεύτερο και τρίτο θεμελιώδες πρόβλημα γεωδαισίας 190
Σχήμα 9.5: Πολυγωνική γραμμή κατακόρυφης χάραξης 195
Σχήμα 9.6: Στοιχεία της τετραγωνικής παραβολής ως τόξο στρογγύλευσης της μηκοτομής 196
Σχήμα 9.7: Τύποι κατακόρυφων καμπυλών 198
Σχήμα 9.8: Σημείο πύκνωσης σε ευθυγραμμία της οριζοντιογραφικής χάραξης 203
Σχήμα 9.9: Εύρεση υψομέτρου σε σημείο πύκνωσης με βάση το ψηφιακό μοντέλο εδάφους 206
Σχήμα 9.10: Διατομές επιχώματος και εκσκαφής 208
Σχήμα 10.1: Ανεπιθύμητη μορφή οριζοντιογραφικής χάραξης με κλειστούς βρόγχους 214
Σχήμα 10.2: Ασυνέχεια στην οριζοντιογραφική χάραξη 215
Σχήμα 10.3: Ασυνέχεια στην κατακόρυφη χάραξη 226
Σχήμα 10.4: Μήκος ορατότητας για στάση σε κυρτή καμπύλη 230
Σχήμα 11.1: Διαδικασίες που εκτελέστηκαν ανά λογισμικό πακέτο 239
Σχήμα 11.2: Εξαγωγή κορυφών δικτύου ακανόνιστων τριγώνων 240
Σχήμα 11.3: Απεικονίσεις πλεγματικών δεδομένων παρεμβολής 242
Σχήμα 11.4: Τρισδιάστατη απεικόνιση πλεγματικού ψηφιακού μοντέλου εδάφους 243
Σχήμα 11.5: Παράθυρα διαμόρφωσης προτύπου και περιορισμών 244

Σχήμα 11.6: Ρυθμίσεις ομαδοποιημένων φατνίων 246
Σχήμα 11.7: Γενικές ρυθμίσεις βελτιστοποίησης και συνθηκών τερματισμού 247
Σχήμα 11.8: Ρυθμίσεις υπολογισμών και μακροεντολών 247
Σχήμα 11.9: Παράθυρο προόδου και σύνοψη κατά την επίλυση περιορισμών 248
Σχήμα 11.10: Αρχείο καταγραφής δοκιμών και τιμές γονιδίων πληθυσμού 248
Σχήμα 11.11: Ανομοιογένεια πληθυσμού και περιορισμοί κατά την επίλυση 248
Σχήμα 12.1: Οριζοντιογραφία πριν την έναρξη της διαδικασίας επίλυσης περιορισμών 254
Σχήμα 12.2: Μηκοτομή πριν την έναρξη της διαδικασίας επίλυσης περιορισμών 255
Σχήμα 12.3: Απεικονίσεις τυχαίων αρχικών λύσεων μετά τη διαδικασία επίλυσης περιορισμών 256
Σχήμα 12.4: Οριζοντιογραφική χάραξη δύο κορυφών μετά την επίλυση των περιορισμών 257
Σχήμα 12.5: Βελτιστοποιημένη οριζοντιογραφική χάραξη 259
Σχήμα 12.6: Μηκοτομή μετά τη βελτιστοποίηση της οριζοντιογραφικής χάραξης δύο κορυφών 260
Σχήμα 12.7: Απεικονίσεις τυχαίων αρχικών λύσεων μετά τη διαδικασία επίλυσης περιορισμών 261
Σχήμα 12.8: Κατακόρυφη χάραξη τριών κορυφών μετά την επίλυση των περιορισμών 262
Σχήμα 12.9: Βελτιστοποιημένη κατακόρυφη χάραξη 263
Σχήμα 13.1: Αποτελέσματα ως προς το μέγεθος του πληθυσμού γονότυπων 266
Σχήμα 13.2: Αποτελέσματα ως προς την αρχική τιμή κόστους μετά την επίλυση περιορισμών 267
Σχήμα 13.3: Αποτελέσματα ως προς τον βαθμό διασταύρωσης για αρχική λύση χαμηλού κόστους .. 268
Σχήμα 13.4: Αποτελέσματα ως προς τον βαθμό διασταύρωσης για αρχική λύση υψηλού κόστους 269
Σχήμα 13.5: Αποτελέσματα ως προς τον βαθμό μετάλλαξης για αρχική λύση χαμηλού κόστους 270
Σχήμα 13.6: Αποτελέσματα ως προς τον βαθμό μετάλλαξης για αρχική λύση υψηλού κόστους 271
Σχήμα 13.7: Βελτιστοποιημένη οριζοντιογραφική χάραξη δεύτερης μελέτης περίπτωσης 274
Σχήμα 13.8: Βελτιστοποιημένη κατακόρυφη χάραξη δεύτερης μελέτης περίπτωσης 274
Σχήμα 13.9: Βελτιστοποιημένη οριζοντιογραφική χάραξη τρίτης μελέτης περίπτωσης 276
Σχήμα 13.10: Βελτιστοποιημένη κατακόρυφη χάραξη τρίτης μελέτης περίπτωσης 276

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 2.1: Κατηγοριοποίηση κόστους οδικών μεταφορών 15
Πίνακας 3.1: Συνδυασμοί τόξων οριζοντιογραφίας 34
Πίνακας 5.1: Παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή ταχύτητας ενός οδηγού 62
Πίνακας 6.1: Μέθοδοι βασισμένες στην κλίση της συνάρτησης στόχου 75
Πίνακας 6.2: Μεθευρετικοί αλγόριθμοι τροχιάς 86
Πίνακας 6.3: Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης βασισμένοι στη φυσική και τη χημεία 88
Πίνακας 6.4: Αλγόριθμοι τεχνητών ανοσοποιητικών συστημάτων 89
Πίνακας 6.5: Αλγόριθμοι βασισμένοι στη νοημοσύνη σμήνους 90
Πίνακας 6.6: Εξελικτικοί αλγόριθμοι 91
Πίνακας 6.7: Αλγόριθμοι βασισμένοι στη βιολογία που δεν ανήκουν στις άλλες κατηγορίες 92
Πίνακας 6.8: Άλλοι αλγόριθμοι 93
Πίνακας 6.9: Μειονεκτήματα τεχνικών βελτιστοποίησης 98
Πίνακας 7.1: Έρευνα στη βελτιστοποίηση κατακόρυφων χαράξεων 105
Πίνακας 7.2: Έρευνα στη βελτιστοποίηση οριζοντιογραφικών χαράξεων 124
Πίνακας 7.3: Έρευνα στην ταυτόχρονη βελτιστοποίηση χαράξεων στις τρεις διαστάσεις 132
Πίνακας 7.4: Έρευνα στην βελτιστοποίηση χαράξεων σε στάδια 146
Πίνακας 7.5: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα προσεγγίσεων για τη βελτιστοποίηση χάραξης 152
Πίνακας 8.1: Συμβολισμός για το γενικό πρόβλημα βελτιστοποίησης χάραξης 165
Πίνακας 9.1: Μεταβλητές για την περιγραφή της περιοχής μελέτης 174
Πίνακας 9.2: Μεταβλητές απόφασης βελτιστοποίησης οριζοντιογραφικής χάραξης 175
Πίνακας 9.3: Μεταβλητές απόφασης βελτιστοποίησης κατακόρυφης χάραξης 175
Πίνακας 9.4: Ορισμός παραμέτρων για το γενικό πρόβλημα βελτιστοποίησης χάραξης 176
Πίνακας 9.5: Παράμετροι καθορισμού διαστήματος αναζήτησης μεταβλητών απόφασης 177
Πίνακας 9.6: Μεταβλητές κύριας πολυγωνικής 178
Πίνακας 9.7: Χαρακτηριστικά σημεία του άξονα της οδού 179
Πίνακας 9.8: Κορυφές δευτερεύουσας πολυγωνικής 180
Πίνακας 9.9: Μεταβλητές για τον υπολογισμό μήκους τόξου συναρμογής 181
Πίνακας 9.10: Μεταβλητές για τον υπολογισμό γωνίας εφαπτομένης 182
Πίνακας 9.11: Μεταβλητές υπολογισμού σχετικών συντεταγμένων 182
Πίνακας 9.12: Τιμές παραμέτρων για υπολογισμό τοπικών συντεταγμένων 183
Πίνακας 9.13: Μεταβλητές υπολογισμού τοπικών συντεταγμένων κέντρου κύκλου καμπυλότητας 184
Πίνακας 9.14: Μεταβλητές υπολογισμού εκτροπής 184
Πίνακας 9.15: Μεταβλητές υπολογισμού μεγάλων εφαπτομένων των τόξων συναρμογής 185
Πίνακας 9.16: Μεταβλητές υπολογισμού μικρών εφαπτομένων των τόξων συναρμογής 185
Πίνακας 9.17: Μεταβλητές αποστάσεων ίχνους κέντρου από τομή διχοτόμου και εφαπτομένων 186
Πίνακας 9.18: Μεταβλητές υπολογισμού βοηθητικού μεγέθους 186
Πίνακας 9.19: Μεταβλητές υπολογισμού εφαπτομενικού μήκους καμπύλης κύριας πολυγωνικής 187
Πίνακας 9.20: Μεταβλητές υπολογισμού μήκους ευθυγραμμίας κατά την οριζοντιογραφία 187
Πίνακας 9.21: Μεταβλητές για τον υπολογισμό των μικρών εφαπτομένων των τόξων συναρμογής 188
Πίνακας 9.22: Μεταβλητές για τον υπολογισμό του μήκους κυκλικού τόξου 188
Πίνακας 9.23: Μεταβλητές για τον υπολογισμό της οριζοντιογραφικής καμπύλης 189
Πίνακας 9.24: Μεταβλητές για τον υπολογισμό του μήκους της οριζοντιογραφικής χάραξης 189
Πίνακας 9.25: Μεταβλητές για τον υπολογισμό γωνίας διεύθυνσης 190
Πίνακας 9.26: Μεταβλητές υπολογισμού σημείων επαφής ευθυγραμμιών και τόξων συναρμογής 192
Πίνακας 9.27: Μεταβλητές για τον υπολογισμό σημείων τομής εφαπτομένων 192
Πίνακας 9.28: Μεταβλητές υπολογισμού θέσεων σημείων αρχής και τέλους κυκλικών τόξων 193
Πίνακας 9.29: Μεταβλητές για τον υπολογισμό σημείων τομής εφαπτομένων 194
Πίνακας 9.30: Μεταβλητές πολυγωνικής γραμμής της μηκοτομής 195
Πίνακας 9.31: Μεταβλητές για την περιγραφή κατακόρυφων καμπυλών 196
Πίνακας 9.32: Μεταβλητές χιλιομετρικών θέσεων χαρακτηριστικών σημείων οριζοντιογραφίας 199

Πίνακας 9.33: Μεταβλητές υπολογισμού του αριθμού των σημείων πύκνωσης 200
Πίνακας 9.34: Μεταβλητές υπολογισμού του αριθμού των σημείων πύκνωσης 201
Πίνακας 9.35: Μεταβλητές υπολογισμού υψομέτρου οδού σε σημείο πύκνωσης εφαπτομένης 201
Πίνακας 9.36: Μεταβλητές υπολογισμού υψομέτρου οδού σε σημείο πύκνωσης παραβολής 202
Πίνακας 9.37: Μεταβλητές υπολογισμού συντεταγμένων σημείων πύκνωσης σε ευθυγραμμίες..... 203
Πίνακας 9.38: Μεταβλητές υπολογισμού συντεταγμένων σημείων πύκνωσης σε τόξα συναρμογής.. 205
Πίνακας 9.39: Μεταβλητές υπολογισμού συντεταγμένων σημείων πύκνωσης σε κυκλικό τόξο 206
Πίνακας 9.40: Μεταβλητές για την εύρεση του υψομέτρου εδάφους σε σημείο πύκνωσης 207
Πίνακας 9.41: Μεταβλητές υπολογισμού όγκου εκσκαφών 208
Πίνακας 9.42: Μεταβλητές υπολογισμού όγκου εκσκαφών 211
Πίνακας 10.1: Μεταβλητές περιορισμών συντεταγμένων κορυφών πολυγωνικής 214
Πίνακας 10.2: Μεταβλητές περιορισμού συνέχειας οριζοντιογραφικής χάραξης..... 215
Πίνακας 10.3: Μεταβλητές υπολογισμού επιτρεπόμενης θλάσης άξονα χωρίς εφαρμογή καμπύλης . 216
Πίνακας 10.4: Μεταβλητές διαστήματος αναζήτησης τιμής ακτίνας κυκλικού τόξου 216
Πίνακας 10.5: Μεταβλητές υπολογισμού ελάχιστης ακτίνας ως προς εγκάρσια κλίση και τριβή 217
Πίνακας 10.6: Μεταβλητές υπολογισμού ελάχιστης ακτίνας κατά τη σύνδεση με ευθυγραμμία 218
Πίνακας 10.7: Μεταβλητές περιορισμού ελάχιστης ακτίνας..... 218
Πίνακας 10.8: Μεταβλητές υπολογισμού ελάχιστου μήκους κυκλικού τόξου χωρίς κλωθοειδείς 219
Πίνακας 10.9: Μεταβλητές περιορισμών παραμέτρων κλωθοειδών..... 220
Πίνακας 10.10: Μεταβλητές υπολογισμού μήκους για ομαλή μεταβολή εγκάρσιας επιτάχυνσης 222
Πίνακας 10.11: Μεταβλητές υπολογισμού μήκους για ελάχιστη εγκάρσια μετατόπιση..... 223
Πίνακας 10.12: Μεταβλητές περιορισμού ελάχιστου μήκους τόξου συναρμογής..... 223
Πίνακας 10.13: Περιγραφή μεταβλητών υπολογισμού μέγιστου μήκους τόξου συναρμογής 224
Πίνακας 10.14: Μεταβλητές περιορισμού μέγιστου μήκους τόξου συναρμογής..... 224
Πίνακας 10.15: Μεταβλητές περιορισμών θέσεων κορυφών πολυγωνικής μηκοτομής..... 226
Πίνακας 10.16: Μεταβλητές περιορισμού συνέχειας κατακόρυφης χάραξης 226
Πίνακας 10.17: Ορισμός μεταβλητών για τον υπολογισμό του μήκους ορατότητας για στάση 228
Πίνακας 10.18: Ορισμός μεταβλητών για τον υπολογισμό του μήκους ορατότητας για στάση 230
Πίνακας 10.19: Μεταβλητές περιορισμών διαστήματος αναζήτησης παραμέτρων παραβολών 233
Πίνακας 10.20: Μεταβλητές για την περιγραφή των κατασκευαστικών περιορισμών 234
Πίνακας 10.21: Μεταβλητές χιλιομετρικών θέσεων χαρακτηριστικών σημείων οριζοντιογραφίας 235
Πίνακας 11.1: Στοιχεία πλεγματικού ψηφιακού μοντέλου εδάφους 243
Πίνακας 12.1: Ορισμός παραμέτρων για το γενικό πρόβλημα βελτιστοποίησης χάραξης..... 252
Πίνακας 12.2: Παράμετροι καθορισμού διαστήματος αναζήτησης μεταβλητών απόφασης..... 253
Πίνακας 12.3: Παράμετροι καθορισμού διαστήματος αναζήτησης μεταβλητών απόφασης..... 254
Πίνακας 12.4: Όγκοι και κόστος χωματισμών για την αρχική ευθύγραμμη χάραξη..... 255
Πίνακας 12.5: Εύρεση αρχικών λύσεων οριζοντιογραφικής χάραξης με επίλυση περιορισμών 257
Πίνακας 12.6: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης οριζοντιογραφικής χάραξης..... 258
Πίνακας 12.7: Όγκοι και κόστος χωματισμών μετά τη βελτιστοποίηση κατά την οριζοντιογραφία ... 259
Πίνακας 12.8: Εύρεση αρχικών λύσεων κατακόρυφης χάραξης με επίλυση περιορισμών..... 261
Πίνακας 12.9: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης οριζοντιογραφικής χάραξης..... 262
Πίνακας 12.10: Τελικοί όγκοι και κόστος χωματισμών μετά τη βελτιστοποίηση..... 263
Πίνακας 12.11: Τελικές τιμές μεταβλητών απόφασης 264
Πίνακας 13.1: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης με διαφορετικό μέγεθος πληθυσμού..... 266
Πίνακας 13.2: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης με διαφορετική αρχική επίλυση 267
Πίνακας 13.3: Βελτιστοποίηση με διαφορετικό βαθμό διασταύρωσης και αρχική επίλυση 269
Πίνακας 13.4: Βελτιστοποίηση με διαφορετικό βαθμό μετάλλαξης και αρχική επίλυση 271
Πίνακας 13.5: Επιλύσεις με διαφορετικές αρχικές επιλύσεις και γενετικές παραμέτρους..... 272
Πίνακας 13.6: Παράμετροι που διαφοροποιούνται για τη δεύτερη εφαρμογή του προτύπου..... 273
Πίνακας 13.7: Όγκοι και κόστος χωματισμών μετά τη βελτιστοποίηση κατά την οριζοντιογραφία ... 275
Πίνακας 13.8: Παράμετροι που διαφοροποιούνται για την τρίτη εφαρμογή του προτύπου..... 275
Πίνακας 13.9: Όγκοι και κόστος χωματισμών μετά τη βελτιστοποίηση της δεύτερης περίπτωσης..... 277

Πίνακας 13.10: Τελικές τιμές μεταβλητών απόφασης 278
Πίνακας 13.11: Αξιολόγηση RoadEvolver ως προς κριτήρια προτύπων βελτιστοποίησης χάραξης ... 281

Ακρωνύμια

AASHO	American Association of State Highway Officials
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
AMF	Accident Modification Factor
CMF	Collision Modification Factor
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation
DFO	Derivative-Free Optimization
DMRB	Design Manual for Roads and Bridges
DMS	Direct Multisearch
DP	Dynamic Programming
EFMORL	Extremal Field Method of Optimal Route Location
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
FHWA	Federal Highway Administration
GA	Genetic Algorithms
GCARS	Generalized Computer-Aided Route Selection
GIS	Geographic Information Systems
HAO	Highway Alignment Optimization
HOPS	Highway Optimization Program System
IDW	Inverse Distance Weight
LiDAR	Light Detection and Ranging
LP	Linear Programming
MADS	Mesh Adaptive Direct Search
MILP	Mixed Integer Linear Programming
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MOGA	Multi-objective Genetic Algorithms
NCHRP	National Cooperative Research Program
NN	Natural Neighbor
NUS	National University of Singapore
OCP	Optimum Curvature Principle
OECD	Organization of Economic Co-operation and Development
OPTLOC	Optimal Rural Highway Location
OPYGAR	Optimisation and Automatic Generation of Longitudinal Profiles
PSO	Particle Swarm Optimization
PU	Purdue University
RAA	Richtlinien für die Anlage von Autobahnen
RAL	Richtlinien für die Anlage von Landstraßen
TAS	Terrain Algorithm System
TAC-ATC	Transportation Association of Canada
TRB	Transportation Research Board
TRL	Transportation Research Laboratory
TRRL	Transport and Road Research Laboratory
UBC	University of British Columbia
UC	University of Canterbury
UCL	University College of London
UM	University of Miami
UMA	University of Malaga
UON	University of Nottingham
VCMORL	Variational Calculus Method of Optimal Route Location
VSS	Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute
WGLM	Weighted Ground Line Method
WS	Weighted Sum
ΑΣΟΕΕ	Ανωτάτη Σχολή Οικονομικών και Εμπορικών Επιστημών
ΕΜΗΚ	Ετήσια Μέση Ημερήσια Κυκλοφορία
ΟΜΟΕ	Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων
ΣΓΠ	Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών
ΥΔΕ	Υπουργείο Δημοσίων Έργων
ΥΠΕΧΩΔΕ	Υπουργείο Περιβάλλοντος Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων

1 Εισαγωγή

Ο γεωμετρικός σχεδιασμός των οδών αποτελεί ένα αρκετά περίπλοκο πρόβλημα, το οποίο βασίζεται σε μια ευρετική μέθοδο αναζήτησης μίας λύσης. Ο σχεδιασμός γίνεται μέσα από μια επαναληπτική διαδικασία δοκιμών και σφαλμάτων ώστε να γίνει επιλογή μιας χάραξη λαμβάνοντας υπ' όψιν την τοπογραφία της περιοχής, τις εδαφικές συνθήκες, καθώς επίσης κοινωνικοοικονομικούς παράγοντες και περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Επομένως, όπως γίνεται αντιληπτό η σχεδίαση πρέπει να ικανοποιεί ορισμένους περιορισμούς και να εξυπηρετεί ορισμένες επιχειρησιακές ανάγκες. Κατά τη διαδικασία σχεδιασμού μιας νέας οδού ή βελτίωσης μιας υπάρχουσας οι μελετητές αντιμετωπίζουν μια μεγάλη ποικιλία προβληματισμών και καλούνται να επιλέξουν μέσα από τεράστιο αριθμό εναλλακτικών χαράξεων που θεωρητικά τείνει στο άπειρο. Ο σχεδιασμός, κατά τη συμβατική μέθοδο, ξεκινά από μια εκτεταμένη περιοχή στην οποία προσδιορίζονται στη συνέχεια μικρότερες ζώνες που αποτελούν τους οδικούς διαδρόμους, εντός των οποίων σχεδιάζονται οι οδικές χαράξεις. Τις τελευταίες δεκαετίες έχει γίνει επιστημονική προσπάθεια ώστε η διαδικασία αυτή να αντιμετωπιστεί ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, καθώς με τη χρήση μαθηματικών προτύπων και την αυξημένη υπολογιστική ταχύτητα των υπολογιστών, η διαδικασία αυτή μπορεί να επιταχυνθεί φτάνοντας σε ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Συγκεκριμένα, η βελτιστοποίηση οδικών χαράξεων έχει προσελκύσει έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον και έχουν αναπτυχθεί αρκετά μαθηματικά πρότυπα πάνω στο συγκεκριμένο θέμα. Έρευνες, όπως αυτές του OECD (1973), των Shaw & Howard (1982) και του Fwa (1989) υποδεικνύουν ότι βέλτιστες χαράξεις μπορούν να προκύψουν μέσα από μαθηματικά πρότυπα και προγράμματα ηλεκτρονικών υπολογιστών αποφέροντας σημαντικές μειώσεις στο κατασκευαστικό κόστος σε σχέση με τη συμβατική μέθοδο χάραξης δοκιμής και λάθους.

Τα υπάρχοντα μαθηματικά πρότυπα αν και αποδίδουν σωστά κάτω από ορισμένες συνθήκες, εντούτοις έχουν ορισμένες ελλείψεις και δεν εφαρμόζονται ευρέως. Οι δυσκολίες στην ανάπτυξη ενός ισχυρού και εύκολα εφαρμόσιμου προτύπου οφείλονται αφ' ενός στην πολύπλοκη σχέση του κόστους που σχετίζεται με μια χάραξη και αφ' ετέρου με την ικανοποίηση εξ' ίσου πολύπλοκων περιορισμών. Επιπροσθέτως, εφ' όσον το πρόβλημα διαθέτει συνεχή χώρο αναζήτησης, υπάρχει άπειρος αριθμός εναλλακτικών λύσεων. Για τον λόγο αυτό απαιτείται ένα ισχυρό μαθηματικό πρότυπο και ένας αποδοτικός αλγόριθμος επίλυσής του προβλήματος.

1.1 Γενική ανασκόπηση

Για την κάλυψη των αναγκών των μεταφορών, προσώπων ή αγαθών και κατά συνέπεια τη βελτίωση των συνθηκών της ζωής των ανθρώπων, απαιτείται η ύπαρξη ενός κατάλληλου συστήματος μεταφορών και συγκοινωνιακής υποδομής. Το οδικό δίκτυο, ως ένα μέρος της συνολικής συγκοινωνιακής υποδομής, αποτελεί το βασικότερο στοιχείο πρόσβασης σε μία περιοχή, αλλά και την αναγκαία προϋπόθεση για την τοπική και περιφερειακή ανάπτυξη. Η διαμόρφωση του οδικού δικτύου επηρεάζει καθοριστικά την ανάπτυξη και τη δομή του χώρου σε επίπεδο τοπικό αλλά και σε πιο ευρύ. Στόχος του κατάλληλου κυκλοφοριακού και γεωμετρικού σχεδιασμού των οδικών έργων, είναι να διαμορφώσουν τις διάφορες μεμονωμένες συνδέσεις, ώστε σύμφωνα με τους χωροταξικούς και πολεοδομικούς στόχους, να εξασφαλίζεται για τα διάφορα οδικά τμήματα μία ασφαλής κυκλοφορική ροή και συγκεκριμένα επίπεδα κυκλοφοριακής εξυπηρέτησης για όλους τους χρήστες της οδού. Η διαρκής ανάπτυξη του οδικού δικτύου που συνδυάστηκε με τη μεγάλη αύξηση της κυκλοφορίας των επιβατικών οχημάτων καθώς και τη βελτίωση των δυνατοτήτων των οχημάτων ως προς την αναπτυσσόμενη ταχύτητα, οδήγησε σύντομα σε μία ποικιλία τύπων οδών και μία λειτουργική κατάταξη του δικτύου, που ανάλογα με τη θέση τους στο δίκτυο της χώρας είχαν αντίστοιχα διαφορετικές τιμές των μεγεθών μελέτης.

Η χάραξη μιας οδού γενικά βασίζεται σε μια μέθοδο η οποία στηρίζεται στον καθορισμό της οριζόντιας και της καθ' ύψος πορείας του άξονα της οδού, σύμφωνα με τις τεχνικές και οικονομικές απαιτήσεις του έργου. Το τελικό αποτέλεσμα της μελέτης προκύπτει από τη σύνθεση ευθύγραμμων και καμπύλων τμημάτων και θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από συνέχεια και ομαλότητα στις περιοχές των συνδεόμενων μερών. Το βασικό μειονέκτημα του γεωμετρικού σχεδιασμού είναι πως δεν επιτρέπει τον σχεδιασμό μιας οδού σαν ενιαία γραμμή ορισμένη στον τρισδιάστατο χώρο, ούτε και μπορεί να δώσει ενιαία και ακριβή περιγραφή των οδικών αξόνων στον τρισδιάστατο χώρο. Πιο συγκεκριμένα, κατά το γεωμετρικό σχεδιασμό με χρήση σχετικού λογισμικού ηλεκτρονικού υπολογιστή γίνεται αρχικά μελέτη της οριζοντιογραφίας της οδού, διαδικασία που γενικά αφορά στη χωροθέτηση του άξονα της οδού, και στη συνέχεια γίνεται μελέτη της μηκοτομής, η οποία αναφέρεται στην υψομετρική διαμόρφωση της οδού. Συνεπώς, ο μελετητής έχει τον κύριο ρόλο και ευθύνη για την παραγωγή ενός αποδεκτού τελικού αποτελέσματος. Δηλαδή, ο μελετητής είναι αυτός που καθορίζει τον οδικό διάδρομο και γενικά θα επιλέγει τις παραμέτρους που υπεισέρχονται στο σχεδιασμό ενός οδικού τμήματος. Σε αυτό το πλαίσιο, η συμβατική γεωμετρική χάραξη πολλές φορές καθίσταται μια αρκετά μη ευέλικτη διαδικασία. Πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στον τρόπο με τον οποίο θα επηρεαστεί το ένα τμήμα από τυχόν αλλαγές στο άλλο, μιας και θα πρέπει να υπάρχει εναρμόνιση της οριζοντιογραφίας και της μηκοτομής για να είναι ορθό το τελικό αποτέλεσμα, σύμφωνα με γεωμετρικά και οπτικά κριτήρια.

Επιπλέον, ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα της υπάρχουσας μεθόδου αποτελεί η αδυναμία πρόβλεψης σε ικανοποιητικά επίπεδα του συνδυασμένου αποτελέσματος οριζοντιογραφίας και μηκοτομής, δηλαδή της τελικής μορφής του οδικού άξονα στον τρισδιάστατο χώρο. Οπότε, η πρόβλεψη της συμπεριφοράς των χρηστών της οδού, όταν αυτή θα κατασκευαστεί, αλλά και των αναμενόμενων παρεχόμενων επιπέδων ασφάλειας της χάραξης, είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί μόνον μέχρι κάποιον βαθμό. Κατ' αυτόν τον τρόπο, υπάρχουν πολλές πιθανότητες το τελικό αποτέλεσμα της χάραξης να μην ικανοποιεί επαρκώς τα κριτήρια που έχουν τεθεί πριν από το σχεδιασμό του. Για παράδειγμα, δεν είναι εύκολα αντιληπτό το συνδυασμένο αποτέλεσμα καμπυλών στην οριζοντιογραφία και τη μηκοτομή, το οποίο ενδεχομένως να μην είναι ασφαλές για τους μελλοντικούς χρήστες της οδού. Πράγματι, είναι πιθανό να μην υπάρχει επαρκής ορατότητα ή να δημιουργούνται εσφαλμένες εντυπώσεις στους οδηγούς σχετικά με τη διάταξη και μορφή της οδού, κάτι το οποίο μπορεί να οδηγήσει στην πρόκληση οδικών ατυχημάτων.

Η επιλογή μεταξύ εναλλακτικών οδικών χαράξεων αποτελεί ένα ιδιαίτερα περίπλοκο πρόβλημα εξ' αιτίας του μεγάλου αριθμού αλληλοσυγκρουόμενων παραγόντων που επηρεάζουν την χάραξη. Η διαδικασία αξιολόγησης μιας χάραξης με τις υπάρχουσες μεθόδους είναι τόσο δαπανηρή και χρονοβόρα, που τελικώς αξιολογούνται ελάχιστες εναλλακτικές. Για τον λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί

αρκετά μαθηματικά πρότυπα σχεδιασμού οδικών χαράξεων, για τη μείωση του χρόνου, του κόστους και των σφαλμάτων της διαδικασίας του συμβατικού οδικού σχεδιασμού. Τα υπάρχοντα μαθηματικά πρότυπα αν και αποδίδουν σωστά κάτω από ορισμένες συνθήκες, εντούτοις έχουν ορισμένες ελλείψεις και δεν εφαρμόζονται στην πράξη. Οι δυσκολίες στην ανάπτυξη ενός ισχυρού και εύκολα εφαρμόσιμου προτύπου οφείλονται αφ' ενός στην πολύπλοκη σχέση του κόστους που σχετίζεται με μια χάραξη και αφ' ετέρου με την ικανοποίηση εξ' ίσου πολύπλοκων περιορισμών. Επιπροσθέτως, εφ' όσον το πρόβλημα διαθέτει συνεχή χώρο αναζήτησης, υπάρχει άπειρος αριθμός εναλλακτικών λύσεων. Για τον λόγο αυτό απαιτείται ένα ισχυρό μαθηματικό πρότυπο και ένας αποδοτικός αλγόριθμος επίλυσής του προβλήματος.

Πολλά πρότυπα βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων παράγουν μια μη ρεαλιστική χάραξη που αποτελείται από ευθύγραμμα τμήματα η μια μαθηματική καμπύλη στην οποία δεν διαχωρίζονται οι ευθυγραμμίες από τις οριζοντιογραφικές καμπύλες, ή τα εφαπτόμενα τμήματα από τις παραβολικές καμπύλες της μηκοτομής. Οι προσεγγίσεις ταυτόχρονης βελτιστοποίησης στις τρεις διαστάσεις κάνουν ορισμένες παραδοχές ως προς τη σχέση της οριζοντιογραφικής κατακόρυφης χάραξης, καθώς ο χώρος αναζήτησης αυξάνεται εκθετικά από τις δύο στις τρεις διαστάσεις. Κατά συνέπεια περιορίζεται ουσιαστικά ο χώρος αναζήτησης σε ένα υποσύνολο των εφικτών λύσεων οδηγώντας σε επιλύσεις χαμηλότερης ποιότητας. Ο σκοπός της προμελέτης είναι ο καθορισμός με επαρκή προσέγγιση της θέσης και γεωμετρίας της οδού. Για τον λόγο αυτόν η διαμόρφωση της χάραξης πρέπει να είναι ρεαλιστική περιλαμβάνοντας τα απαραίτητα λεπτομερή γεωμετρικά στοιχεία που την αποτελούν. Οι μορφές αναπαράστασης της χάραξης στα υπάρχοντα πρότυπα βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων παρουσιάζουν ορισμένες ελλείψεις καθιστώντας τις μάλλον ακατάλληλες για χρήση στο στάδιο της προμελέτης. Ένα πρότυπο, το οποίο μπορεί να μιμηθεί τη συμβατική διαδικασία σχεδιασμού που ακολουθεί ένας μελετητής οδοποιίας θα ικανοποιούσε τις απαραίτητες συνθήκες για χρήση στο στάδιο αυτό.

1.2 Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας

Διαπιστώνοντας τις αδυναμίες της συμβατικής διαδικασίας σχεδιασμού οδών αλλά και τις ελλείψεις των υπαρχόντων προτύπων βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων, αντικείμενο της εργασίας αποτελεί η ανάπτυξη ενός νέου προτύπου βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων κατά την οριζοντιογραφία και τη μηκοτομή που να ξεπερνά ορισμένες από τις ελλείψεις αυτές. Στόχος του προτύπου είναι ο αυτόματος σχεδιασμός της χάραξης σε επίπεδο προμελέτης που αποφέρει το χαμηλότερο κόστος λαμβάνοντας υπ' όψιν μια πληθώρα περιορισμών που απορρέουν από τις οδηγίες γεωμετρικού σχεδιασμού οδών. Για τη διαχείριση των δεδομένων, την προτυποποίηση και την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιούνται λειτουργίες διαφόρων λογισμικών πακέτων. Ο χρήστης επιλέγει τα σημεία αρχής και τέλους της χάραξης και εισάγει μια σειρά παραμέτρων ανάλογα με τις ισχύουσες προδιαγραφές. Ο σχεδιασμός και η υλοποίηση του προτύπου έγινε μετά την εκτεταμένη ανασκόπηση τόσο των στοιχείων του οδικού σχεδιασμού όσο και των υπαρχόντων μεθόδων και προτύπων βελτιστοποίησης.

1.2.1 Συνεισφορά

Το μαθηματικό πρότυπο βελτιστοποίησης που αναπτύσσεται στην παρούσα εργασία χαρακτηρίζεται από αρκετές πρωτοτυπίες. Η συνεισφορά της διπλωματικής συνοψίζεται ως εξής:

1. Ανασκόπηση των σταδίων μελέτης και εκπόνησης οδικών έργων
2. Ανάλυση οικονομικών στοιχείων των οδικών έργων
3. Διερεύνηση οδηγιών και κριτική θεώρηση πρακτικών οδικών χαράξεων
4. Εντοπισμός των χαρακτηριστικών προβλημάτων της χάραξης της οδού στον χώρο
5. Ανάλυση στοιχείων οδικής ασφάλειας

6. Ανασκόπηση προβλημάτων και μεθόδων βελτιστοποίησης
7. Ανάλυση γενετικών αλγορίθμων
8. Εκτενής περιγραφή μαθηματικών προτύπων βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων
9. Συγκριτική ανάλυση προσεγγίσεων στο πρόβλημα βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων
10. Εντοπισμός ελλείψεων υπαρχόντων προτύπων βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων
11. Καθορισμός πλαισίου κριτηρίων ικανοποιητικών προτύπων βελτιστοποίησης χαράξεων
12. Διατύπωση ορισμών και ιδιοτήτων γενικού προτύπου βελτιστοποίησης χαράξεων
13. Καινοτόμα θεώρηση μεταβλητών απόφασης με ανεξαρτησία οριζοντιογραφίας και μηκοτομής
14. Αναλυτική μαθηματική προτυποποίηση υπολογισμών γεωμετρικού σχεδιασμού
15. Ρεαλιστική αναπαράσταση χάραξης με θεώρηση ασύμμετρων οριζοντιογραφικών καμπυλών
16. Εντοπισμός και εκτενής προτυποποίηση περιορισμών γεωμετρικού σχεδιασμού οδών
17. Επιτυχής συνδυασμός οριζοντιογραφικής και κατακόρυφης χάραξης μέσω περιορισμών
18. Εφαρμογή μεθοδολογίας και επίλυση με γενετικούς αλγορίθμους
19. Ανάλυση ευαισθησίας γενετικών παραμέτρων
20. Αξιολόγηση του προτύπου ως προς το πλαίσιο κριτηρίων που έχουν αναπτύχθηκαν

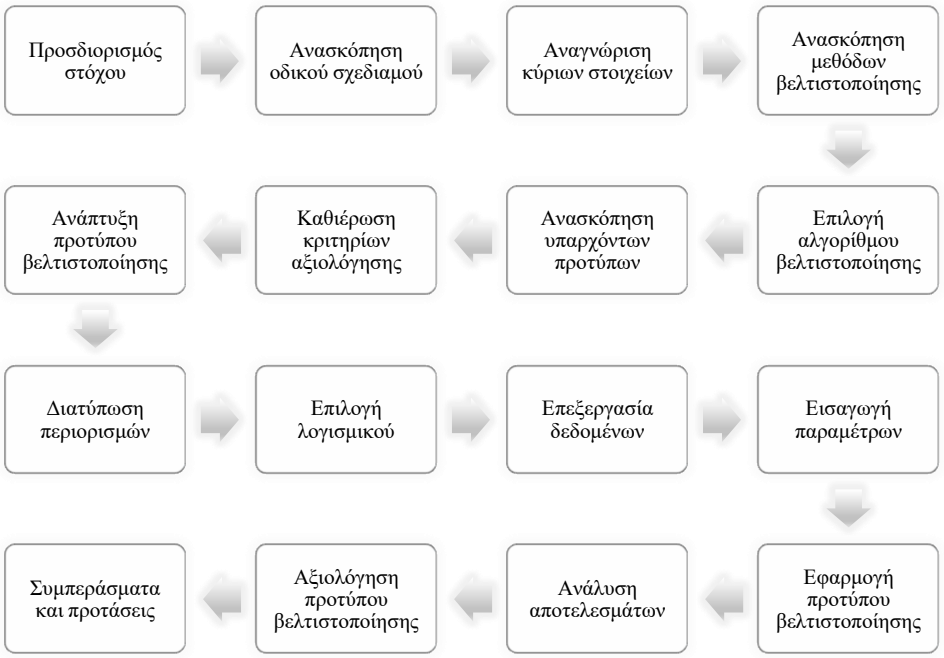
Στο μαθηματικό πρότυπο βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία έγινε προσπάθεια μίμησης της συμβατικής διαδικασίας χάραξης. Η εργασία αυτή περιέχει καινοτομίες ως προς τη διαμόρφωση του προβλήματος καθώς έγινε προσπάθεια προτυποποίησης όλων των μεταβλητών απόφασης που λαμβάνει υπ' όψιν ένας μελετητής κατά τη μελέτη της οριζοντιογραφίας και της μηκοτομής στο στάδιο της προμελέτης. Η βελτιστοποίηση γίνεται σε δύο στάδια θεωρώντας ανεξάρτητες τις κορυφές της μηκοτομής από αυτές της οριζοντιογραφίας αλλά εξασφαλίζοντας τον επιτυχή συνδυασμό τους μέσω κατάλληλων περιορισμών. Στην εργασία γίνεται επίσης εκτενής μαθηματική προτυποποίηση περιορισμών που απορρέουν από οδηγίες γεωμετρικού σχεδιασμού οδών καθιστώντας το πρωτοπόρο ως προς το είδος και πλήθος από το οποίο ο χρήστης καλείται να επιλέξει. Τα στοιχεία της χάραξης της οδού στον χώρο περιλαμβάνονται επίσης στο πρότυπο βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων που αναπτύσσεται στην παρούσα εργασία υπό μορφή περιορισμών.

Η πρωτοτυπία της εργασίας έγκειται επίσης στη θεώρηση ασύμμετρων οριζοντιογραφικών καμπυλών, λαμβάνοντας υπ' όψιν όλες εκείνες τις μεταβλητές απόφασης που επιτρέπουν τη ρεαλιστική αναπαράσταση της χάραξης κατά την οριζοντιογραφία και τη μηκοτομή. Πιο συγκεκριμένα καινοτομία αποτελεί η εισαγωγή των ακτινών των κυκλικών τόξων και των παραμέτρων κλωθοειδών εισόδου και εξόδου σαν ξεχωριστές μεταβλητές απόφασης ενώ γίνονται όλοι οι απαραίτητοι υπολογισμοί. Η μαθηματική προτυποποίηση των κορυφών της οριζοντιογραφίας επιτρέπει τη δημιουργία οπισθόδρομων χαράξεων. Οι χαράξεις περιλαμβάνουν διακριτά γεωμετρικά στοιχεία, τα οποία περιγράφονται από ξεχωριστές μαθηματικές σχέσεις, οι οποίες συνδέονται μέσω περιορισμών. Προφανώς, η μεγάλη δυσκολία που διαπιστώθηκε κατά την προτυποποίηση και ένταξη όλων των σχέσεων των ασύμμετρων οριζοντιογραφικών καμπυλών σε ένα πρότυπο βελτιστοποίησης καθιστούσε την θεώρησή τους έως τώρα δυσχερή. Τα στοιχεία αυτά διαφοροποιούν το RoadEvolver ως προς τα υπόλοιπα πρότυπα βελτιστοποίησης θέτοντας τις βάσεις για χρήση ενός προτύπου βελτιστοποίησης σε ένα πιο λεπτομερές στάδιο σχεδιασμού, όπως αυτό της προμελέτης.

1.3 Μεθοδολογία

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικά στάδια εκπόνησης της εργασίας. Για τον λόγο αυτό παρατίθεται ένα διάγραμμα ροής των σταδίων, το οποίο επιτρέπει στον αναγνώστη να αποκτήσει μία συνολική εικόνα για το αντικείμενο της εργασίας και την αλληλουχία των ενεργειών για την αντιμετώπισή του.

Σχήμα 1.1: Στάδια εκπόνησης της εργασίας



Ως στόχος της εργασίας ορίστηκε η ανάπτυξη ένα πρότυπο σχεδιασμού οδών, το οποίο περιγράφει το πολύπλοκο πρόβλημα βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων. Το πρότυπο αυτό ονομάστηκε RoadEvolver και αναπτύχθηκε με στόχο τον σχεδιασμό της χάραξης σε επίπεδο προμελέτης που αποφέρει το χαμηλότερο κόστος λαμβάνοντας υπ' όψιν μια πληθώρα περιορισμών που απορρέουν από τις οδηγίες γεωμετρικού σχεδιασμού οδών. Ο σχεδιασμός και η υλοποίηση του προτύπου έγινε μετά την εκτεταμένη ανασκόπηση τόσο των στοιχείων του οδικού σχεδιασμού όσο και των υπαρχόντων μεθόδων βελτιστοποίησης που έγιναν στα πρώτα στάδια της εργασίας.

Στη συνέχεια εξετάστηκαν τα χαρακτηριστικά του προβλήματος της βελτιστοποίησης χαράξεων και έγινε εκτενής ανασκόπηση των υπαρχόντων προτύπων βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων. Στην ανασκόπηση αυτήν αναγνωρίστηκαν ορισμένες αδυναμίες των υπαρχόντων προτύπων και παρουσιάστηκαν ορισμένες κατευθυντήριες για πιθανές βελτιώσεις. Ταυτόχρονα καθορίστηκε ένα πλαίσιο κριτηρίων για την αξιολόγηση των προτύπων βελτιστοποίησης.

Σε επόμενο στάδιο διατυπώθηκαν όλες οι απαραίτητες μαθηματικές σχέσεις για τους γεωμετρικούς υπολογισμούς της χάραξης κατά την οριζοντιογραφίας και τη μηκοτομή. Οι σχέσεις που διατυπώθηκαν είναι αυτές που χρησιμοποιούνται κατά τη συμβατική μέθοδο οδηγώντας στην αναπαράσταση της χάραξης με ρεαλιστικό τρόπο. Η ένταξη των σχέσεων αυτών σε ένα πρότυπο βελτιστοποίησης αποτέλεσε πρωτοτυπία της εργασίας. Όσον αφορά τους περιορισμούς του σχεδιασμού που λήφθηκαν υπ' όψιν, αυτοί αντλήθηκαν από οδηγίες γεωμετρικού σχεδιασμού διαφόρων χωρών με βάση την ανασκόπηση προηγούμενου σταδίου. Η διατύπωση έγινε έτσι ώστε να μπορεί να γίνει επιλογή των περιορισμών που λαμβάνει υπ' όψιν το πρότυπο ανάλογα με τις προδιαγραφές που ισχύουν.

Για τη διαχείριση των δεδομένων, την προτυποποίηση και την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιούνται λειτουργίες διαφόρων λογισμικών πακέτων. Αφού έγιναν οι απαραίτητες επεξεργασίες του μοντέλου εδάφους της περιοχής μελέτης ακολούθησε εφαρμογή του προτύπου. Κατά την εφαρμογή επιλέχθηκαν οι συντεταγμένες των σημείων αρχής και τέλους της χάραξης και έγινε εισαγωγή τιμών μιας σειρά παραμέτρων.

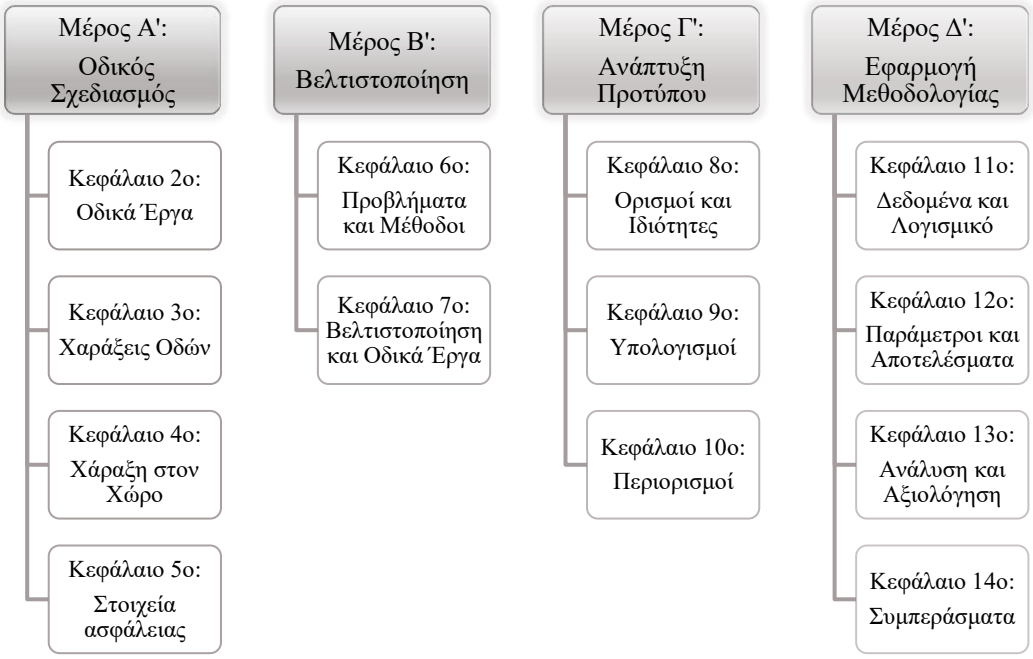
Στη συνέχεια ακολούθησε έλεγχος αξιοπιστίας του προτύπου με εφαρμογή διαφορετικών παραμέτρων. Έγινε ανάλυση τόσο της επίδραση των παραμέτρων σχεδιασμού όσο και των γενετικών παραμέτρων που καθορίζουν τη συμπεριφορά του αλγόριθμου επίλυσης. Τελικά, αξιολογήθηκε η επίδοση του προτύπου ως προς το πρότυπο κριτηρίων που είχε καθοριστεί σε προηγούμενο στάδιο και διατυπώθηκαν τα συμπεράσματα της εργασίας.

Η διαδικασία καθορισμού του στόχου και της μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε αποτέλεσε μία διαδικασία εξειδίκευσης και επανακαθορισμού με βάση την πρόοδο των εργασιών που σημειώθηκε. Επισημαίνεται ότι για την εύρεση, οργάνωση και ανασκόπηση των βιβλιογραφικών πηγών χρησιμοποιήθηκαν οι οδηγίες των Avni, et al. (2015) και Γιαννής (2010)

1.4 Δομή διπλωματικής εργασίας

Η δομή της εργασίας περιλαμβάνει τέσσερα μέρη. Στόχος του πρώτου μέρος της εργασίας είναι η εισαγωγή του αναγνώστη στις έννοιες και τα στοιχεία που αφορούν τα οδικά έργα και πιο συγκεκριμένα των οδικών χαράξεων. Στο δεύτερο μέρος περιγράφεται η έννοια της βελτιστοποίησης και οι βασικές μέθοδοι που έχουν χρησιμοποιηθεί στα οδικά έργα. Το τρίτο μέρος της εργασίας περιλαμβάνει την ανάπτυξη του μαθηματικού προτύπου βελτιστοποίησης, ενώ στο τέταρτο μέρος γίνεται εφαρμογή του προτύπου αυτού. Τα τέσσερα αυτά μέρη χωρίζονται συνολικά σε δεκατέσσερα κεφάλαια ακολουθώντας τη δομή του παρακάτω σχήματος. Το περιεχόμενο κάθε κεφαλαίου περιγράφεται συνοπτικά στη συνέχεια.

Σχήμα 1.2: Δομή διπλωματικής εργασίας



Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή της διπλωματικής εργασίας και έχει σκοπό την παρουσίαση του γενικότερου πλαισίου στο οποίο εντάσσεται το αντικείμενό της. Αρχικά, περιγράφονται τα στοιχεία του προβλήματος βελτιστοποίησης των οδικών χαράξεων. Στη συνέχεια,

παρουσιάζεται ο επιδιωκόμενος στόχος της συγκεκριμένης έρευνας και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τη διεξαγωγή των συμπερασμάτων.

Το δεύτερο κεφάλαιο ασχολείται με το γενικότερο πλαίσιο των οδικών έργων, τα επίπεδα σχεδιασμού και πιο συγκεκριμένα με τις απαιτούμενες μελέτες που απαιτούνται για τη σύλληψη, τον σχεδιασμό και την υλοποίηση των οδικών έργων Στο κεφάλαιο επίσης γίνεται αναφορά στα οικονομικά στοιχεία των οδικών έργων στο πλαίσιο των οποίων εντάσσονται τα πρότυπα βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναφέρονται οι βασικές αρχές που αφορούν τη γεωμετρική διαμόρφωση της οδού κατά την οριζοντιογραφία και τη μηκοτομή. Επίσης, γίνεται περιγραφή όλων εκείνων των στοιχείων που λαμβάνονται υπ' όψιν κατά την χάραξη των οδών με κριτική θεώρηση ορισμένων μεθόδων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιείται μια παρουσίαση και ανάλυση των υποδείξεων των οδηγιών γεωμετρικού σχεδιασμού που αφορούν τη χάραξη της οδού στον χώρο. Για τη σαφέστερη απόδοση των υποδείξεων των οδηγιών παρατίθενται σκαριφήματα οριζοντιογραφίας και μηκοτομής καθώς και προοπτικές εικόνες. Από τις απαιτήσεις χάραξης της οδού στον χώρο προκύπτουν βασικοί περιορισμοί που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα πρότυπα βελτιστοποίησης χάραξης.

Το πέμπτο κεφάλαιο περιγράφει ορισμένα στοιχεία οδικής ασφάλειας καθώς μόνον η αυστηρή τήρηση των προδιαγραφών σχεδιασμού δεν έχει πάντα ως αποτέλεσμα τον ασφαλέστερο δυνατό σχεδιασμό. Στις ενότητες του κεφαλαίου γίνεται μια σύντομή ανάλυση ορισμένων από τους παράγοντες που επιδρούν στην οδική συμπεριφορά.

Στόχος του έκτου κεφαλαίου είναι να εισάγει τον αναγνώστη στη θεωρία της βελτιστοποίησης που αποτελεί την ευρύτερη οικογένεια στην οποία ανήκουν οι μέθοδοι που έχουν χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση του προβλήματος των οδικών χαράξεων. Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται σε βάθος η επιλεγείσα προσέγγιση γενετικών αλγορίθμων που χρησιμοποιείται για την επίλυση του προβλήματος και επεξηγούνται ορισμένες έννοιες που βοηθούν στην καλύτερη κατανόηση της.

Στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται ανασκόπηση της ανάπτυξης και εφαρμογής μεθόδων βελτιστοποίησης στον οδικό σχεδιασμό. Συγκεκριμένα, γίνεται εκτενής περιγραφή των προτύπων βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων που έχουν αναπτυχθεί από διάφορους ερευνητές ανά τον κόσμο. Τα προβλήματα βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων χωρίζονται σε τέσσερις βασικές κατηγορίες, ενώ σε κάθε κατηγορία περιγράφονται οι προσεγγίσεις που έχουν υιοθετηθεί για την επίλυση του προβλήματος. Στο τέλος του κεφαλαίου γίνεται συγκριτική ανάλυση των προσεγγίσεων αυτών, ενώ αναγνωρίζονται τα κριτήρια αξιολόγησης ενός ικανοποιητικού προτύπου βελτιστοποίησης και σχολιάζεται η έλλειψη προόδου στην εφαρμογή προτύπων βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων.

Το όγδοο κεφάλαιο περιλαμβάνει τους βασικούς μαθηματικούς ορισμούς και τις ιδιότητες της βελτιστοποίησης χάραξης που βοηθούν στην καλύτερη κατανόηση του προβλήματος. Όλοι οι ορισμοί και οι ιδιότητες σε μαθηματική μορφή που διευκολύνει την ανάπτυξη των προτύπων. Στο κεφάλαιο περιλαμβάνεται επίσης ένα γενικού μαθηματικού προτύπου βελτιστοποίησης χάραξης.

Στο ένατο κεφάλαιο γίνεται εξειδίκευση του γενικού μαθηματικού προτύπου βελτιστοποίησης χαράξεων προκειμένου να προσαρμοστεί στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται όλα εκείνα τα στοιχεία του μαθηματικού προτύπου που χρησιμοποιεί η εφαρμογή RoadEvolver. Επίσης, δίνονται οι σχέσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της χάραξης και γίνονται όλοι οι απαραίτητοι υπολογισμοί που απαιτούνται για τον υπολογισμό του όγκου χωματισμών στη συνάρτηση στόχου.

Το δέκατο κεφάλαιο περιλαμβάνει τη μαθηματική προτυποποίησης ενός μεγάλου αριθμού περιορισμών και λειτουργικών απαιτήσεων εκρέουν από τις οδηγίες του σχεδιασμού οδών στο πρώτο

μέρος της εργασίας. Αυτοί οι περιορισμοί έχουν αναπτυχθεί με την πάροδο του χρόνου και αντλούνται από την έρευνα και τις οδηγίες γεωμετρικού σχεδιασμού οδών που χρησιμοποιούνται παγκοσμίως. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι μαθηματικές σχέσεις συγκεκριμένων περιορισμών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην εφαρμογή RoadEvolver. Οι περιορισμοί έχουν χωριστεί σε κατηγορίες ανάλογα με το αν αφορούν την οριζοντιογραφία, τη μηκοτομή ή τον συνδυασμό τους.

Στόχος του ενδέκατου κεφαλαίου είναι να επιτρέψει στον αναγνώστη να σχηματίσει μία πλήρη εικόνα τόσο για τα στοιχεία, στα οποία στηρίχθηκε η εφαρμογή, όσο και για την ποιότητά τους. Το κεφάλαιο επίσης περιλαμβάνει την παρουσίαση των διαδικασιών επεξεργασίας των στοιχείων. Τέλος, δίνονται ορισμένες τεχνικές λεπτομέρειες και στοιχεία των διαφόρων λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν.

Στο δωδέκατο κεφάλαιο γίνεται στην ουσία η εφαρμογή μεθόδων και αλγορίθμων για την επίλυση του μαθηματικού προτύπου βελτιστοποίησης που αναλύθηκε στο τρίτο μέρος της εργασίας. Αρχικά, παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που εισάγει ή τροποποιεί ο χρήστης στην εφαρμογή. Στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης κατά την οριζοντιογραφία και τη μηκοτομή.

Στο δέκατο τρίτο κεφάλαιο πραγματοποιούνται αρκετές διαφορετικές επιλύσεις προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση διαφόρων παραμέτρων στο πρότυπο βελτιστοποίησης της χάραξης. Η μεθοδολογία εφαρμόζεται τόσο ως προς ορισμένες παραμέτρους σχεδιασμού, όσο και ως προς τις γενετικές παραμέτρους που καθορίζουν την αποδοτικότητα του αλγορίθμου επίλυσης. Για τον λόγο αυτόν πραγματοποιείται μια σειρά δοκιμών και εξάγονται ορισμένα στοιχεία. Το πρότυπο RoadEvolver που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία αξιολογείται με βάση τα κριτήρια που έχουν καθιερωθεί στην έρευνα βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων.

Τέλος στο δέκατο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των ευρημάτων και των συμπερασμάτων της εργασίας, ενώ παρατίθενται και οι προτάσεις για αξιοποίηση και επέκταση του προτύπου.

ΜΕΡΟΣ Α’: ΟΔΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

2 Οδικά Έργα

Η κατασκευή ενός σύγχρονου οδικού έργου απαιτεί μεγάλες επενδύσεις και επομένως προσεκτική μελέτη που θα διερευνά όλες τις παραμέτρους για να καταλήξει στην προσφορότερη λύση για την πραγματοποίηση του οδικού έργου, ή ακόμη και στην ιεράρχηση χρονικών προτεραιοτήτων για τις βελτιώσεις ή και για νέες κατασκευές (Κανελλαΐδης, Μαλέρδος, Γλαρός, Δραγομάνοβιτς, & Βαρδάκη, 2014). Παράμετροι που πρέπει να διερευνηθούν είναι η ασφάλεια, η οικονομικότητα στην κατασκευή αλλά και στη λειτουργία και τη συντήρηση, οι επιπτώσεις στο περιβάλλον, η αισθητική, οι κοινωνικές επιπτώσεις και η άνεση. Παράλληλα με την τεχνική μελέτη πρέπει να εκπονούνται οι μελέτες που περιγράφονται στις επόμενες ενότητες. Στο κεφάλαιο επίσης γίνεται αναφορά στα οικονομικά στοιχεία των οδικών έργων στο πλαίσιο των οποίων εντάσσονται τα πρότυπα βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων.

2.1 Μελέτη σκοπιμότητας

Βασικός στόχος της μελέτης σκοπιμότητας είναι να καθορίσει και να πολιτικοποιήσει το κόστος και τις ωφέλειες των επενδυτικών προγραμμάτων, προκειμένου να διευκολύνουν αποφάσεις που πρέπει να ληφθούν κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους. Τα αποτελέσματα των μελετών αυτών συνιστούν καθοριστικό παράγοντα για την τελική απόφαση υλοποίησης όλων των επενδυτικών προσπαθειών μέσω των κοινωνικών και οικονομικών αποτελεσμάτων. Πιο συγκεκριμένα, σκοπός της μελέτης σκοπιμότητας είναι να δοθούν επιστημονικά και οικονομικά τεκμηριωμένες απαντήσεις στα ερωτήματα:

- Γιατί το έργο πραγματοποιείται;
- Γιατί το έργο πραγματοποιείται τώρα;
- Γιατί το έργο πραγματοποιείται με αυτά τα χαρακτηριστικά;

Ουσιαστικά η μελέτη σκοπιμότητας της συγκοινωνιακής σύνδεσης δύο περιοχών είναι μελέτη με την οποία αξιολογούνται εναλλακτικές λύσεις για το είδος της συγκεκριμένης σύνδεσης, για τη χρονική ιεράρχησή της σε σχέση με άλλα ομοειδή έργα και για τα χαρακτηριστικά της.

2.1.1 Κυκλοφοριακή μελέτη

Στα πλαίσια της μελέτης σκοπιμότητας γίνεται και η κυκλοφοριακή μελέτη που περιέχει ανάλυση και πρόγνωση όλων των κυκλοφοριακών μεγεθών και των στατιστικών ιδιοτήτων τους. Η μελέτη της οδού, έχει ως αντικειμενικό σκοπό, να προσφέρει στα οχήματα που πρόκειται να κυκλοφορήσουν σε αυτή, γρήγορη, ασφαλή και άνετη κίνηση, σε συνδυασμό πάντα με την ελάχιστη δυνατή δαπάνη

κατασκευής και συντήρησης της οδού και τον σεβασμό στο περιβάλλον. Καταρχήν, πρέπει να μελετηθούν οι παράγοντες, οι οποίοι επηρεάζουν τις παραπάνω προϋποθέσεις για μία καλή μελέτη. Οι κυριότεροι είναι :

- Ο προβλεπόμενος κυκλοφοριακός φόρτος της νέας οδού για το παρόν και το μέλλον για έναν χρονικό ορίζοντα τριάντα ετών για παράδειγμα.
- Η προβλεπόμενη κυκλοφοριακή σύνθεση, δηλαδή το είδος των οχημάτων που προβλέπεται να κυκλοφορήσουν.
- Η μορφολογία και η σύσταση του εδάφους της περιοχής της νέας οδού, αλλά και η απαιτούμενη δαπάνη για την απαλλοτρίωση των ιδιοκτησιών που θα καταλάβει η οδός.
- Ο βαθμός ασφαλείας της οδού.
- Οι διατιθέμενοι πόροι για τη κατασκευή της συγκεκριμένης οδού, οι οποίοι βρίσκονται σε άμεση σχέση με την εθνική οικονομία της χώρας.

Η σπουδή όλων των παραπάνω παραγόντων, που επηρεάζουν τη μελέτη μίας νέας οδού, αποτελεί, τη λεγόμενη κυκλοφοριακή μελέτη της οδού. Βάσει των συμπερασμάτων της κυκλοφοριακής μελέτης, κάθε οδός κατατάσσεται σε κάποια κατηγορία οδού σύμφωνα με τη λειτουργική κατάταξη του οδικού δικτύου (Ψαριανός, 2001). Σημαντικό ρόλο συνήθως παίζει, το επίπεδο εξυπηρέτησης, το οποίο ως ένα ποιοτικό μέτρο, εκφράζει το αποτέλεσμα διαφόρων παραμέτρων όπως η ταχύτητα, ο χρόνος μετακίνησης και η άνεση της οδήγησης.

2.2 Γεωλογική και εδαφοτεχνική μελέτη

Σκοπός των μελετών αυτών είναι η διερεύνηση των εδαφικών χαρακτηριστικών που καθορίζουν ή επηρεάζουν στοιχεία της διατομής του οδικού έργου και τη γενική πορεία της χάραξης της οδού. Η εξειδίκευση των χαρακτηριστικών του έργου γίνεται με την εκπόνηση της τεχνικής μελέτης. Η μελέτη αυτή προχωρεί σταδιακά, όπως αναπτύσσεται παρακάτω. Στα πρώτα στάδια μελέτης καθορίζονται τα γενικά χαρακτηριστικά καθώς και η θέση της οδού. Στα τελευταία και υπό την προϋπόθεση ότι δεν ανατρέπονται οι παραδοχές επιλογής της συγκεκριμένης βέλτιστης λύσης για το οδικό έργο, καθορίζονται τα λεπτομερέστερα χαρακτηριστικά, ενώ παράλληλα παρέχονται οι πληροφορίες που είναι αναγκαίες για την κατασκευή του έργου.

2.3 Μελέτη της οδού

Οι βασικοί στόχοι που πρέπει να επιτυγχάνονται με τη μελέτη και τον γεωμετρικό σχεδιασμό της οδού είναι:

- Λειτουργία και η ικανοποίηση χωροταξικών και πολεοδομικών στόχων
- Εφαρμογή υψηλού επιπέδου εξυπηρέτησης
- Αίσθηση της ασφάλειας και της άνεσης της κυκλοφορίας
- Υψηλή ποιότητα της κυκλοφορίας
- Οικονομία κατά την κατασκευή και τη λειτουργία της οδού

- Υψηλή αισθητική

Η μελέτη της οδού εκπονείται κατά στάδια. Η ανάγκη της κατά στάδια εκπόνησής της προκύπτει από τους παρακάτω λόγους:

- Υπάρχουν θεωρητικά άπειρες λύσεις σε ένα οδικό έργο και είναι απαραίτητος ο περιορισμός τους από τα πρώτα στάδια της μελέτης ώστε να περιορισθούν οι σχετικές δαπάνες της.

- Ο όγκος των εργασιών που απαιτείται για την ολοκλήρωση της μελέτης της οδού είναι πολύ μεγάλος, ιδιαίτερα αν συνδυασθεί με άλλες παράλληλες μελέτες. Ο καταμερισμός της προσπάθειας είναι αναγκαίος ώστε η προσέγγιση της λύσης να γίνεται από το γενικό στο μερικό και να ελέγχεται σε κάθε στάδιο αν δεν ανατρέπονται από την γενική μελέτη οι προϋποθέσεις επιλογής της συγκεκριμένης λύσης που έχουν ληφθεί υπόψη στη μελέτη σκοπιμότητας, η οποία συνδυάζεται με το πρώτο ή δεύτερο στάδιο της μελέτης της οδού.

Τα στάδια της μελέτης αποκτούν περιεχόμενο από την ανάγκη να υπάρχει ένα ισοζύγιο μεταξύ της προσπάθειας που καταβάλλεται και της ποσότητας πληροφοριών που προκύπτουν από την εκπόνηση των σταδίων της μελέτης. Η μελέτη ενός οδικού έργου εκπονείται στα εξής στάδια:

- Μελέτη αναγνώρισης, που κατά περίπτωση λέγεται και προκαταρκτική μελέτη.

- Προμελέτη.

- Οριστική μελέτη - Μελέτη εφαρμογής.

Σε ορισμένες περιπτώσεις υπάρχει δυνατότητα σύγχρονης εκπόνησης των σταδίων μελέτης αναγνώρισης και προμελέτης.

2.3.1 Μελέτη αναγνώρισης

Σκοπός της μελέτης αναγνώρισης είναι η διερεύνηση και παρουσίαση ενός ή περισσότερων επικρατέστερων οδικών διαδρόμων. Ο σκοπός επιτυγχάνεται με τα ακόλουθα βήματα:

- Διερεύνηση επί χάρτου εφικτών λύσεων.

- Επιτόπια λεπτομερής εξέταση όσων προκύπτουν ως εφικτές λύσεις.

- Μελέτη των λύσεων αυτών κάθε μιας ξεχωριστά και συγκριτική αξιολόγηση προς επιλογή μιας ή περισσοτέρων για περαιτέρω εξέταση στο επόμενο στάδιο μελέτης.

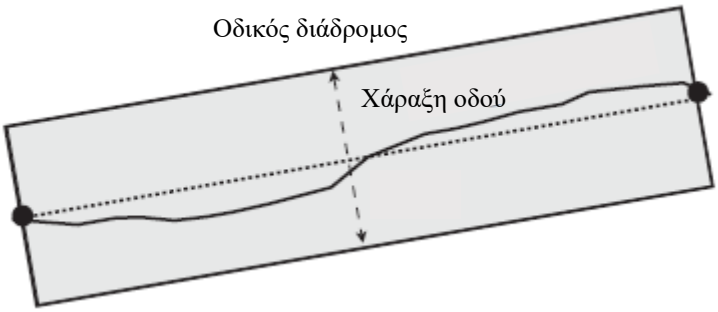
Η μελέτη αναγνώρισης περιλαμβάνει γενική οριζοντιογραφία της περιοχής του έργου, οριζοντιογραφία, μηκοτομή, αναλυτική τεχνική έκθεση και άλλα βοηθητικά και επεξηγηματικά στοιχεία σε κατάλληλες κλίμακες 1:25000 ή 1:10000 (FGSV, 2011).

2.3.2 Προμελέτη

Σκοπός της προμελέτης είναι ο καθορισμός με επαρκή προσέγγιση της χάραξης μιας οδού, δηλαδή της θέσης και της γεωμετρίας της. Ως επαρκής νοείται η προσέγγιση που επιτρέπει η κλίμακα και η εν γένει ακρίβεια του χρησιμοποιούμενου τοπογραφικού υποβάθρου. Σύμφωνα με την (FGSV, 2011) η ελάχιστη κλίμακα που χρησιμοποιείται για το στάδιο της προμελέτης είναι η 1:5000. Η μελέτη προχωρεί με διερεύνηση παραλλαγών εντός του οδικού διαδρόμου που προέκυψε από το προηγούμενο στάδιο της αναγνωριστικής μελέτης ή αν είχαν προκύψει περισσότερες ζώνες διάβασης, η διερεύνηση

γίνεται για κάθε μία από αυτές. Σε κάθε περίπτωση γίνεται συγκριτική αξιολόγηση. Η θέση της χάραξης μιας οδού εντός ενός οδικού διαδρόμου απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα.

Σχήμα 2.1: Χάραξη οδού εντός οδικού διαδρόμου
(Πηγή: Angulo, Castillo, García-Ródenas, & Sánchez-Vizcaíno, 2012, Ιδία επεξεργασία)



Η προμελέτη περιλαμβάνει την επί του τοπογραφικού διαγράμματος τοποθέτηση του άξονα της οδού, τη σύνταξη μηκοτομής, διατομών, προμετρήσεων και προϋπολογισμού, ως και λεπτομερούς τεχνικής έκθεσης καθώς και άλλα βοηθητικά και επεξηγηματικά στοιχεία. Όπως γίνεται κατανοητό οι απαιτούμενες κλίμακες επιβάλλουν η διαμόρφωση της χάραξης να είναι ρεαλιστική περιλαμβάνοντας τα απαραίτητα λεπτομερή γεωμετρικά στοιχεία που την αποτελούν.

2.3.3 Οριστική μελέτη - Μελέτη εφαρμογής

Εκπονείται κατά κανόνα σε τοπογραφικό υπόβαθρο με ικανοποιητικό για τις ανάγκες της μελέτης εύρος ζώνης και σε κλίμακα 1:1000 ή 1:500. Σκοπός της οριστικής μελέτης είναι η με μεγάλη ακρίβεια σύνταξη των απαιτουμένων σχεδίων και τεχνικών και οικονομικών τευχών για τη δημοπράτηση του έργου και η παροχή των απαραίτητων πληροφοριών για την κατασκευή της οδού. Η μελέτη εφαρμογής της οριστικής μελέτης γίνεται μετά την έγκριση της οριστικής μελέτης και περιλαμβάνει τη μεταφορά και χάραξη επί του εδάφους του άξονα της οδού που έχει προκύψει από την οριστική μελέτη. Με τη μελέτη εφαρμογής συμπληρώνονται οι απαραίτητες πληροφορίες για την κατασκευή της οδού.

Σημειώνεται ότι τόσο στη φάση της προμελέτης όσο και της οριστικής μελέτης είναι απαραίτητες οι επιτόπιες επισκέψεις. Η τεχνική μελέτη της οδού εκπονείται με βάση κανονισμούς που ενσωματώνουν τις τελευταίες εξελίξεις της έρευνας στην επιστημονική περιοχή της Οδοποιίας και τη συσσωρευμένη εμπειρία από τις εφαρμογές. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι κανονισμοί αφήνουν στο μελετητή περιθώρια επιλογών που γενικά μπορεί να διακριθούν σε δύο κατηγορίες:

- Επιλογές που γίνονται κατόπιν αξιολόγησης με βάση κριτήρια που τίθενται στη μελέτη σκοπιμότητας, όπως επιλογή ταχύτητας και διατομής.

- Επιλογές που γίνονται με βάση κριτήρια οικονομικότητας αλλά και εμπειρικούς κανόνες που προκύπτουν από το καταστάλαγμα πολλών εφαρμογών, μέσα στα πλαίσια των κανονισμών, όπως επιλογή ακτίνας καμπύλης της οριζοντιογραφίας και της μηκοτομής. Η σωστή εφαρμογή των κανονισμών αλλά και οι εύλογες επιλογές μέσα από τα περιθώρια που αφήνουν οι κανονισμοί είναι προϋπόθεση της σωστής τεχνικής μελέτης της οδού.

Παράλληλα με την τεχνική μελέτη της οδού εκπονείται και η μελέτη των πάσης φύσης τεχνικών έργων της οδού όπως γέφυρες, οχετοί και τοίχοι αντιστήριξης. Μετά την ολοκλήρωση της τεχνικής μελέτης και τη χρηματοδότηση του έργου ακολουθεί η φάση της δημοπράτησής του, με την ανακήρυξη του αναδόχου και η κατασκευή της οδού.

2.4 Κατασκευή οδικού έργου

Η κατασκευή της οδού ακολουθεί γενικά τα εξής στάδια:

1. Διαδικασία απαλλοτριώσεων.
2. Απομάκρυνση φυτικών γαιών, κατεδάφιση κτισμάτων.
3. Κατασκευή μεγάλων τεχνικών έργων.
4. Εκτέλεση χωματουργικών εργασιών και κατασκευή οχετών.
5. Αποκατάσταση επικοινωνίας μεταξύ περιοχών και δικτύων, που διακόπηκε με την κατασκευή της οδού.
6. Κατασκευή έργων αποστράγγισης και κατασκευή του οδοστρώματος.
7. Κατασκευή σήμανσης, στηθαίων ασφαλείας, εγκαταστάσεων φωτισμού, και λοιπών δευτερευόντων έργων.

Σημειώνεται τέλος με έμφαση ότι προϋπόθεση για τη σωστή κατασκευή της οδού είναι η τήρηση των προβλεπόμενων από τη μελέτη τεχνικών προδιαγραφών καθώς επίσης και ο έλεγχος της τήρησής τους με σωστή επίβλεψη της κατασκευής και εκτέλεση των αναγκαίων εργαστηριακών ελέγχων.

2.5 Οικονομικά στοιχεία οδικών έργων

Για την οικονομική αξιολόγηση των οδικών έργων, το πιο σύνηθες κριτήριο που υιοθετείται είναι το κόστος ή η ωφέλεια. Γενικά, για τη βελτιστοποίηση των οδικών χαράξεων στόχο αποτελεί η μείωση του συνολικού κόστους της χάραξης. Σύμφωνα με προηγούμενες έρευνες (OECD, 1973) (Chew, Goh, & Fwa, 1989) το κόστος της χάραξης μπορεί να ταξινομηθεί στις κατηγορίες του παρακάτω πίνακα. Στη συνέχεια γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση των κατηγοριών αυτών.

Πίνακας 2.1: Κατηγοριοποίηση κόστους οδικών μεταφορών
(Πηγή: Jha, Schonfeld, Jong & Kim, 2006, Ιδία επεξεργασία)

Στοιχεία κόστους		Παραδείγματα
Κόστος μελετών και διοικητικό κόστος		Κόστος συμβουλευτικών υπηρεσιών και επίβλεψης
Κόστος κατασκευής		Χωματουργικά, οδοστρώματα, απαλλοτριώσεις
Κόστος λειτουργίας και συντήρησης		Οδόστρωμα, αποψιλώσεις, φωτισμός
Κόστος χρηστών	Λειτουργικό κόστος οχημάτων	Καύσιμα, φθορά ελαστικών, μείωση αξίας οχημάτων
	Κόστος χρόνου ταξιδίου	Αξία χρόνου μετακίνησης για εργασία
	Κόστος ατυχημάτων	Αξία προβλεπόμενου αριθμού ατυχημάτων
Κοινωνικό και περιβαλλοντικό κόστος		Ηχορύπανση, ρύπανση του αέρα, απώλειες υγροτόπων

2.5.1 Κόστος μελετών και διοικητικά κόστη

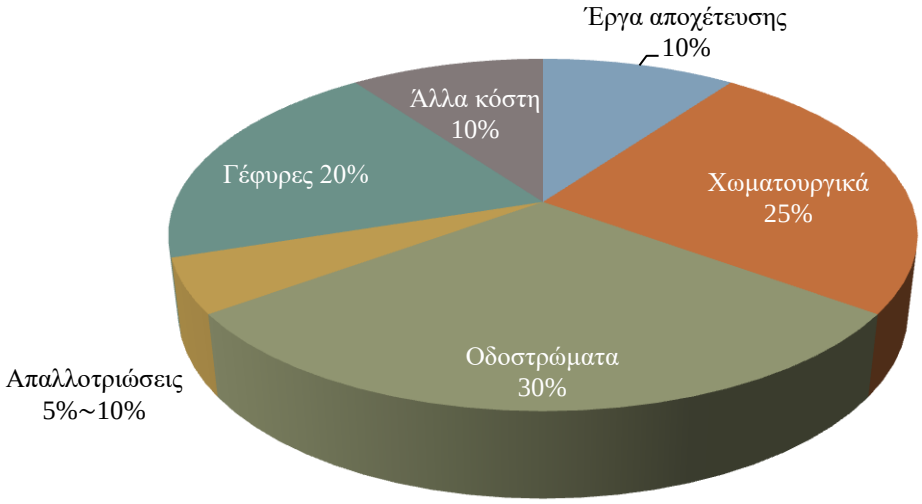
Ένα οδικό έργο συνήθως περιλαμβάνει μια σειρά βημάτων, που ξεκινούν με τη μελέτη σκοπιμότητας και ακολουθείται από τον σχεδιασμό, την κατασκευή και τελικά τη λειτουργία και συντήρηση του έργου. Το κόστος σχεδιασμού περιλαμβάνεται κυρίως στο πρωταρχικό στάδιο ενός οδικού έργου, ενώ το διοικητικό κόστος αφορά ολόκληρη την περίοδο σχεδιασμού του έργου. Εφ' όσον αυτά τα στοιχεία

κόστους δεν είναι ευαίσθητα ως προς της εναλλακτικές χαράξεις, συνήθως δε λαμβάνονται υπ' όψιν στη βελτιστοποίηση οδικών χαράξεων.

2.5.2 Κόστος κατασκευής

Για τον σχεδιασμό ενός οδικού έργου, είναι απαραίτητο να εκτιμηθεί το κόστος για κάθε λεπτομερές στοιχείο με στόχο την κατάρτιση και τον έλεγχο του προϋπολογισμού (Chew, Goh, & Fwa, 1989). Στις έρευνες των Stott (1972) και OECD (1973) τα κύρια στοιχεία κατασκευαστικού κόστους είναι τα οδοστρώματα, οι χωματουργικές εργασίες, οι γέφυρες, τα έργα αποχέτευσης, οι απαλλοτριώσεις και άλλα κόστη. Μια μέση εκτίμηση του ποσοστού κάθε στοιχείου επί του συνολικού κατασκευαστικού κόστους φαίνεται στο επόμενο σχήμα.

Σχήμα 2.2: Ανάλυση κόστους κατασκευής οδών
(Πηγή: Stott, 1972)



Είναι ευνόητο ότι τα ποσοστά των παραπάνω στοιχείων δεν είναι σταθερά για κάθε οδικό έργο. Για παράδειγμα, το ποσοστό του κόστους των χωματουργικών μπορεί να είναι μεγαλύτερο σε ορεινές περιοχές και γενικότερα σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο και μεγάλες κλίσεις. Ακόμη, για μια οδό που διέρχεται από αστικές περιοχές, το ποσοστό του κόστους απαλλοτριώσεων μπορεί να είναι μεγαλύτερο. Στη συνέχεια γίνεται μια επισκόπηση των στοιχείων του κατασκευαστικού κόστους. Τα στοιχεία αυτά εξειδικεύονται περισσότερο ανάλογα με το στάδιο της μελέτης.

2.5.2.1 Κόστος χωματουργικών εργασιών

Η αύξηση της έκτασης και του όγκου των χωματουργικών εργασιών, αυξάνει τον όγκο και το κόστος της συνολικής κατασκευής. Τα στοιχεία κόστους που περιλαμβάνονται στα χωματουργικά κόστη αφορούν τις εκσκαφές και τα επιχώματα της οδού. Βέβαια, η σημαντική αύξηση του όγκου των χωματουργικών εργασιών, έχει ως συνέπεια την αύξηση του μεγέθους των τεχνικών έργων που αποτελούν σημαντικές κατασκευές για την επιτυχή ολοκλήρωση ενός έργου. Όταν η ερυθρά της οδού βρίσκεται χαμηλότερα από το υψόμετρο του εδάφους τότε προκύπτει κόστος εκσκαφής, ενώ αντιθέτως όταν η επιφάνεια του εδάφους βρίσκεται χαμηλότερα από τη στάθμη της ερυθράς τότε προκύπτει κόστος για την κατασκευή επιχώματος. Τόσο το κόστος εκσκαφών όσο και αυτό των επιχωμάτων αποτελεί ουσιαστικά συνάρτηση του όγκου των χωματισμών που μεταφέρονται, αν και το μοναδιαίο κόστος εκσκαφής μπορεί να μεταβάλλεται ανάλογα με το βάθος της εκσκαφής και το είδος του εδάφους. Το κόστος μεταφοράς χωματισμών από δανειοθαλάμους ή προς χώρους απόθεσης συμπεριλαμβάνεται επίσης στο συνολικό κόστος. Για λόγους απλότητας το κόστος χωματουργικών

υπολογίζεται με βάση των όγκο εκσκαφών και επιχωμάτων. Στον υπολογισμό αυτό λαμβάνονται υπ' όψιν τρεις μεταβλητές, οι οποίες είναι το πλάτος του καταστρώματος της οδού, η γωνία κλίσης των πρανών και η διαφορά μεταξύ του υψομέτρου του εδάφους και της ερυθράς της οδού.

2.5.2.2 Κόστος οδοστρωμάτων

Το κόστος οδοστρωμάτων υπολογίζεται από τα πάχη των στρώσεων και το μοναδιαίο κόστος των υλικών οδοστρωσίας που χρησιμοποιούνται. Είναι πιθανό το κόστος αυτό να μεταβάλλεται κατά μήκος της οδού λόγω ανομοιογένειας στο είδος και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του εδάφους. Αυτό το κόστος μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της θέσης σε αντιστοίχηση με την κατανομή των διαφόρων ειδών εδάφους εντός της περιοχής μελέτης.

2.5.2.3 Κόστος απαλλοτριώσεων

Το κόστος των απαλλοτριώσεων προκύπτει από το γινόμενο της μονάδας αξίας της γης με την έκταση των προς απαλλοτρίωση περιοχών. Το μοναδιαίο κόστος απαλλοτρίωσης μπορεί να μεταβάλλεται κατά μήκος της χάραξης, ανάλογα με το είδος της κατασκευής, αλλά και την δυνητική ανάπτυξη της συγκεκριμένης περιοχής που επηρεάζει τις αξίες των ακινήτων. Αυτή η κατηγορία κόστους μπορεί να προτυποποιηθεί με τον ίδιο τρόπο, όπως, για παράδειγμα το κόστος οδοστρωμάτων, καθώς εξαρτάται από το μέγεθος των προς προτυποποίηση εκτάσεων.

2.5.2.4 Κόστος έργων αποχέτευσης και προστασίας κλίσης επιχωμάτων

Οι υδραυλικές κατασκευές των οδικών έργων επιτελούν τη ζωτική λειτουργία της μεταφοράς, της εκτροπής, ή της απομάκρυνσης των επιφανειακών και υπόγειων νερών από το οδόστρωμα και γενικότερα από τη ζώνη του οδικού έργου. (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2002)

Η ροή των ομβρίων που δημιουργείται, από τη διαμόρφωση της μηκοτομής και των επικλίσεων, επάνω στην επιφάνεια των κύριων λωρίδων κυκλοφορίας της οδού δεν επιτρέπεται να προέρχεται από άλλες επιφάνειες, είτε εξωτερικές λεκάνες είτε βοηθητικές επιφάνειες κυκλοφορίας (παρόδιος χώρος στάθμευσης, οδόστρωμα εγκάρσιων οδών σε θέσεις ισόπεδων κόμβων ή άλλων προσβάσεων) παρά μόνο από τη βροχή που προσπίπτει στην επιφάνεια αυτών. Επομένως κατά τη μελέτη οδοποιίας, η γεωμετρική σχεδίαση της οδού πρέπει να αποτρέπει ανεπιθύμητες συνθήκες.

Οι εγκαταστάσεις αποχέτευσης μπορεί να ταξινομηθούν με βάση το είδος της κατασκευής σε εγκαταστάσεις ανοιχτών και κλειστών αγωγών. Οι εγκαταστάσεις ανοιχτών αγωγών περιλαμβάνουν τις παρόδιες τάφρους, την κοίλη διαμόρφωση των κεντρικών ή διαχωριστικών νησίδων και τα ρείθρα. Οι εγκαταστάσεις κλειστών αγωγών περιλαμβάνουν τους οχετούς και τα συστήματα υπονόμων. Γενικά, οι εγκαταστάσεις αυτές δεν επηρεάζονται τόσο από τη χάραξη αλλά εξαρτάται κυρίως από τα υλικά οδοστρωσίας που επιλέγονται, κλιματικούς παράγοντες αλλά και στοιχεία του σχεδιασμού των διατομών της οδού.

2.5.3 Κόστος συντήρησης

Το κόστος συντήρησης μιας οδού μπορεί να διακριθεί σε οχτώ κατηγορίες που αφορούν τις επιφάνειες των οδοστρωμάτων, ερείσματα και προσβάσεις, απορροή, παρόδια στοιχεία, γέφυρες και σήραγγες, οδικά παρελκόμενα (κιγκλιδώματα, πινακίδες, φωτισμός), έλεγχος χιονιού και παγετού και συσκευές ελέγχου της κυκλοφορίας. Η καθαρή παρούσα αξία της συντήρησης για μια περίοδο τριάντα ετών αποτελεί περίπου το 5% του συνολικού κόστους κατασκευής (OECD, 1973).

2.5.4 Κόστος χρηστών

Τα κύρια στοιχεία του κόστους χρηστών αποτελούν το λειτουργικό κόστος οχημάτων, η αξία του χρόνου μετακίνησης και το κόστος ατυχημάτων. Τα στοιχεία αυτά περιγράφονται αναλυτικά στα επόμενα εδάφια.

2.5.4.1 Λειτουργικό κόστος οχημάτων

Το λειτουργικό κόστος ενός οχήματος αποτελείται από το κόστος της ποσότητας του καύσιμου που χρησιμοποιείται, το κόστος των λιπαντικών, το κόστος αγοράς και φθοράς των ελαστικών, το κόστος συντήρησης των οχημάτων, το κόστος του χρόνου που ξοδεύεται κατά την συντήρηση, και το κόστος της φυσιολογικής φθοράς του οχήματος. Το λειτουργικό κόστος μεταβάλλεται εξαιτίας πολλών παραγόντων, όπως ο τύπος οχήματος, η ταχύτητα, η κλίση της τοπογραφίας, το όριο ταχύτητας, το είδος της οδού, η ποιότητα του οδοστρώματος και η γεωμετρία της οδού. Το λειτουργικό κόστος αναλύεται συνήθως στο κόστος καυσίμου και στο υπόλοιπο κόστος. Οι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη είναι η τοπογραφία της οδού, ο τύπος της οδού, δηλαδή αν είναι αστική ή υπεραστική και η σύνθεση της κυκλοφορίας. Για την συμπερίληψη αυτών των στοιχείων στη μαθηματική προτυποποίηση του προβλήματος, πρέπει να εκφράζονται σε συνάρτηση με την ταχύτητα μελέτης, τις αποστάσεις που διανύονται, τον αριθμό των στάσεων του οχήματος, τις εναλλαγές της ταχύτητας καθώς και το είδος του οχήματος. Στην τεχνικοοικονομική ανάλυση της οδού συνήθως λαμβάνονται υπ' όψιν μόνο τα στοιχεία που εξαρτώνται από τα οχηματοχιλιόμετρα. Άλλα λειτουργικά κόστη όπως τέλη κυκλοφορίας, έξοδα για στάθμευση, κόστος ασφάλισης καθώς και η υποτίμηση της αξίας των οχημάτων με την πάροδο του χρόνου μπορούν να μην συμπεριληφθούν. Η καθαρή παρούσα αξία του λειτουργικού κόστους οχημάτων για μια περίοδο τριάντα ετών μπορεί να αποτελέσει από 300% έως 1000% του κόστους κατασκευής ανάλογα με τον προβλεπόμενο φόρτο κυκλοφορίας.

2.5.4.2 Αξία χρόνου μετακίνησης

Η αξία του χρόνου μετακίνησης προκύπτει συνήθως από το γινόμενο του συνολικού χρόνου μετακίνησης με τη μοναδιαία αξία του χρόνου, η οποία εξαρτάται άμεσα από τον σκοπό της μετακίνησης, ο οποίος μπορεί να είναι η εργασία, αναψυχή ή άλλος. Η αύξηση ή η μείωση του χρόνου διαδρομής σε συνδυασμό με τον όγκο της κυκλοφοριακής ροής, δημιουργεί σημαντικό εξωτερικό κόστος. Η προσπάθεια για τη χρηματική αποτίμηση του χρόνου διαδρομής δεν είναι μία διαδικασία απλή. Στις περισσότερες ευρωπαϊκές χώρες η αποτίμηση αυτή διακρίνεται από τον τύπο του οχήματος, αν απευθύνεται στον οδηγό ή στον συνοδηγό και αν ο χρόνος διαδρομής αναφέρεται σε εργασία ή αναψυχή. Σε ορισμένες προσεγγίσεις η αξία του χρόνου δεν βασίζεται στο σκοπό της διαδρομής, αλλά από το αν η οδός βρίσκεται σε αστική ή μη αστική περιοχή. Σε άλλες προσεγγίσεις δίνεται έμφαση στην αξία της διαδρομής την Κυριακή. Σημαντικό στοιχείο αποτελεί η αξία του χρόνου μετακίνησης να προσαρμόζεται στα ισχύοντα επίπεδα τιμών

2.5.4.3 Κόστος ατυχημάτων

Τα οδικά ατυχήματα αποτελούν μια μεγάλη οικονομική απώλεια και θεωρούνται ως στοιχείο μεταφορικού κόστους. Το κόστος ατυχημάτων υπολογίζεται συνήθως από το γινόμενο των ποσοστών ατυχημάτων και το μέσο κόστος ανά ατύχημα. Η ακριβής σχέση μεταξύ ατυχημάτων και διαμόρφωσης της οδού είναι πολύ δύσκολο να προτυποποιηθεί, καθώς οι αιτίες των ατυχημάτων είναι πολλές και περίπλοκες. Για τον λόγο αυτόν καθώς και λόγω έλλειψης παρατηρήσεων το κόστος ατυχημάτων συνήθως δεν λαμβάνεται υπ' όψιν για την κατασκευή μιας νέας οδού. Αντίθετα, σε έργα βελτίωσης οδών, η μείωση των δεικτών ατυχημάτων αποτελεί σημαντικό τμήμα της ωφέλειας για τους χρήστες. Όταν ένα τμήμα της οδού χαρακτηρίζεται ως επικίνδυνο, το τμήμα αυτό υπόκειται σε βελτιώσεις, ενώ πραγματοποιείται ανάλυση της κατάστασης πριν και αφού λάβουν χώρα οι βελτιώσεις με βάση τα δεδομένα παρατηρήσεων.

Αν και στις περισσότερες περιπτώσεις τα ατυχήματα οφείλονται σε σφάλματα των οδηγών, ο οδικός σχεδιασμός μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την ασφάλεια ελαχιστοποιώντας τα σφάλματα αυτά. Συσχέτιση των γεωμετρικών στοιχείων της οδού με δείκτες ατυχημάτων κάνουν οι Φρατζεσκάκης & Γκόλιας (1994). Στοιχεία όπως, επαρκή μήκη ορατότητας, ερείσματα άνευ εμποδίων, ήπιες κλίσεις πρανών και απουσία άλλων εμποδίων εξασφαλίζουν στον οδηγό αρκετό χρόνο αντίδρασης σε μια επικίνδυνη κατάσταση.

2.5.5 Περιβαλλοντικό και κοινωνικό κόστος

Η κατασκευή ενός οδικού έργου αναδιαμορφώνει την περιοχή μελέτης, ενώ συνήθως προκαλεί μεταβολή των χρήσεων γης γειτονικών περιοχών. Τις τελευταίες δεκαετίες υπάρχει έντονη ευαισθητοποίηση κοινωνικών ομάδων για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των οδικών έργων, όπως η ρύπανση του αέρα, των υδάτων και η ηχορρύπανση. Σε ορισμένες ακραίες περιπτώσεις, τα περιβαλλοντικά ζητήματα μπορεί να αποτελέσουν τους πιο κρίσιμους παράγοντες στον οδικό σχεδιασμό παραμερίζοντας τα υπόλοιπα στοιχεία κόστους. Έτσι, έχει καθιερωθεί η εκτίμηση και αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεών των οδικών έργων πριν δοθεί η έγκριση για την πραγματοποίησή τους.

Η θεώρηση του περιβαλλοντικού και κοινωνικού κόστους γίνεται συνήθως στο στάδιο της προκαταρκτικής μελέτης όπου γίνεται αξιολόγηση των εναλλακτικών οδικών διαδρόμων και επιλογή ενός ή περισσότερων για περαιτέρω εξέταση. Στα πιο προχωρημένα στάδια της μελέτης τα περιβαλλοντικά κόστη συνήθως δεν συμπεριλαμβάνονται, καθώς η τελική διαμόρφωση της οδού δεν παρουσιάζει συνήθως μεγάλες διαφορές ως προς τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Τόσο το κοινωνικό όσο και το περιβαλλοντικό κόστος είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν και για το λόγο αυτό δεν είναι εύκολο να ενταχθούν στη συνάρτηση στόχου του προβλήματος. Βέβαια, χρήσιμα στοιχεία μπορούν να αντληθούν από έρευνες σχετικές με το εξωτερικό κόστος των μετακινήσεων (Zhang, Boardman, Gillen, & Waters II, 2004) (Litman, 2009) (Austroads, 2014) (Korzhenevych, et al., 2014).

Με αυτές τις εκτιμήσεις είναι δυνατό να συμπεριληφθούν κοινωνικά και περιβαλλοντικά στοιχεία κόστους στη συνάρτηση στόχου ενός προτύπου βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων. Βέβαια, το περιβαλλοντικό και κοινωνικό κόστος δεν εκφράζεται μόνο ως συνάρτηση των οχηματοχιλιομέτρων καθώς επηρεάζεται και από τη θέση της οδού. Έτσι, σε ένα πρότυπο βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων πρέπει να έχει προβλεφθεί η δυνατότητα να αποφεύγονται ορισμένες περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές όπως υγροτόπους και παραθαλάσσιες περιοχές.

2.6 Σχέση κόστους και διαμόρφωσης της χάραξης

Για την προτυποποίηση του προβλήματος της βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων είναι πολύ σημαντικό να εντοπιστούν οι σχέσεις μεταξύ κόστους και διαμόρφωσης της χάραξης. Όλα τα στοιχεία κόστους πρέπει να ποσοτικοποιηθούν κατάλληλα σε σχέση με τα χαρακτηριστικά του σχεδιασμού, έτσι ώστε η συνάρτηση του συνολικού κόστους να μπορεί να ελαχιστοποιηθεί ως προς τη διαμόρφωση της χάραξης. Σύμφωνα με τους Jha, Schonfeld, Jong, & Kim (2006) τα στοιχεία κόστους των οδών μπορούν να ταξινομηθούν σε εξαρτώμενα από τη θέση, το μήκος, την έκταση, τον όγκο και τα οχηματοχιλιόμετρα.

Το κόστος εξαρτώμενο από τη θέση αφορά τη θέση και την καλυπτόμενη από την χάραξη έκταση σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Για παράδειγμα, το κόστος απαλλοτριώσεων, το περιβαλλοντικό κόστος καθώς και το κόστος κατασκευής της οδού που επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους εξαρτώνται εκτός άλλων παραγόντων και από τη θέση. Άλλα στοιχεία, όπως, προστατευτικά κιγκλιδώματα, αποχετεύσεις και περιφράξεις μπορούν να χαρακτηρισθούν ως εξαρτώμενα από το μήκος. Εξαρτώμενα από την έκταση στοιχεία κόστους είναι εκείνα που εξαρτώνται από το μέγεθος της επιφάνειας κατάληψης της οδού. Για παράδειγμα το κόστος οδοστρωμάτων, ανεξάρτητα από το

υπόλοιπο κατασκευαστικό κόστος αποτελεί στοιχείο εξαρτώμενο από την έκταση. Αν το πλάτος ή ο αριθμός των λωρίδων κυκλοφορίας παραμένει σταθερός κατά μήκος της χάραξης, τότε είναι δυνατό το στοιχείο αυτό να εκφραστεί ως εξαρτώμενο από το μήκος. Ένα παράδειγμα κόστους εξαρτώμενου από τον όγκο είναι το χωματουργικό κόστος στην ελαχιστοποίηση του οποίου επικεντρώνεται το πρότυπο βελτιστοποίησης της παρούσας εργασίας. Λειτουργικό κόστος οχημάτων και ένα τμήμα του περιβαλλοντικού και κοινωνικού κόστους είναι εξαρτώμενα από τα οχηματοχιλιόμετρα που διανύονται. Με αυτήν την κατηγοριοποίηση γίνεται πιο εύκολη η προτυποποίηση του κόστους των οδών ως προς τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους.

Διαφορετικές κατηγορίες κόστους ευνοούν διαφορετικές διαμορφώσεις χαράξεων. Για παράδειγμα, στοιχεία κόστους εξαρτώμενα από το μήκος και τα οχηματοχιλιόμετρα οδηγούν τις χαράξεις σε πιο ευθύγραμμες μορφές. Αντίθετα στοιχεία κόστους εξαρτώμενα από τη θέση ευνοούν λιγότερο άμεσες συνδέσεις και καμπύλα τμήματα. Η βέλτιστη διαμόρφωση της χάραξης θα ισορροπεί μεταξύ των διάφορων κατηγοριών κόστους.

Μια άλλη σημαντική παρατήρηση αφορά το αν ένα στοιχείο κόστους είναι κυρίαρχο έναντι των υπολοίπων ή αν παρουσιάζει ευαισθησία σε αλλαγές. Ένα στοιχείο κόστους ονομάζεται κυρίαρχο έναντι των υπολοίπων αν αποτελεί υψηλό ποσοστό του συνολικού κόστους της συνάρτησης στόχου. Για παράδειγμα, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, το λειτουργικό κόστος οχημάτων μπορεί να αποτελέσει από 300% έως και 1000% του κατασκευαστικού κόστους. Ευαίσθητα είναι τα στοιχεία του κόστους που παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις ως προς τις αλλαγές των επιλογών σχεδιασμού των χαράξεων. Ένα κυρίαρχο στοιχείο κόστους δεν είναι απαραίτητα και ευαίσθητο. Για το γενικότερο πρόβλημα της βελτιστοποίησης ζητούμενο πρέπει να αποτελεί η συμπερίληψη τόσο των κυρίαρχων όσο και των ευαίσθητων στοιχείων κόστους. Βέβαια, το πρότυπο βελτιστοποίησης που αναπτύσσεται στην παρούσα εργασία εστιάζεται στο στάδιο της προμελέτης. Αυτό σημαίνει πως ο οδικός διάδρομος της οδού έχει ήδη καθοριστεί ενώ το πλέον ευαίσθητο κόστος είναι αυτό των χωματουργικών εργασιών.

3 Χαράξεις Οδών

Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται οι βασικές αρχές που αφορούν τη γεωμετρική διαμόρφωση της οδού κατά την οριζοντιογραφία και τη μηκοτομή. Επίσης, γίνεται περιγραφή όλων εκείνων των στοιχείων που λαμβάνονται υπ' όψιν κατά την χάραξη των οδών. Στόχος του κεφαλαίου είναι να εισάγει τον αναγνώστη στο βασικό γνωστικό υπόβαθρο Οδοποιίας πάνω στο οποίο βασίζονται τα πρότυπα βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων.

3.1 Στοιχεία οδικών χαράξεων

Αντικειμενικός σκοπός της μελέτης της χάραξης μίας οδού, είναι ο σαφής ποιοτικός και ποσοτικός προσδιορισμός της οδού στο χώρο. Ο γεωμετρικός σχεδιασμός πρέπει να παρέχει το κατάλληλο επίπεδο κινητικότητας και προσέγγισης στο χώρο, ενώ ταυτόχρονα να διασφαλίζει ένα σημαντικό επίπεδο ασφάλειας (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2001). Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται κατά την χάραξη της μελέτης ενός οδικού έργου, προκύπτουν από την αλληλεπίδραση της χάραξης της οδού, της οδικής συμπεριφοράς των οδηγών, της δυναμικής κίνησης των οχημάτων και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της τροχιάς τους.

Ο σχεδιασμός ενός οδικού έργου προσεγγίζεται κατά κανόνα με γεωμετρική μέθοδο, σύμφωνα με την οποία η χάραξη μιας οδού πραγματοποιείται σε δύο διακριτά στάδια. Αρχικά γίνεται η σχεδίαση του άξονα της οδού στο οριζόντιο επίπεδο, η οποία ονομάζεται οριζοντιογραφία της οδού. Στη συνέχεια πραγματοποιείται η υψομετρική διαμόρφωση του άξονα της οδού. Η υψομετρική διαμόρφωση γίνεται επί του αναπτύγματος της κατακόρυφης επιφάνειας με οδηγό καμπύλη τον άξονα της οδού κατά την οριζοντιογραφία και καλείται μηκοτομή της οδού. Ο άξονας της οδού κατά τη μηκοτομή ονομάζεται ερυθρά της οδού ενώ η προβολή της επιφάνειας του εδάφους ονομάζεται γραμμή εδάφους.

Το τελικό αποτέλεσμα της χάραξης στον χώρο προκύπτει από τη σύνθεση των επιμέρους δύο σταδίων. Κατά τη μέθοδο αυτή, η πρόβλεψη του συνδυασμένου τελικού αποτελέσματος της οδού στον χώρο είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί μόνο μέχρι κάποιον βαθμό και επιπλέον η συμβατική γεωμετρική χάραξη δεν είναι σε θέση να παράσχει τα δεδομένα της με μια ενιαία και ακριβή μορφή, προκειμένου αυτά να είναι διαχειρίσιμα από τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές και να χρησιμοποιηθούν σε άλλες σύγχρονες εφαρμογές και συστήματα.

3.1.1 Ισοκλινής της χάραξης

Ισοκλινής γραμμή μιας τοπογραφικής επιφάνειας λέγεται η γραμμή της επιφάνειας στο τυχόν σημείο της οποίας η εφαπτομένη σχηματίζει δοθείσα γωνία με το επίπεδο προβολής. Η ισοκλινής γραμμή είναι η τεθλασμένη, της οποίας οι κορυφές βρίσκονται επί των ισοϋψών και οι πλευρές έχουν σταθερή κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο και βρίσκονται πάνω στο έδαφος.

Στην υψομετρική οριζοντιογραφία του εδάφους γίνεται δεκτό ότι ανάμεσα σε δύο διαδοχικές ισοϋψείς η επιφάνεια του εδάφους μεταβάλλεται γραμμικά, κατά την κάθετη κατεύθυνση στην ισοϋψή. Κατά συνέπεια, πρέπει μεταξύ δύο ισοϋψών η πλευρά της ισοκλινούς να μην τέμνει ενδιάμεσα άλλη ισοϋψή. Επισημαίνεται ότι ο ρόλος της ισοκλινούς είναι υποβαθμισμένος στη σύγχρονη Οδοποιία, λόγω κυρίως των μεγάλων ταχυτήτων μελέτης. Δεν παύει όμως να αποτελεί ένα χρήσιμο οδηγό για τη χάραξη.

3.1.2 Πολυγωνική της χάραξης

Για τον καθορισμό του άξονα της οδού καθορίζονται πρώτα οι ευθυγραμμίες που αποτελούν την πολυγωνική της χάραξης με βασικό κριτήριο καθορισμού του άξονα την οικονομία στις χωματουργικές εργασίες της οδού. Οι απαιτήσεις από τον άξονα, δηλαδή της πολυγωνικής με τις σχετικές καμπύλες είναι:

- Η προσπάθεια εξίσωσης των επιχωμάτων και των ορυγμάτων
- Η μείωση του όγκου των χωματισμών

Στην περίπτωση κυρίως των υπεραστικών οδικών συνδέσεων, η πολυγωνική καθορίζεται αφού χαραχθεί ο άξονας με ελεύθερη σχεδίαση. Αντί αυτής της διαδικασίας στην παρούσα εργασία οι συντεταγμένες των κορυφών της πολυγωνικής καθώς και της μορφής των καμπυλών αποτελούν μεταβλητές απόφασης του προβλήματος με στόχο την ικανοποίηση των παραπάνω απαιτήσεων. Διακρίνονται δύο είδη πολυγωνικών γραμμών (Ψαριανός, 2001):

- Πρωτεύουσα ή κύρια πολυγωνική ονομάζεται αυτή που προκύπτει από τις εφαπτόμενες στα σημεία καμπής του άξονα της οδού
- Δευτερεύουσα πολυγωνική ονομάζεται αυτή που προκύπτει από τις εφαπτόμενες στα σημεία επαφής των τόξων μεταξύ τους

Τα σημεία επαφής των τόξων ονομάζονται χαρακτηριστικά ή κύρια ή δευτερεύοντα σημεία του άξονα. Τα σημεία μεταξύ των χαρακτηριστικών σημείων και τα οποία ανήκουν σε ένα τόξο ονομάζονται δευτερεύοντα σημεία ή σημεία πύκνωσης του άξονα.

3.2 Ταχύτητες

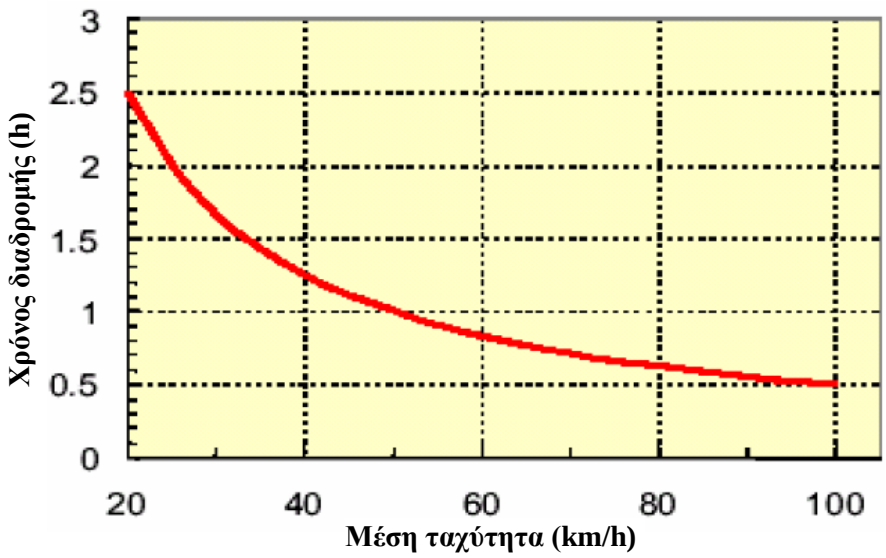
Διακρίνονται τέσσερα είδη ταχυτήτων που λαμβάνονται υπ' όψιν στις μελέτες οδικών έργων και αποτελούνται από τη μέση ταχύτητα, την ταχύτητα μελέτης, τη λειτουργική ταχύτητα και την επιτρεπόμενη ταχύτητα. Αυτές περιγράφονται στις παρακάτω υποενότητες.

3.2.1 Μέση ταχύτητα

Η μέση ταχύτητα ενός οχήματος, σε ένα τμήμα της οδού, είναι ο λόγος της διανυόμενης απόστασης διαιρεμένη με το χρόνο που το διήνυσε το όχημα συμπεριλαμβανομένων όλων των στάσεων του. Εκφράζει ένα μέτρο εξυπηρέτησης που παρέχει ο δρόμος, και παρέχει ένα μέτρο εκτίμησης κόστους - οφέλους από τους χρήστες της οδού.

Βασική επιδίωξη των μελετών οδοποιίας, είναι η επίτευξη υψηλών μέσων ταχυτήτων διαδρομής για τα οχήματα που κυκλοφορούν στην οδό με χαμηλή μεταβλητότητα, εξασφαλίζοντας ότι οι μετακινήσεις να γίνονται με ασφάλεια και άνεση και σε σύντομο χρόνο. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ένα παράδειγμα μεταβολής του χρόνου διαδρομής σε σχέση με τη μέση ταχύτητα, σε μια συγκεκριμένη διαδρομή.

Σχήμα 3.1: Παράδειγμα μεταβολής χρόνου διαδρομής σε σχέση με μέση ταχύτητα (Πηγή: Κεχαγιά, 2005, Ιδία επεξεργασία)



Από τις υψηλές ταχύτητες όμως δημιουργούνται ορισμένα προβλήματα, όπως:

- Αυξάνονται οι απαιτήσεις που επιβάλλονται στον χρήστη για γρήγορη επεξεργασία των πληροφοριών από το οδικό περιβάλλον για απόφαση και πραγματοποίηση των απαραίτητων ενεργειών για την ασφαλή κίνησή του.
- Αυξάνονται τα απαιτούμενα μήκη ορατότητας.
- Αυξάνεται η σοβαρότητα των ατυχημάτων.
- Αυξάνονται οι δαπάνες κίνησης των οχημάτων.
- Αυξάνονται οι δαπάνες κατασκευής των οδικών έργων.
- Αυξάνονται οι επιπτώσεις στο περιβάλλον.

3.2.2 Ταχύτητα μελέτης

Σύμφωνα με τις οδηγίες μελετών του ΥΠΕΧΩΔΕ (2001), η ταχύτητα μελέτης προκύπτει λαμβάνοντας υπ' όψιν τα περιβαλλοντικά και οικονομικά κριτήρια, που ανταποκρίνονται στον προβλεπόμενο λειτουργικό χαρακτήρα της οδού στο οδικό δίκτυο και την επιδιωκόμενη ποιότητα κυκλοφοριακής ροής, με βάση το λειτουργικό χαρακτήρα της οδού. Στην ταχύτητα μελέτης αντιστοιχούν οριακές και προτεινόμενες τιμές σύμφωνα με τη λειτουργική κατηγοριοποίηση της οδού. Ειδικότερα, σε αρκετές οδηγίες γεωμετρικού σχεδιασμού οδών, η ταχύτητα μελέτης παίζει σημαντικό ρόλο στον υπολογισμό σημαντικών περιορισμών των στοιχείων σχεδιασμού, όπως:

- Ελάχιστες ακτίνες των οριζοντίων καμπυλών.
- Ελάχιστες παραμέτρους των κλωθοειδών.
- Μέγιστες κατά μήκος κλίσεις.
- Ελάχιστες ακτίνες των κυρτών και κοίλων κατακόρυφων καμπυλών.

Η σωστή επιλογή της ταχύτητας μελέτης εξαρτάται από την σημασία της οδού, τον τύπο της διατομής, τον κυκλοφοριακό φόρτο και τη σύνθεση της κυκλοφορίας, την ποιότητα της κυκλοφορίας καθώς και από την μορφολογία του εδάφους. Η ταχύτητα μελέτης επηρεάζει μεταξύ άλλων αποφασιστικά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός οδικού τμήματος, το επίπεδο εξυπηρέτησης της οδού, την οικονομικότητα και την ασφάλεια. Επομένως η ταχύτητα μελέτης πρέπει να παραμένει σταθερή κατά το δυνατόν σε οδικά τμήματα μεγάλου μήκους, που αποτελούν χαρακτηριστικές ενότητες και αλληλοεξαρτώνται. Όπως φαίνεται από τα παραπάνω στην έννοια της ταχύτητας μελέτης αποδίδονται κάποιες ιδιότητες χωρίς να ορίζεται αυστηρά. Στο επόμενο εδάφιο παρουσιάζονται οι προσπάθειες που έχουν γίνει διαχρονικά για τον ορισμό της.

3.2.2.1 Ιστορική εξέλιξη της έννοιας της ταχύτητας μελέτης

Η έννοια της ταχύτητας μελέτης είχε σημαντική εξέλιξη κατά τη διάρκεια των ετών (Fitzpatrick, Carlson, Brewer, Wooldridge, & Miaou, 2003). Είναι χαρακτηριστικό ότι οι Barnett, Haile, & Moyer (1936), καθόριζαν ως ταχύτητα μελέτης, *τη μέγιστη λογική ομοιόμορφη ταχύτητα που θα μπορούσε να υιοθετηθεί από την ταχύτερη ομάδα οδηγών*. Ο σχεδιασμός των οδικών έργων της εποχής επέβαλλε μεγάλες, όσο το δυνατό, ευθείες.

Ο πρώτος ορισμός που έδωσε η AASHO (1938) για την ταχύτητα μελέτης ανέφερε ότι *είναι η μέγιστη προσεγγιστική ομοιόμορφη ταχύτητα που πιθανόν θα μπορούσε να υιοθετεί από την ταχύτερη ομάδα οδηγών, αλλά όχι υποχρεωτικά από το μικρότερο ποσοστό των απερίσκεπτων οδηγών*. Το 1954 εμφανίστηκε ο όρος «μέγιστη ασφαλής ταχύτητα». Έτσι, η ταχύτητα μελέτης περιγράφτηκε ως *η ταχύτητα που ορίζεται για τον σχεδιασμό και την σχέση των φυσικών χαρακτηριστικών της οδού και που επηρεάζουν την κίνηση των οχημάτων. Αποτελεί τη μέγιστη ασφαλής ταχύτητα που μπορεί να διατηρηθεί σε ένα τμήμα της οδού, ικανοποιώντας τα στοιχεία του σχεδιασμού* (AASHO, 1954). Ταυτόχρονα, η AASHO καθόρισε τις βάσεις για τον ορισμό της έννοιας που υιοθετήθηκαν μέχρι και την έκδοση, του πράσινου βιβλίου, δηλαδή:

- Η προτεινόμενη ταχύτητα σχεδιασμού θα πρέπει να είναι λογική ως προς την τοπογραφία, το ανάγλυφο πλησίον της οδού και την κατηγορία της οδού.

- Όλα τα χαρακτηριστικά της οδού θα πρέπει να σχετίζονται με την ταχύτητα σχεδιασμού ώστε να επιτευχθεί ένας ορθολογικός και ισόρροπος σχεδιασμός.

- Η ταχύτητα σχεδιασμού θα πρέπει να είναι σύμφωνη με την επιθυμητή ταχύτητα σχεδόν όλων των οδηγών.

Στην πρώτη έκδοση οδηγιών γεωμετρικού σχεδιασμού οδών (AASHO, 1984) αναφέρεται ότι *η ταχύτητα μελέτης είναι η μέγιστη ασφαλής ταχύτητα που μπορεί να διατηρηθεί σε ένα τμήμα της οδού. Η ταχύτητα θα πρέπει να είναι σύμφωνη με την τοπογραφία, τη γη πλησίον και την κατηγορία της οδού.* Ο ορισμός αυτός διατηρείται στις επόμενες δύο εκδόσεις έως ότου οι Fambro, Fitzpatrick, & Koppa (1997), απομακρύνουν τον όρο «ασφαλής», με σκοπό να αποφευχθεί η αντίληψη ότι ταχύτητες μεγαλύτερες από την ταχύτητα σχεδιασμού είναι «μη ασφαλείς». Έτσι, ορίζουν την ταχύτητα μελέτης ως την *ταχύτητα που επιλέγεται για να καθορίσει τα σημαντικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά στοιχεία της οδού*. Αυτός ο ορισμός διατηρείται έκτοτε στις τρεις επόμενες εκδόσεις οδηγιών γεωμετρικού σχεδιασμού οδών της AASHTO. Μάλιστα, στην έκτη έκδοση αναφέρεται ότι η επιλεγόμενη τιμή της ταχύτητας μελέτης θα πρέπει να είναι συμβατή με την αναμενόμενη λειτουργική ταχύτητα, την τοπογραφία και τις χρήσεις γης της περιοχής και τη λειτουργική κατάταξη της οδού, χωρίς βέβαια να δίνονται περισσότερες διευκρινήσεις ή ποσοτικά μεγέθη.

3.2.2.2 Παράμετροι σχεδιασμού που επηρεάζονται από την ταχύτητα μελέτης

Η επιλογή της ταχύτητας μελέτης αποτελεί καθοριστικό στοιχείο για τη χάραξη ενός οδικού έργου με τη συγκεκριμένη μεθοδολογία. Η τιμή της επηρεάζει ποικίλους παράγοντες όπως οικονομικούς,

τεχνικούς, κοινωνικούς και περιβαλλοντικούς. Στην περίπτωση αυτή, η μέθοδος της πολυκριτηριακής ανάλυσης, εφαρμόζοντας διαφορετικούς συντελεστές βαρύτητας, καθορίζει την ισορροπία αντιστάθμισης. Για παράδειγμα σε μία οδική αρτηρία, εξισορροπείται το αυξημένο κόστος εξαιτίας της κατασκευής του οδικού έργου και της λειτουργίας των οχημάτων καθώς και το περιβαλλοντικό κόστος από το μεγαλύτερο εύρος κατάληψης και τις λοιπές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, με το όφελος της εξοικονόμησης χρόνου και της παροχής υψηλής ασφάλειας και της λειτουργικότητας. Κριτήρια και παράμετροι που επηρεάζονται με την μεταβολή της τιμής της ταχύτητας μελέτης σε επίπεδο σχεδιασμού είναι τα παρακάτω:

- Μεταβολή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της οδού.
- Αύξηση του όγκου των χωματισμών.
- Αύξηση του όγκου και του μεγέθους των τεχνικών έργων.
- Αύξηση του χρόνου και του κόστους της κατασκευής.
- Μείωση του χρόνου της διαδρομής.
- Βελτίωση του επιπέδου εξυπηρέτησης.
- Βελτίωση συνθηκών οδικής ασφάλειας.

3.2.2.3 Σχέση ταχύτητας μελέτης και γεωμετρικών χαρακτηριστικών

Βασική αρχή στο σχεδιασμό της ταχύτητας μελέτης είναι η διατήρηση σταθερής ταχύτητας σ' όλο το μήκος της οδού και η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί όσο το δυνατόν υψηλότερη ταχύτητα σχεδιασμού, ώστε να διατηρηθεί ένας αποδεκτός βαθμός ασφάλειας, κινητικότητας και αποτελεσματικότητας, κάτω από περιορισμούς που ορίζουν η περιβαλλοντική ποιότητα, αισθητική και κοινωνικές και πολιτικές επιπτώσεις.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον στις σύγχρονες μελέτες οδοποιίας συγκεντρώνει η έννοια της αρμονίας και της συνέχειας μεταξύ των στοιχείων της μελέτης. Η αρμονική ακολουθία των δυναμικών δεδομένων της κίνησης των οχημάτων στα διαδοχικά στοιχεία μελέτης, ενός οδικού τμήματος με σταθερή ταχύτητα μελέτης, δημιουργεί τις προϋποθέσεις για έναν ομοιόμορφο και οικονομικότερο τρόπο οδήγησης. Η ταχύτητα μελέτης επηρεάζει αποφασιστικά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός οδικού τμήματος, καθώς αντιστοιχούν σε αυτήν οριακές και προτεινόμενες τιμές για τα περισσότερα στοιχεία μελέτης καθώς και οι αποδεκτές τιμές για τη συσχέτιση των μεμονωμένων στοιχείων μελέτης. Συγκεκριμένα τα γεωμετρικά στοιχεία που μπορεί να καθορίσει η ταχύτητα μελέτης είναι:

- Ελάχιστες ακτίνες και μήκη των οριζόντιων καμπυλών.
- Ελάχιστες παράμετροι ή μήκη των τόξων συναρμογής.
- Μέγιστες κατά μήκος κλίσεις.
- Ελάχιστες ακτίνες και μήκη των κυρτών και κοίλων κατακόρυφων καμπυλών, λόγω απαιτήσεων ορατότητας.

Τα γεωμετρικά στοιχεία μελέτης της οριζοντιογραφίας και της μηκοτομής, καθορισμένα από την επιλογή της ταχύτητας μελέτης, θα πρέπει να δημιουργούν τις προϋποθέσεις για μία αρμονική χάραξη της οδού στο φυσικό ανάγλυφο. Στην περίπτωση της αύξησης της ταχύτητας μελέτης, η χάραξη είναι πιο τεταμένη, με μεγάλες ακτίνες καμπυλότητας στην οριζοντιογραφία και στη μηκοτομή. Ανάλογα με

το βαθμό πτύχωσης του φυσικού ανάγλυφου, τα βάθη των ορυγμάτων και τα ύψη των επιχωμάτων είναι πολύ πιο σημαντικά και κατά συνέπεια δημιουργείται αύξηση όγκου και έκτασης των χωματουργικών εργασιών.

3.2.2.4 Κριτική θεώρηση ταχύτητας μελέτης

Βασική αρχή της μεθόδου της ταχύτητας μελέτης είναι η διατήρηση σταθερής ταχύτητας σε όλο το μήκος της οδού. Οι οδηγοί όμως μεταβάλλουν συνεχώς την ταχύτητά τους, ανάλογα με το μέγεθος της καμπύλης και το μήκος της ευθυγραμμίας που συναντούν. Επίσης, σε κάθε θέση της οδού οι ταχύτητες των οχημάτων διαφέρουν μεταξύ τους εξαιτίας των διαφορετικών οδηγών και οχημάτων.

Στις περισσότερες προδιαγραφές σχεδιασμού οδών, τα απαιτούμενα μήκη ορατότητας υπολογίζονται με βάση την ταχύτητα μελέτης και επομένως είναι ανεπαρκή σε θέσεις όπου είναι δυνατή η ανάπτυξη μεγαλύτερων ταχυτήτων. Επίσης, τα γειτονικά στοιχεία, δηλαδή οι διαδοχικές καμπύλες και ευθυγραμμίες δεν συσχετίζονται μεταξύ τους και επομένως μπορούν να υπάρξουν μεγάλες διαφορές ταχυτήτων κατά μήκος της οδού και η προσαρμογή της ταχύτητας στα γεωμετρικά στοιχεία δεν είναι πάντα εφικτή. Οι διαφορές αυτές των ταχυτήτων θεωρούνται υπεύθυνες για την πρόκληση διαφόρων τύπων ατυχημάτων. Για τους λόγους αυτούς η έννοια της ταχύτητας μελέτης έχει κριθεί ως ανεπαρκής σε σχέση με το κριτήριο της οδικής ασφάλειας και έχει αντικατασταθεί στις οδηγίες σχεδιασμού υπεραστικών οδών και αυτοκινητοδρόμων της FGSV (2011) (2012).

3.2.3 Λειτουργική ταχύτητα

Όπως διαπιστώθηκε στην προηγούμενη υποενότητα, η ταχύτητα μελέτης δεν μπορεί να αποτελέσει αποκλειστικά κριτήριο για τον προσδιορισμό βασικών γεωμετρικών μεγεθών, που συνδέονται άμεσα με τη δυναμική των κινήσεων ενός οχήματος, όπως η επίκλιση της οδού ή το μήκος ορατότητας. Το μέγεθος της ταχύτητας μελέτης, δεν καθορίζει οπωσδήποτε την πραγματική ταχύτητα κίνησης ενός οχήματος σε κάποια θέση της οδού. Αποτελέσματα ερευνών έχουν δείξει ότι οι πραγματικές ταχύτητες είναι μεγαλύτερες από την ταχύτητα μελέτης. Το γεγονός αυτό αποτέλεσε την αφετηρία για την εισαγωγή της έννοιας της λειτουργικής ταχύτητας, ενός καθοριστικού για τη σύγχρονη οδοποιία στοιχείου μελέτης, η οποία εκφράζει την αναμενόμενη ταχύτητα κινήσεως των οχημάτων σε κάποιο τμήμα της υπό μελέτη οδού.

Μία τιμή ταχύτητας την οποία επιλέγει το 85% των οδηγών, για να κινηθεί σε οποιαδήποτε θέση της οδού κάτω από καλές καιρικές συνθήκες και ορατότητα, μπορεί να θεωρηθεί ως η μέγιστη ασφαλής ταχύτητα για την θέση αυτή. Σύμφωνα με τις οδηγίες μελετών οδικών έργων του ΥΠΕΧΩΔΕ (2001), *η λειτουργική ταχύτητα V_{85} για τις οδούς εκτός κατοικημένων περιοχών, χωρίς παρόδιες κατασκευές, ορίζεται η ταχύτητα με την οποία θα κινηθεί ανεμπόδιστα το 85% των κινουμένων οχημάτων πάνω σε υγρό και καθαρό οδόστρωμα της οδού.* Η αναφορά στο υγρό οδόστρωμα γίνεται τονίζοντας την επίδραση του υγρού οδοστρώματος στη μείωση της αντίστασης ολίσθησης και κατά συνέπεια στην αύξηση της επικινδυνότητας της οδού. Σύμφωνα όμως με μετρήσεις, φαίνεται ότι δεν υπάρχει ουσιαστική διαφορά από στεγνό οδόστρωμα σε υγρό οδόστρωμα, καθώς σημαντική διαφορά παρατηρείται μόνο όταν η ένταση της βροχής είναι τόση ώστε το μήκος ορατότητας των οδηγών να είναι μικρότερο από 150m (Lamm, Psarianos, & Mailaender, 1999). Η χρήση της έννοιας της λειτουργικής ταχύτητας V_{85} εκπεφρασμένη από την τιμή της ταχύτητας, που δεν υπερβαίνει το 85% των οδηγών κάτω από συνθήκες ελεύθερης ροής σε καθαρό και στεγνό οδόστρωμα βασίζεται στη θεωρία πως στην μεγάλη πλειοψηφία τους οι οδηγοί:

- Είναι λογικοί και συνετοί.
- Δεν επιθυμούν να εμπλακούν σε ένα ατύχημα.
- Επιθυμούν να φτάσουν στον προορισμό τους στο μικρότερο δυνατό χρόνο.

3.2.3.1 Σχέση λειτουργικής ταχύτητας και γεωμετρικών χαρακτηριστικών

Με την εισαγωγή της λειτουργικής ταχύτητας στο σχεδιασμό οδών, αλλά και στην αξιολόγηση των ήδη υπαρχουσών, έγινε ένα σοβαρό βήμα στην μείωση της απόκλισης μεταξύ των πραγματικών λειτουργικών δεδομένων και περιορισμών μιας οδού και των αντιστοίχων αντικειμενικών στόχων της μελέτης της οδού. Αποτελεί ένα μέγεθος που χρησιμοποιείται στο γεωμετρικό υπολογισμό μεμονωμένων στοιχείων μελέτης της οριζοντιογραφίας, της μηκοτομής και της διατομής και έχει άμεση σχέση με τη δυναμική της κίνησης των οχημάτων. Πιο συγκεκριμένα, τα γεωμετρικά στοιχεία που καθορίζονται με τη λειτουργική ταχύτητα σε ορισμένες οδηγίες σχεδιασμού αφορούν:

- Επικλίσεις στις οριζόντιες καμπύλες.
- Απαιτούμενα μήκη ορατότητας για στάση και κατά συνέπεια οι ακτίνες των κυρτών κατακόρυφων καμπυλών.
- Απαιτούμενα μήκη ορατότητας για προσπέραση.
- Ελάχιστες οριζόντιες ακτίνες σε περίπτωση εφαρμογής αρνητικής επίκλισης.
- Στοιχεία για την απορροή των ομβρίων.

Η λειτουργική ταχύτητα μεταβάλλεται σε συνάρτηση με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οδού και χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της ποιότητας σχεδιασμού των οδικών τμημάτων όσον αφορά την ασφάλεια.

3.2.3.2 Πρόβλεψη λειτουργικής ταχύτητας

Η οδική συμπεριφορά του οδηγού και η επιλογή της κατάλληλης, κάθε φορά, ταχύτητα κίνησής του εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Η ταχύτητα V85, σύμφωνα με πολλές ερευνητικές εργασίες, κυρίως για τις οδούς με ενιαία επιφάνεια κυκλοφορίας, θεωρείται συνάρτηση ορισμένων γεωμετρικών χαρακτηριστικών της οδού και μεταβάλλεται σε συνάρτηση με τα χαρακτηριστικά αυτά. Οι καθοριστικοί παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή της ταχύτητας V85, είναι η ελικτότητα της μεμονωμένης καμπύλης και το πλάτος της λωρίδας κυκλοφορίας. Η ελικτότητα της μεμονωμένης καμπύλης είναι συνάρτηση της γωνίας αλλαγής κατεύθυνσης και του συνολικού μήκους της καμπύλης, που αποτελείται από το μήκος του κυκλικού τόξου και τα μήκη των εκατέρωθεν τόξων συναρμογής. Η ταχύτητα V85 προσδιορίζεται για κάθε μεμονωμένο γεωμετρικό στοιχείο, καμπύλη ή ευθυγραμμία, καθώς επίσης και για ένα οδικό τμήμα με ενιαία χαρακτηριστικά. Η συσχέτιση της ταχύτητας V85 με την κάθε μεμονωμένη καμπύλη αποτελεί πλέον καθιερωμένη πρακτική στη σύγχρονη οδοποιία.

Η Γερμανία ήταν από τις πρώτες χώρες στις οποίες καθορίστηκε η σχέση μεταξύ λειτουργικής ταχύτητας V85, ελικτότητας και πλάτους της οδού, ενώ μετρήσεις έδειξαν την ανάγκη για αναθεώρηση των σχέσεων, εξαιτίας του αυξημένου επιπέδου λειτουργικής ταχύτητας των τελευταίων δεκαετιών. Στις Η.Π.Α. μετά από μετρήσεις κατέληξαν σε σχέση συσχέτισης της ταχύτητας V85 με διαφορετικά γεωμετρικά στοιχεία της οδού και με τον βαθμό καμπυλότητας Ανάλογες έρευνες έχουν γίνει και σε άλλες χώρες και έχουν δημιουργηθεί εξισώσεις συσχέτισης της λειτουργικής ταχύτητας, ως αποτελέσματα διαφορετικών μοντέλων παλινδρόμησης, με την ελικτότητα της μεμονωμένης καμπύλης. Στην Ελλάδα, για υπεραστικές οδούς με διαχωρισμένες επιφάνειες κυκλοφορίας, δεν υπάρχουν ακόμη τεκμηριωμένες απόψεις, όσον αφορά τη σχέση μεταξύ των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της οδού και της ταχύτητας κυκλοφορίας. Σε οδούς με ενιαία επιφάνεια κυκλοφορίας, η ταχύτητα V85 προσδιορίζεται ως η μέση τιμή των ταχυτήτων και για τις δύο κατευθύνσεις κυκλοφορίας, χωριστά για κάθε μία καμπύλη της χάραξης της οδού, σε συνάρτηση με την ελικτότητα της κάθε μία καμπύλης και τα χαρακτηριστικά του οδικού τμήματος τα οποία αφορούν την κατά μήκος κλίση, το μήκος εφαρμογής της κλίσης και το πλάτος λωρίδας κυκλοφορίας του οδικού τμήματος. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, δεν έχει επιτευχθεί ακόμη η διατύπωση μιας

γενικευμένης μεθόδου που θα επέτρεπε έναν επαρκή και αξιόπιστο προσδιορισμό της λειτουργικής ταχύτητας (Ψαριανός & Αντωνίου, 2012). Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τα μαθηματικά πρότυπα υπολογισμού των λειτουργικών ταχυτήτων παγκοσμίως ο αναγνώστης παραπέμπεται στη σχετική έκθεση του TRB (2011).

3.2.3.3 Παράμετροι που επηρεάζονται με τη μεταβολή της λειτουργικής ταχύτητας

Η ταυτόχρονη επίτευξη και ικανοποίηση των βασικών στόχων κατά τη σωστή χάραξη μίας οδού, δηλαδή η λειτουργία, η ασφάλεια, η οικονομία, η εναρμόνιση με το περιβάλλον και η αισθητική, δεν είναι πάντα εφικτή. Η προσπάθεια ικανοποίησης του ενός στόχου προκαλεί αρνητικές επιπτώσεις στην ικανοποίηση κάποιου άλλου στόχου. Οι παράγοντες που επηρεάζονται από την αλλαγή της λειτουργικής ταχύτητας κατά την κίνηση του οχήματος.

- Αύξηση του λειτουργικού κόστους, καθώς είναι χαρακτηριστικό ότι οι μικρές ταχύτητες δημιουργούν το μεγαλύτερο λειτουργικό κόστος.

- Επιδείνωση συνθηκών οδικής ασφάλειας, καθώς οχήματα τα οποία ταξιδεύουν πολύ γρηγορότερα, έχουν ένα υψηλότερο ποσοστό κινδύνου να εμπλακούν σε ατύχημα.

- Αύξηση των αέριων εκπομπών: Τα οχήματα κατά την κίνησή τους παράγουν διάφορες αέριες εκπομπές σε διαφορετικές ταχύτητες.

- Αύξηση του θορύβου. Ο θόρυβος που προκαλεί το όχημα προέρχεται από δύο πηγές: τη μηχανή του οχήματος και την επαφή ελαστικού και οδοστρώματος. Η δεύτερη αιτία είναι και αυτή που κυριαρχεί και που επηρεάζεται σημαντικά από την αύξηση της ταχύτητας.

- Μεταβολή στην πρόσφυση των ελαστικών. Η ταχύτητα επηρεάζει την πρόσφυση των ελαστικών επί του οδοστρώματος. Η αύξηση της ταχύτητας οδηγεί σε μείωση των συντελεστών τριβής, δηλαδή μείωση της αντίστασης σε ολίσθηση, την στιγμή ακριβώς που οι απαιτήσεις ελέγχου του οχήματος αυξάνουν.

3.2.3.4 Κριτική θεώρηση λειτουργικής ταχύτητας

Η μοντελοποίηση και η εξαγωγή των σχέσεων υπολογισμού της λειτουργικής ταχύτητας γίνεται με ανάλυση παλινδρόμησης βάσει ορισμένων παρατηρήσεων. Κατά τη συλλογή των στοιχείων όμως εμφανίζονται ορισμένες ελλείψεις που εντοπίζουν οι Ψαριανός & Αντωνίου (2012). Οι ελλείψεις αυτές αφορούν:

- Την ανεπαρκή κάλυψη των όλων των συνθηκών από τα δεδομένα.

- Το μικρό δείγμα παρατηρήσεων του οποίου η ακρίβεια μπορεί να επιβαρυνθεί περαιτέρω ανάλογα με τη μέθοδο απόκτησης τους.

- Την επιλογή του αριθμού των θέσεων μέτρησης.

- Τους διαφορετικούς τύπους οχημάτων.

Επίσης, κατά την προτυποποίηση των λειτουργικών ταχυτήτων γίνονται υποθέσεις για την οδική συμπεριφορά που δεν ανταποκρίνονται απαραίτητα στην πραγματικότητα. Συγκεκριμένα, γίνεται θεώρηση ότι οι οδηγοί των οχημάτων επιταχύνουν μόνο κατά τη διέλευση από ευθυγραμμίες που προηγούνται των καμπυλών ενώ η επιτάχυνση θεωρείται ίδια στις περιπτώσεις διέλευσης από κατακόρυφες καμπύλες. Επίσης, η εκτίμηση της ταχύτητας με βάση τα πρότυπα αυτά αφορά μόνο τις θέσεις εναλλαγής των γεωμετρικών στοιχείων. Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο αποτελεί το γεγονός πως οι παρατηρήσεις είναι εξαρτημένες, ενώ οι μετρούμενες τιμές του δείγματος που λαμβάνονται υπ' όψιν

για τη διαμόρφωση του μαθηματικού προτύπου έχουν μικρό εύρος και συνεπώς η επέκταση του σε τιμές εκτός του εύρους παρατηρήσεων είναι μάλλον αυθαίρετη με άγνωστες επιπτώσεις στους υπολογισμούς των ταχυτήτων. Άλλοι περιορισμοί των μαθηματικών αυτών προτύπων αφορούν το γεγονός πως δε γίνεται συσχέτιση των τιμών σε γεωμετρικά στοιχεία με συνδυασμό οριζοντιογραφίας και μηκοτομής καθώς μόνο τα στοιχεία της οριζοντιογραφίας είναι αυτά που λαμβάνονται κυρίως υπ' όψιν. Τέλος, στις περιπτώσεις όπου παρατηρούνται υψηλές ή χαμηλές ταχύτητες με χαμηλή μεταβλητότητα δημιουργείται πρόβλημα στην επιλογή της V85 αφού τα στοιχεία που έχουν ωθήσει στην επιλογή αυτή της ταχύτητας ως χαρακτηριστικής δεν ισχύουν απαραίτητα στις περιπτώσεις αυτές.

3.2.4 Επιτρεπόμενη ταχύτητα

Η επιτρεπόμενη ταχύτητα είναι το τοπικό ή γενικά ισχύον μέγιστο όριο ταχύτητας, το οποίο κανονικά καθορίζεται με βάση την κατηγορία της οδού. Παρ' ότι τα στοιχεία μελέτης της οδού δεν προσδιορίζονται με βάση την επιτρεπόμενη ταχύτητα , η ταχύτητα αυτή θεωρείται καθοριστική, δεδομένου ότι η ταχύτητα μελέτης που σχετίζεται άμεσα με τα στοιχεία μελέτης της οδού, πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση από την επιτρεπόμενη ταχύτητα.

Τα όρια ταχύτητας σε αστικές περιοχές βρίσκονται σε αρμονία στις περισσότερες Ευρωπαϊκές χώρες, αλλά υπάρχει μεγάλη μεταβολή στις τιμές των ορίων στις υπεραστικές οδούς και στους αυτοκινητοδρόμους. Από τις υπάρχουσες μετρήσεις της λειτουργικής ταχύτητας, φαίνεται πως ένα συγκεκριμένο ποσοστό των οδηγών οδηγεί πολύ γρήγορα για τις υπάρχουσες συνθήκες και ένα συγκεκριμένο ποσοστό κινείται με μία παράλογα αργή ταχύτητα σε σύγκριση με την τάση του πληθυσμού των οδηγών που διαμορφώνουν τη ροή της κυκλοφορίας. Η θέσπιση ορίου ταχύτητας κατώτερου της κρίσιμης αυτής τιμής θα καθιστούσε παράνομο ένα μεγάλο ποσοστό λογικών οδηγών.

3.2.5 Σχέση καθοριστικών ταχυτήτων

Με την επεξεργασία των αποτελεσμάτων διαφόρων μετρήσεων στις Η.Π.Α., έγινε προσπάθεια δημιουργίας εξισώσεων παλινδρόμησης για την πρόβλεψη της λειτουργικής ταχύτητας σε σχέση με το όριο ταχύτητας από τους Fitzpatrick, Carlson, Brewer, Wooldridge, & Miaou (2003). Έτσι, ενώ η σχέση μεταξύ λειτουργικής ταχύτητας και ορίου ταχύτητας μπορεί να καθοριστεί, η σχέση μεταξύ λειτουργικής ταχύτητας και ταχύτητας μελέτης δεν μπορεί να καθοριστεί με την ίδια αξιοπιστία, καθώς η ταχύτητα μελέτης φαίνεται να έχει πολύ μικρή επίδραση στη λειτουργική ταχύτητα.

Δημιουργείται το ερώτημα «κατά πόσο η αλλαγή του ορίου ταχύτητας μπορεί να επηρεάσει τη λειτουργική ταχύτητα των οχημάτων». Πολλοί ερευνητές ισχυρίζονται ότι η αλλαγή του ορίου ταχύτητας δεν έχει επίπτωση στην λειτουργική ταχύτητα. Ο οδηγός, ως συνετός και λογικός, επιλέγει την ταχύτητα οδήγησης στα πλαίσια της ασφάλειας και της άνεσης. Άλλοι όμως ερευνητές ισχυρίζονται ότι η αλλαγή του ορίου ταχύτητας επηρεάζει τους οδηγούς ως προς τη συμμόρφωσή των στα επιβληθέντα όρια και όχι τόσο στην οδική τους συμπεριφορά. Αποτελέσματα έχουν δείξει μία μικρή αλλαγή της λειτουργικής ταχύτητας. Σε κάθε περίπτωση οι πολιτικές καθορισμού και επιβολής ορίων ταχύτητας θα πρέπει να στοχεύουν στη μείωση της διασποράς των παρατηρούμενων ταχυτήτων και η επιβολή του ορίου ταχύτητας να αποτελεί το έσχατο μέτρο για τη βελτίωση των συνθηκών ασφάλειας.

3.3 Δυναμική κίνησης οχημάτων

Η σχέση που υπάρχει μεταξύ ελαστικού του τροχού και οδοστρώματος σε συνάρτηση με την ταχύτητα του οχήματος αποτελεί αναπόσπαστο στοιχείο για τη διατύπωση των αρχών των οδηγιών γεωμετρικού σχεδιασμού των οδών. Στις μελέτες οδοποιίας, η εξέταση των δυνάμεων, που επενεργούν σε ένα όχημα και οι οποίες χρησιμεύουν στην επιλογή των τιμών των στοιχείων μελέτης, στηρίζεται στην παραδοχή ότι το όχημα είναι ένα στερεό σώμα, στο κέντρο βάρους του οποίου ασκούνται οι διάφορες

δυνάμεις. Αυτό σημαίνει ότι η μάζα του οχήματος θεωρείται συγκεντρωμένη στο κέντρο βάρους του και παραλείπεται το πραγματικό σύστημα δυνάμεων, που εμφανίζεται στα διάφορα μέρη του οχήματος (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2001).

Υπάρχουν πολλές και ουσιαστικές διαφορές ως προς την επιλογή των επιτρεπόμενων τιμών του συντελεστή της εφαπτομενικής και της εγκάρσιας συνιστώσας της τριβής στις οδηγίες γεωμετρικού σχεδιασμού των οδών παγκοσμίως. Οι διαφορές αυτές έχουν με τη σειρά τους καθοριστική επίδραση στον υπολογισμό των ελαχίστων ακτινών των οριζόντιων καμπυλών, των απαιτουμένων μηκών ορατότητας, των ελάχιστων ακτινών των κατακόρυφων καμπυλών σε αλληλεξάρτηση με τις εκάστοτε ισχύουσες ταχύτητες μελέτης ή λειτουργικές ταχύτητες. Επίσης, απαιτείται σχεδόν πάντα ο προσδιορισμός ενός επαρκούς περιθωρίου ασφαλείας, όσον αφορά την δυναμική της κίνησης των οχημάτων, χωρίς όμως να γίνονται πλήρως κατανοητά τα όρια που υιοθετούν οι διάφοροι κανονισμοί. Αυτό συμβαίνει επειδή τις περισσότερες φορές δεν είναι γνωστά τα δεδομένα, με τα οποία έγινε η επιλογή των επιτρεπομένων τιμών των συντελεστών τριβής.

3.3.1 Πρόσφυση οδοστρώματος

Μία από τις βασικές παραμέτρους της ασφάλειας κατά την κυκλοφορία των οχημάτων αποτελεί η ολισθηρότητα της υγρής επιφανείας της οδού, δηλαδή η πρόσφυση του οδοστρώματος. Ως πρόσφυση του οδοστρώματος χαρακτηρίζεται εκείνη η φυσική κατάσταση που εμφανίζεται στην κοινή επιφάνεια ελαστικού και οδοστρώματος και η οποία οφείλεται στη συνάφεια, στη στατική τριβή και στην αντίσταση λόγω τραχύτητας. Κατά την θεώρηση αυτή οι δύο επιφάνειες του ελαστικού και του οδοστρώματος θεωρούνται ως ισοδύναμες. Η τιμή του συντελεστή τριβής που εκφράζει την πρόσφυση του οδοστρώματος, παρουσιάζει διακυμάνσεις λόγω των πολλών παραγόντων που την επηρεάζουν, όπως η πίεση, η σύνθεση, η μορφή και το βάθος των ραβδώσεων των ελαστικών, ο τύπος και η κατάσταση του οδοστρώματος, η ύπαρξη υγρασίας, λάσπης, χιονιού, πάγου και άλλοι παράγοντες.

3.3.1.1 Συντελεστής τριβής ολίσθησης

Από την πρόσφυση του οδοστρώματος εξαρτάται η μέγιστη τιμή των δυνάμεων της προώθησης και της πέδησης καθώς και των εγκάρσιων δυνάμεων, που ασκούνται στα ελαστικά των τροχών των αυτοκινήτων και οι οποίες επενεργούν στο οδόστρωμα ως δυνάμεις αντίδρασης. Η πρόσφυση του οδοστρώματος στις περισσότερες χώρες εκφράζεται με τον συντελεστή τριβής ολίσθησης κάτω από ορισμένες συνθήκες μέτρησης. Ο συντελεστής τριβής ολίσθησης είναι ο συντελεστής τριβής που αναπτύσσεται μεταξύ ελαστικού και οδοστρώματος, όταν οι τροχοί είναι ακινητοποιημένοι.

3.3.1.2 Συντελεστής εφαπτομενικής τριβής

Με βάση τις μετρήσεις του συντελεστή ολίσθησης σε αντιπροσωπευτικά υγρά οδοστρώματα, προκύπτει η επιτρεπόμενη τιμή του συντελεστή εφαπτομενικής τριβής. Κατά κανόνα η επιλογή της τιμής του επιτρεπόμενου συντελεστή εφαπτομενικής τριβής γίνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να καλύπτεται το 80 έως το 95% των οδοστρωμάτων μιας χώρας. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται με τη μελέτη της οδού, υψηλός συντελεστής ασφαλείας κατά την κίνηση των οχημάτων στις καμπύλες. Βέβαια, η μέθοδος αυτή έχει αποδειχθεί μη εφαρμόσιμη σε ορισμένες χώρες λόγω εμφάνισης μικρών τιμών του συντελεστή εφαπτομενικής τριβής. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η υιοθέτηση τιμών που να καλύπτουν τόσο μεγάλο ποσοστό των οδοστρωμάτων οδηγεί όχι μόνο σε ιδιαίτερα αντιοικονομικές κατασκευές οδών, αλλά και σε κατασκευές, οι οποίες θα είχαν ανεπιθύμητες επιπτώσεις στο περιβάλλον (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2001). Στην εφαπτομενική κατεύθυνση διατίθεται το 92% έως το 87% της τιμής του συντελεστή εφαπτομενικής τριβής κατά την κίνηση του οχήματος σε καμπύλες, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά την επιτάχυνση, την επιβράδυνση, την πέδηση ή άλλους αναγκαίους ελιγμούς του οχήματος.

3.3.1.3 Συντελεστής εγκάρσιας τριβής

Εκτός από τον ορισμό της μέγιστης επιτρεπόμενης τιμής του συντελεστή εφαπτομενικής τριβής σε συνάρτηση με την ταχύτητα πρέπει να επιλεγεί ο συντελεστής εκμετάλλευσης της μέγιστης επιτρεπόμενης τιμής του συντελεστή εγκάρσιας τριβής.

Στις οδηγίες γεωμετρικού σχεδιασμού οδών της Austroads (2010) θεωρείται ότι σε μικρές ταχύτητες οι οδηγοί είναι περισσότερο ανεκτικοί σε μεγάλες πλευρικές επιταχύνσεις, και επομένως προβλέπεται να χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό των οδών μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή πλευρικής τριβής, για τον προσδιορισμό των οποίων πραγματοποιήθηκαν εκτεταμένες μετρήσεις στο οδικό δίκτυο της Αυστραλίας. Η προσέγγιση αυτή φαίνεται να είναι σύμφωνη και με τη διαπίστωση ότι σε καμπύλες μικρής ακτίνας παρατηρείται συνήθως σημαντική διαφορά μεταξύ της ταχύτητας μελέτης και της λειτουργικής ταχύτητας, που υποδεικνύει ότι στην πράξη οι οδηγοί πράγματι αξιοποιούν τον αυξημένο συντελεστή πλευρικής τριβής, ανεχόμενοι τη μεγαλύτερη πλευρική επιτάχυνση.

Πρέπει να επισημανθεί ότι οι μέγιστες τιμές των συντελεστών τριβής που δίνονται στις οδηγίες αποτελούν τιμές σχεδιασμού, και επομένως θα πρέπει να καλύπτουν και τις δυσμενέστερες συνθήκες πλευρικής τριβής που υπάρχουν στο οδικό δίκτυο.

3.3.2 Κριτική θεώρηση της εφαρμοζόμενης θεωρίας δυναμικής της κίνησης

Οι περισσότερες οδηγίες χάραξης οδών έχουν προσεγγίσει εμπειρικά την δυναμική του οχήματος και ο προσδιορισμός κρίσιμων γεωμετρικών μεγεθών όπως για παράδειγμα η ακτίνα της οριζόντιας και η ακτίνα της κυρτής κατακόρυφης καμπύλης γίνονται με βάση την συμπεριφορά του οχήματος κατά την πέδηση (Ψαριανός, 2006). Συγκεκριμένα, ο προσδιορισμός του πρώτου μεγέθους γίνεται με τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται ισχυρό απόθεμα πρόσφυσης στην επιτρόχια κατεύθυνση, η διάθεση του οποίου να είναι δυνατή σε περίπτωση πέδησης ή ανεπιθύμητων ελιγμών. Αντίστοιχα, ο προσδιορισμός της ακτίνας της κυρτής κατακόρυφης καμπύλης προϋποθέτει τον προσδιορισμό του απαιτούμενου μήκους ορατότητας μέχρι πλήρους στάσης. Ένα ισχυρό μειονέκτημα είναι ότι στον προσδιορισμό των κρίσιμων γεωμετρικών μεγεθών αγνοείται η δυναμική κίνησης των βαρέων οχημάτων δεδομένου ότι σαν όχημα σχεδιασμού θεωρείται το επιβατηγό όχημα.

Η αντιμετώπιση του οχήματος ως στερεό σώμα όπου η μάζα του είναι συγκεντρωμένη στο κέντρο βάρους παρουσιάζει σημαντικές απλουστεύσεις και παραδοχές που δεν ανταποκρίνονται απαραίτητα στην πραγματική κίνηση των οχημάτων, ενώ αγνοούνται σημαντικές παραμέτρους της μελέτης που επηρεάζουν την οδική ασφάλεια (Κιμούνδρης, 1994). Βασικά μειονεκτήματα αυτής της θεώρησης είναι τα παρακάτω:

- Η αναγωγή της μάζας του οχήματος σε ένα σημείο, αν και απλουστεύει τους υπολογισμούς δεν συμπεριλαμβάνει τις τρισδιάστατες δυνάμεις και ροπές που εξασκούνται σε κάθε τροχό του οχήματος. Παράμετροι όπως τύπος οχήματος, μάζα, θέση κέντρου βάρους αγνοούνται ενώ επίσης δεν υπάρχει διαχωρισμός μεταξύ κινητήριου και μη κινητήριου άξονα.

- Η κίνηση του οχήματος εξετάζεται ανεξάρτητα στην επιτρόχια και στην εγκάρσια κατεύθυνση και δεν περιλαμβάνονται οι περιορισμοί με τους οποίους οι συνιστώσες της εξ' επαφής δύναμης επιδρούν.

- Ο συντελεστής τριβής χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της σχέσης της ασφαλούς ταχύτητας με την ακτίνα της καμπύλης. Υπάρχουν όμως παράγοντες που επηρεάζουν τον συντελεστή τριβής και δεν λαμβάνονται υπ' όψιν στον υπολογισμό της ταχύτητας μιας δεδομένης καμπύλης.

- Ο οδηγός αδυνατεί να αντιληφθεί το πραγματικό μέγεθος του συντελεστή τριβής, οπότε δεν καθορίζει την ταχύτητά του με βάση αυτόν. Όταν ο οδηγός αντιληφθεί την έλλειψη τριβής, μέσω της ολίσθησης έχει ήδη χάσει τον έλεγχο του οχήματος και είναι δύσκολο να προβεί σε διορθωτικές ενέργειες.

- Ο οδηγός δεν καθορίζει απαραίτητα την ταχύτητά του βάσει της πιθανότητας ύπαρξης κάποιου πιθανού εμποδίου. Επομένως, η χρήση ενός ποσοστού του συντελεστή τριβής δεν είναι σίγουρο πως ανταποκρίνεται στις πραγματικές συνθήκες. Εφ' όσον ο οδηγός δεν γνωρίζει τη διατιθέμενη τιμή του συντελεστή τριβής, αντίστοιχα δεν μειώνει την ταχύτητα του για εξασφαλίσει απόθεμα συντελεστή τριβής.

Το γεγονός ότι ο οδηγός δεν έχει γνώση του συντελεστή τριβής ώστε να καθορίσει την ταχύτητά του με βάση αυτόν, αντικατοπτρίζεται και από την παρατήρηση ότι δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές στις ταχύτητες που αναπτύσσονται σε στεγνό και υγρό οδόστρωμα. Ο συντελεστής τριβής σε στεγνό οδόστρωμα είναι αρκετά μεγαλύτερος από ότι σε υγρό οδόστρωμα, οπότε θεωρητικά θα έπρεπε να υπάρχουν ανάλογες μεταβολές στις επιλεγόμενες ταχύτητες. Από τα παραπάνω φαίνεται πως τα μεγέθη των γεωμετρικών στοιχείων που καθορίζει ο μελετητής με βάση μια ταχύτητα μελέτης δεν είναι σίγουρο πως ανταποκρίνονται στις πραγματικές συνθήκες καθώς οι οδηγοί ενδεχομένως καθορίζουν την ταχύτητά τους βάσει διαφορετικών κριτηρίων από αυτά που λαμβάνονται υπ' όψιν.

3.4 Οριζοντιογραφία

Η οριζοντιογραφία είναι η προβολή της οδού στο οριζόντιο επίπεδο. Στοιχεία της οριζοντιογραφίας μιας αποτελούν οι ευθυγραμμίες, τα κυκλικά τόξα και τα τόξα συναρμογής τα οποία παρεμβάλλονται μεταξύ ευθυγραμμιών και κυκλικών τόξων για την ομαλή μετάβαση σε αυτά. Τα στοιχεία αυτά περιγράφονται στις επόμενες ενότητες.

3.4.1 Ευθυγραμμία

Η χρήση της ευθυγραμμίας παρουσιάζει πλεονεκτήματα στις παρακάτω περιπτώσεις:

- Σε περιοχές με ειδική τοπογραφική διαμόρφωση, όπως πεδινά εδάφη και κοιλάδες

- Σε περιοχές κόμβων και βοηθητικών εγκαταστάσεων

- Σε περιοχές με ελαττωμένη ορατότητα για προσπέραση

- Σε περιοχές με ειδικές πολεοδομικές συνθήκες.

Γενικά όμως πρέπει να αποφεύγονται μεγάλες ευθυγραμμίες σε τμήματα οδών, ιδιαίτερα όταν έχουν σταθερή κατά μήκος κλίση, γιατί εμφανίζονται μειονεκτήματα (FGSV, 2011), όπως τα παρακάτω:

- Δυσχεραίνεται η εκτίμηση των αποστάσεων και των ταχυτήτων των οχημάτων.

- Αυξάνεται τη νύχτα ο κίνδυνος θάμβωσης από τα φώτα των αντιθέτως κινουμένων οχημάτων

- Ενισχύονται τα αισθήματα κόπωσης και μονοτονίας, που μπορεί να επιδράσουν αρνητικά στην προσοχή του οδηγού

- Υπάρχει δυσκολία προσαρμογής στη μορφολογία των λοφωδών και ορεινών εδαφών

3.4.2 Κυκλικό τόξο

Για τα κυκλικά τόξα επιλέγονται οι μεγαλύτερες δυνατές ακτίνες ιδιαίτερα στις περιπτώσεις των μικρών επίκεντρων γωνιών και όταν ακολουθούν ευθυγραμμίες, προκειμένου να επιτευχθούν :

- Μικρά μήκη καμπυλών
- Επαρκή μήκη ορατότητας για προσπέραση
- Αρμονία και συνέχεια στην οδική συμπεριφορά

Παράλληλα με τους προαναφερθέντες σκοπούς, η επιλογή των ακτινών θα πρέπει να είναι τέτοια, ώστε:

- Η οδός να προσαρμόζεται κατά μορφή και μέγεθος με το ανάγλυφο του εδάφους και το τοπίο,
- Να εξασφαλίζεται η συμβατότητα μεταξύ οριζοντιογραφίας και μηκοτομής, και να επιτυγχάνεται η καλή ανάπτυξη της οδού στο χώρο, όσον αφορά τα μεγέθη και την αλληλουχία των καμπυλών.
- Να εξασφαλίζεται η αρμονική σχέση μεταξύ ταχύτητας μελέτης και λειτουργικής ταχύτητας

3.4.3 Τόξα συναρμογής

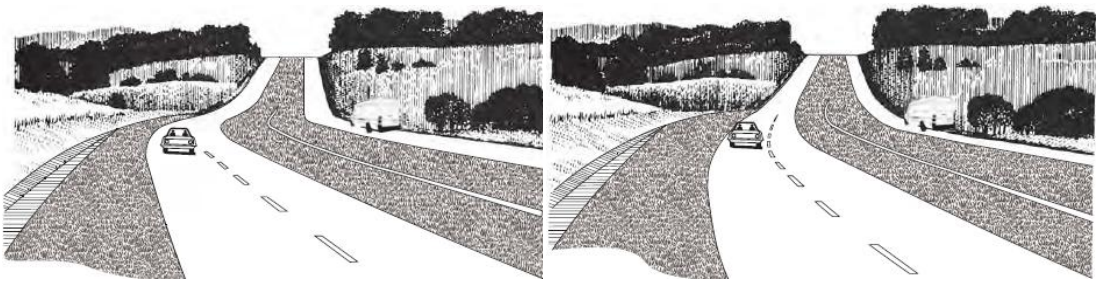
Τόξο συναρμογής είναι η καμπύλη που συνδέει το ευθύγραμμο και το κυκλικό τμήμα του άξονα της οδού στις περιοχές των κορυφών της πολυγωνικής της οδού. Στον σύγχρονο οδικό σχεδιασμό, απαιτείται η χρήση καμπυλών συναρμογής μεταξύ ευθυγραμμιών και κυκλικών τόξων εκτός και αν χρησιμοποιούνται κυκλικά τόξα μεγάλης ακτίνας ή χαμηλή ταχύτητα μελέτης.

Οι καμπύλες συναρμογής χρησιμοποιούνται για την ομαλή εναλλαγή μεταξύ κυκλικών τόξων διαφορετικής ακτίνας και επίκλισης, ώστε να διασφαλιστεί ένα πιο άνετο περιβάλλον οδήγησης. Αρχικά η μετάβαση από την ευθυγραμμία στο τόξο γινόταν μέσω κυκλικού τόξου διπλάσιας ακτίνας. Με τον τρόπο αυτόν όμως δεν υπήρχε σταθερή μεταβολή της καμπυλότητας, αλλά μόνο κλιμάκωσή της (Κανελλαΐδης, Μαλέρδος, Γλαρός, Δραγομάνοβιτς, & Βαρδάκη, 2014). Στόχος της χρήσης των τόξων συναρμογής είναι:

- Η χρησιμοποίηση του μήκους τους για την ομαλή συναρμογή των επικλίσεων
- Η άνεση των οδηγών με βαθμιαία μεταβολή της θέσης του τιμονιού κατά την είσοδο και έξοδο σε κυκλικά τόξα
- Η εξασφάλιση της συνεχούς γραμμικής μεταβολής της φυγόκεντρης επιτάχυνσης
- Η δημιουργία μιας οπτικά ικανοποιητικής χάραξης με συνεχή μεταβολή της καμπυλότητας

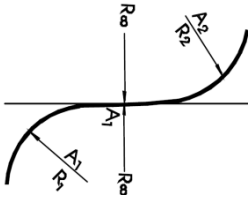
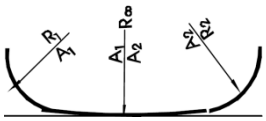
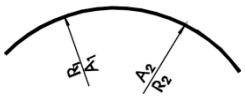
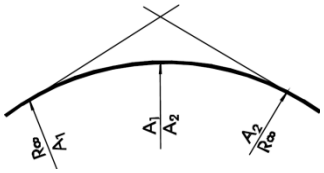
Βέβαια, παρά τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η χρήση των τόξων συναρμογής, σύμφωνα με την AASHTO (2011) δεν υπάρχουν στοιχεία που να αποδεικνύουν ότι τα τόξα συναρμογής συμβάλλουν καθοριστικά στην οδική ασφάλεια. Για το λόγο αυτό επιλέγεται να μην χρησιμοποιούνται από πολλούς φορείς κατά τον γεωμετρικό σχεδιασμό των οδών.

Σχήμα 3.2: Καμπύλη χωρίς τόξο συναρμογής και καμπύλη με τόξο συναρμογής (Πηγή: AASHTO, 2011)



Η απλούστερη μαθηματική καμπύλη που μπορεί να διαταχθεί μεταξύ ευθυγραμμίας, της οποίας η καμπυλότητα είναι μηδενική εξ' ορισμού, και του κυκλικού τόξου ορισμένης καμπυλότητας, είναι η κλωθοειδής. Αυτή προτάθηκε από τον Criswell (1935) και αποτελεί την πιο διαδεδομένη καμπύλη συναρμογής που χρησιμοποιείται στην οδοποιία, καθώς παρουσιάζει συνεχή μεταβολή της καμπυλότητάς της. Οι διάφορες δυνατότητες συνδυασμών ευθυγραμμίας, κυκλικού τόξου και τόξου συναρμογής παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα.

Πίνακας 3.1: Συνδυασμοί τόξων οριζοντιογραφίας

Σύνδεση	Χρησιμοποιήσιμο	Δεν συνιστάται
Ευθεία με κυκλικό τόξο	Απλό τόξο συναρμογής	Κλωθοειδής κανίστρου
Δύο κυκλικά τόξα	Σιγμοειδής καμπύλη 	C – καμπύλη 
Δύο κυκλικά τόξα (το ένα εντός του άλλου)	Ωοειδής καμπύλη 	
Δύο ευθυγραμμίες μόνο με τόξα συναρμογής		Κλωθοειδής κορυφής 

Στη συνέχεια περιγράφονται οι κύριες συνιστώμενες συνδέσεις δηλαδή η απλή κλωθοειδής, η σιγμοειδής καμπύλης και η ωοειδής. Σημειώνεται ότι όλες οι υπόλοιπες μορφές συνδέσεων όπως η κλωθοειδής κορυφής, η κλωθοειδής κανίστρου και η C-κλωθοειδής, των οποίων η χρήση δεν

συνιστάται δεν εμφανίζονται στο υπό ανάπτυξη πρότυπο βελτιστοποίησης χαράξεων μέσω περιορισμών που έχουν τεθεί. Αναλυτική περιγραφή και υπολογισμούς όλων των μορφών συνδέσεων κάνει ο Ψαριανός (2001).

3.4.3.1 Απλή κλωθοειδής

Το απλό τόξο συναρμογής δίνει τη δυνατότητα ομαλής μετάβασης από την ευθυγραμμία στο κυκλικό τόξο. Με τη χρησιμοποίηση παραμέτρου κλωθοειδούς με μεγάλες τιμές για μικρές τιμές της ακτίνας, το μήκος συναρμογής γίνεται μεγαλύτερο. Στην περίπτωση επίσης μεγάλων ευθυγραμμιών και διατομών μεγάλου πλάτους πρέπει το τόξο συναρμογής να είναι μεγάλου μήκους, ώστε η συναρμογή να είναι οπτικά πιο ομαλή.

Τα παραπάνω ισχύουν για οδούς στις οποίες η αλληλουχία των ακτινών είναι επιτυχής και στις οποίες αναμένεται να αναπτυχθεί μία ομοιόμορφη ταχύτητα. Αν όμως οι περιορισμοί για την αλληλουχία των ακτινών δεν μπορεί να ικανοποιηθούν πρέπει τότε να γίνεται όσο το δυνατόν πιο έγκαιρα η προειδοποίηση για το κυκλικό τόξο που ακολουθεί με την επιλογή μιας μικρής αλλά επιτρεπόμενης τιμής της παραμέτρου της κλωθοειδούς. Τότε η συναρμογή θα εμφανισθεί οπτικά πιο "απότομη" και ο οδηγός θα προειδοποιηθεί έγκαιρα να μειώσει την ταχύτητά του μετά το τέλος μιας μεγάλης ευθυγραμμίας.

3.4.3.2 Σιγμοειδής καμπύλη

Η σιγμοειδής καμπύλη ή S-καμπύλη αποτελείται από δύο διαδοχικές αντίρροπες κλωθοειδείς με κοινό σημείο επαφής την αρχή τους. Για κάθε κλάδο ισχύουν οι περιορισμοί για την απλή κλωθοειδή. Βέβαια στη συγκεκριμένη περίπτωση για λόγους αρμονίας στη χάραξη των καμπύλων και ομοιόμορφης μεταβολής των επικλίσεων πρέπει οι δύο κλωθοειδείς να έχουν περίπου ίσες παραμέτρους.

3.4.3.3 Ωοειδής καμπύλη

Η ωοειδής καμπύλη είναι τμήμα κλωθοειδούς το οποίο συνδέει δύο ομόρροπα κυκλικά τόξα. Το ένα κυκλικό τόξο πρέπει να βρίσκεται στο εσωτερικό του άλλου χωρίς να είναι ομόκεντρο. Για να είναι οπτικά εμφανής η ωοειδής καμπύλη πρέπει να υπάρχει μία μεταβολή της γωνίας διεύθυνσης κατά μήκος της τουλάχιστον κατά 3,5 gon. Σημειώνεται ότι η ωοειδής καμπύλη δεν έχει ληφθεί υπ' όψιν στη διαμόρφωση του μαθηματικού προτύπου βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων της παρούσας εργασίας. Η συμπερίληψη ωοειδών καμπυλών θα γίνει σε επόμενη εργασία.

3.5 Μηκοτομή

Η μηκοτομή της οδού είναι το ανάπτυγμα της τομής της οδού και του εδάφους με την κυλινδρική επιφάνεια που έχει οδηγό καμπύλη τον άξονα της οδού και γενέτειρες κατακόρυφες ευθείες. Η απεικόνιση του εδάφους στη μηκοτομή ονομάζεται γραμμή εδάφους ενώ η απεικόνιση του άξονα της οδού, στη φάση που έχει κατασκευασθεί η τελική επιφάνεια κύλισης, ονομάζεται ερυθρά γραμμή. Επισημαίνεται ότι κατά κανόνα η οδηγός καμπύλη της κυλινδρικής επιφάνειας είναι ο άξονας της οδού και μόνο σε ειδικές περιπτώσεις είναι μία από τις οριογραμμές της. Στα αντίστοιχα σχέδια, η μηκοτομή της οδού παρίσταται ως επίπεδη γραμμή σε ορθογώνιο σύστημα αξόνων όπου οι τετμημένες είναι οι χιλιομετρικές θέσεις των σημείων του άξονα, όπως προκύπτουν από την οριζοντιογραφία, και οι τεταγμένες τα υψόμετρά τους.

3.5.1 Κατά μήκος κλίσεις

Η κατά μήκος κλίση του άξονα της οδού είναι η εφαπτομένη της γωνίας που σχηματίζει ο άξονας με το οριζόντιο επίπεδο προβολής. Οι κατά μήκος κλίσεις, για λόγους ασφάλειας της κυκλοφορίας,

εξοικονόμησης ενέργειας, μείωσης εκπομπής καυσαερίων και ποιότητας κυκλοφοριακής ροής, πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρές. Πρέπει όμως για λόγους μείωσης του κόστους κατασκευής της οδού και διατήρησης της μορφής του τοπίου να προσαρμόζονται στη μορφολογία του εδάφους. Εντονότερες κατά μήκος κλίσεις έχουν τα εξής μειονεκτήματα (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2001):

- Υψηλότερη ρύπανση.
- Μεγαλύτερη πιθανότητα ατυχημάτων.
- Διασπορά εύφλεκτων υλικών με μεγάλη ταχύτητα.
- Μείωση της ταχύτητας των βαρέων οχημάτων.

Αν δεν είναι δυνατόν να αναπτυχθούν οι αναμενόμενες λειτουργικές ταχύτητες σε ορισμένες ανωφέρειες, πρέπει να διερευνάται η πιθανότητα διάταξης μίας πρόσθετης λωρίδας για τα βαρέα οχήματα ή αλλαγής της χάραξης της οδού.

3.5.2 Τόξα στρογγύλευσης

Η στρογγύλευση της μηκοτομής γίνεται συνήθως με τη χρησιμοποίηση της τετραγωνικής παραβολής ως προσέγγισης του εγγύτατου κύκλου της καμπύλης του οποίου η ακτίνα ισούται με την ακτίνα καμπυλότητας στην κορυφή της παραβολής. Οι ακτίνες των κοίλων και κυρτών καμπύλων πρέπει να επιλέγονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε σε συνδυασμό και με την οριζοντιογραφία της οδού (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2001):

- Να προκύπτει μια αρμονική χάραξη της οδού στο χώρο.
- Να εξασφαλίζεται η οδική ασφάλεια με όσο το δυνατό καλύτερες συνθήκες ορατότητας.
- Να γίνεται η καλύτερη δυνατή προσαρμογή στην υπάρχουσα μορφή του τοπίου και στη μορφολογία του εδάφους.

Οι τιμές των ελάχιστων ακτινών προκύπτουν από τις απαιτήσεις ορατότητας, δυναμικής της κυκλοφορίας και αποφυγής οπτικών θλάσεων. Η παράλειψη της καμπύλης συναρμογής συνιστάται να αποφεύγεται στις εξής περιπτώσεις :

- Σε θέσεις γεφυρών συμπεριλαμβάνοντας και τα άκρα των γεφυρών.
- Σε θέσεις ιρλανδικών ρείθρων, δηλαδή με ροή επάνω στην οδό.
- Σε άλλες θέσεις όπου απαιτείται προσεκτική διαμόρφωση των κλίσεων.

Οι κυρτές και οι κοίλες καμπύλες συνδέονται κατά κανόνα με ευθυγραμμίες. Είναι προτιμότερη η άμεση επαφή των κατακόρυφων καμπυλών χωρίς παρεμβολή ευθυγραμμίας. Η σύνδεση δύο κυρτών ή δύο κοίλων κατακόρυφων καμπυλών συναρμογής με ένα μικρό ενδιάμεσο ευθύγραμμο τμήμα υπόκειται τους κανόνες μελέτης της οδού στον χώρο.

3.6 Ορατότητα

Η επιλογή της ταχύτητας και της τροχιάς εξαρτάται από την δυνατότητα των οδηγών να δουν τον δρόμο μπροστά τους. Οι οδηγοί πρέπει να βλέπουν μπροστά από το όχημά τους και αρκετά μακριά ώστε να αντιλαμβάνονται με μεγάλη ακρίβεια τη χάραξη της οδού και τα χαρακτηριστικά της οδού. Η

εικόνα της οδού περιλαμβάνει επίσης και τα πλευρικά εμπόδια όπως στηρίγματα σημάτων, στηθαία, βάθρα γεφυρών και κιγκλιδώματα τα οποία επηρεάζουν τη συμπεριφορά του οδηγού και επομένως πρέπει να είναι ορατά με ευκρίνεια.

Ένα από τα βασικά στοιχεία κατά τη μελέτη μιας οδού, προκειμένου να υπάρχει ασφάλεια στην κυκλοφορία, είναι η εξασφάλιση επαρκούς μήκους ορατότητας, δηλαδή της δυνατότητας του οδηγού να βλέπει ελεύθερα εμπρός του κατά τη διαδρομή, σε επαρκές μήκος.

3.6.1 Τα μήκη ορατότητας στον σχεδιασμό της οδού

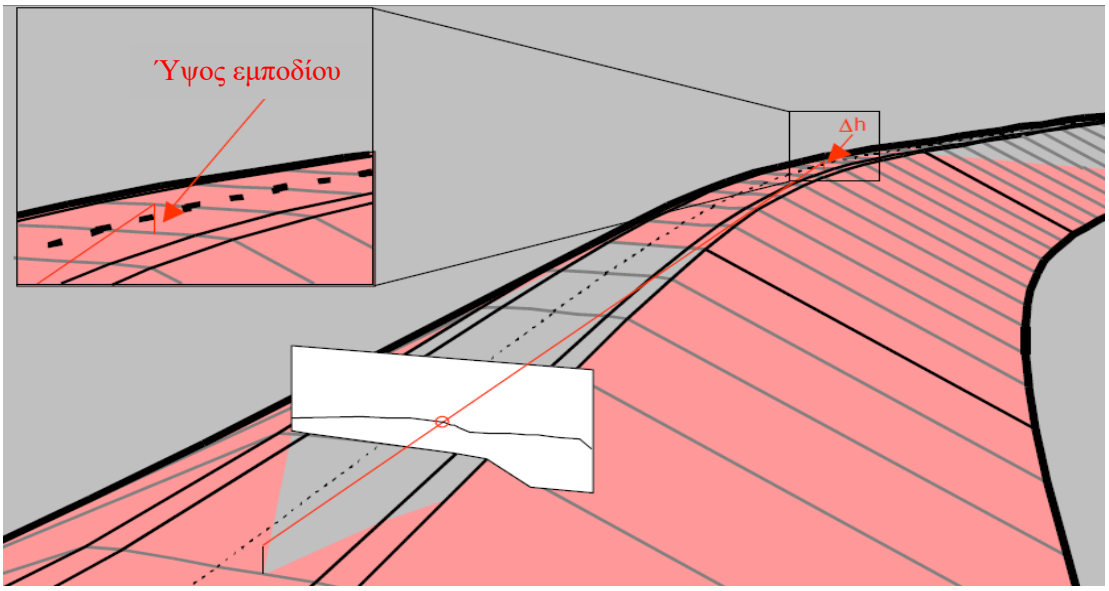
Τα μήκη ορατότητας χρησιμοποιούνται, κατά τη μελέτη μιας οδού, στις καμπύλες στην οριζοντιογραφία, και στα τόξα στρογγύλευσης στη μηκοτομή. Η ταχύτητα, η κατά μήκος κλίση και το μήκος ορατότητας είναι μεγέθη αλληλοεξαρτώμενα, που επηρεάζουν την ασφάλεια της κυκλοφορίας και την ποιότητα της κυκλοφοριακής ροής και θα πρέπει να εξασφαλίζουν σε όλο το μήκος της οδού την εποπτικότητα και την αναγνωρισιμότητα της χάραξης. Διακρίνονται δύο είδη μηκών ορατότητας:

- Το απαιτούμενο μήκος ορατότητας για στάση, που είναι η απαιτούμενη απόσταση για ακινητοποίηση του οχήματος προ ενός εμποδίου, που εμφανίζεται απροσδόκητα πάνω στο οδόστρωμα.

- Το απαιτούμενο μήκος ορατότητας για προσπέραση, που είναι η απαιτούμενη απόσταση για την ασφαλή προσπέραση προπορευόμενου οχήματος, με είσοδο στη λωρίδα κυκλοφορίας της αντίθετης κατεύθυνσης.

Σημειώνεται ότι στο μαθηματικό πρότυπο που αναπτύσσεται στην παρούσα εργασία λαμβάνονται υπ' όψιν μόνον οι απαιτήσεις επαρκούς μήκους ορατότητας για στάση κατά τη μηκοτομή. Η εξέταση των μηκών ορατότητας για προσπέραση καθώς και ο απαραίτητος έλεγχος των μηκών ορατότητας σε οριζοντιογραφικές καμπύλες ως προς πλευρικά εμπόδια θα γίνει σε επόμενη εργασία.

Σχήμα 3.3: Τρισδιάστατο μήκος ορατότητας
(Πηγή: Zimmermann, 2001)



Το μήκος ορατότητας, κατά γενικό κανόνα, μετρείται από τους οφθαλμούς του οδηγού μέχρι το εμπόδιο που θα πρωτοεμφανιστεί επί του καταστρώματος της οδού. Επομένως, θα πρέπει για τους υπολογισμούς να προσδιοριστεί, το ύψος των οφθαλμών του οδηγού πάνω από την επιφάνεια της οδού, καθώς και το ύψος του εμποδίου.

Ως θέση του οδηγού επί της οδού λαμβάνεται ο άξονας της λωρίδας κυκλοφορίας στην οποία κινείται το όχημα, ενώ η θέση του εμποδίου επί του οδοστρώματος εξαρτάται από το είδος του μήκους ορατότητας, για στάση ή για προσπέραση.

Τα βαριά οχήματα και ειδικά τα φορτηγά, χρειάζονται κατά κανόνα μεγαλύτερα μήκη επιβράδυνσης. Επισημαίνεται ότι το γεγονός αυτό αντισταθμίζεται από τη σημαντικά υψηλότερη θέση οδήγησης που έχουν τα βαριά οχήματα σε σχέση με τα επιβατικά, με αποτέλεσμα να αυξάνεται το διατιθέμενο μήκος ορατότητας. Σε περιπτώσεις πάντως που το πλεονέκτημα της υψηλότερης θέσης οδήγησης εξουδετερώνεται, όπως για παράδειγμα όταν η ορατότητα περιορίζεται από πλευρικά εμπόδια, προτείνεται να αυξάνονται οι διατιθέμενες αποστάσεις ορατότητας, ώστε να εξυπηρετούνται και τα φορτηγά.

3.6.2 Υπάρχον μήκος ορατότητας

Το υπάρχον μήκος ορατότητας για στάση είναι το μήκος του τμήματος της οδού μέσα στα όρια του οποίου ένα εμπόδιο συγκεκριμένου ύψους, που βρίσκεται στη λωρίδα κυκλοφορίας του οχήματος, είναι συνεχώς ορατό από τον οδηγό του οχήματος. Το υπάρχον μήκος ορατότητας εξαρτάται από:

- Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οδού
- Το ύψος οφθαλμών του οδηγού
- Το ύψος εμποδίου από την επιφάνεια της οδού

3.6.2.1 Ύψος οφθαλμών

Στις οδηγίες γεωμετρικού σχεδιασμού οδών της AASHTO (2011), λαμβάνεται ως ύψος οφθαλμών 1,08 m για τη μέτρηση των μηκών ορατότητας για στάση και για προσπέραση. Στην περίπτωση που χρειάζεται να πραγματοποιηθεί ξεχωριστός έλεγχος ορατότητας για τα φορτηγά οχήματα, προτείνεται η χρήση ύψους οφθαλμών του οδηγού φορτηγού 2,33 m από το οδόστρωμα. Αντίθετα, στις οδηγίες σχεδιασμού της FGSV (2011) λαμβάνεται ύψος οφθαλμών 1,00 m πάνω από την επιφάνεια της οδού και για τα δύο μήκη ορατότητας.

3.6.2.2 Ύψος εμποδίου

Ο προσδιορισμός του ύψους του εμποδίου εξαρτάται από πολλές παραμέτρους και για τον λόγο αυτό δεν έχει θεσπιστεί ενιαίο πρότυπο που να χρησιμοποιείται στον σχεδιασμό των οδών. Σύμφωνα με την AASHTO (2011), ως ύψος εμποδίου επί της οδού, προκειμένου για έλεγχο του υφιστάμενου μήκους ορατότητας για στάση, προβλέπεται η τιμή 0,60 m. Θεωρείται ότι το ύψος αυτό είναι αντιπροσωπευτικό των εμποδίων που μπορεί να αποτελέσουν κίνδυνο για το όχημα, ενώ η επιλογή μικρότερης τιμής θα οδηγούσε σε σημαντικά μεγαλύτερα μήκη κυρτωμάτων, χωρίς αποδεδειγμένα ανάλογη βελτίωση της ασφάλειας, διότι είναι αμφισβητήσιμη η ικανότητα των οδηγών να διακρίνουν μικρότερα αντικείμενα σε μεγάλες ταχύτητες και από απόσταση.

Προκειμένου για το μήκος ορατότητας για προσπέραση λαμβάνεται ως ύψος εμποδίου η τιμή 1,08 m. Η τιμή αυτή έχει προκύψει μετά από έρευνα στο σύνολο των σύγχρονων οχημάτων, κατά την οποία διαπιστώθηκε ότι το 85% έχει συνολικό ύψος μεγαλύτερο από 1,33 m. Θεωρείται ότι το ανώτερο τμήμα του οχήματος ύψους 0,25 m είναι απαραίτητο να είναι ορατό, ώστε ο οδηγός που προσπερνά να αντιληφθεί ότι πρόκειται για αντίθετα κινούμενο όχημα. Τα μήκη ορατότητας που καθορίζονται με τέτοιο τρόπο επαρκούν και κατά τη διάρκεια της νύχτας, διότι το φως των προβολέων είναι ορατό από μεγαλύτερη απόσταση απ' ότι το όχημα την ημέρα. Η σύμπτωση του ύψους εμποδίου για προσπέραση με το ύψος οφθαλμών έχει ως αποτέλεσμα το μήκος ορατότητας για προσπέραση να είναι αμφίδρομο,

δηλαδή τη στιγμή που ο οδηγός που προσπερνά αντικρίζει το αντίθετα κινούμενο όχημα, ο οδηγός του αντίθετα κινούμενου οχήματος αντικρίζει το όχημα που προσπερνά.

3.7 Προδιαγραφές σχεδιασμού οδών

Οι οδηγίες σχεδιασμού οδών των διαφόρων χωρών, υφίστανται συνεχείς τροποποιήσεις και βελτιώσεις, εκφράζοντας τη συνεχή εξέλιξη στην επιστημονική γνώση και έρευνα. Βασικά στοιχεία για τη διατύπωση των αρχών και των κανόνων των προδιαγραφών που διέπουν τη μελέτη χάραξης μίας οδού είναι η επιλογή της ταχύτητας μελέτης και η εκτίμηση του συντελεστή τριβής του οδοστρώματος, δηλαδή της σχέσης που υπάρχει μεταξύ του ελαστικού του τροχού και του οδοστρώματος σε συνάρτηση με την ταχύτητα του οχήματος.

Οι εκάστοτε κανόνες χάραξης οδών ήταν ανέκαθεν αντικείμενο διαμάχης μεταξύ των μελετητών οδοποιίας, ενώ δεν είναι λίγοι αυτοί που πιστεύουν πως οι κανόνες χάραξης οδών δεν αποτελούν και μέτρο εκτίμησης του επιπέδου ασφάλειας τους (Ψαριανός, 2006). Από την συγκριτική μελέτη μεταξύ πολλών οδηγιών χάραξης καθώς και από τα αποτελέσματα ερευνών συμπεραίνεται ότι υπάρχουν πολλές και ουσιαστικές διαφορές ως προς την επιλογή των επιτρεπόμενων τιμών του συντελεστή της εφαπτομενικής και της εγκάρσιας συνιστώσας της τριβής. Οι διαφορές αυτές έχουν με τη σειρά τους καθοριστική επίδραση στον υπολογισμό των ελαχίστων ακτινών των οριζόντιων καμπυλών, των απαιτούμενων μηκών ορατότητας, των ελαχίστων ακτινών των κατακόρυφων καμπυλών σε αλληλεξάρτηση με την εκάστοτε ισχύουσα ταχύτητα μελέτης ή λειτουργική ταχύτητα. Επιπλέον απαιτείται σχεδόν πάντα ο προσδιορισμός ενός επαρκούς περιθωρίου ασφαλείας, όσον αφορά τη δυναμική της κίνησης των οχημάτων, χωρίς όμως να γίνονται πλήρως κατανοητά τα όρια που υιοθετούν οι διάφορες προδιαγραφές. Αυτό συμβαίνει επειδή τις περισσότερες φορές δεν είναι γνωστό το θεωρητικό υπόβαθρο, με το οποίο έγινε η δεδομένη επιλογή των επιτρεπόμενων τιμών των συντελεστών τριβής.

Οι περισσότερες ισχύουσες οδηγίες χρησιμοποιούν την ταχύτητα μελέτης ως βασική παράμετρο για τη μελέτη της οδού, βασισμένη στην κατηγορία της οδού και στον τύπο της διατομής. Η τιμή της λειτουργικής ταχύτητας διαφέρει από χώρα σε χώρα. Οι διαφορές και οι ατέλειες των προδιαγραφών οφείλονται στην έλλειψη μοντέλου πρόβλεψης των ταχυτήτων σε κάθε θέση της οδού, αλλά και στην έλλειψη μοντέλου επακριβούς ελέγχου της υπάρχουσας ασφάλειας κατά την κίνηση του οχήματος (Κιμούνδρης, 1994). Μία εκτενή λίστα των ισχυουσών προδιαγραφών στις περισσότερες χώρες έχει κάνει ο Bartlett (2016) ενώ μια παλαιότερη συγκριτική ανάλυση ορισμένων οδηγιών μπορεί να βρεθεί στους Krammes & Garnham (1998). Στη συνέχεια γίνεται μια συνοπτική περιγραφή στοιχείων των οδηγιών γεωμετρικού σχεδιασμού ορισμένων χωρών.

3.7.1 Γερμανικές οδηγίες σχεδιασμού οδών

Η FGSV (2012) εξέδωσε τις αναθεωρημένες οδηγίες σχεδιασμού υπεραστικών οδών RAL. Οι οδηγίες αυτές αφορούν όλες τις κατηγορίες υπεραστικών οδών εκτός από αυτές των αυτοκινητοδρόμων για τις οποίες έχουν αναπτυχθεί οι οδηγίες RAA από το 2008 (FGSV, 2011). Στις οδηγίες αυτές διαπιστώνεται νέα φιλοσοφία στον σχεδιασμό καθώς τροποποιείται το πλαίσιο κριτηρίων στα οποία βασίζονται (Ψαριανός, 2008). Έμφαση δίνεται στο στάδιο της προκαταρκτικής μελέτης και τον εργοταξιακό σχεδιασμό.

Η έννοια της ταχύτητα μελέτης όπως ίσχυε προηγούμενα δεν υφίσταται πλέον και αντικαθίσταται από την ταχύτητα σχεδιασμού, που αφορά των υπολογισμό των οριακών τιμών των γεωμετρικών στοιχείων. Όλες οι κατηγορίες των οδών αντιστοιχίζονται σε κλάσεις σχεδιασμού με συγκεκριμένες τυπικές διατομές και στόχο την ενιαία οδική συμπεριφορά μέσω της τυποποίησης του σχεδιασμού. Για τους αυτοκινητοδρόμους οι κλάσεις αντιστοιχίζονται με βάση το είδος της σύνδεσης ενώ για τις υπόλοιπες υπεραστικές οδούς λαμβάνεται υπ’ όψιν και η ετήσια μέση ημερήσια κυκλοφορία. Η

ταχύτητα υπολογισμού είναι μοναδική για κάθε κλάση σχεδιασμού και όλες οι οριακές τιμές των μεγεθών, όπως επιτρεπτές ακτίνες και μήκη κυκλικών τόξων, κατά μήκος κλίσεις και ακτίνες τόξων στρογγύλευσης της μηκοτομής αντιστοιχίζονται κατευθείαν σε κάθε σχεδιαστική κλάση με βάση τα αναμενόμενα λειτουργικά χαρακτηριστικά.

Με τη μεθοδολογία αυτή γίνεται προσέγγιση για επιλογή γεωμετρικών στοιχείων που αντιστοιχούν στις πραγματικά αναπτυσσόμενες ταχύτητες και λόγω των αυστηρών περιορισμών οι μεταβολές των ταχυτήτων στο μήκος της οδού είναι πολύ μικρές συμβάλλοντας στην οδική ασφάλεια. Αυτή η μεθοδολογία έχει αρνητική συνέπεια το ότι οι χαράξεις που προκύπτουν είναι αρκετά δεσμευτικές και οικονομικά ασύμφορες ως προς την κατασκευή σε περιοχές με πολύ έντονο ανάγλυφο.

3.7.2 Ελβετικές οδηγίες σχεδιασμού οδών

Οι Ελβετικές οδηγίες αποτελούνται από μια σειρά προτύπων της VSS (n.d.). Τα πρότυπα αυτά αναπτύχθηκαν σε διαφορετικές χρονολογίες. Στις οδηγίες των προτύπων διακρίνονται δύο καθοριστικές ταχύτητες. Η πρώτη αφορά την ταχύτητα μελέτης, η οποία επιλέγεται από τον μελετητή βάσει της κατηγορίας της οδού, της μορφολογίας του εδάφους, του φόρτου και της σύνθεσής του και της μέγιστης επιτρεπόμενης ταχύτητας και χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των ελάχιστων ακτινών των κυκλικών τόξων και των μέγιστων κατά μήκος κλίσεων. Η δεύτερη αφορά τη μέγιστη ασφαλή ταχύτητα διέλευσης κάθε γεωμετρικού στοιχείου. Αυτή χρησιμοποιείται για να ελεγχθεί η ομοιομορφία των ταχυτήτων κατά μήκος της χάραξης και για τον καθορισμό των τιμών των επικλίσεων, αλλά και των απαιτήσεων ορατότητας και διαρθρώνεται σε ένα θεωρητικό διάγραμμα ταχυτήτων κατά μήκος της οριζοντιογραφικής χάραξης.

Για τον υπολογισμό των ταχυτήτων λαμβάνονται υπ ‘ όψιν μόνο η ακτίνα των κυκλικών τόξων καθώς η κατά μήκος κλίση βρέθηκε να μην επηρεάζει άμεσα τις λειτουργικές ταχύτητας των επιβατικών οχημάτων. Το διάγραμμα αυτό υπολογίζεται με βάση τρία βασικά στοιχεία, που αποτελούνται από τις ταχύτητες στις οριζοντιογραφικές καμπύλες, τη μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα στις ευθυγραμμίες και μια καθορισμένη τιμή επιτάχυνσης ή επιβράδυνση κατά την είσοδο ή έξοδο από οριζοντιογραφικές καμπύλες. Συγκεκριμένα, το διάγραμμα δημιουργείται με βάση τις ακόλουθες παραδοχές:

- Για κάθε μέγεθος της ακτίνας των καμπυλών υπολογίζεται η αντίστοιχη ασφαλής ταχύτητα βάσει της φυγόκεντρου επιτάχυνσης και του συντελεστή τριβής.

- Η ταχύτητα αυτή θεωρείται σταθερή στο μήκος του κυκλικού τόξου.

- Η μεταβολή της ταχύτητας ακολουθεί σταθερή επιβράδυνση ή επιτάχυνση με καθορισμένη τιμή 0,8 m/s^2.

- Στα ευθύγραμμα τμήματα η ταχύτητα του διαγράμματος υπολογίζεται βάσει της σταθερής τιμής επιτάχυνσης καθώς θεωρείται ότι η επιτάχυνση αυτή λαμβάνει χώρα αμέσως μετά την έξοδο από την οριζοντιογραφική καμπύλη. Ως μέγιστη ταχύτητα μπορεί να ληφθεί η τιμή του καθορισμένου εθνικού ορίου ταχύτητας ανάλογα με την κατηγορία της οδού.

- Η απόσταση μεταξύ δύο καμπυλών μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την απόσταση που χρειάζεται για τη μείωση της ταχύτητας με τη συγκεκριμένη επιβράδυνση. Στην περίπτωση αυτή σημειώνεται πρώτα αύξηση της ταχύτητας και στη συνέχεια μείωσή της. Με τον τρόπο αυτό σε όλη την ενδιάμεση απόσταση μεταξύ των καμπυλών αναπτύσσονται σταθερές επιταχύνσεις ή επιβραδύνσεις.

Μέσω διαγράμματος ταχυτήτων ελέγχεται η μεταβολή των ταχυτήτων για τον εντοπισμό επικίνδυνων θέσεων. Οι προϋποθέσεις που πρέπει να πληροί το διάγραμμα είναι τρεις:

1. Η διαφορά των ταχυτήτων μεταξύ γειτονικών καμπυλών πρέπει να μην είναι μεγαλύτερη από 10 km/h, ενώ διαφορές μεγαλύτερες από 20 km/h θεωρούνται απαράδεκτες.

2. Κατά τη μετάβαση από τμήματα της οδού με μεγάλες ευθυγραμμίες ή ακτίνες μεγαλύτερες των 420 m σε τμήματα της οδού με μειωμένη ταχύτητα οι διαφορές ταχυτήτων δεν πρέπει να υπερβαίνουν τα 5 km/h.

3. Τα διατιθέμενα μήκη ορατότητας πρέπει να είναι μεγαλύτερα από το μήκος που απαιτείται για τη μεταβολή της ταχύτητας με την καθορισμένη τιμή των 0,8 m/s^2.

Το κυκλικό τόξο πρέπει να έχει ένα ελάχιστο μήκος ανάλογο με την ταχύτητα στη θέση αυτή. Εάν δεν χρησιμοποιούνται σιγμοειδείς καμπύλες, τότε το ευθύγραμμο τμήμα πρέπει να έχει ένα ελάχιστο μήκος που εξαρτάται επίσης από την ταχύτητα. Ακόμη, συγκρίνοντας το διάγραμμα ταχυτήτων των επιβατικών οχημάτων με αυτό των βαρέων οχημάτων διαπιστώνεται η ανάγκη πρόσθετων λωρίδων κυκλοφορίας. Η κατασκευή νέων οδών είναι περιορισμένη στην Ελβετία, οπότε η παραπάνω διαδικασία εφαρμόζεται κυρίως σε βελτιώσεις οδών (Krammes & Garnham, 1998). Αν διαπιστωθούν αποκλίσεις από τα τρία κριτήρια γίνεται έλεγχος των δεδομένων ατυχημάτων της οδού. Από τον έλεγχο αυτό προκύπτει αν θα χρησιμοποιηθούν διορθωτικά μέτρα.

Επιπλέον στοιχεία των προτύπων αφορούν, τη μέγιστη τιμή επικλίσεων, η οποία καθορίζεται στο 7% ενώ μειώνεται κατά προσέγγιση γραμμικά ανάλογα με το μέγεθος της ακτίνας σε σχέση με την ελάχιστη τιμή της. Τόξα συναρμογής πρέπει να χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις που οι ακτίνες είναι μικρότερες από καθορισμένες τιμές. Το μήκος των κλωθοειδών αυξάνεται όσο μικρότερη είναι η τιμή της ακτίνας του κυκλικού τόξου, ενώ οδηγίες δίνονται για τις διάφορες μορφές συνδέσεων των στοιχείων της οριζοντιογραφίας. Όσον αφορά τη μηκοτομή, οι ακτίνες καμπυλότητας των τόξων στρογγύλευσης προκύπτουν ως συνήθως μέσω των απαιτήσεων μήκους ορατότητας.

Συμπερασματικά, με τον έλεγχο της διαφοράς ταχυτήτων εξασφαλίζεται στην ουσία η σχέση των διαδοχικών καμπυλών και το μέγιστο μήκος ευθυγράμμου τμήματος. Βασική καινοτομία για την εποχή αποτέλεσε ο υπολογισμός σε κάθε θέση των απαραίτητων στοιχείων βάσει της ταχύτητας στη συγκεκριμένη θέση. Μέσω της διαδικασίας που ακολουθείται, δίνεται η δυνατότητα χρησιμοποίησης στην οδό πολύ μικρών ακτινών και μεγάλων ευθυγράμμων τμημάτων, αρκεί η σταδιακή μεταβολή των στοιχείων να εξασφαλίζει τη μέγιστη επιτρεπόμενη διαφορά ταχυτήτων από θέση σε θέση. Οι δυνατότητα αυτή δίνει μεγαλύτερη ελευθερία στον μελετητή να δώσει πιο οικονομικές λύσεις. Βέβαια, η επιλογή για διατήρηση της διαδικασίας υπολογισμού ασφαλών ταχυτήτων και η μη ενσωμάτωση λειτουργικών στοιχείων, που έχουν δείξει ότι χρησιμοποιούνται μεγαλύτερες ταχύτητες στις οριζοντιογραφικές καμπύλες είναι αμφιλεγόμενη. Οι πραγματικές ταχύτητες δεν είναι σίγουρο ότι συμφωνούν με το διάγραμμα ταχυτήτων που προκύπτει. Οι οδηγοί δεν συμπεριφέρονται σύμφωνα με το θεωρητικό αυτόν τρόπο, οπότε το διάγραμμα που προκύπτει δε συμφωνεί απαραίτητα με τις πραγματικές ταχύτητες και τη μεταβολή τους. Επομένως, τα κριτήρια ελέγχου είναι μάλλον ανεπαρκή στις περισσότερες περιπτώσεις.

3.7.3 Ελληνικές οδηγίες σχεδιασμού οδών

Στην ενότητα αυτή κρίνεται σκόπιμο να περιγραφούν τόσο οι ισχύουσες όσο και παλαιότερες οδηγίες χαράξεων οδών που ίσχυσαν στην Ελλάδα και από τις οποίες πηγάζουν πολλά από τα προβλήματα που εμφανίζει το υπάρχον οδικό δίκτυο της χώρας.

3.7.3.1 Παλαιές οδηγίες

Στις παλαιότερες οδηγίες χαράξεων του τέως ΥΔΕ (1962) (1964), η ταχύτητα μελέτης θεωρείτο δεδομένη για κάθε τύπο διατομής της οδού, ενώ χρησιμοποιήθηκαν πολύ χαμηλές τιμές της για τον

προσδιορισμό των γεωμετρικών στοιχείων. Η παράλογη αυτή θεώρηση επέτρεψε την κατασκευή οδών με απαράδεκτα γεωμετρικά στοιχεία (Κιμούνδρης, 1994). Πιο συγκεκριμένα :

- Τη χρήση πολύ μικρών ακτινών σε πεδινά εδάφη, όπου η μέση ταχύτητα είναι πολύ μεγαλύτερη.
- Τη χρήση ευθυγράμμων τμημάτων μεγάλου μήκους, που επιτρέπουν την ανάπτυξη υψηλών ταχυτήτων, πριν από καμπύλες στις οποίες επιβάλλονται μικρές ταχύτητες κίνησης.
- Την εφαρμογή καμπυλών στην μηκοτομή με τις ελάχιστες ακτίνες, σε θέσεις όπου είναι δυνατή η ανάπτυξη υψηλών ταχυτήτων.
- Την εφαρμογή μεγάλων κατά μήκος κλίσεων σε θέσεις ανάπτυξης μεγάλων ταχυτήτων.
- Τον υπολογισμό των επικλίσεων με βάση την ταχύτητα μελέτης ανάλογα με την ακτίνα της καμπύλης. Σε μεγάλης ακτίνας καμπύλες η αναπτυσσόμενη ταχύτητα είναι μεγαλύτερη της ταχύτητας μελέτης. Επομένως στις θέσεις αυτές οι επικλίσεις είναι ανεπαρκείς.
- Σε αρκετές θέσεις τα γεωμετρικά στοιχεία επιτρέπουν την ανάπτυξη υψηλών ταχυτήτων, ενώ η διατομή της οδού δεν παρέχει την αντίστοιχη ασφάλεια.

3.7.3.2 Ισχύουσες οδηγίες

Για την μελέτη των οδικών χαράξεων εφαρμόζεται σήμερα το αντίστοιχο τεύχος των οδηγιών μελετών οδικών έργων ΟΜΟΕ-Χ (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2001), όπου περιγράφονται όλα τα στοιχεία και οι απαιτήσεις που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και να εφαρμόζονται κατά το σχεδιασμό και τη μελέτη της χάραξης των υπεραστικών και ημιαστικών οδών.

Για την αξιολόγηση της οριζόντιας χάραξης μίας οδού ως προς την ασφάλεια, χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά τρία ποσοτικά κριτήρια ασφαλείας, τα οποία είναι αποτέλεσμα εκτενούς ανάλυσης και συσχέτισης των τροχαίων ατυχημάτων με τα κατασκευαστικά στοιχεία ή τα στοιχεία κυκλοφοριακής τεχνικής της οδού, όπως διαμόρφωση της διατομής, ακτίνες, κατά μήκος κλίση, πρόσφυση οδοστρώματος. Αποτελούν μία ποσοτική αξιολόγηση που συνδέουν τη μελέτη της οδού, την οδική συμπεριφορά των οδηγών, τη δυναμική της κίνησης των οχημάτων και την πρόκληση των ατυχημάτων.

Το πρώτο κριτήριο ασφάλειας αφορά την επίτευξη αρμονίας και συνέχειας στη μελέτη. Η ταχύτητα μελέτης και η λειτουργική ταχύτητα V_{85} πρέπει να είναι εναρμονισμένες. Με αυτόν τον τρόπο επιδιώκεται η συμβατότητα μεταξύ της οδικής συμπεριφοράς των οδηγών και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της οδού. Το κριτήριο αναφέρεται πάντοτε σε ένα στοιχείο της χάραξης, δηλαδή σε μία καμπύλη ή σε μία ανεξάρτητη ευθυγραμμία και βασίζεται σε έρευνες που σχετίζονται με την οδική συμπεριφορά των οδηγών και την επιρροή αυτής στην πρόκληση των ατυχημάτων. Έτσι δίνεται η δυνατότητα να αξιολογούνται τμήματα υπεραστικών οδών σε σχέση με την ποιότητα σχεδιασμού.

Σύμφωνα με το δεύτερο κριτήριο, που αφορά την επίτευξη αρμονίας και συνέχειας στη λειτουργική ταχύτητα, η ταχύτητα μελέτης και η λειτουργική ταχύτητα V_{85} πρέπει να διατηρούνται κατά το δυνατόν σταθερές σε επαρκές μήκος της οδού. Εφόσον καταστεί αναγκαίο, για παράδειγμα, λόγω εμφανούς διαφοράς του ανάγλυφου του εδάφους, σε οδικό τμήμα μεγάλου μήκους, να τροποποιηθούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της χάραξης, και επομένως η ταχύτητα μελέτης, τότε θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή των στοιχείων μελέτης, τα οποία πρέπει να μεταβάλλονται σταδιακά. Η επιλογή διαδοχικών στοιχείων μελέτης με αρμονική μεταξύ τους σχέση, όσον αφορά την δυναμική της κίνησης των οχημάτων, δημιουργεί τις προϋποθέσεις για έναν ομοιόμορφο και

οικονομικό τρόπο οδήγησης. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται η ενσωμάτωση στη διαδικασία μελέτης της οδού των σχέσεων που συνδέουν την ταχύτητα και την οδική συμπεριφορά των οδηγών.

Καινοτομία για την περίοδο σύνταξης των οδηγιών αποτέλεσε το τρίτο κριτήριο που αφορά την επίτευξη αρμονίας και συνέχειας στη δυναμική της κίνησης των οχημάτων. Με το συγκεκριμένο κριτήριο παρέχεται η δυνατότητα αξιολόγησης των δεδομένων της δυναμικής της κίνησης των οχημάτων στα καμπύλα τμήματα της οδού για κάθε μεμονωμένο γεωμετρικό στοιχείο της μελέτης. Για τον λόγο αυτό, ελέγχεται η σχέση που υπάρχει μεταξύ του διατιθέμενου συντελεστή πλευρικής τριβής και του απαιτούμενου συντελεστή εγκάρσιας τριβής, η οποία προσδιορίζεται σε συνάρτηση με την αναμενόμενη ταχύτητα V_{85} στα καμπύλα τμήματα. Η διαφορά διατιθέμενου και απαιτούμενου συντελεστή εγκάρσιας τριβής αποτελεί ένα μέτρο ασφαλείας που συνδέεται με τη δυναμική της κίνησης των οχημάτων.

Η ταχύτητα μελέτης επιλέγεται ανάλογα με την σημασία της οδού και τον τύπο της διατομής. Μετά τη χάραξη του άξονα της οδού υπολογίζεται η ταχύτητα V_{85} για το σύνολο ή για τμήματα της οδού. Για την πρόβλεψη της ταχύτητας V_{85} χρησιμοποιείται η έννοια της ελικτότητας της οδού, δηλαδή ο λόγος της συνολικής μεταβολής κατεύθυνσης της οδού προς το μήκος του τμήματος της οδού, και το πλάτος της διατομής. Η σχέση της ταχύτητας V_{85} με το ελικτό προέκυψε από την στατιστική ανάλυση μετρήσεων ταχυτήτων σε τμήματα υπαρχουσών οδών.

Για τον έλεγχο της ορθής εκλογής της ταχύτητας μελέτης εξετάζεται η διαφορά της από την ταχύτητα V_{85}, η οποία δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 20 km/h. Με τη μέθοδο αυτήν αποφεύγονται καμπύλες πολύ μικρών ή πολύ μεγάλων ακτινών και η χάραξη αποκτά περισσότερο ομοιόμορφα χαρακτηριστικά. Εμπειρικοί περιορισμοί που αφορούν το μέγιστο μήκος της ευθυγραμμίας μεταξύ των καμπυλών, τη σχέση των ακτινών διαδοχικών καμπυλών και το ελάχιστο μήκος κυκλικού τόξου, καθορίζουν την ομοιομορφία της οδού.

3.7.4 Οδηγίες σχεδιασμού οδών των Η.Π.Α.

Οι αμερικανικές οδηγίες γεωμετρικού σχεδιασμού οδών της AASHTO (2011) βασίζονται αποκλειστικά στην ταχύτητα μελέτης της οδού, ενώ συγχρόνως εφαρμόζουν ορισμένα κριτήρια για την επίτευξη της ομοιομορφίας της οδού. Η ταχύτητα μελέτης επιλέγεται ανάλογα με την κατηγορία της οδού, την μορφολογία του εδάφους και το φόρτο κυκλοφορίας, έτσι ώστε να αντιστοιχεί στις ταχύτητες που αναμένεται να αναπτυχθούν στην οδό. Εάν σε τμήματα της οδού χρησιμοποιηθούν ακτίνες καμπυλών μεγαλύτερες από την ελάχιστη, πρέπει να ληφθεί υπόψη η αύξηση της ταχύτητας στον υπολογισμό των μηκών ορατότητας.

Σκοπός είναι η επίτευξη ομοιόμορφης χάραξης. Τα μεγάλα μήκη ευθυγραμμιών πρέπει να αποφεύγονται, ενώ επαρκή ευθύγραμμα τμήματα είναι απαραίτητα για ασφαλείς προσπεράσεις. Η μεταβολή από τμήματα μεγάλων ακτινών σε τμήματα μικρών ακτινών πρέπει να γίνεται με τη χρήση ενδιάμεσων καμπυλών με διαδοχικά αυξανόμενη καμπυλότητα. Η ελάχιστη ακτίνα πρέπει να χρησιμοποιείται σε σπάνιες περιπτώσεις και η αλλαγή κατεύθυνσης της οδού πρέπει να είναι όσο το δυνατό μικρότερη αλλά με το μεγαλύτερο δυνατό μήκος. Τα κριτήρια αυτά έχουν περισσότερο μορφή οδηγιών και ποιοτικού ελέγχου της χάραξης. Η έλλειψη καθορισμένων τιμών και σχέσεων των γεωμετρικών μεγεθών δεν μπορεί να εξασφαλίσει την ασφάλεια της οδού.

4 Χάραξη στον Χώρο

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται μια παρουσίαση και ανάλυση των υποδείξεων των οδηγιών γεωμετρικού σχεδιασμού της Γερμανίας (FGSV, 2012), των Η.Π.Α (AASHTO, 2011), της Αυστραλίας (Austroads, 2010) και του Καναδά (TAC-ATC, 1999), που αφορούν τη χάραξη της οδού στον χώρο. Ειδικότερα, οι οδηγίες γεωμετρικού σχεδιασμού της FGSV (2012) διακρίνονται για τη σαφή και κατανοητή οργάνωση των διατάξεων για τη χάραξη στον χώρο σε ενότητες ανάλογα με το τμήμα της μελέτης στο οποίο οι διατάξεις αυτές αναφέρονται. Επισημαίνεται ότι και στις οδηγίες σχεδιασμού αυτοκινητοδρόμων της FGSV (2011), περιλαμβάνονται αρκετές από τις υποδείξεις που παρουσιάζονται στη συνέχεια. Για τη σαφέστερη απόδοση των υποδείξεων των οδηγιών παρατίθενται σκαριφήματα οριζοντιογραφίας και μηκοτομής καθώς και προοπτικές εικόνες. Από τις απαιτήσεις χάραξης της οδού στον χώρο προκύπτουν βασικοί περιορισμοί που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα πρότυπα βελτιστοποίησης χάραξης.

4.1 Αρχές χάραξης της οδού στον χώρο

Τόσο στις οδηγίες της FGSV (2012), της AASHTO (2011), όσο και της TAC-ATC (1999) τονίζεται η ανάγκη για εναρμόνιση της οριζοντιογραφίας με τη μηκοτομή, ώστε να εξασφαλίζεται οπτική άνεση από τη θέση του οδηγού, με αποτέλεσμα καλύτερη και ασφαλέστερη κυκλοφοριακή λειτουργία της οδού. Επίσης, επισημαίνεται ότι ανεπιτυχείς συνδυασμοί οριζοντιογραφίας και μηκοτομής είναι δυνατό να υποβαθμίσουν τα πλεονεκτήματα κάθε μιας χωριστά και να επιδεινώσουν τα μειονεκτήματά τους, ενώ αντίθετα η αρτιότητα στη μελέτη τους και στο συνδυασμό τους αυξάνει τη λειτουργικότητα και την ασφάλεια, επιτρέπει τη διατήρηση σταθερής ταχύτητας και βελτιώνει την εμφάνιση της οδού, συνήθως χωρίς επιβάρυνση στο κόστος (AASHTO, 2011).

4.1.1 Ανεξάρτητες χαράξεις

Κατά την AASHTO (2011) και την TAC-ATC (1999) θεωρείται επιθυμητό σε διαιρεμένους αυτοκινητοδρόμους, εφόσον βέβαια το επιτρέπει το εύρος απαλλοτρίωσης, πράγμα σπάνιο για τα ελληνικά δεδομένα, να ακολουθεί κάθε κατεύθυνση κυκλοφορίας της οδού ανεξάρτητη χάραξη με ενδιάμεσο ελεύθερο χώρο. Έτσι είναι δυνατόν να αξιοποιηθούν τα πλεονεκτήματα σχεδιασμού και λειτουργίας των οδών μιας κατεύθυνσης. Σημειώνεται, ότι το πρότυπο βελτιστοποίησης που αναπτύσσεται στην παρούσα εργασία προβλέπει ενιαία επιφάνεια κυκλοφορίας δύο κατευθύνσεων, ενώ επέκταση για ανεξάρτητες χαράξεις θα γίνει μελλοντικά.

4.1.2 Εποπτικότητα και οπτική καθοδήγηση

Για επαρκή ασφάλεια και υψηλή ποιότητα κυκλοφορίας σε μια οδό, θεωρείται ως προϋπόθεση η εικόνα της οδού να είναι ομαλή και η διαδρομή να παρέχει εποπτικότητα και να γίνεται εγκαίρως και μονοσήμαντα κατανοητή (FGSV, 2012). Σημαντικότατο ρόλο έχει και η ορθή οπτική καθοδήγηση, η οποία επιτυγχάνεται με την εμφάνιση του καταστρώματος της οδού στον χώρο καθώς και με την ύπαρξη κατάλληλης διαγράμμισης στις οριογραμμές και στον διαχωρισμό των λωρίδων κυκλοφορίας.

4.1.3 Ισορροπία μεγεθών στοιχείων οριζοντιογραφίας και μηκοτομής

Στις οδηγίες γεωμετρικού σχεδιασμού της AASHTO (2011) της TAC-ATC (1999) και της Austroads (2010) θεωρείται σημαντικό τα μεγέθη των στοιχείων της οριζοντιογραφίας και των στοιχείων της μηκοτομής να βρίσκονται σε ισορροπία. Δηλαδή, πρέπει να αποφεύγεται ο συνδυασμός ευθυγραμμίας ή ανοιχτής καμπύλης με απότομα ή μεγάλου μήκους κεκλιμένα τμήματα, καθώς και ο συνδυασμός υπερβολικής καμπυλότητας με μικρές κατά μήκος κλίσεις. Επίσης πρέπει να αποφεύγεται η επαλληλία ευθυγραμμιών ή ανοιχτών οριζοντιογραφικών καμπύλων με κατακόρυφες καμπύλες μικρού μήκους.

4.1.4 Αλληλουχία στοιχείων στην οριζοντιογραφία

Η ασφάλεια σε μια έντονα καμπυλόγραμμη χάραξη δεν μειώνεται από μια καμπύλη μικρότερης ακτίνας διότι η μεγάλη ελικτότητα συνδυάζεται με χαμηλή ταχύτητα και ο κίνδυνος ατυχημάτων παραμένει περιορισμένος. Είναι όμως σημαντικό να αποφεύγονται θέσεις αιφνιδιασμού του οδηγού. Συνεπώς, πρέπει να αποφεύγονται απότομες μεταβάσεις από μεγάλες σε μικρές ακτίνες και να επιδιώκεται βαθμιαία μείωσή τους, ώστε να δίνεται η δυνατότητα στους οδηγούς να προσαρμόσουν την ταχύτητά τους στις νέες συνθήκες με ασφάλεια. Ακόμη, η ισορροπία μεταξύ των μηκών των ευθυγράμμων τμημάτων και των καμπύλων στην οριζοντιογραφία αποτελεί προϋπόθεση για επιτυχημένη χάραξη της οδού στον χώρο. Συνεπώς, θεωρείται μη ικανοποιητικός σχεδιασμός ο συνδυασμός ευθυγραμμίας μεγάλου μήκους με μικρές εφαπτόμενες καμπύλες ενώ συνιστάται πιο καμπυλόγραμμη χάραξη με αρμονικότερη σχέση μεταξύ μηκών ευθυγραμμίας και καμπύλης. Επίσης, η καμπυλόγραμμη χάραξη είναι προτιμότερη από τη χάραξη που περιλαμβάνει μεγάλου μήκους ευθυγραμμίες και μικρού μήκους καμπύλες (TAC-ATC, 1999). Τέλος, η οριζοντιογραφική καμπύλη που ακολουθεί ευθυγραμμία και είναι ορατή στον οδηγό από μεγάλη απόσταση, δίνει την εντύπωση ότι αποκλίνει από την ευθυγραμμία πιο απότομα από ότι στην πραγματικότητα. Για να αντιμετωπισθεί η εσφαλμένη αυτή εντύπωση προτείνεται η χρήση καμπύλης συναρμογής μεγαλύτερου μήκους.

4.1.5 Αλληλουχία στοιχείων στη μηκοτομή

Βασικό χαρακτηριστικό μιας επιτυχημένης μηκοτομής είναι η κατά το δυνατόν καλή προσαρμογή στο έδαφος. Έτσι αποφεύγονται υψηλά ορύγματα και επιχώματα, τα οποία, εκτός από αντιοικονομικά, δεν επιτρέπουν την οπτική ένταξη της οδού στον περιβάλλοντα χώρο.

Σχήμα 4.1: Μη ικανοποιητική ένταξη της οδού στον περιβάλλοντα χώρο

Συμπληρώνεται ακόμη ότι σε λοφώδη και ορεινά εδάφη θα πρέπει οι ακτίνες των κυρτών καμπύλων της μηκοτομής να είναι μεγαλύτερες από αυτές των κοίλων καμπύλων, ώστε να βελτιώνονται τα διαθέσιμα μήκη ορατότητας. Αντίθετα, σε πεδινά εδάφη, όπου εμφανίζονται μικρότερες υψομετρικές διαφορές, έως δέκα μέτρα, συνιστάται να είναι μεγαλύτερες οι ακτίνες των κοίλων καμπύλων από αυτές των κυρτών, ώστε με την αύξηση του μήκους των κοιλωμάτων να γίνει η χάραξη οπτικά φιλικότερη.

4.1.6 Σύμπτωση σημείων καμπής οριζοντιογραφίας και μηκοτομής

Μια χάραξη είναι ιδιαίτερα επιτυχημένη όταν κατά ένα μεγάλο ποσοστό συμπίπτουν τα σημεία καμπής της οριζοντιογραφία και της μηκοτομή. Σε αυτή την περίπτωση η προοπτική εικόνα της οδού γίνεται ιδιαίτερα ευχάριστη και η χάραξη πλεονεκτεί τόσο από άποψη δυναμικής της κίνησης όσο και από άποψη απορροής των ομβρίων, διότι στα σημεία με μηδενική κατά μήκος κλίση η οριζοντιογραφία είναι σε καμπύλη άρα εφαρμόζεται η μέγιστη επίκλιση, ενώ στην περιοχή της καμπύλης συναρμογής, όπου η επίκλιση είναι περίπου μηδενική, υπάρχει μέγιστη κατά μήκος κλίση.

Ειδικά σε λοφώδη και ορεινά εδάφη, όπου από την τοπογραφία του εδάφους επιβάλλεται συχνά η ύπαρξη τμήματος σταθερής κατά μήκος κλίσης μεταξύ του τέλους του κυρτώματος και της αρχής του κοιλώματος, το σημείο καμπής στην οριζοντιογραφία, δηλαδή η αρχή της οριζοντιογραφικής καμπύλης, καλό είναι να τοποθετείται πιο κοντά στην αρχή του κοιλώματος. Με αυτόν τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα στον οδηγό να αντιληφθεί την καμπύλη νωρίτερα.

Στις οδηγίες της AASHTO (2011), σχετικά με το θέμα της σύμπτωσης των σημείων καμπής, αναφέρεται ότι όταν οι κορυφές οριζοντιογραφίας και μηκοτομής συμπίπτουν δημιουργείται μια ευχάριστη εμφάνιση τρισδιάστατης καμπύλης με διαδοχικά κοιλώματα και κυρτώματα. Στην περίπτωση που το πλήθος των κορυφών διαφέρει, είναι δυνατό να παραλειφθεί μια φάση, δηλαδή το μήκος δηλαδή μεταξύ διαδοχικών κορυφών. Τέλος, όταν οι κορυφές της μηκοτομής συμπίπτουν με τα σημεία καμπής στην οριζοντιογραφία, δηλαδή ολόκληρη η μηκοτομή είναι μετατοπισμένη κατά το μισό του μήκους μεταξύ των κορυφών ή αλλιώς μισή φάση, η χάραξη χαρακτηρίζεται ως αποτυχημένη.

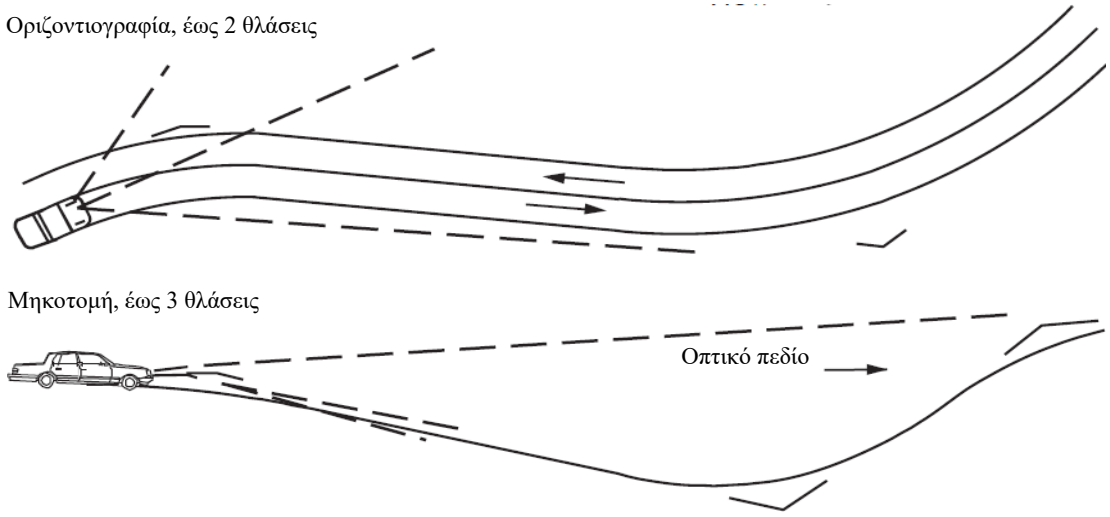
4.1.7 Σύμπτωση σημείων τομής εφαπτομένων

Η οδηγία για σύμπτωση των σημείων καμπής είναι δυνατό να εφαρμοσθεί μόνο όταν το πλήθος των σημείων καμπής στην οριζοντιογραφία και τη μηκοτομή είναι ίδιο. Συνήθως όμως, η τοπογραφία του εδάφους καθώς και άλλοι παράγοντες που λαμβάνονται υπ' όψη κατά τη διάρκεια της μελέτης οδηγούν σε διαφορετικό πλήθος σημείων καμπής. Σχετικά με αυτές τις περιπτώσεις, αναφέρεται ότι η χάραξη θεωρείται και πάλι επιτυχημένη όταν τα σημεία τομής των εφαπτομένων στις καμπύλες της οριζοντιογραφίας και της μηκοτομής βρίσκονται κατά το δυνατόν κοντά το ένα στο άλλο, και τα υπεράριθμα είναι ανάμεσά τους. Επισημαίνεται, ότι για να θεωρηθεί ότι συμπίπτουν επαρκώς οι κορυφές στην οριζοντιογραφία και τη μηκοτομή μιας χάραξης, αρκεί να απέχουν λιγότερο από το ένα τέταρτο του μήκους της φάσης (Smith & Lamm, 1994).

4.1.8 Μέγιστος αριθμός θλάσεων στο οπτικό πεδίο του οδηγού

Σύμφωνα με τις οδηγίες γεωμετρικού σχεδιασμού της AASHTO (2011), αναφέρεται ότι σε κάθε θέση της χάραξης δεν θα πρέπει να βρίσκονται στο οπτικό πεδίο του οδηγού περισσότερες από δύο θλάσεις στην οριζοντιογραφία και τρεις στη μηκοτομή. Στόχος της οδηγίας αυτής είναι η βελτίωση της αισθητικής της οδού.

Σχήμα 4.2: Μέγιστος αριθμός θλάσεων στο οπτικό πεδίο σε οριζοντιογραφία και μηκοτομή (Πηγή: AASHTO, 2011, Ιδία επεξεργασία)



4.2 Χαρακτηριστικά προβλήματα της οδού στον χώρο

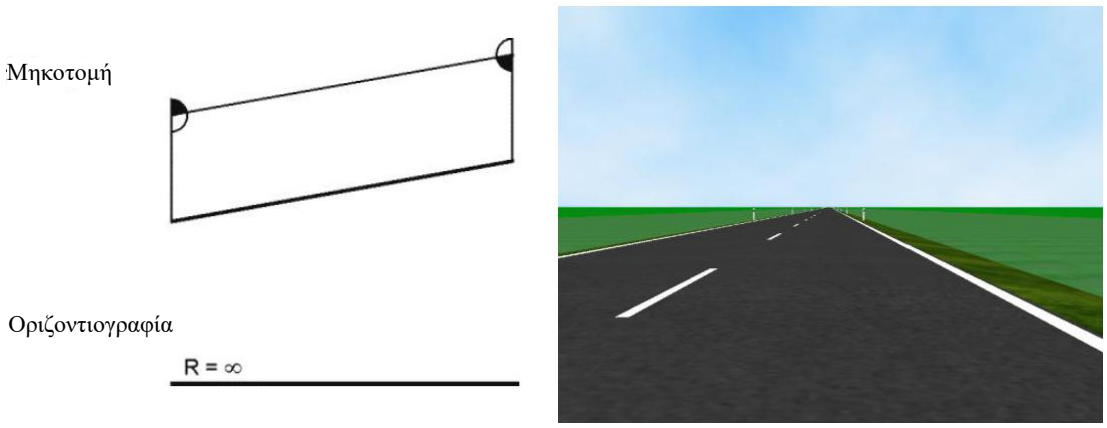
Στην ενότητα αυτή εξετάζεται η επίδραση που έχει ο συνδυασμός της οριζοντιογραφίας και της μηκοτομής στη χάραξη στον χώρο. Επισημαίνονται, επίσης, διάφορες χαρακτηριστικές μορφές ελαττωμάτων της προοπτικής εικόνας της οδού και προσδιορίζεται κάθε φορά ο συνδυασμός οριζοντιογραφίας και μηκοτομής από τον οποίο δημιουργούνται. Οι ατέλειες αυτές, διακρίνονται ως εξής:

- Παρατεταμένες ευθυγραμμίες σταθερής κλίσης.
- Οπτικές θλάσεις.
- Προοπτικές παραμορφώσεις.
- Κυματισμός και απόκρυψη τμημάτων της οδού.

4.2.1 Παρατεταμένες ευθυγραμμίες σταθερής κατά μήκος κλίσης

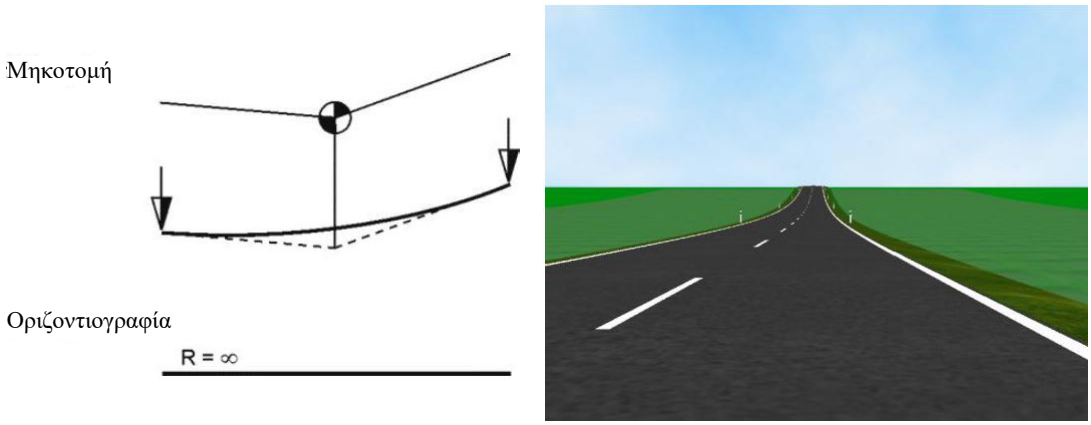
Γενικά, η σταθερή κλίση στη μηκοτομή δεν δημιουργεί προβλήματα στη χάραξη και επιπλέον συμβάλλει σε ευχάριστη και φιλική προς το χρήστη προοπτική εικόνα της οδού. Επίσης, οι ευθυγραμμίες σταθερής κλίσης παρουσιάζουν πλεονεκτήματα στην προσαρμογή σε έδαφος χωρίς έντονο ανάγλυφο και για τη διαμόρφωση κόμβων. Απ' την άλλη πλευρά όμως, η μεγάλου μήκους ευθυγραμμία σταθερής κλίσης δεν είναι επιθυμητή κατά την FGSV (2012), επειδή εμφανίζονται μειονεκτήματα που συνδέονται με τη λανθασμένη εκτίμηση της απόστασης και της ταχύτητας των αντίθετα κινούμενων οχημάτων, την ανάπτυξη υπερβολικά υψηλών ταχυτήτων, τον κίνδυνο θάμβωσης του οδηγού από τους προβολείς των αντίθετα κινούμενων οχημάτων κατά τη διάρκεια της νύχτας, τη δημιουργία κόπωσης στον οδηγό και τη δυσκολία προσαρμογής της χάραξης στο τοπίο. Ενδεχομένως, η χάραξη να βελτιώνεται με τη χρήση οριζοντιογραφικής καμπύλης με ιδιαίτερα μεγάλη ακτίνα, καθώς υπάρχει καλύτερη εποπτεία της διαδρομής της οδού και δυνατότητα ορθότερης εκτίμησης της ταχύτητας των αντίθετα κινούμενων καθώς και των προπορευόμενων οχημάτων

Σχήμα 4.3: Ευθυγραμμία με σταθερή κατά μήκος κλίση
(Πηγή: FGSV, 2012, Ιδία επεξεργασία)



Για να αμβλυνθεί η δυσμενής εντύπωση που προκαλείται από την πολλές φορές επιβεβλημένη για άλλους λόγους οριζοντιογραφική ευθυγραμμία, συνιστάται η επιλογή κοιλώματος στη μηκοτομή με μεγάλη ακτίνα τόξου στρογγύλευσης. Στην περίπτωση αυτή, υπάρχει καλύτερη εποπτεία της διαδρομής της οδού και δυνατότητα ορθότερης εκτίμησης της ταχύτητας των αντίθετα κινούμενων καθώς και των προπορευόμενων οχημάτων. Κατά συνέπεια το στοιχείο αυτό είναι κατάλληλο για δημιουργία κόμβων ή για τμήματα προσπέρασης. Θα πρέπει πάντως να τονιστεί ότι ο συνδυασμός κοιλώματος με οριζοντιογραφική καμπύλη μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να παραπλανήσει τον οδηγό, δίνοντας την εντύπωση ότι η καμπύλη είναι πιο ανοιχτή απ' ότι στην πραγματικότητα. Το φαινόμενο αυτό αναλύεται παρακάτω στην ενότητα των προοπτικών παραμορφώσεων.

Σχήμα 4.4: Ευθυγραμμία σε κοίλωμα
(Πηγή: FGSV, 2012, Ιδία επεξεργασία)



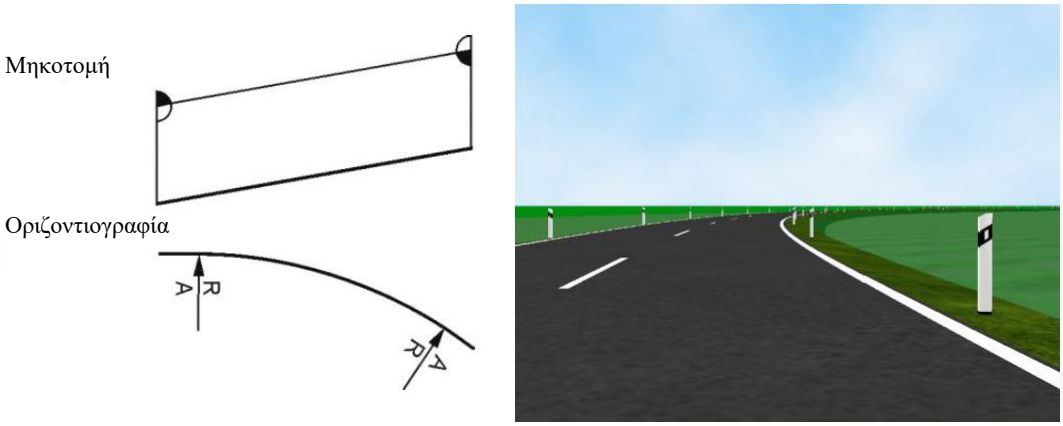
4.2.2 Οπτικές θλάσεις

Τόσο στις οδηγίες της TAC-ATC (1999) όσο και σε αυτές τις AASHTO (2011) τονίζεται ότι η χρήση της ελάχιστης επιτρεπόμενης ακτίνας σε μια καμπύλη θα πρέπει κατά το δυνατό να αποφεύγεται, γιατί αντιστοιχεί σε οριακή κατάσταση. Εξάλλου, οι μεγάλου μήκους ανοιχτές καμπύλες συνθέτουν μια ευχάριστη χάραξη και προσαρμόζονται καλύτερα στο τοπίο. Μεγάλη έμφαση δίνεται στην αποφυγή της οπτικών θλάσεων. Γενικά, όπως αναφέρθηκε και προηγούμενα οι παρατεταμένες τμήματα ευθυγραμμίες σταθερής κλίσης πρέπει να αποφεύγονται καθώς αποτελούν αίτιο και του φαινομένου των οπτικών θλάσεων.

4.2.2.1 Οπτική θλάση σε οριζοντιογραφική καμπύλη

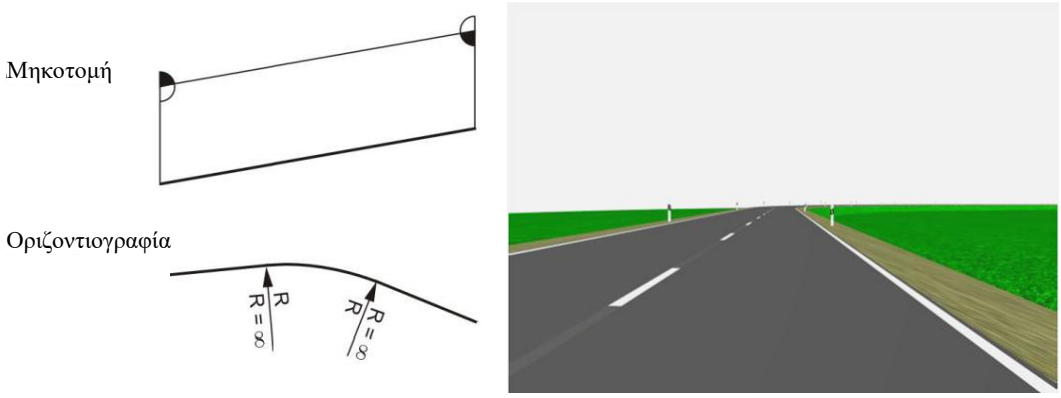
Η επαλληλία οριζοντιογραφικής καμπύλης με τμήματα σταθερής κατά μήκος κλίσης δεν παρουσιάζει προβλήματα όταν υπάρχουν επαρκή μήκη ορατότητας και μπορεί να προσαρμοστεί ικανοποιητικά στον περιβάλλοντα χώρο δίνοντας τη δυνατότητα προσπέρασης κατά περίπτωση.

Σχήμα 4.5: Αποφυγή οπτικής θλάσης με τη χρησιμοποίηση καμπύλης μεγαλύτερης ακτίνας (Πηγή: FGSV, 2012, Ιδία επεξεργασία)



Βέβαια, πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή καμπυλών καθώς είναι δυνατό να εμφανιστεί το φαινόμενο της οπτικής θλάσης σε μια οριζοντιογραφική καμπύλη μικρού μήκους η οποία συνδέει ευθυγραμμίες και είναι ορατή από αρκετή απόσταση. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να αποφευχθεί με την επιλογή μεγαλύτερων ακτινών και καμπύλων συναρμογής μεγαλύτερου μήκους. Η επιλεγόμενη ακτίνα μάλιστα πρέπει να είναι τόσο μεγαλύτερη όσο πιο μικρή είναι η αλλαγή κατεύθυνσης της οδού.

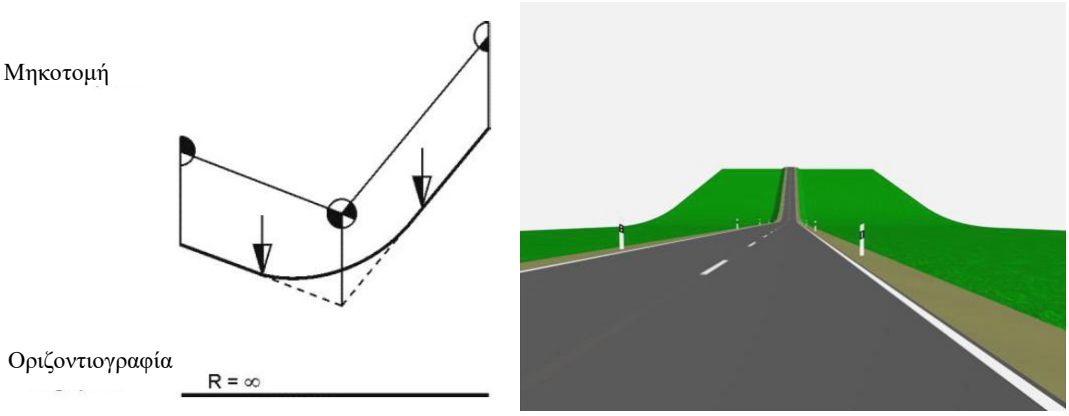
Σχήμα 4.6: Οπτική θλάση σε οριζοντιογραφική καμπύλη (Πηγή: FGSV, 2012, Ιδία επεξεργασία)



4.2.2.2 Οπτική θλάση σε κοίλωμα

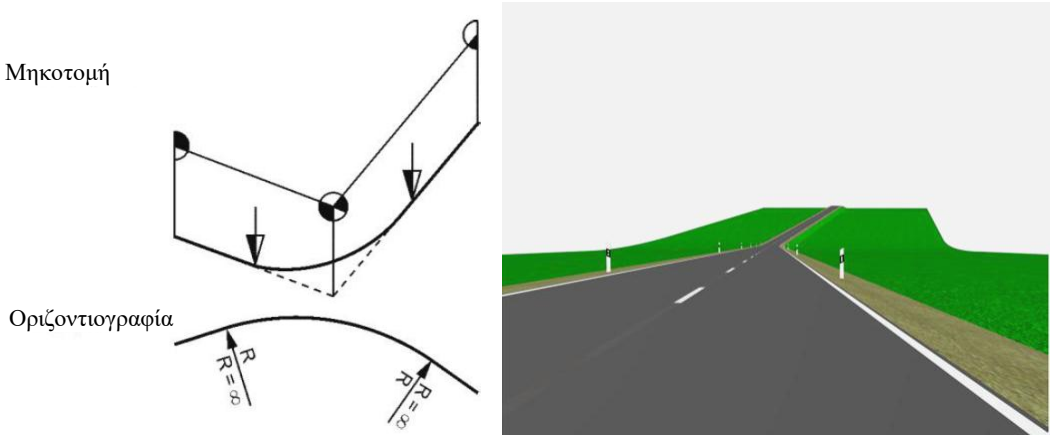
Στις οδηγίες σχεδιασμού της TAC-ATC (1999) επισημαίνεται ότι θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην περίπτωση κοιλωμάτων μικρού σχετικά μήκους, που είναι ορατά από μεγάλη απόσταση, για παράδειγμα αν βρίσκονται στο τέλος οριζοντιογραφικής ευθυγραμμίας με σταθερή κατά μήκος κλίση. Στην περίπτωση αυτή είναι δυνατό να εμφανιστεί το φαινόμενο της οπτικής θλάσης στη βάση του κοιλώματος. Η FGSV (2012) προτείνει την μικρές αλλαγές στη διεύθυνση των ευθυγραμμιών της οριζοντιογραφίας, μεγαλύτερες από 3 gon για την αποφυγή του φαινομένου.

Σχήμα 4.7: Οπτική θλάση σε κοίλωμα μικρού μήκους μεταξύ τμημάτων με σταθερή κλίση (Πηγή: FGSV, 2012, Ιδία επεξεργασία)



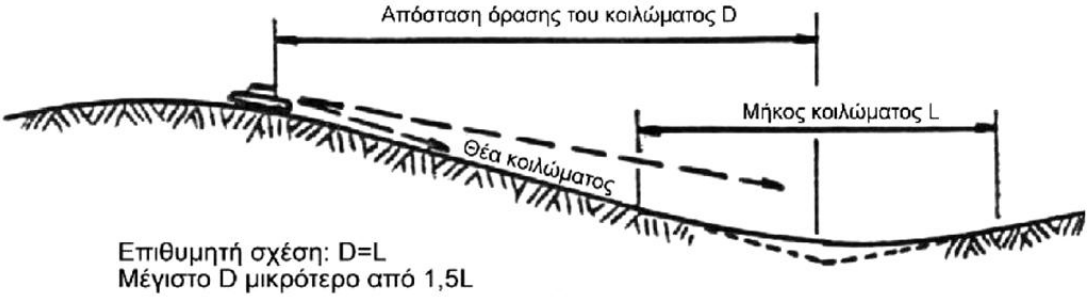
Το φαινόμενο των οπτικών θλάσεων γίνεται επίσης έντονο κατά την επαλληλία οριζοντιογραφικών καμπυλών με κοιλώματα. Για το λόγο αυτό, πρέπει να αποφεύγεται η χρήση της ελάχιστης ακτίνας σε οριζοντιογραφικές καμπύλες όταν η αλλαγή στις κατά μήκος κλίσεις υπερβαίνει το 10%.

Σχήμα 4.8: Οπτική θλάση σε κοίλωμα μικρού μήκους σε οριζοντιογραφική καμπύλη (Πηγή: FGSV, 2012, Ιδία επεξεργασία)



Σε έρευνα των Smith & Lamm (1994) αναφέρεται ότι για την αποφυγή της οπτικής θλάσης θα πρέπει το μήκος της κοίλης καμπύλης στη μηκοτομή να είναι περίπου ίσο με την απόσταση από την οποία ο οδηγός αντικρίζει το κοίλωμα ή, αν αυτό δεν είναι δυνατό, ίσο με το 70% της απόστασης αυτής όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

Σχήμα 4.9: Αποφυγή οπτικής θλάσης σε κοίλωμα (Πηγή: Smith & Lamm, 1994)



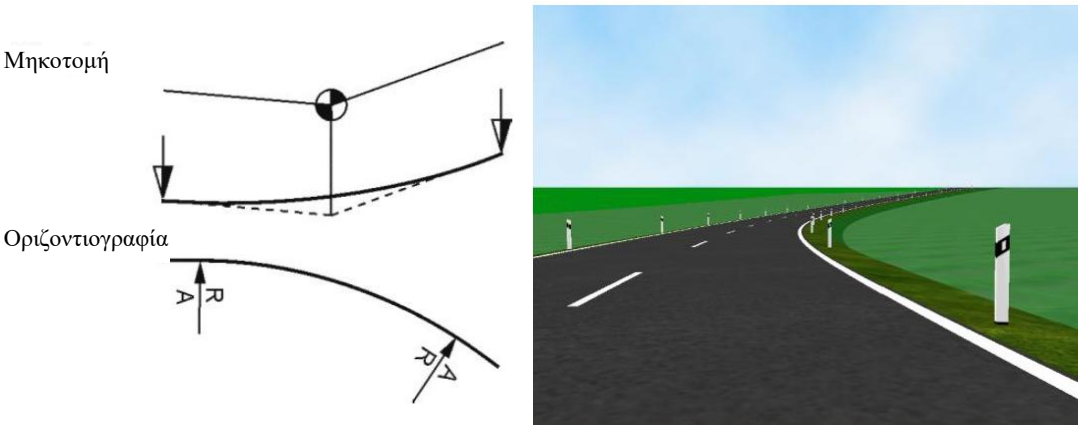
4.2.3 Προοπτικές παραμορφώσεις

Η εικόνα της οδού στον χώρο είναι, αποτέλεσμα του συνδυασμού οριζοντιογραφίας και μηκοτομής. Μια ανεπιτυχής χάραξη μπορεί να οφείλεται είτε μόνο στην οριζοντιογραφία, είτε μόνο στη μηκοτομή, ή στο λανθασμένο συνδυασμό τους. Στην ενότητα αυτή εξετάζεται η επίδραση στην προοπτική εικόνα της οδού των μεμονωμένων στοιχείων της οριζοντιογραφίας, η επίδραση των στοιχείων της μηκοτομής, δηλαδή οι περιπτώσεις σταθερής κατά μήκος κλίσης, κοίλης καμπύλης και κυρτής καμπύλης καθώς και η αλληλουχία τους στην προοπτική εικόνα της οδού.

4.2.3.1 Επαλληλία οριζοντιογραφικών καμπυλών με κοίλωμα

Σύμφωνα με την FGSV (2012), ο συνδυασμός κοίλων τμημάτων στη μηκοτομή με οριζοντιογραφικές καμπύλες παρουσιάζει ορισμένα πλεονεκτήματα, καθώς μπορεί να προσαρμοστεί επιτυχώς στον περιβάλλοντα χώρο, βελτιώνει την οπτική καθοδήγηση και οδηγεί στην επιλογή χαμηλότερων ταχυτήτων από τους οδηγούς σε περιπτώσεις μεγάλου μεγέθους στοιχείων σχεδιασμού. Βέβαια, στην περίπτωση επαλληλίας με οριζοντιογραφική καμπύλη μικρής ακτίνας μπορεί να οδηγήσει τον οδηγό σε λάθος εκτιμήσεις. Η επαλληλία αυτή δίνει την εντύπωση, ότι η καμπύλη είναι πιο ανοιχτή απ' ότι στην πραγματικότητα και ο οδηγός μπορεί να μη μειώσει όσο χρειάζεται την ταχύτητά του.

Σχήμα 4.10: Επαλληλία οριζοντιογραφική καμπύλης με κοίλωμα
(Πηγή: FGSV, 2012, Ιδία επεξεργασία)



Ερευνώντας το παραπάνω φαινόμενο σε συγκεκριμένες θέσεις υφισταμένων οδών, οι Smith & Lamm (1994) διαπίστωσαν ότι η επαλληλία οριζοντιογραφικής καμπύλης με κοίλωμα μπορεί να αυξήσει τον κίνδυνο ατυχημάτων, επειδή αλλοιώνει την προοπτική εικόνα της οδού. Για τον λόγο αυτό άλλωστε επισημαίνεται ότι πρέπει να καθοριστεί κάποια σχέση μεταξύ της ακτίνας της οριζοντιογραφικής καμπύλης και της ακτίνας του τόξου στρογγύλευσης. Η σχέση που προτείνεται, βασισμένη στην εμπειρία από την FGSV (2012), είναι ότι η ακτίνα του τόξου στρογγύλευσης στη μηκοτομή πρέπει να είναι τουλάχιστον το δεκαπλάσιο της ακτίνας της οριζοντιογραφικής καμπύλης, καθώς σε αντίθετη περίπτωση παρατηρείται αύξηση του επιπέδου ταχύτητας. Επίσης, σημειώνεται ότι η περίπτωση των κλειστών οριζοντιογραφικών καμπύλων σε κοίλωμα εξαιρείται από την απαίτηση για σύμπτωση των σημείων καμπής σε οριζοντιογραφία και μηκοτομή. Για να περιοριστεί δηλαδή η εντύπωση που προκαλείται στον οδηγό, ότι η καμπύλη είναι πιο ανοιχτή απ' ότι στην πραγματικότητα, προτείνεται τα σημεία καμπής κατά το δυνατό να διαχωρίζονται. Συνιστάται δηλαδή, είτε το κοίλωμα να αρχίζει αρκετά μέσα στο οριζοντιογραφικό τόξο, ώστε η καμπυλότητα της χάραξης να είναι αναγνωρίσιμη χωρίς την επίδραση του κοιλώματος στην προοπτική εικόνα, είτε το κοίλωμα να είναι τοποθετημένο νωρίτερα, ώστε η οριζοντιογραφική καμπύλη να αρχίζει περί το τέλος του.

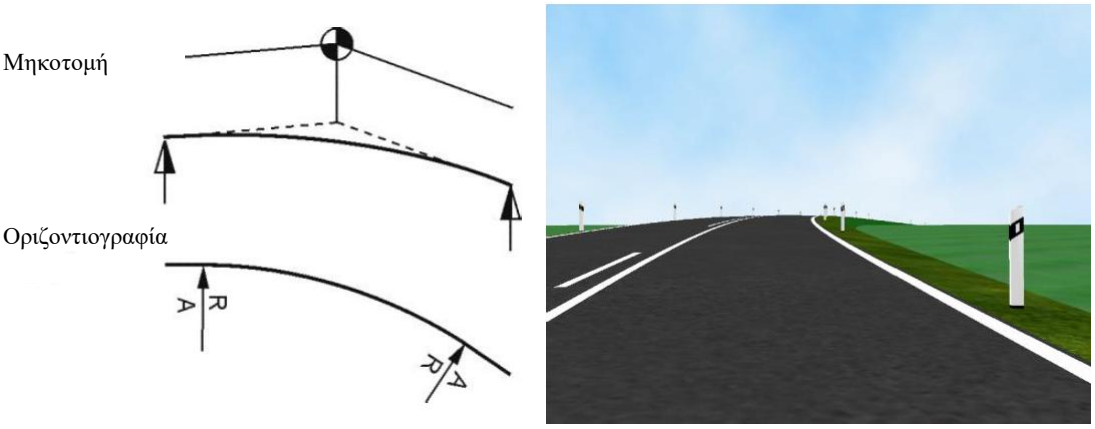
Η επικινδυνότητα του ανεπιτυχούς συνδυασμού κλειστής οριζοντιογραφικής καμπύλης και κοιλώματος επισημαίνεται και από την AASHTO (2011), αλλά το θέμα αυτό προσεγγίζεται από διαφορετική οπτική γωνία. Η λανθασμένη εκτίμηση της καμπυλότητας της χάραξης δεν αναφέρεται

καθόλου, αλλά τονίζεται ότι κάθε οριζοντιογραφική καμπύλη μικρής ακτίνας σε επαλληλία με κοίλωμα προσλαμβάνει ανεπιθύμητη παραμορφωμένη εμφάνιση, καθώς η οριζοντιογραφική καμπύλη φαίνεται σαν οξεία γωνία. Ακόμη επισημαίνεται ότι στο κατώτατο σημείο των κοιλωμάτων οι ταχύτητες των αυτοκινήτων και ειδικά των βαρέων οχημάτων συχνά είναι υψηλές, και έτσι η τοποθέτηση εκεί της αρχής μιας κλειστής οριζοντιογραφικής καμπύλης μπορεί να οδηγήσει σε ατυχήματα. Από τα παραπάνω φαίνεται ότι υπάρχει αναγνώριση από τις οδηγίες σχεδιασμού ως προς την επικινδυνότητα του ανεπιτυχούς συνδυασμού οριζοντιογραφικής καμπύλης και κοιλώματος, αλλά διατυπώνονται διαφορετικές απόψεις ως προς το πραγματικό αίτιο που προκαλεί τα ατυχήματα. Έτσι, κατά την FGSV (2012) τα ατυχήματα αποδίδονται στην παραπλάνηση του οδηγού ως προς την καμπυλότητα της χάραξης, άποψη με την οποία συμφωνούν και οι Smith & Lamm (1994), ενώ κατά την AASHTO (2011) αποδίδονται σε λόγους δυναμικής της κίνησης αν και επισημαίνεται η παραμορφωμένη εμφάνιση στην προοπτική εικόνα.

4.2.3.2 Επαλληλία οριζοντιογραφικής καμπύλης με κύρτωμα

Η χάραξη σε περιοχές κυρτού τόξου στρογγύλευσης μηκοτομής καθορίζεται από τις απαιτήσεις ορατότητας. Το κύρτωμα μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα στην προοπτική εικόνα της οδού, όταν συνδυαστεί με οριζοντιογραφική καμπύλη ενώ είναι ακατάλληλο για τμήματα προσπέρασης. Παρ' όλα αυτά στην περίπτωση μεγάλου μεγέθους στοιχείων οριζοντιογραφίας και μηκοτομής δεν δημιουργεί πρόβλημα, καθώς βελτιώνει την οπτική καθοδήγηση και παροτρύνει τους οδηγούς να χρησιμοποιούν χαμηλότερες ταχύτητες.

Σχήμα 4.11: Επαλληλία οριζοντιογραφική καμπύλης με κύρτωμα
(Πηγή: FGSV, 2012, Ιδία επεξεργασία)



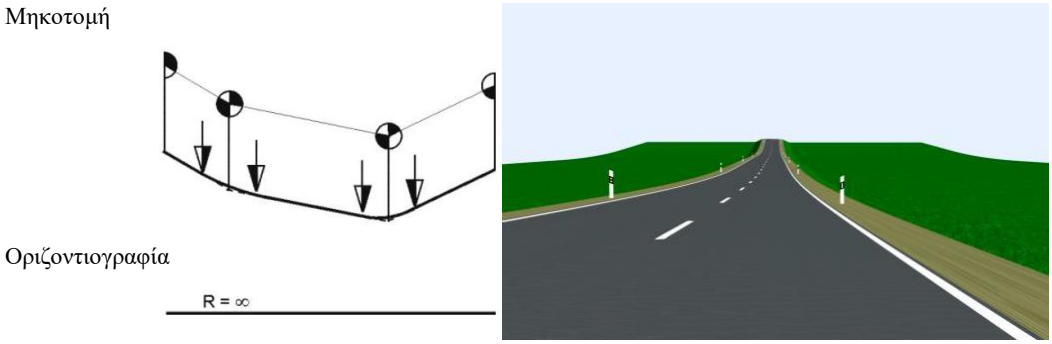
Στην περίπτωση που για οποιοδήποτε λόγο τα σημεία καμπής σε οριζοντιογραφία και μηκοτομή δεν είναι δυνατό να συμπίπτουν, θα πρέπει να εξασφαλίζεται ότι η αλλαγή της κατεύθυνσης της οδού θα είναι σαφώς αναγνωρίσιμη μέσα στο διαθέσιμο μήκος ορατότητας (FGSV, 2012). Η αλλαγή κατεύθυνσης της οδού, μετρούμενη από την αρχή της καμπύλης συναρμογής, που βρίσκεται μέσα στο διαθέσιμο μήκος ορατότητας θα πρέπει να είναι κατ' ελάχιστο 3,5 gon. Η σχέση μεταξύ της ακτίνας της οριζοντιογραφικής καμπύλης και της ακτίνας του τόξου στρογγύλευσης που προτείνεται, είναι ότι η ακτίνα του τόξου στρογγύλευσης στη μηκοτομή πρέπει να είναι και σε αυτήν την περίπτωση τουλάχιστον το δεκαπλάσιο της ακτίνας της οριζοντιογραφικής καμπύλης, καθώς έτσι επιτυγχάνεται μείωση της ταχύτητας συμβάλλοντας στην οδική ασφάλεια.

Επίσης, τονίζεται ότι κλειστή οριζοντιογραφική καμπύλη δεν πρέπει να βρίσκεται κοντά σε έντονη κυρτή καμπύλη μηκοτομής, επειδή ο οδηγός δεν μπορεί εύκολα να αντιληφθεί την αλλαγή στην οριζοντιογραφία, ειδικά κατά τη διάρκεια της νύχτας (AASHTO, 2011). Θα πρέπει η οριζοντιογραφική καμπύλη να προηγείται της καμπύλης στη μηκοτομή και να επιλέγεται τιμή για την ακτίνα στην οριζοντιογραφία επαρκώς μεγαλύτερη από την ελάχιστη που απαιτείται για τη συγκεκριμένη ταχύτητα μελέτης.

4.2.3.3 Παραμορφώσεις λόγω παρεμβολής ευθυγραμμιών μεταξύ καμπυλών

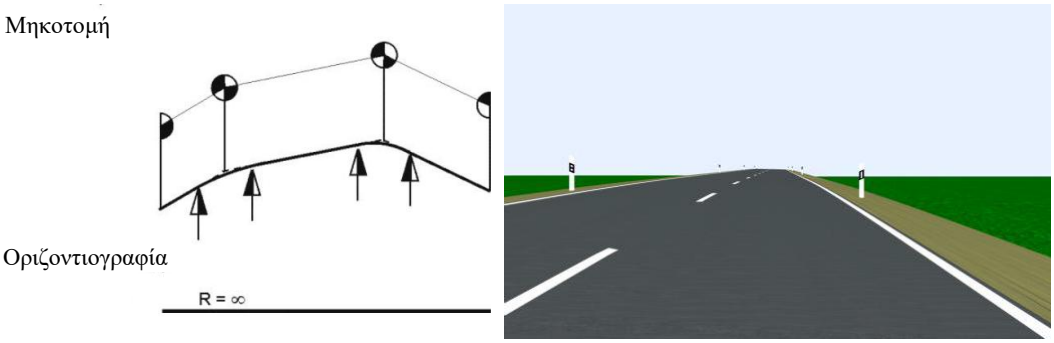
Στις οδηγίες χαράξεων της FGSV (2012) ότι μικρές ευθυγραμμίες σταθερής κατά μήκος κλίσης πρέπει να αποφεύγονται μεταξύ δύο διαδοχικών κατακόρυφων καμπυλών ίδιας φοράς. Συγκεκριμένα, ένα μικρό ευθύγραμμο τμήμα μεταξύ δύο διαδοχικών κοιλωμάτων μπορεί να δημιουργήσει την εντύπωση κυρτώματος και επομένως πρέπει να αποφεύγεται.

Σχήμα 4.12: Παραπλανητική εντύπωση κυρτώματος μεταξύ διαδοχικών κοίλων καμπυλών (Πηγή: FGSV, 2012, Ιδία επεξεργασία)



Αντίστοιχα, μικρό ευθύγραμμο τμήμα μεταξύ διαδοχικών ορατών κυρτωμάτων μπορεί να δημιουργήσει την εντύπωση κοιλώματος. Μηκοτομές αυτής της μορφής συναντώνται συχνά όταν η οδός περνά πάνω από τεχνικά έργα.

Σχήμα 4.13: Παραπλανητική εντύπωση κοιλώματος μεταξύ διαδοχικών κυρτών καμπυλών (Πηγή: FGSV, 2012, Ιδία επεξεργασία)



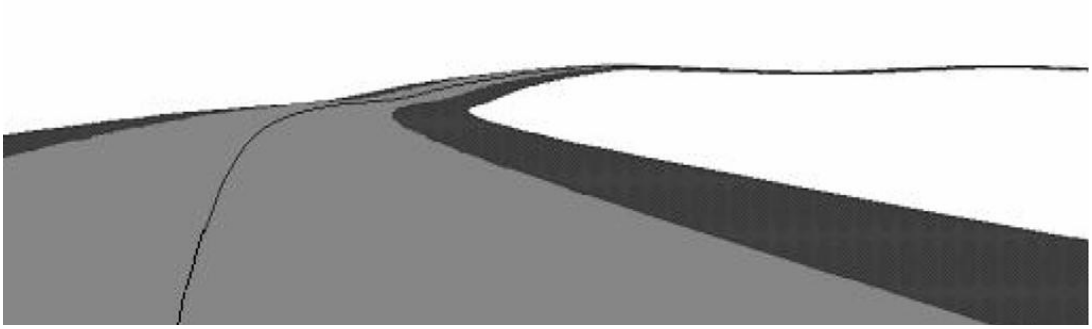
4.2.4 Κυματισμός και απόκρυψη τμημάτων οδού

Τα φαινόμενα κυματισμού, που ενδεχομένως οδηγούν στην απόκρυψη τμημάτων οδού από το οπτικό πεδίο του οδηγού οφείλονται στις τοπικές υπερυψώσεις. Οι τελευταίες δημιουργούνται, όταν η χάραξη ακολουθεί βραχείες ανυψώσεις του εδάφους, χωρίς κάποιο τμήμα της να αποκρύπτεται από το οπτικό πεδίο του οδηγού.

4.2.4.1 Κυματισμός

Πολλαπλές διαδοχικές τοπικές υπερυψώσεις οδηγούν σε κυματισμό της οδού. Στις οδηγίες της AASHTO (2011) τονίζεται, ότι όταν η οριζοντιογραφία είναι καμπυλόγραμμη και το οπτικό πεδίο ελεύθερο, ο οδηγός μπορεί να διακρίνει την πλευρική όψη της περιοχής όπου εμφανίζεται ο κυματισμός, με αποτέλεσμα το φαινόμενο να γίνεται πιο έντονο, καθώς αποκαλύπτεται και η πιο μικρή υπερύψωση.

Σχήμα 4.14: Κυματισμός σε οριζοντιογραφική καμπύλη
(Πηγή: Mertzanis & Hatzi, 2011, Ιδία επεξεργασία)

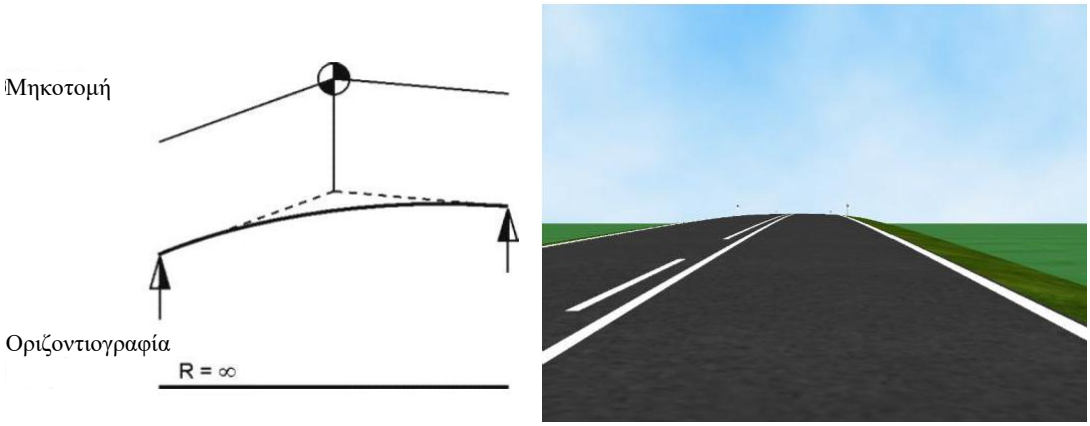


Στις οδηγίες της AASHTO (2011) και της TAC-ATC (1999) συμπληρώνεται ότι η σταθερή κατά μήκος κλίση θα πρέπει σαφώς να προτιμάται σε σύγκριση με διαδοχικές κοίλες και κυρτές καμπύλες, που προκύπτουν από την επιθυμία μείωσης των όγκων των χωματισμών και των αποστάσεων μεταφοράς τους, διότι οι διαδοχικές βυθίσεις της οδού περιορίζουν την ορατότητα και μπορεί να οδηγήσουν σε ατυχήματα κατά τη διάρκεια ελιγμών προσπέρασης.

4.2.4.2 Βύθισμα της οδού

Η ευθυγραμμία σε συνδυασμό με κύρτωμα μειώνει την ορατότητα, δυσχεραίνει τον οπτικό προσανατολισμό και είναι ακατάλληλη σε περιοχές κόμβων.

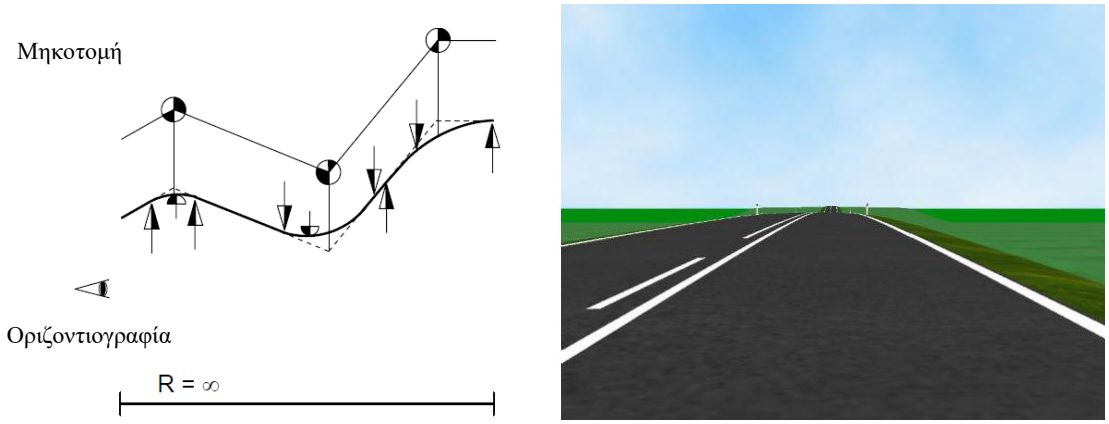
Σχήμα 4.15: Ευθυγραμμία σε κύρτωμα
(Πηγή: FGSV, 2012, Ιδία επεξεργασία)



Στην περίπτωση που η επαλληλία ευθυγραμμίας και κυρτώματος συνδυαστεί με μηκοτομή που ακολουθεί βραχείες ανυψώσεις του εδάφους και υπάρχουν τμήματα της οδού που χάνονται από το οπτικό πεδίο του οδηγού, δημιουργείται βύθισμα της οδού. Μια τέτοια περίπτωση παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.

Στην περίπτωση που το βύθισμα είναι μεγάλο δεν υπάρχει καθόλου ορατότητα σε κάποιο τμήμα της οδού, ενώ στο μικρό βύθισμα ο οδηγός δυσκολεύεται να εκτιμήσει σωστά την απόσταση. Και στις δύο περιπτώσεις μπορεί να προκληθούν ατυχήματα κατά τη διάρκεια ελιγμών προσπέρασης.

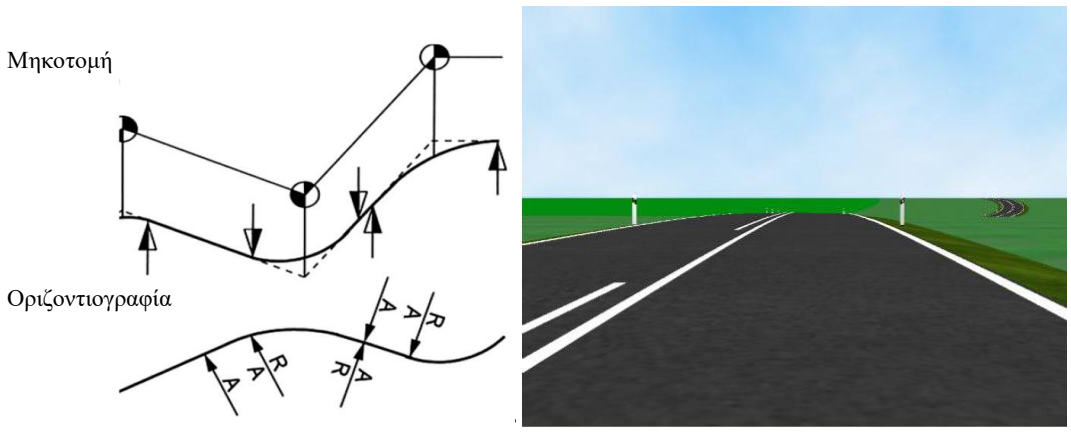
Σχήμα 4.16: Βύθισμα της οδού
(Πηγή: FGSV, 2012, Ιδία επεξεργασία)



4.2.4.3 Άλμα της οδού

Όταν ταυτόχρονα με το βύθισμα η χάραξη κάμπτεται, τότε δημιουργείται η εντύπωση άλματος της οδού και η αλλαγή κατεύθυνσης της οδού ενδέχεται να μην γίνεται εγκαίρως αντιληπτή από τους οδηγούς. Στο παρακάτω σχήμα, η αλλαγή κατεύθυνσης της οδού προς τα αριστερά δεν γίνεται εύκολα αντιληπτή. Για την αποφυγή των φαινομένων απόκρυψης τμημάτων της οδού προτείνεται από την FGSV (2012) η χρήση ακτινών καμπυλότητας μεγαλύτερων από 5000 m και η αποφυγή παρεμβολής τμημάτων σταθερής κλίσης μεταξύ των κατακόρυφων καμπυλών όταν η αλλαγή κλίσης είναι μικρότερη από 8% περίπου. Πρέπει να γίνεται έλεγχος με προοπτικές εικόνες σε περιοχές της κορυφής των αρχικών κυρτών καμπυλών.

Σχήμα 4.17: Άλμα της οδού
(Πηγή: FGSV, 2012, Ιδία επεξεργασία)



Το φαινόμενο του άλματος επισημαίνεται και από την AASHTO (2011). Αναφέρεται δηλαδή ότι όταν η αρχή οριζοντιογραφικής καμπύλης δεν γίνεται φανερή στον οδηγό από παρεμβαλλόμενο κύρτωμα ενώ η συνέχεια της καμπύλης είναι ορατή στο βάθος της προοπτικής εικόνας, τότε παρατηρείται το φαινόμενο αυτό.

4.3 Σύνοψη απαιτήσεων χάραξης οδού στον χώρο

Για την επίτευξη μιας αρμονικής χάραξης της οδού στον χώρο απαιτείται συγκρίσιμη κλίμακα μεταβολών στην οριζοντιογραφία και τη μηκοτομή, δηλαδή μικρές μεταβολές στην οριζοντιογραφία δεν θα πρέπει να συνδυάζονται με μεγάλες μεταβολές στη μηκοτομή.

Με τη σύμπτωση των σημείων καμπής στην οριζοντιογραφία και τη μηκοτομή προκύπτει μια επιτυχημένη τρισδιάστατη χάραξη της οδού στον χώρο που αντιστοιχεί με αρμονικές μορφές που υπάρχουν στο φυσικό εδαφικό ανάγλυφο.

Οι καμπύλες της μηκοτομής πρέπει να περιέχονται στις καμπύλες της οριζοντιογραφίας. Με τον τρόπο αυτό βελτιώνεται η τρισδιάστατη εικόνα στα κοιλώματα, γιατί μειώνεται ο βαθμός αλλαγής κατεύθυνσης στον χώρο και επίσης βελτιώνεται η ασφάλεια στα κυρτώματα, με τη βελτίωση της αντίληψης της κατεύθυνσης της οριζοντιογραφικής καμπύλης πριν χαθεί η εικόνα της οδού εξαιτίας του κυρτώματος.

5 Στοιχεία Ασφάλειας

Η οδική ασφάλεια επηρεάζεται από μια σύνθετη αλληλεπίδραση των στοιχείων της οδού και μόνον η αυστηρή τήρηση των προδιαγραφών σχεδιασμού δεν έχει πάντα ως αποτέλεσμα τον ασφαλέστερο δυνατό σχεδιασμό. Ο σχεδιασμός θα πρέπει να ανταποκρίνεται στις ανάγκες όλων των χρηστών της οδού. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται σε ζητήματα ασφάλειας που σχετίζονται με τα βαρέα οχήματα, ενώ θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι ιδιαίτερες ανάγκες των ευάλωτων ομάδων, όπως ηλικιωμένων οδηγών, ποδηλατών, πεζών και μοτοσυκλετιστών (Κανελλαΐδης, και συν., 2013). Σύμφωνα με τους Lamm & Choueiri (1991) οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν σε μετρήσιμο βαθμό την οδική συμπεριφορά και ασφάλεια είναι:

- Ανθρώπινοι παράγοντες όπως η λανθασμένη εκτίμηση των ιδιοτήτων της οδού, της κυκλοφορίας, της ταχύτητας, η έλλειψη εμπειρίας οδήγησης, η οδήγηση υπό την επήρεια αλκοόλ, καθώς και δυσκολίες που μπορούν να παρουσιαστούν κυρίως στους μεγαλύτερους σε ηλικία οδηγούς.

- Η ίδια η γεωμετρία της οδού δικτύου. Ο συνδυασμός της οριζοντιογραφίας, της μηκοτομής και των διατομών ως προς το βαθμό ανάπτυξης των παρόδιων χρήσεων και του επιπέδου πρόσβασης.

- Η ύπαρξη αυξημένου κυκλοφοριακού φόρτου σε συνδυασμό με τις ποιοτικές και χρονικές της διαφοροποιήσεις.

- Θέματα που άπτονται της νομοθεσίας που ισχύει σε μια περιοχή όπως ο έλεγχος της κυκλοφορίας και ο βαθμός επιβολής αυτού.

- Περιβαλλοντικοί παράγοντες όπως οι καιρικές συνθήκες και η κατάσταση του οδοστρώματος.

- Χαρακτηριστικά του οχήματος, όπως τα ελαστικά, το σύστημα πέδησης και η παλαιότητα του.

Στις επόμενες ενότητες γίνεται μια σύντομή ανάλυση ορισμένων από τους παραπάνω παράγοντες που επιδρούν στην οδική συμπεριφορά και ασφάλεια των οδών.

5.1 Στοιχεία ανθρώπινου παράγοντα

Οι οδηγοί χρησιμοποιούν τις αισθήσεις τους για να συλλέξουν πληροφορίες. Οι περισσότερες πληροφορίες προσλαμβάνονται με την όραση από την εικόνα της χάραξης και της σήμανσης. Οι

οδηγοί επίσης αντιλαμβάνονται αλλαγές στον χειρισμό του οχήματός τους, όπως με την αίσθηση της επιφάνειας της οδού μέσω των κραδασμών των τροχών.

Κατά τη διάρκεια της οδήγησης οι οδηγοί λειτουργούν σε πολλά επίπεδα ταυτόχρονα. Ελέγχουν τις πηγές πληροφοριών, λαμβάνουν πολυάριθμες αποφάσεις και πραγματοποιούν τις απαραίτητες ενέργειες ελέγχου του οχήματός τους. Οι πηγές πληροφοριών, είτε είναι σχετικές με την οδήγηση ή όχι, είναι ανταγωνιστικές για την προσοχή των οδηγών. Οι αναγκαίες πληροφορίες θα πρέπει να βρίσκονται στο οπτικό πεδίο του οδηγού, να είναι διαθέσιμες όταν και όπου χρειάζονται, να είναι αξιοποιήσιμες και να προσελκύουν την προσοχή του. Οι οδηγοί αντιλαμβάνονται τις πληροφορίες και διατηρούν την επίγνωση για το συνεχώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον τους μέσω μιας διαδικασίας επιμερισμού της προσοχής τους. Λαμβάνουν κάποιες από τις αποφάσεις τους αμέσως και άλλες πιο καθυστερημένα μετά από κρίση, εκτίμηση και πρόβλεψη για να καλύψουν κενά στις διαθέσιμες πληροφορίες.

5.1.1 Χρόνος αντίδρασης

Ο χρόνος αντίδρασης των οδηγών αυξάνεται με την πολυπλοκότητα της απόφασης και του όγκου των προς επεξεργασία πληροφοριών. Επιπλέον, όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος αντίδρασης τόσο μεγαλύτερη είναι και η πιθανότητα λάθους. Ο χρόνος αντίδρασης σε αναμενόμενο συμβάν του μέσου οδηγού είναι περίπου 0,6s με λίγους οδηγούς να έχουν χρόνο 2s. Σε μη αναμενόμενα συμβάντα οι χρόνοι αντίδρασης αυξάνουν κατά περίπου 35%. Επομένως για απλή, μη αναμενόμενη απόφαση και αντίδραση, μερικοί οδηγοί χρειάζονται 2,7sec για να αντιδράσουν. Μια σύνθετη απόφαση με εναλλακτικές επιλογές μπορεί να απαιτήσει μερικά δευτερόλεπτα περισσότερο από μια απλή απόφαση.

Στον σχεδιασμό των οδών θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι χρόνοι αντίδρασης. Επίσης πρέπει να αναγνωρίζεται ότι οι οδηγοί διαφοροποιούνται στις αντιδράσεις τους σε συγκεκριμένα συμβάντα και χρειάζονται περισσότερο χρόνο για να ανταποκριθούν όταν οι αποφάσεις είναι σύνθετες ή σε μη αναμενόμενα συμβάντα. Ανεμπόδιστες γραμμές ορατότητας και επαρκείς αποστάσεις ορατότητας για απόφαση παρέχουν κάποια περιθώρια λάθους.

5.1.2 Προτεραιότητα στην παρεχόμενη πληροφόρηση

Η προτεραιότητα στην παρεχόμενη πληροφόρηση συνδέεται με τη σχετική σημασία από πλευράς ασφάλειας των ανταγωνιστικών πληροφοριών από το οδικό περιβάλλον. Οι πληροφορίες που είναι απαραίτητες για τα δύο από τα επίπεδα της οδήγησης, του ελέγχου και της καθοδήγησης, είναι σημαντικές καθώς τα λάθη σε αυτά τα επίπεδα μπορεί να συμβάλουν απευθείας σε ατυχήματα. Οι πληροφορίες που αφορούν στο επίπεδο της πλοήγησης έχουν χαμηλότερη ιεράρχηση σε σχέση με τις πληροφορίες που αφορούν στα άλλα επίπεδα οδήγησης, καθώς μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα τη μη αποδοτική κυκλοφοριακή ροή αλλά είναι λιγότερο πιθανό να οδηγήσουν σε ατυχήματα. Συνεπώς ο σχεδιασμός της οδού θα πρέπει να βοηθά τους οδηγούς να επικεντρώνουν την προσοχή τους στα στοιχεία που είναι κρίσιμα για την ασφάλεια καθώς και στις πηγές πληροφοριών υψηλής προτεραιότητας. Αυτός ο στόχος επιτυγχάνεται με την εξασφάλιση ανεμπόδιστων γραμμών ορατότητας καθώς και καλή οπτική ευκρίνεια.

5.1.3 Προσδοκίες των οδηγών

Οι προσδοκίες των οδηγών διαμορφώνονται από την εμπειρία και την εκπαίδευσή τους στην οδήγηση. Όμοιες καταστάσεις στην κυκλοφορία και οι επιτυχημένες αντιδράσεις σε αυτές, ενσωματώνονται στην υπάρχουσα γνώση. Οι προσδοκίες σχετίζονται με την πιθανότητα ένας οδηγός να ανταποκριθεί σε συνηθισμένες καταστάσεις με συγκεκριμένους τρόπους που ο ίδιος έχει διαπιστώσει ως επιτυχημένους στο παρελθόν. Οι προσδοκίες επηρεάζουν τον τρόπο που οι οδηγοί αντιλαμβάνονται και αξιοποιούν τις πληροφορίες με τη συμπεριφορά τους. Με την επαλήθευση των προσδοκιών τους οι οδηγοί βοηθούνται να αντιδρούν άμεσα και επιτυχημένα. Ασυνήθιστες, μοναδικές καταστάσεις που

δεν είναι σύμφωνες με τις προσδοκίες των οδηγών μπορεί να προκαλέσουν μεγαλύτερους χρόνους αντίδρασης, μη κατάλληλες αντιδράσεις ή λάθη.

Τα περισσότερα στοιχεία του σχεδιασμού θα πρέπει να είναι αρκετά παρόμοια ώστε να δημιουργούν προσδοκίες στους οδηγούς που συνδέονται με τα κοινά γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά της οδού καθώς και με τα χαρακτηριστικά της διαδρομής. Για παράδειγμα, επειδή στους περισσότερους ανισόπεδους κόμβους των αυτοκινητοδρόμων, οι έξοδοι βρίσκονται στη δεξιά πλευρά, οι οδηγοί γενικά αναμένουν τις εξόδους προς τα δεξιά. Αυτό βοηθάει την οδήγησή τους καθώς ενισχύονται οι γρήγορες και σωστές αντιδράσεις στις θέσεις των εξόδων προς τα δεξιά. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου οι προσδοκίες τους παραβιάζονται. Για παράδειγμα, εάν ένας κλάδος εξόδου βρίσκεται προς τα αριστερά τότε η προσδοκία για έξοδο προς τα δεξιά είναι εσφαλμένη και οι χρόνοι αντίδρασης μπορεί να είναι μεγαλύτεροι ή να γίνονται λάθη.

Ένας από τους πιο αποτελεσματικούς τρόπους για να βοηθηθεί η οδήγηση είναι μέσω σχεδιασμού σύμφωνα με τις προσδοκίες των οδηγών. Ασυνήθιστα χαρακτηριστικά σχεδιασμού θα πρέπει να αποφεύγονται και τα στοιχεία του σχεδιασμού πρέπει να είναι ομοιογενή σε όλο το οδικό τμήμα. Επιπλέον πρέπει να γίνεται προσπάθεια και για διατήρηση της ομοιογένειας από το ένα οδικό τμήμα στο επόμενο. Όταν οι οδηγοί προσλαμβάνουν τις πληροφορίες που προσδοκούν από την οδό και τα μέσα ελέγχου κυκλοφορίας, τότε τείνουν να οδηγούν χωρίς λάθη. Όταν δεν συναντούν αυτό που προσδοκούν ή συναντούν αυτό που δεν προσδοκούν, μπορεί να κάνουν λάθη.

5.1.4 Σχεδιασμός της οδού λαμβάνοντας υπόψη τις ανάγκες των χρηστών της

Για να είναι ασφαλές το οδικό περιβάλλον θα πρέπει:

- Να είναι συγχωρητικό και να σχεδιάζεται έτσι ώστε να αποτρέπονται απώλειες ζωής ή σοβαροί τραυματισμοί όταν συμβαίνει ένα ατύχημα.
- Να προειδοποιεί τον οδηγό για μη ικανοποιητικά στοιχεία σχεδιασμού ή για ασυνήθιστα χαρακτηριστικά.
- Να πληροφορεί τον οδηγό για τις συνθήκες που θα συναντήσει στην πορεία του.
- Να καθοδηγεί τον οδηγό.
- Να ελέγχει τη διέλευση του οδηγού από θέσεις ή τμήματα εμπλοκών.
- Να λαμβάνει υπόψη τα πιθανά λάθη του οδηγού ή τη μη κατάλληλη συμπεριφορά του.

Επισημαίνεται ότι παρόμοιες καταστάσεις θα πρέπει να αντιμετωπίζονται με παρόμοιο τρόπο και να αποφεύγονται η μη επαρκής, η μη κατάλληλη και η υπερβολική αντιμετώπιση. Θα πρέπει να χρησιμοποιούνται βέλτιστες τιμές για τα στοιχεία σχεδιασμού όσο το δυνατόν συχνότερα, και σύμφωνα με τους περιορισμούς που επικρατούν. Θα πρέπει να δίνεται έγκαιρη πληροφόρηση και προειδοποίηση για ενίσχυση της αντίληψης της οριοθέτησης της οδού, ενώ παράλληλα θα πρέπει να αποφεύγεται η αύξηση του γνωστικού φόρτου ενασχόλησης του οδηγού, όπως συμβαίνει στις περιπτώσεις υπερβολικής σήμανσης, αντικρουόμενων μηνυμάτων ή έλλειψης σαφούς οριοθέτησης της οδού. Συνεπώς, σε ένα ασφαλές οδικό περιβάλλον πρέπει:

- Να συγχωρείται το ανθρώπινο λάθος και να μην «τιμωρούνται» οι χρήστες της οδού με απώλεια ζωής ή σοβαρό τραυματισμό όταν, αναπόφευκτα, κάνουν λάθη.
- Ο σχεδιασμός της οδού και ο έλεγχος της κυκλοφορίας να μην «αιφνιδιάζει» τον οδηγό.

- Ο ρυθμός παροχής πληροφοριών να είναι ελεγχόμενος.
- Να παρέχονται επαναλαμβανόμενες πληροφορίες, όπου και όταν θα πρέπει να επισημαίνονται κίνδυνοι.

5.1.5 Παράγοντες επιλογής ταχύτητας κίνησης οχημάτων

Ανεξάρτητα από την ταχύτητα μελέτης, ο οδηγός καθορίζει την ταχύτητα της κίνησής του με διαφορετικά κριτήρια που δεν λαμβάνονται υπόψη στην μελέτη της οδού. Η κίνηση με το αυτοκίνητο σχετίζεται με την ελευθερία που προσφέρει στον οδηγό η επιλογή του πότε θα ταξιδέψει, ποια διαδρομή θα ακολουθήσει και του πόσο γρήγορα θα ταξιδέψει, συναίσθημα που δύσκολα το βρίσκει σε κάποιο άλλο μέσο μεταφοράς.

Ο λόγος επίσης της εξοικονόμησης του χρόνου, για την μετακίνηση εξαιτίας επαγγελματικών ή προσωπικών αιτών, αποτελεί ένα σημαντικό κίνητρο. Ο Hale (1990) αναφέρει χαρακτηριστικά, ότι για πολλούς οδηγούς η ταχύτητα έχει μία «εσωτερική αξία», εκφράζοντας δηλαδή μία προσωπική ευχαρίστηση, μία ψυχολογική ικανοποίηση ελευθερίας.

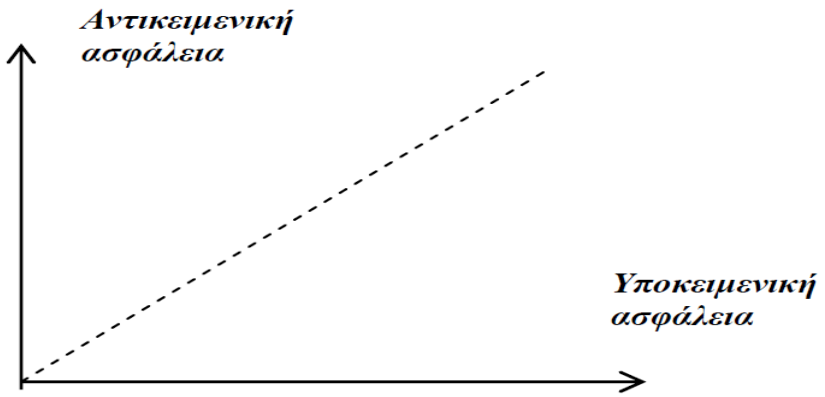
Ποικίλα κριτήρια και παράγοντες είναι καθοριστικά για τη διαμόρφωση των επιλογών της ταχύτητας του οδηγού, όπως το οδικό περιβάλλον, τα μηχανικά χαρακτηριστικά του οχήματος και η ιδιοσυγκρασία του οδηγού (Giles, 2004). Αυτά παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 5.1: Παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή ταχύτητας ενός οδηγού (Πηγή: Giles, 2004)

Οδικό περιβάλλον	Όχημα	Προσωπικά χαρακτηριστικά
Τύπος οδού	Τύπος οχήματος	Ηλικία οδηγού
Οριζοντιογραφία	Παλαιότητα	Εμπειρία οδηγού
Ορατότητα	Μέγιστη δυνατή ταχύτητα	Αίσθηση κινδύνου
Μέγεθος καμπύλης		Αντίληψη ασφάλειας
Μήκος ευθυγραμμίας		Αξία χρόνου
Όριο ταχύτητας		Οδική συμπεριφορά

Η προσαρμογή του οδηγού ως προς τον οδική συμπεριφορά είναι αποτέλεσμα της ψυχολογικής αντίθεσης που δημιουργείται ανάμεσα της αίσθησης της αντικειμενικής και της υποκειμενικής ασφάλειας. Η αντικειμενική ασφάλεια προσδιορίζεται από την ικανοποίηση των κριτηρίων ασφάλειας της οδού, ενώ η υποκειμενική ασφάλεια είναι κατανοητή από την προσωπική εμπειρία.

Σχήμα 5.1: Σχέση αντικειμενικής και υποκειμενικής ασφάλειας (Πηγή: Κεχαγιά, 2005)



Στις περισσότερο αναπτυγμένες χώρες γίνεται διαρκής αναμόρφωση των κανονισμών μελέτης οδών βάσει νέων επιστημονικών ερευνών, εμπειρικών κανόνων, απλουστεύσεων και παραδοχών ώστε να ληφθεί υπόψη η πραγματική συμπεριφορά των οδηγών. Ο Galin (1981), ήταν από τους πρώτους ερευνητές που προσπάθησε να υπολογίσει μία βέλτιστη τιμή της ταχύτητας κίνησης, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση όχι μόνο των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της οδού, που ήταν μέχρι τότε το αντικείμενο μελέτης, αλλά και άλλων παραγόντων όπως ο ανθρώπινος παράγοντας, τα μηχανικά χαρακτηριστικά του οχήματος, ο κυκλοφοριακός παράγοντας και στοιχεία του περιβάλλοντος, όπως τα είδη χρήσης γης και ο καιρός. Επιλύοντας ένα μαθηματικό πρότυπο παλινδρομικής ανάλυσης με τους παραπάνω παράγοντες, απέδειξε την μεταβολή της τιμής της λειτουργικής ταχύτητας συναρτήσει των διαφορετικών παραγόντων. Η αντικειμενική δυσκολία εμφανίζεται στο ότι οι παράγοντες αυτοί δεν είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους, αλλά συσχετίζονται μερικώς.

5.2 Ομοιομορφία στον σχεδιασμό των οδών

Η ομοιομορφία ή ομοιογένεια ή συνοχή ή αρμονία στον σχεδιασμό των οδών, ιδιαίτερα σε υπεραστικό περιβάλλον, είναι ένα σημαντικό στοιχείο για την οδική ασφάλεια. Δεν πρέπει να υπάρχουν «εκπλήξεις» για τους οδηγούς όπως για παράδειγμα, μια οριζοντιογραφική καμπύλη με μικρή ακτίνα σε ένα οδικό τμήμα όπου όλες οι άλλες καμπύλες έχουν μεγάλες ακτίνες ή μια προς τα αριστερά έξοδος σε αυτοκινητόδρομο με όλες τις άλλες εξόδους προς τα δεξιά. Η ομοιογένεια στον σχεδιασμό της οδού πρέπει να εξασφαλίζεται για κάθε τύπο οδού και σε κάθε μορφής εδαφικό ανάγλυφο, σε όλες τις θέσεις της οδού. Με αυτή την προσέγγιση μπορεί να επιτευχθεί σχεδιασμός των οδών, με χαρακτηριστικά που μπορεί να βοηθήσουν τους χρήστες να κατανοήσουν εύκολα τον τύπο της οδού και να περιμένουν τον τρόπο διαμόρφωσης των διάφορων στοιχείων της. Ο σχεδιασμός της οδού έτσι ώστε οι προσδοκίες που δημιουργούνται στον οδηγό να επαληθεύονται κατά την οδήγηση, συμβάλλει στην ασφαλή οδήγηση. Κατά συνέπεια, για την ασφάλεια της κυκλοφορίας και την επίτευξη οικονομικών ταχυτήτων, απαιτείται:

- Ο διαχωρισμός στο οδικό δίκτυο με την καθιέρωση κατηγοριών οδών, όπως αρτηρίες και συλλεκτήριες οδοί με βάση λειτουργικά κριτήρια.
- Ο διαχωρισμός στη διατομή σε ζώνες όπως βραδυπορίας ή λωρίδες στάθμευσης.
- Ο διαχωρισμός στους κόμβους σε διαβάσεις για πεζούς και για δίκυκλα, ή σε ειδικές λωρίδες εισόδου και εξόδου.

Στις προδιαγραφές της TAC-ATC (1999) προτείνεται να εξετάζονται τρεις περιοχές που αναφέρονται στην ομοιογένεια του σχεδιασμού:

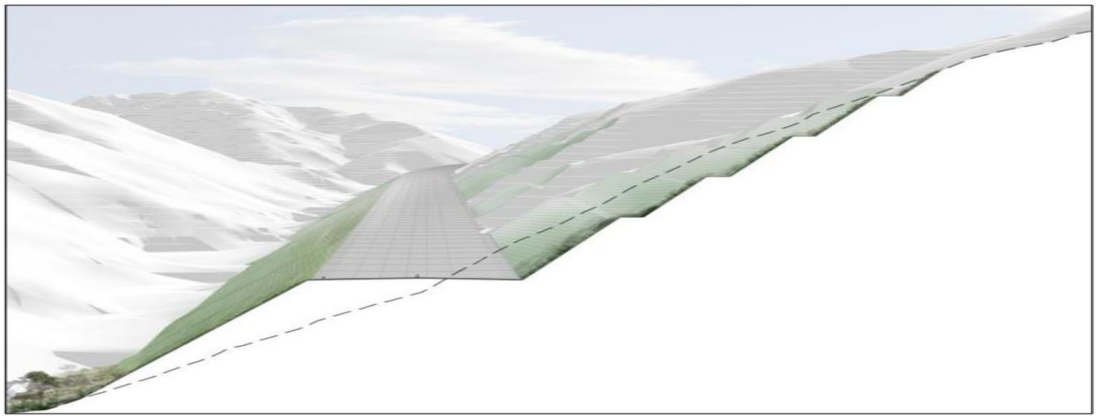
- Ομοιομορφία στη διατομή της οδού.
- Ομοιομορφία στις λειτουργικές ταχύτητες.
- Ομοιομορφία στον φόρτο ενασχόλησης.

5.2.1 Ομοιομορφία στη διατομή της οδού

Για μια δεδομένη λειτουργική κατηγοριοποίηση της οδού, σε ορισμένες συνθήκες εδαφικού ανάγλυφου, τα στοιχεία της διατομής της πρέπει να είναι τα ίδια οπουδήποτε, αλλά κυρίως κατά μήκος κάθε συγκεκριμένου οδικού τμήματος. Εφόσον καθορισθούν οι διαστάσεις των στοιχείων της διατομής, όπως το πλάτος λωρίδας και των ερεισμάτων και τα χαρακτηριστικά του ελεύθερου παρόδιου χώρου, αυτές πρέπει να εφαρμόζονται σταθερά και πρέπει επίσης να αποφεύγεται η δημιουργία αναντιστοιχίας μεταξύ της διατομής μιας οδού και της οριζοντιογραφίας και μηκοτομής.

Στην περίπτωση, για παράδειγμα, της βελτίωσης της οδού, η αναβάθμιση των στοιχείων της διατομής χωρίς να υπάρξει αντίστοιχη αναβάθμιση της καμπυλότητας στην οριζοντιογραφία ή της κατά μήκος κλίσης, μπορεί να έχει ως συνέπεια εσφαλμένη και εν δυνάμει επικίνδυνη αντίληψη της οδού από τους οδηγούς. Αυτό μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα, οι οδηγοί να επιλέγουν ταχύτητες που υπερβαίνουν τις κατάλληλες για τις συνθήκες της χάραξης.

Σχήμα 5.2: Διατήρηση ομοιόμορφης διατομής οδού



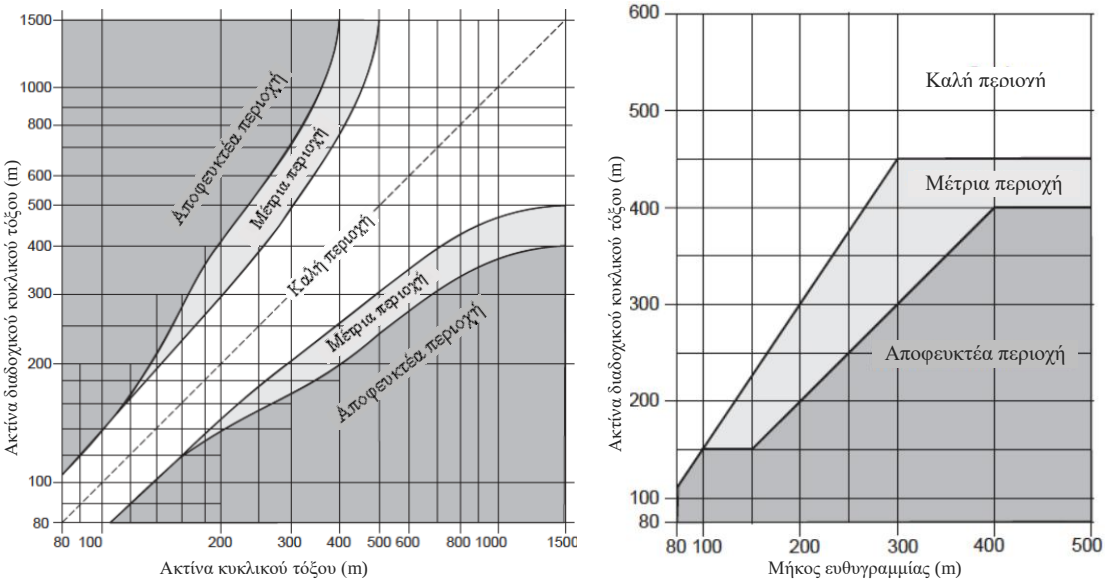
Μερικές φορές μια ξαφνική αλλαγή στη μορφή της διατομής είναι αναπόφευκτη, όπως στην περίπτωση όπου μια οδός δύο λωρίδων ανακατασκευάζεται με τέσσερις λωρίδες σταδιακά. Σε τέτοιες περιπτώσεις οι υπεύθυνοι για τον σχεδιασμό της οδού πρέπει να προβούν στις κατάλληλες ενέργειες για να μετριασθούν οι επιπτώσεις από την αλλαγή της διατομής. Οι αλλαγές πρέπει να γίνονται βαθμιαία με επαρκούς μήκους τμήματα συναρμογής και έγκαιρη σήμανση για να προειδοποιούνται οι οδηγοί που προσεγγίζουν τι πρέπει να περιμένουν.

5.2.2 Ομοιομορφία στις λειτουργικές ταχύτητες

Ο σχεδιασμός της οδού πρέπει να είναι κατάλληλος για τις λειτουργικές ταχύτητες των οχημάτων που κινούνται στην οδό. Οι επιθυμητές ή οι αναμενόμενες ταχύτητες πρέπει να καθορίζονται στα πρώτα στάδια του σχεδιασμού του έργου. Οι λειτουργικές ταχύτητες επηρεάζουν την καμπυλότητα στην οριζοντιογραφία και στη μηκοτομή, το πλάτος λωρίδας, τις αποστάσεις ορατότητας, τον πλευρικό ελεύθερο χώρο και τα στηθαία ασφαλείας. Η οδός πρέπει να σχεδιασθεί με τρόπο που να διευκολύνει και ουσιαστικά να ενθαρρύνει την ανάπτυξη ομοιογενών λειτουργικών ταχυτήτων, με στόχο τη βελτίωση της ασφάλειας της οδού.

Υπάρχουν μερικές θέσεις όπου η αλλαγή στην τοπογραφία καθιστά αναγκαία τη μείωση των ταχυτήτων. Σε αυτές τις συνθήκες οι ακτίνες των καμπύλων της οριζοντιογραφίας πρέπει να μειώνονται σταδιακά, μέσω μιας σωστής αλληλουχίας, με χρήση κατάλληλης προειδοποιητικής σήμανσης, αν χρειάζεται. Σε οδικά δίκτυα χωρίς κατάλληλη λειτουργική κατηγοριοποίηση η ανάμιξη της τοπικής κυκλοφορίας με κυκλοφορία υψηλών ταχυτήτων σε οδούς κατευθείαν σύνδεσης, μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα ανομοιογένεια στις λειτουργικές ταχύτητες. Η κατάλληλη ιεράρχηση του οδικού δικτύου, ο έλεγχος των προσβάσεων και το κατάλληλο αναπτυξιακό σχέδιο μπορεί να βοηθήσουν στην επίτευξη ομοιογενών ταχυτήτων. Επίσης, για την εξασφάλιση αρμονίας στις λειτουργικές ταχύτητες προβλέπεται ότι οι ακτίνες των κυκλικών τόξων σε διαδοχικές καμπύλες της οριζοντιογραφίας καθορίζονται με βάση τις επιτρεπτές τιμές. Το ίδιο ισχύει και για τις αλληλουχίες ευθυγραμμιών και κυκλικών τόξων σύμφωνα με τις οδηγίες σχεδιασμού οδών της FGSV (2012).

Σχήμα 5.3: Επιτρεπτές αλληλουχίες κυκλικών τόξων και ευθυγραμμιών (Πηγή: FGSV, 2012, Ιδία επεξεργασία)

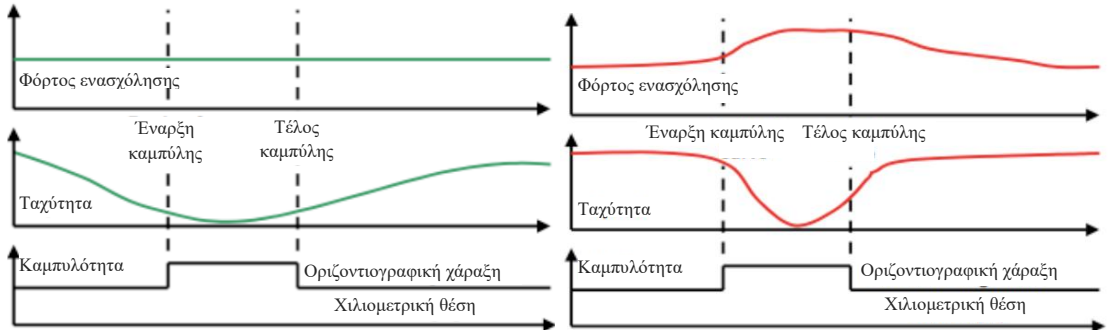


Επισημαίνεται ότι τα συγκεκριμένα διαγράμματα προέκυψαν από μετρήσεις ταχυτήτων στη Γερμανία και επομένως μπορεί να χρησιμεύσουν ως στοιχεία μόνο για μια ποιοτική εκτίμηση της ομοιογένειας των λειτουργικών ταχυτήτων (Κανελλαΐδης, και συν., 2013). Απαιτείται σχετική έρευνα σε άλλες χώρες, για να προκύψουν τα αντίστοιχα απαραίτητα στοιχεία. Η αυτόματη συμπερίληψη αυτών των στοιχείων στο πρότυπο βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων θα γίνει σε επόμενη εργασία όμως ο χρήστης της εφαρμογής είναι σε θέση να καθορίζει ελάχιστες και μέγιστες τιμές ακτινών κυκλικού τόξου βασιζόμενος στα παραπάνω διαγράμματα.

5.2.3 Ομοιομορφία στον φόρτο ενασχόλησης του οδηγού

Ο φόρτος ενασχόλησης του οδηγού αναφέρεται στην προσπάθεια που καταβάλλει ο οδηγός κατά την οδήγηση. Επισημαίνεται ότι ο φόρτος αυτός μεταβάλλεται με τη δυσκολία του έργου οδήγησης. Η δυσκολία του έργου οδήγησης σχετίζεται με τις ικανότητες του οδηγού τη δεδομένη στιγμή, που συνδέονται με την υγεία, τη φυσική, νοητική και συναισθηματική του κατάσταση, τις γνώσεις και τις εμπειρίες του σε σχέση με την οδήγηση, καθώς και από τις απαιτήσεις που του επιβάλλονται από τις συνθήκες οδήγησης, όπως η χάραξη της οδού, οι συνθήκες κυκλοφορίας και το οδικό περιβάλλον. Εάν οι απαιτήσεις είναι πολύ μικρές, η προσοχή του οδηγού, δηλαδή το επίπεδο εγρήγορσης θα είναι πολύ μικρή με πιθανή απώλεια επαγρύπνησης και αιφνιδιασμό για παράδειγμα σε μια οριζοντιογραφική καμπύλη, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα.

Σχήμα 5.4: Ασφαλής και μη ασφαλής φόρτος ενασχόλησης του οδηγού (Πηγή: Psarianos, 2010, Ιδία Επεξεργασία)



Εάν οι απαιτήσεις είναι πολύ μεγάλες λόγω των συνθηκών κυκλοφορίας, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση υψηλών ταχυτήτων, πυκνής κυκλοφορίας, αστικού πολύπλοκου οδικού περιβάλλοντος με πληθώρα σημάτων και διαφημίσεων, ή λόγω της προσωπικής του κατάστασης, όπως άγχος, πλήθος πληροφοριών για επεξεργασία, συναισθηματική κατάσταση μπορεί ο οδηγός, για αντιστάθμιση της δυσκολίας, να αγνοήσει μερικές σχετικές πληροφορίες από το οδικό περιβάλλον με πιθανές όμως επιπτώσεις στην ασφαλή οδήγηση.

Σε αυτές τις συνθήκες η αντίδραση του οδηγού σε μη αναμενόμενες καταστάσεις μπορεί να είναι πολύ αργή ή μη κατάλληλη. Είναι σημαντικό οι υπεύθυνοι για τον σχεδιασμό της οδού να εξασφαλίζουν ότι δεν θα συμβούν απότομες αυξήσεις του φόρτου ενασχόλησης του οδηγού, καθώς αυτές μπορεί να συμβάλουν σε αύξηση του κινδύνου συγκρούσεων. Οι απότομες αυξήσεις του φόρτου ενασχόλησης εξαρτώνται από τους ακόλουθους παράγοντες:

- Τη φύση του στοιχείου της οδού το οποίο προσεγγίζει ο οδηγός. Για παράδειγμα, ένας ισόπεδος κόμβος ή η κατάργηση μιας λωρίδας κυκλοφορίας είναι πιο κρίσιμα στοιχεία από την αλλαγή στο πλάτος του ερείσματος.

- Την περιορισμένη απόσταση ορατότητας προς το στοιχείο της οδού.

- Την ανομοιότητα του στοιχείου της οδού σε σχέση με το προηγούμενο στοιχείο που προκαλεί αιφνιδιασμό στον οδηγό.

- Το μεγάλο ποσοστό οδηγών μη εξοικειωμένων με την υπόψη οδό.

- Τις μεγάλες απαιτήσεις προσοχής του οδηγού μετά από μια χρονική περίοδο μικρότερων απαιτήσεων, όπως για παράδειγμα σε μια κλειστή καμπύλη μετά από μια μεγάλου μήκους ευθυγραμμία.

Στον σχεδιασμό της οδού πρέπει να αποφεύγονται θέσεις της οδού στις οποίες οι περισσότεροι ή όλοι από τους παράγοντες που προαναφέρθηκαν εμφανίζονται ταυτόχρονα. Η κατανόηση των παραγόντων αυτών από τους υπεύθυνους για τον σχεδιασμό των οδών, θα τους καταστήσει ικανούς να προσφέρουν στον οδηγό ένα ομοιογενές επίπεδο συγκέντρωσης στο έργο οδήγησης που δεν θα είναι ούτε πολύ χαμηλό ούτε πολύ υψηλό, αλλά με επαρκείς εναλλαγές ώστε να διατηρείται ένα ικανοποιητικό επίπεδο εγρήγορσης του οδηγού.

ΜΕΡΟΣ Β’: ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

6 Προβλήματα και Μέθοδοι

Στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι να εισάγει τον αναγνώστη στη θεωρία της βελτιστοποίησης που αποτελεί την ευρύτερη οικογένεια στην οποία ανήκουν οι μέθοδοι που έχουν χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση του προβλήματος των οδικών χαράξεων. Η επιλεγείσα μεθοδολογία των γενετικών αλγορίθμων που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία για την αντιμετώπιση του προβλήματος αναλύεται σε βάθος και επεξηγούνται ορισμένες έννοιες που βοηθούν στην κατανόηση της

6.1 Γενικά

Η βελτιστοποίηση είναι η διαδικασία απόκτησης του βέλτιστου αποτελέσματος κάτω από δεδομένες καταστάσεις. Στόχος της λήψης αποφάσεων είναι είτε η ελαχιστοποίηση του κόστους είτε η μεγιστοποίηση του κέρδους. Το κόστος και το κέρδος σε οποιοδήποτε πρόβλημα μπορεί να εκφραστεί ως μια συνάρτηση καθορισμένων μεταβλητών απόφασης, και κατά συνέπεια, η βελτιστοποίηση μπορεί να καθορισθεί ως η διαδικασία εύρεσης των συνθηκών που δίνουν τη μέγιστη ή την ελάχιστη τιμή μιας συνάρτησης. Οι μέθοδοι αναζήτησης του βέλτιστου είναι γνωστές και ως τεχνικές μαθηματικού προγραμματισμού και αποτελούν μέρος της επιχειρησιακής έρευνας. Ο χώρος της βελτιστοποίησης στα εφαρμοσμένα μαθηματικά αναφέρεται στην αναζήτηση βέλτιστων παραμέτρων ενός συνήθως περίπλοκου συστήματος. Προβλήματα βελτιστοποίησης απαντώνται σε πολλά επιστημονικά πεδία.

6.1.1 Λήψη αποφάσεων

Τα βήματα που απαιτούνται για την λήψη μιας απόφασης είναι τα ακόλουθα:

1. Αναγνώριση της ανάγκης. Η αντίληψη ότι κάποιες δράσεις πρέπει να γίνουν ή να γίνουν καλύτερα.

2. Καθορισμός του προβλήματος. Στο βήμα αυτό περιλαμβάνονται η ακριβής περιγραφή των στόχων της έρευνας, ο καθορισμός των εναλλακτικών αποφάσεων του συστήματος και η αναγνώριση των ορίων, των περιορισμών και των απαιτήσεων του συστήματος.

3. Κατασκευή του μαθηματικού προτύπου. Τα μαθηματικά πρότυπα καθορίζουν ρητά τη σχέση των δεδομένων εισόδου, δηλαδή μεταβλητών, περιορισμών και παραμέτρων με τα δεδομένα εξόδου, δηλαδή την τιμή του κριτηρίου βελτιστοποίησης που εκφράζεται με την συνάρτηση στόχου.

4. Συλλογή δεδομένων. Τα δεδομένα του προβλήματος απεικονίζουν τις πραγματικές συνθήκες.

5. Επίλυση του μαθηματικού προτύπου. Για την επίλυση του μαθηματικού προτύπου έχει αναπτυχθεί ένας πολύ μεγάλος αριθμός από τεχνικές, ανάλογα με την δομή του προβλήματος.

6. Επεξεργασία της λύσης του μαθηματικού προτύπου. Αφού επιλυθεί κάποιο πρότυπο είναι αναγκαία η ύπαρξη ανάλυσης ευαισθησίας. Αυτή η ανάλυση θα εστιασθεί στην αξιοπιστία τόσο του προτύπου όσο και της λύσης.

7. Υλοποίηση των τελικών αποτελεσμάτων.

Τα βήματα που περιγράφτηκαν προηγουμένως δεν πρέπει να θεωρηθούν ως ένα άκαμπτο σύνολο από βήματα όπου κάποιος εισέρχεται στο ένα άκρο και εξέρχεται από το άλλο άκρο, αντίθετα αναμένεται στην επίλυση οποιουδήποτε προβλήματος ένας πολύ μεγάλος αριθμός από επαναλήψεις διαφόρων βημάτων και από τροποποιήσεις της στρατηγικής σε διάφορα βήματα.

6.2 Προβλήματα

Στη μορφοποίηση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης περιλαμβάνονται τα ακόλουθα τρία βασικά σύνολα στοιχείων:

1. Μεταβλητές απόφασης. Οι μεταβλητές απόφασης είναι οι άγνωστοι που πρέπει να καθοριστούν από την επίλυση του προτύπου. Οι παράμετροι αποτελούν τις μεταβλητές ελέγχου του συστήματος.

2. Περιορισμοί. Για την μέτρηση των φυσικών περιορισμών του συστήματος, το πρότυπο πρέπει να περιέχει περιορισμούς που να περιορίζουν τις μεταβλητές απόφασης στις εφικτές ή επιτρεπτές τιμές του.

3. Συνάρτηση στόχου. Η συνάρτηση στόχου καθορίζει το μέτρο της αποτελεσματικότητας του συστήματος ως μαθηματική συνάρτηση των μεταβλητών απόφασής του. Για παράδειγμα, αν ο στόχος του συστήματος είναι η μεγιστοποίηση του συνολικού κέρδους, η συνάρτηση στόχου πρέπει να καθορίζει το κέρδος σε όρους των μεταβλητών απόφασης. Γενικά η βέλτιστη λύση ενός προτύπου επιτυγχάνεται όταν οι αντίστοιχες τιμές των μεταβλητών απόφασης οδηγούν στην βέλτιστη τιμή της συνάρτησης στόχου ικανοποιώντας ταυτόχρονα όλους τους περιορισμούς.

6.2.1 Ταξινόμηση προβλημάτων βελτιστοποίησης

Τα προβλήματα βελτιστοποίησης μπορούν να ταξινομηθούν λαμβάνοντας υπ’ όψιν τα ακόλουθα:

6.2.1.1 Αριθμός μεταβλητών απόφασης

Τον αριθμό των μεταβλητών που επηρεάζουν την συνάρτηση στόχου. Υπάρχει διαφορετική αντιμετώπιση στην επίλυση του προβλήματος αν υπάρχει μία ή αν υπάρχουν παραπάνω μεταβλητές. Ενώ στην βελτιστοποίηση συναρτήσεων μίας μεταβλητής μπορούν να χρησιμοποιηθούν αναλυτικές και αλγεβρικές μέθοδοι για τον ακριβή ορισμό της βέλτιστης τιμής, στη μελέτη συναρτήσεων πολλών μεταβλητών χρησιμοποιούνται κυρίως αριθμητικές μέθοδοι για έναν προσεγγιστικό ορισμό βέλτιστων.

6.2.1.2 Συνεχείς και διακριτές μεταβλητές

Βασική διάκριση των προβλημάτων βελτιστοποίησης είναι στα συνεχή και στα διακριτά προβλήματα. Τα συνεχή προβλήματα εμπλέκουν πραγματικές μεταβλητές ως ελεύθερες μεταβλητές ενδεχομένως με άνω και κάτω όρια που οριοθετούν και το χώρο αναζήτησης κάθε μεταβλητής. Είναι προφανές ότι στη συνεχή βελτιστοποίηση αναζητείται η βέλτιστη λύση από ένα άπειρο πλήθος υποψήφιων λύσεων. Στα

διακριτά προβλήματα βελτιστοποίησης γίνεται αναζήτηση ακέραιων λύσεων από ένα πεπερασμένο πλήθος επιθυμητών λύσεων, το οποίο συνήθως είναι αρκετά μεγάλου μεγέθους ώστε να δοκιμασθεί το σύνολο των λύσεων. Τα συνεχή προβλήματα έχουν συνήθως συνεχείς και παραγωγίσιμες συναρτήσεις στόχου και συναρτήσεις περιορισμών.

Αν οι μεταβλητές είναι συνεχείς τότε λέμε ότι έχουμε ένα πρόβλημα συνεχούς βελτιστοποίησης. Εάν οι μεταβλητές είναι ακέραιες τότε το πρόβλημα θεωρείται ως ένα πρόβλημα ακέραιας ή διακριτής ή συνδυαστικής βελτιστοποίησης. Ένα πρόβλημα που έχει και συνεχείς και ακέραιες μεταβλητές ονομάζεται πρόβλημα μικτής ακέραιας βελτιστοποίησης. Προβλήματα ακέραιας βελτιστοποίησης όπου η μοντελοποίηση και οι λύσεις τους αντιστοιχούν σε πρότυπα δικτύου και μπορούν να περιγραφούν από ένα γράφημα ονομάζονται προβλήματα συνδυαστικής βελτιστοποίησης.

6.2.1.3 Ντετερμινιστικές και στοχαστικές μεταβλητές

Μια διάκριση των προβλημάτων βελτιστοποίησης είναι σε αιτιοκρατικά και στοχαστικά. Στον διαχωρισμό αυτό χρειάζεται προσοχή καθώς εν προκειμένω πρόκειται για τα προβλήματα και όχι της μεθόδους βελτιστοποίησης. Συνεπώς αν κάποια ή και όλες οι μεταβλητές είναι πιθανολογικές, δηλαδή μη αιτιοκρατικές ή στοχαστικές, τότε το πρόβλημα ονομάζεται πρόβλημα στοχαστικής βελτιστοποίησης. Σημειώνεται ότι στην παρούσα εργασία το πρόβλημα που εξετάζεται είναι αιτιοκρατικό και επιλύεται με στοχαστική μέθοδο.

6.2.1.4 Βαθμός γραμμικότητας

Το βαθμό της μη γραμμικότητας της συνάρτησης στόχου. Τα γραμμικά προβλήματα βελτιστοποίησης έχουν γραμμική συνάρτηση στόχου και γραμμικούς περιορισμούς. Ένα πρόβλημα τετραγωνικού προγραμματισμού είναι ένα πρόβλημα μη-γραμμικού προγραμματισμού με τετραγωνική συνάρτηση στόχου και γραμμικούς περιορισμούς. Όταν είτε η συνάρτηση στόχου ή και κάποιος ή και ακόμα όλοι οι περιορισμοί είναι μη γραμμικοί τότε το πρόβλημα ονομάζεται πρόβλημα μη γραμμικού προγραμματισμού.

6.2.1.5 Περιορισμοί

Ένα πρόβλημα μπορεί να μη χρησιμοποιεί περιορισμούς οπότε ονομάζεται πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς ή να χρησιμοποιεί περιορισμούς είτε ισότητας είτε ανισότητας οπότε ονομάζεται πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς. Επίσης, Ένα πρόβλημα κατατάσσεται σε διαφορετικές κατηγορίες βάση τη φύση των περιορισμών του καθώς αυτοί μπορεί να είναι γραμμικοί, ακέραιοι, μη γραμμικοί και άλλοι.

6.2.1.6 Άλλα κριτήρια

Εκτός των κριτηρίων που αναφέρθηκαν υπάρχουν και άλλα κριτήρια όπως:

- Αν το πρόβλημα έχει μία ή περισσότερες λύσεις.
- Αν το πρόβλημα έχει ένα ή περισσότερα κριτήρια, δηλαδή συναρτήσεις στόχους.
- Αν η συνάρτηση στόχου ή και οι περιορισμοί μεταβάλλονται στο χρόνο τότε το πρόβλημα ονομάζεται πρόβλημα δυναμικής βελτιστοποίησης.

6.2.2 Μαθηματικό πρότυπο βελτιστοποίησης

Το γενικευμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης μοντελοποιείται ως ακολούθως:

$$\text{Minimize } f_i(x) \text{ ή Maximize } f_i(x), \quad i = 0, \ldots, I \tag{6.1}$$

υπό του περιορισμούς:

$$g_k(x) = 0, \quad k = 0, \ldots, K \tag{6.2}$$

$$h_j(x) \leq 0, \quad j = 0, \ldots, J \tag{6.3}$$

Στις παραπάνω σχέσεις, x είναι η μεταβλητή βελτιστοποίησης με $x = (x_1, x_2, \ldots, x_n)$. Τα στοιχεία $x_1, x_2, \ldots, x_n$ της μεταβλητής καλούνται μεταβλητές απόφασης και μπορούν να είναι διακριτές, συνεχείς ή συνδυασμός των δύο. Ο αριθμός των διαστάσεων του προβλήματος είναι ίσος με τον αριθμό των μεταβλητών απόφασης.

Οι συναρτήσεις $f: \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ καλούνται συναρτήσεις στόχου. Στις περιπτώσεις ελαχιστοποίησης αυτές ονομάζονται συναρτήσεις κόστους ενώ στις περιπτώσεις μεγιστοποίησης ονομάζονται συναρτήσεις καταλληλότητας. Θεωρώντας ως συνάρτηση στόχου την $-f$ προκύπτει πρόβλημα μεγιστοποίησης. Οι συναρτήσεις στόχου μπορούν να είναι γραμμικές ή μη γραμμικές. Αν $I = 1$, τότε υπάρχει μόνο μία συνάρτηση στόχου και το πρόβλημα βελτιστοποίησης ονομάζεται μονοκριτηριακό ενώ αν το πρόβλημα ονομάζεται πολυκριτηριακό ή πρόβλημα πολλαπλών στόχων. Στην ακραία περίπτωση όπου $I = 0$, δηλαδή δεν υπάρχει συνάρτηση στόχου παρά μόνο περιορισμοί, έχουμε ένα πρόβλημα εφικτότητας.

Οι σχέσεις (6.2) και (6.3) καλούνται περιορισμοί ισότητας και ανισότητας. Παρόμοια, οι συναρτήσεις $g: \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ και $h: \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ είναι οι συναρτήσεις ισότητας και ανισότητας αντίστοιχα. Λαμβάνοντας την αντίθετη συνάρτηση της, η σχέση (6.3) μετατρέπεται σε ανισότητα μεγαλύτερη ή ίση του μηδενός. Αν $K = 0$ και $J = 0$προκύπτει πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς. Όπως και οι συναρτήσεις στόχου, έτσι και οι συναρτήσεις των περιορισμών μπορούν να είναι γραμμικές ή μη γραμμικές. Αν όλες οι συναρτήσεις είναι γραμμικές προκύπτει πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού.

Ένα διάνυσμα $s \in \mathbb{R}^n$ είναι μία εφικτή λύση του προβλήματος όταν ικανοποιεί τους περιορισμούς ισότητας και ανισότητας. Το σύνολο $S \subseteq \mathbb{R}^n$όλων των εφικτών λύσεων του προβλήματος βελτιστοποίησης λέγεται χώρος αναζήτησης ή χώρος λύσεων. Όταν ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης έχει μία τουλάχιστον εφικτή λύση ονομάζεται εφικτό. Στην αντίθετη περίπτωση ονομάζεται ανέφικτο. Για ένα διάνυσμα s_l του χώρου αναζήτησης μπορούμε να θεωρήσουμε ένα νέο διάνυσμα $\varphi_l \in \mathbb{R}^n$ με στοιχεία, τις τιμές των συναρτήσεων στόχου που αντιστοιχούν στο s_l δηλαδή $\varphi_l = [f_1(s_l), f_2(s_l), \ldots, f_I(s_l)]$. Το σύνολο $\Phi \subseteq \mathbb{R}^I$ όλων διανυσμάτων των τιμών των συναρτήσεων στόχου που αντιστοιχούν στις εφικτές λύσεις του προβλήματος ονομάζεται χώρος απόκρισης ή χώρος συναρτήσεων στόχου.

Μία λύση ονομάζεται βέλτιστη όταν ελαχιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση και ταυτόχρονα ικανοποιεί τους περιορισμούς ισότητας και ανισότητας. Για δύο εφικτές λύσεις s_1 και s_2, η s_1 είναι καλύτερη της s_2 αν ισχύει η σχέση $f(s_1) < f(s_2)$ ενώ η s_1 είναι τουλάχιστον τόσο καλή όσο η s_2 αν ισχύει η σχέση $f(s_1) < f(s_2)$. Η βέλτιστη λύση σε ένα σύνολο γειτονικών εφικτών λύσεων ονομάζεται τοπικό βέλτιστο Η βέλτιστη λύση στο σύνολο όλων των εφικτών λύσεων ονομάζεται ολικό βέλτιστο. Προφανώς, η βέλτιστη λύση ενός προβλήματος ταυτίζεται με το ολικό βέλτιστο. Σε ένα πρόβλημα εφικτότητας κάθε εφικτή λύση είναι βέλτιστη.

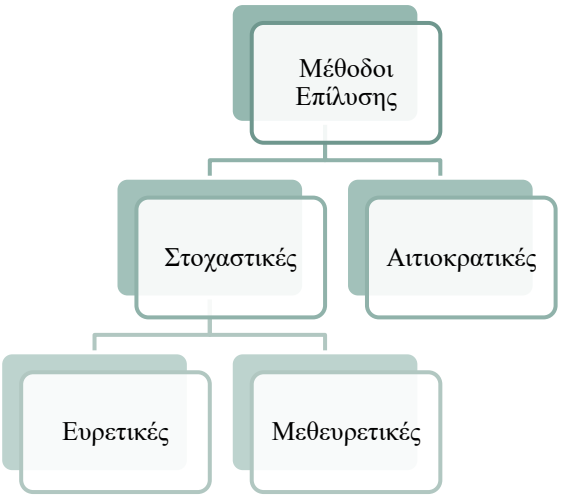
6.3 Μέθοδοι

Για την επίλυση προβλημάτων υπάρχουν γενικές μέθοδοι, που μπορούν να εφαρμοστούν σε οποιοδήποτε πρόβλημα, αλλά και ειδικές, που εξαρτώνται άμεσα από το πρόβλημα για του οποίου την επίλυση σχεδιάζονται. Οι γενικές μέθοδοι συμπεριλαμβάνουν τους ακριβείς αλγόριθμους και την

τοπική αναζήτηση με τις επεκτάσεις και τα μεθευρετικά της. Στις ειδικές περιλαμβάνονται οι ευρετικές μέθοδοι και οι προσεγγιστικοί αλγόριθμοι.

Από την πλευρά των μεθόδων και όχι των προβλημάτων βελτιστοποίησης, βασική είναι η διάκριση σε αιτιοκρατικές και στοχαστικές μεθόδους. Μια αιτιοκρατική μέθοδος βελτιστοποίησης χρησιμοποιεί τη γενικευμένη έννοια, της παραγώγου της συνάρτησης στόχου, τιμές της οποίας καλείται να υπολογίσει ή να προσεγγίσει. Χαρακτηριστικό των στοχαστικών μεθόδων βελτιστοποίησης είναι ότι χρησιμοποιούν συγχρόνως στοιχεία και από τις δύο κατηγορίες μεθόδων. Η δημιουργία μιας αιτιοκρατικής μεθόδου βελτιστοποίησης απαιτεί μεγαλύτερο χρόνο επένδυσης, είναι επεκτάσιμη σε άλλα παρεμφερή προβλήματα, δηλαδή όταν αλλάζει η συνάρτηση στόχου, συγκλίνει γενικά γρήγορα στη βέλτιστη λύση, με τον κίνδυνο όμως η λύση αυτή να είναι ένα τοπικό βέλτιστο, ανάλογα με το σημείο εκκίνησης (Γιαννάκογλου, 2012). Από την άλλη πλευρά, οι στοχαστικοί αλγόριθμοι είναι εύκολα προσαρμόσιμοι στο να λυθεί ένα διαφορετικό πρόβλημα, ενώ μπορούν να εντοπίσουν το ολικό βέλτιστο ανεξάρτητα της αρχικοποίησης.

Σχήμα 6.1: Μέθοδοι βελτιστοποίησης



6.3.1 Αιτιοκρατικοί αλγόριθμοι

Οι περισσότεροι συμβατικοί ή κλασικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης είναι ντετερμινιστικοί ή αλλιώς αιτιοκρατικοί. Δηλαδή κάθε δράση που λαμβάνει χώρα συνδέεται με αιτιώδη αλυσιδωτή σχέση με τις προηγούμενες κατά απόλυτο τρόπο. Για παράδειγμα η μέθοδος Simplex που χρησιμοποιείται στην επίλυση προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού είναι αιτιοκρατική. Οι συμβατικοί αιτιοκρατικοί αλγόριθμοι εγγυώνται την εύρεση της βέλτιστης λύσης στα προβλήματα που καλούνται να επιλύσουν. Όταν όμως χρησιμοποιηθούν σε δύσκολα προβλήματα βελτιστοποίησης απαιτούνται τόσο μεγάλοι υπολογιστικοί χρόνοι για την παραγωγή αποτελεσμάτων ώστε πρακτικά είναι αδύνατη η εφαρμογή τους. Με βάση την ανωτέρω περιγραφή γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι σε προβλήματα βελτιστοποίησης, ιδιαίτερα αν υπάρχουν περιορισμοί και μη γραμμικές συναρτήσεις, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι κλασικές αιτιοκρατικές ή ντετερμινιστικές μέθοδοι για την επίλυσή τους. Αιτιοκρατικοί αλγόριθμοι όπως η μέθοδος των πολλαπλασιαστών Lagrange μπορεί να δίνουν εγγυημένες λύσεις, ακολουθούν όμως μια συγκεκριμένη διαδικασία που επαναλαμβάνεται συνεχώς και με την εισαγωγή συγκεκριμένων δεδομένων παράγουν πάντοτε το ίδιο αποτέλεσμα.

6.3.2 Στοχαστικοί αλγόριθμοι

Με βάση τα προαναφερθέντα δημιουργήθηκε η ανάγκη ανάπτυξης στοχαστικών μεθόδων οι οποίες δε θα εγκλωβίζονται σε τοπικά βέλτιστα και θα μπορούν να βρουν μια πολύ καλή λύση, η οποία δεν είναι πάντα η βέλτιστη σε εύλογο χρονικό διάστημα.. Οι ερευνητές, μελετώντας φυσικά, βιολογικά

και κοινωνικά φαινόμενα δημιούργησαν αλγόριθμους οι οποίοι λαμβάνοντας υπόψη και τον παράγοντα της τυχαιότητας μπορούν να εξερευνούν ένα μεγάλο μέρος του χώρου λύσεων και με επαναλαμβανόμενες εκτιμήσεις της συνάρτησης στόχου να παράγουν ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Οι στοχαστικοί αλγόριθμοι, δηλαδή οι μη-ντετερμινιστικοί, είναι δυο ειδών, οι ευρετικοί και οι μεθευρετικοί. Οι πρώτοι, ψάχνουν την βέλτιστη λύση μέσω μεθόδων δοκιμής και σφάλματος και ως εκ τούτου μπορούν να βρουν μια αρκετά καλή λύση σε λογικό χρόνο, χωρίς όμως να εγγυώνται ότι αυτή είναι η βέλτιστη. Αυτό συμβαίνει διότι είναι αδύνατον σε περίπλοκα προβλήματα να εξεταστούν όλες οι εφικτές λύσεις σε λογικό χρόνο. Εξέλιξη των ευρετικών αλγορίθμων αποτελούν οι μεθευρετικοί οι οποίοι είναι πιο αποτελεσματικοί και η βασική διαφορά τους είναι ότι συνδυάζουν την τοπική αναζήτηση βέλτιστης λύσης με κάποια γενικότερη στρατηγική αναζήτησης ώστε να ξεφύγουν από το τοπικό βέλτιστο και να προσδιορίσουν το ολικό. Οι μεταευρετικές μέθοδοι είναι υψηλού επιπέδου τεχνικές, αποδοτικότερες από τις απλές ευρετικές και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση σχεδόν όλων των προβλημάτων βελτιστοποίησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι αρκετές φορές στη βιβλιογραφία οι όροι ευρετικοί και μεθευρετικοί συγχέονται και δεν ορίζονται ξεκάθαρες διαφορές μεταξύ τους. Κοινό στοιχείο ευρετικών και μεθευρετικών αλγορίθμων είναι ότι σε αντίθεση με τους αιτιοκρατικούς δεν μπορούν να εγγυηθούν ότι η λύση που βρέθηκε είναι η βέλτιστη.

6.4 Κλασσικές μέθοδοι

Οι κλασσικές μέθοδοι, παρουσίασαν αξιόλογα αποτελέσματα, όσον αφορά την εφαρμογή τους σε υπολογιστικά συστήματα και κυριάρχησαν για πολλά χρόνια. Σημειώνεται ότι δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλες οι μέθοδοι για την επίλυση όλων των προβλημάτων αλλά μια μέθοδος μπορεί να απευθύνεται και σε προβλήματα με διαφορετική δομή. Γενικά, ο στόχος είναι να βρεθεί η βέλτιστη όλων των πιθανών λύσεων, που είναι αυτή που ελαχιστοποιεί ή μεγιστοποιεί την συνάρτηση στόχου. Η συλλογή όλων των πιθανών λύσεων για ένα δεδομένο πρόβλημα μπορεί να θεωρηθεί ως ένας χώρος αναζήτησης, και οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης, με τη σειρά τους, συχνά αναφέρονται ως αλγόριθμοι αναζήτησης. Οι βασικές αρχές που ακολουθούν οι παραδοσιακοί αλγόριθμοι αναζήτησης παρουσιάζονται παρακάτω.

6.4.1 Μέθοδοι βασισμένες στο λογισμό

Οι μέθοδοι αυτές έχουν γίνει αντικείμενο ευρείας μελέτης. Χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, οι οποίες είναι οι έμμεσες και οι άμεσες. Οι έμμεσες ασχολούνται με την εύρεση τοπικών ακρότατων επιλύνοντας συνήθως ένα σύνολο μη γραμμικών συναρτήσεων. Οι άμεσες από την πλευρά τους ψάχνουν για τοπικά ακρότατα κάνοντας μικρά άλματα στη συνάρτηση. Αν και αρκετά δοκιμασμένες και οι δύο κατηγορίες παρουσιάζουν σημαντικά μειονεκτήματα. Το βασικότερο από αυτά είναι ότι εμφανίζουν τοπικότητα στην εμβέλεια. Δηλαδή, το ακρότατο το οποίο βρίσκουν είναι το καλύτερο στη γειτονιά ενός σημείου.

6.4.1.1 Μέθοδοι βασισμένες στην πληροφορία κλίσης

Μερικοί αιτιοκρατικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης χρησιμοποιούν την πληροφορία της κλίσης. Γνωστό παράδειγμα αλγόριθμου είναι ο Newton-Raphson, καθώς χρησιμοποιεί τις τιμές της συνάρτησης και τις παραγώγους της. Ένας τέτοιος αλγόριθμος λειτουργεί πολύ αποτελεσματικά για ομαλά μονοτροπικά προβλήματα. Γενικά, οι μέθοδοι αυτές είναι επαρκής για εύρεση τοπικών ελαχίστων για κυρτά προβλήματα πολλών διαστάσεων με μη γραμμικούς περιορισμούς. Παρ' όλα αυτά έχουν προβλήματα στην αντιμετώπιση ασυνεχών συναρτήσεων, ενώ δεν έχουν σχεδιαστεί για την επίλυση πολυτροπικών προβλημάτων ή διακριτές και μικτές μεταβλητές. Στον επόμενο πίνακα αναφέρονται ορισμένες μέθοδοι βασισμένες στην πληροφορία κλίσης ανεξαρτήτως περιορισμών.

Πίνακας 6.1: Μέθοδοι βασισμένες στην κλίση της συνάρτησης στόχου

Αναζήτηση κατά γραμμή	Line search
Μέθοδοι απότομης κατάβασης	Steepest descent
Μέθοδοι εσωτερικού σημείου	Interior point methods
Μέθοδος Newton	Newton method
Μέθοδοι μεταβλητής μετρικής	Quasi-Newton methods
Μέθοδοι συζυγών κλίσεων	Conjugate gradient methods

6.4.1.2 Μέθοδοι χωρίς πληροφορία κλίσης

Σε περιπτώσεις που υπάρχει ασυνέχεια στη συνάρτηση στόχου ή η παράγωγος πληροφορία δεν είναι διαθέσιμη ή αξιόπιστη ή δεν μπορεί να αποκτηθεί δεν είναι αποδοτικός και αντί αυτού προτιμάτε ένας αλγόριθμος που να μην βασίζεται στην πληροφορία κλίσης. Συνεπώς δεν χρειάζεται κάποια παράγωγο αλλά μόνο τις τιμές της συνάρτησης. Ορισμένες μέθοδοι είναι οι παρακάτω:

- Μέθοδος αναζήτησης ίχνους.
- Μέθοδος κατερχόμενου απλόκου ή μέθοδος Nelder- Mead.
- Μέθοδοι συζυγών κατευθύνσεων Powell. Η μέθοδος αυτή έχει χρησιμοποιηθεί από τους Li, Pu, Zhao, & Liu (2013) σε συνδυασμό με δυναμικό προγραμματισμό για βελτιστοποίηση οδικών χαράξεων.
- Μέθοδοι άμεσης αναζήτησης προσαρμοζόμενου πλέγματος MADS. Η μέθοδος αυτή έχει χρησιμοποιηθεί από τον Mondal (2014) για τη βελτιστοποίηση οδικών χαράξεων.

6.4.2 Απαριθμητικές μέθοδοι

Οι απαριθμητικές ή τυχαίες μέθοδοι συναντώνται σε πολλές μορφές και σε διάφορα προβλήματα. Μέσα σε ένα πεπερασμένο ή διακριτό χώρο αναζήτησης, αναζητούνται κάποια βέλτιστα σημεία με ψάξιμο σε ένα προς ένα σημείο. Παρόλο που η απλότητα εδώ είναι ελκυστική, η αποδοτικότητα είναι προφανές ότι είναι πολύ χαμηλή, κάτι που δεν τις κάνει ιδιαίτερα δημοφιλείς. Σχεδόν ποτέ δεν χρησιμοποιούνται μόνες τους, αλλά σε συνδυασμό με άλλες αποδοτικότερες μεθόδους. Η απλούστερη των αλγορίθμων αναζήτησης είναι η εξαντλητική αναζήτηση που προσπαθεί να βρει κάθε δυνατή λύση από ένα προκαθορισμένο σύνολο λύσεων και στη συνέχεια επιλέγει την καλύτερη αυτών. Μια τέτοια μέθοδο έχει χρησιμοποιήσει ο Easa(1988a) για τη βελτιστοποίηση της κατακόρυφης χάραξης.

6.4.3 Μέθοδοι επαναληπτικής αναζήτησης

Πρόκειται για ένα παραγωγικό συνδυασμό των μεθόδων των δύο προηγουμένων κατηγοριών. Μόλις εντοπιστεί ένα τοπικό μέγιστο ή ελάχιστο, επιλέγεται τυχαία ένα νέο σημείο και αρχίζει ξανά η ίδια διαδικασία για τον εντοπισμό μιας νέας κορυφής. Αυτό γίνεται αρκετές φορές κρατώντας πάντα την καλύτερη τιμή που έχει βρεθεί. Η τεχνική αυτή έχει το πλεονέκτημα της απλότητας, δηλαδή δεν υπάρχει περίπτωση παγίδευσης, αλλά όταν τα τοπικά μέγιστα είναι πολλά, η απόδοσή της ελαττώνεται σημαντικά.

6.4.4 Δυναμικός προγραμματισμός

Στο δυναμικό προγραμματισμό η επίλυση ενός προβλήματος γίνεται μέσω της επίλυσης επιμέρους αλληλοεπικαλυπτόμενων υποπροβλημάτων. Καθένα από τα υποπροβλήματα λύνεται μία μόνο φορά και η βέλτιστη λύση αποθηκεύεται και ανακαλείται όταν χρειάζεται. Η βασική αρχή του δυναμικού

προγραμματισμού είναι το ότι κάθε υποστρατηγική μιας βέλτιστης στρατηγικής είναι η ίδια βέλτιστη. Για να επιλυθεί ένα πρόβλημα με δυναμικό προγραμματισμό, αυτό εντάσσεται σε μια οικογένεια προβλημάτων της ίδιας φύσης και συνδέεται με τις βέλτιστες λύσεις τους με μια αναδρομική σχέση. Οι αλγόριθμοι δυναμικού προγραμματισμού κάνουν μια διεξοδική έρευνα που αποφεύγει εκ νέου υπολογισμούς αποθηκεύοντας τις λύσεις των υποπροβλημάτων. Το βασικό σημείο για την χρησιμοποίηση αυτής της τεχνικής είναι ότι διαμορφώνει τη λύση μέσα από μια διαδικασία αναδρομής. Χρησιμοποιείται κυρίως για τη βελτιστοποίηση της λύσης ενός προβλήματος πολλαπλών φάσεων, για καθεμία από τις οποίες είναι διαθέσιμος ένας αριθμός εναλλακτικών αποφάσεων. Είναι αυτονόητο ότι δεν αποτελεί ισχυρό εργαλείο βελτιστοποίησης λόγω της υπερβολικής εξειδίκευσης για μικρό εύρος προβλημάτων. Όπως θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο το πρόβλημα της βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων έχει προσεγγιστεί από πολλούς ερευνητές ως πρόβλημα δυναμικού προγραμματισμού.

6.4.5 Μέθοδοι διαμερισμού και φραγής

Η μέθοδος διαμερισμού και φραγής αποτελείται από επαναλαμβανόμενες εφαρμογές διαχώρισης και εκτίμησης στο χώρο των λύσεων του προβλήματος. Οι αλγόριθμοι αυτής της κατηγορίας κάνουν μια κρίσιμη απαρίθμηση του χώρου αναζήτησης. Απαριθμούν, αλλά παράλληλα προσπαθούν συνεχώς να αποκλείσουν τμήματα του χώρου αναζήτησης που δεν μπορούν να περιέχουν την καλύτερη λύση. Κατά τη διαχώριση γίνεται διαμέριση του χώρου αναζήτησης σε μικρότερα υποσύνολα, ενώ η εκτίμηση αφορά την εύρεση του άνω φράγματος της βέλτιστης λύσης, δηλαδή μιας υπερεκτίμησης της βέλτιστης τιμής της συνάρτησης στόχου μέσα στο υποδένδρο. Κύριο ρόλο παίζουν οι στρατηγικές που ακολουθούνται για τη διαχώριση και τη διάσχιση του χώρου αναζήτησης κατά την εφαρμογή της μεθόδου. Για τη διαχώριση πρέπει να αποφασιστεί ποια υποσύνολα του χώρου αναζήτησης θα σχηματιστούν ενώ για τη διάσχιση πρέπει να καθοριστεί η σειρά με την οποία θα εξετάζονται τα υποσύνολα αυτά. Η επιλογή της μεταβλητής βάσει της οποίας θα γίνει η διαχώριση μπορεί να γίνει στην τύχη, συστηματικά, βάσει της εμπειρίας του παρελθόντος ή επιλύοντας ένα υποπρόβλημα. Η επιλογή της μεταβλητής διαχώρισης επηρεάζει το χρόνο εύρεσης της λύσης και το πλήθος των κόμβων που χρειάζεται να ανιχνευθούν για να βρεθεί η λύση. Η ποιότητα της λύσης εξαρτάται από τον χρόνο που δίνεται στη μέθοδο για να εκτελεστεί. Προφανώς για μια πολύ καλή εκτίμηση απαιτείται περισσότερος χρόνος από ότι για μια χονδρική εκτίμηση. Συνήθως γίνεται ένας συμβιβασμό σε αυτή τη βάση. Οι πιο συνηθισμένες στρατηγικές διάσχισης είναι η κατά πλάτος, η κατά βάθος, η πρώτα ο καλύτερος και η πρώτα ο χειρότερος. Η θεωρητική πολυπλοκότητα της μεθόδου είναι εκθετική. Πρακτικά μπορεί να μετρηθεί με βάση τον απαιτούμενο χρόνο ή το χώρο μνήμης.

6.4.6 Επισκόπηση

Οι τεχνικές διαμερισμού και φραγής και δυναμικού προγραμματισμού είναι αρκετά αποτελεσματικές, αλλά η χρονική τους πολυπλοκότητα είναι συχνά πολύ υψηλή και μη αποδεκτή για πλήρη προβλήματα. Αν και δεν έχουν εξεταστεί εξαντλητικά όλες οι μέθοδοι αναζήτησης, το συμπέρασμα που προκύπτει από αυτή τη σύντομη παρουσίαση είναι πως οι μέθοδοι αυτές δεν έχουν την ισχύ για να αντεπεξέλθουν σε μεγάλο αριθμό προβλημάτων. Αυτό όμως, δεν σημαίνει ότι δεν είναι χρήσιμες. Αντιθέτως, έχουν δώσει λύσεις σε πολλές περιπτώσεις μέχρι σήμερα. Καθώς, όμως, παρουσιάζονται ολοένα και δυσκολότερα προβλήματα, τόσο πιο επιτακτική γίνεται η ανάγκη για εύρεση νέων μεθόδων αναζήτησης και βελτιστοποίησης. Μια τέτοια κατηγορία αλγορίθμων, που βασίζονται σε αναλογίες με τις φυσικές διαδικασίες της εξέλιξης, είναι οι μεθευρετικές μέθοδοι που παρουσιάζονται στη συνέχεια.

6.5 Ευρετικές μέθοδοι

Η επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης γίνεται ολοένα και δυσκολότερη όσο αυξάνει το μέγεθος του προβλήματος και πολλές φορές το να προσπαθούμε να βρούμε την ολικά βέλτιστη λύση σε λογικό χρόνο είναι πρακτικά αδύνατο. Για να επιλυθούν προβλήματα αυτής της μορφής συχνά

καταφεύγουμε σε διαφορετικές τεχνικές που μας οδηγούν σε μια σχεδόν βέλτιστη, αλλά ικανοποιητική λύση. Μια λύση ενός ευρετικού αλγορίθμου γίνεται αποδεκτή αν ικανοποιεί κάποια κριτήρια όπως η ποιότητα της λύσης, δηλαδή η απόκλισή της από τη βέλτιστη, η ευκολία απόκτησης μιας λύσης, η λογική πάνω στην οποία στηρίζονται οι κανόνες του ευρετικού αλγορίθμου που χρησιμοποιήθηκαν για να οδηγηθούμε στη λύση. Για κάθε πρόβλημα βελτιστοποίησης δεν υπάρχει μόνο ένας ευρετικός αλγόριθμος που να δίνει τη βέλτιστη λύση, αλλά έχουν αναπτυχθεί αρκετοί αλγόριθμοι οι οποίοι συγκρινόμενοι μεταξύ τους, οδηγούν ολοένα και σε καλύτερες λύσεις. Εκτός από την ανάγκη για εύρεση ικανοποιητικών λύσεων σε δύσκολα προβλήματα υπάρχουν και άλλοι λόγοι για τη χρήση ευρετικών μεθόδων εκ των οποίων οι σημαντικότερες είναι:

- Δεν υπάρχει καμία γνωστή μέθοδος επίλυσης του προβλήματος της εύρεσης βέλτιστων τιμών.
- Αν και υπάρχει ακριβής μέθοδος για την επίλυση του προβλήματος αυτή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί από το διαθέσιμο υπολογιστικό σύστημα.
- Η ευρετική μέθοδος είναι πιο ευέλικτη από την αντίστοιχη ακριβή, επιτρέποντας τη συμπερίληψη συνθηκών που δεν μπορούν να προτυποποιηθούν εύκολα.
- Η ευρετική μέθοδος χρησιμοποιείται ως τμήμα μια διαδικασίας ολικής βελτιστοποίησης για εύρεση των βέλτιστων λύσεων ενός προβλήματος.

Τα σύγχρονα προβλήματα τείνουν να είναι πολύ περίπλοκα και σχετίζονται με την ανάλυση μεγάλων συνόλων δεδομένων. Ακόμη και αν ένας αλγόριθμος μπορεί να αναπτυχθεί με ακρίβεια, η πολυπλοκότητα χρόνου ή χώρου μπορεί να αποδειχθεί απαράδεκτη. Στην πραγματικότητα αρκεί συχνά να βρεθεί μια προσέγγιση ή μια μερική λύση. Μια τέτοια παραδοχή επεκτείνει το σύνολο των τεχνικών για να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα. Σε αντίθεση με τους ακριβής αλγορίθμους, οι ευρετικοί αλγόριθμοι παρέχουν κάποιες προσεγγίσεις για την επίλυση των προβλημάτων βελτιστοποίησης. Ο όρος ευρετικός χρησιμοποιείται για τους αλγόριθμους που βρίσκουν λύσεις μεταξύ όλων των πιθανών λύσεων ενός προβλήματος, αλλά δεν εγγυώνται ότι η καλύτερη λύση θα βρεθεί. Επιλέγουν την πιο κοντινή λύση στην ακριβή αλλά όχι την ακριβή. Κατά τις μεθόδους αυτές, η πορεία προς ένα τελικό αποδεκτό αποτέλεσμα στηρίζεται σε μια σειρά προσεγγιστικών αποτελεσμάτων. Αν και οι ευρετικές μέθοδοι δίνουν απλές και ικανοποιητικές λύσεις σε μερικά προβλήματα, τίποτα δεν εγγυάται ότι αυτές οι λύσεις είναι οι καλύτερες δυνατές. Παρά την ετυμολογία τους δεν εγγυώνται ότι έχουν προσεγγίσει τη βέλτιστη λύση αν και μπορούν να βρίσκουν ποιοτικές λύσεις σε εύλογο χρονικό διάστημα. Οι ευρετικές μέθοδοι σχεδιάζονται για την επίλυση συγκεκριμένων προβλημάτων. Συνήθως δίνουν προσεγγίσεις των βέλτιστων λύσεων και κάποιες φορές προτιμούνται, επειδή δίνουν αποδεκτές απαντήσεις σε μικρό χρόνο. Συνεπώς, δεν μπορούν να αποτελέσουν κύριο εργαλείο βελτιστοποίησης. Μερικές φορές μπορεί να είναι ακριβείς, με την εύρεση της πραγματικά καλύτερης λύσης, αλλά ο αλγόριθμος εξακολουθεί να ψάχνει για άλλες καλές λύσεις μέχρι να αποδειχθεί ότι βρήκε την καλύτερη όλων. Συνοψίζοντας, ένας ικανοποιητικός ευρετικός αλγόριθμος πρέπει να έχει τις παρακάτω ιδιότητες:

1. Να μπορεί να επιτευχθεί μια λύση σε λογικό επίπεδο υπολογιστικής απόδοσης.
2. Η λύση αυτή να είναι κοντά στη βέλτιστη με κάποιο βαθμό αξιοπιστίας.
3. Η πιθανότητα να λήψης μιας κακής λύσης να είναι μικρή.

6.5.1 Κατηγορίες ευρετικών μεθόδων

Οι ευρετικές μέθοδοι που συναντώνται χαρακτηρίζονται από αρκετές διαφοροποιήσεις. Για τον λόγο αυτό είναι δύσκολη μια πλήρης κατηγοριοποίηση τους, αφού έχουν δημιουργηθεί για την

αντιμετώπιση συγκεκριμένων προβλημάτων. Η παρακάτω κατηγοριοποίηση προσπαθεί να περιλάβει μεγάλο εύρος ώστε να μην αποκλείει κανέναν ευρετικό αλγόριθμο.

- Μέθοδοι διάσπασης. Το αρχικό πρόβλημα διασπάται σε υποπροβλήματα που είναι πιο εύκολο να επιλυθούν αν και με ένα γενικό τρόπο είναι σαφές ότι τα υποπροβλήματα αυτά ανήκουν στην ίδια κατηγορία προβλημάτων.

- Επαγωγικές μέθοδοι. Η ιδέα πίσω από αυτές τις μεθόδους είναι η γενίκευση μικρότερων και πιο απλοϊκών εκδοχών του αρχικού προβλήματος. Οι ιδιότητες και οι τεχνικές που στις περιπτώσεις αυτές είναι πιο εύκολο να αναλυθούν και μπορούν να εφαρμοστούν στη συνέχεια στην πλήρη εκδοχή του προβλήματος.

- Μέθοδοι μείωσης. Αυτές εμπεριέχουν αναγνωριστικές ιδιότητες που ικανοποιούνται από καλές λύσεις τις οποίες εισάγουν ως όρια του προβλήματος. Ο στόχος είναι ο περιορισμός του χώρου λύσεων απλουστεύοντας το πρόβλημα. Ο προφανής κίνδυνος είναι ότι η βέλτιστη λύση του αρχικού προβλήματος μπορεί να μην συμπεριληφθεί εντός των ορίων.

- Κατασκευαστικοί μέθοδοι. Αυτές δημιουργούν μια λύση ενώνοντας τα διάφορα τμήματα της λύσης το ένα μετά το άλλο μέχρι η λύση να ολοκληρωθεί. Συνήθως είναι αιτιοκρατικές μέθοδοι και βασίζονται στην καλύτερη επιλογή σε κάθε επανάληψη. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε προβλήματα συνδυαστικής βελτιστοποίησης.

- Μέθοδοι τοπικής αναζήτησης. Σε αντίθεση με τις προαναφερθέντες μεθόδους, οι μέθοδοι τοπικής αναζήτησης ξεκινούν από μια εφικτή λύση του προβλήματος την οποία προσπαθούν να βελτιώσουν προοδευτικά. Σε κάθε βήμα της διαδικασίας εκτελείται μία μετακίνηση από μία λύση σε μια άλλη με καλύτερη τιμή. Η μέθοδος τερματίζεται όταν δεν υπάρχει άλλη προσβάσιμη λύση που να τη βελτιώνει.

Αν και όλες οι παραπάνω μέθοδοι έχουν συνεισφέρει στην επίλυση πραγματικών προβλημάτων, οι κατασκευαστικές μέθοδοι και οι μέθοδοι τοπικής αναζήτησης αποτέλεσαν τα θεμέλια των μεθευρετικών μεθόδων που περιγράφονται στην επόμενη ενότητα. Σύμφωνα με μια άλλη κατηγοριοποίηση βάσει ορισμένων ιδιαίτερων χαρακτηριστικών οι κατηγορίες των αλγορίθμων αυτών είναι οι ακόλουθες:

- Αλγόριθμοι απληστίας. Οι αλγόριθμοι απληστίας προσπαθούν να οδηγήσουν σε μια εφικτή λύση του προβλήματος, αλλά πολλές φορές χρειάζονται πάρα πολύ μεγάλο χρόνο γιατί είναι μυωπικοί αλγόριθμοι, δηλαδή βλέπουν μόνο μπροστά.

- Προσεγγιστικοί αλγόριθμοι. Οι προσεγγιστικοί αλγόριθμοι προσπαθούν να λύσουν αυτό το πρόβλημα χρησιμοποιώντας επιπλέον πληροφορία.

- Αλγόριθμοι τοπικής αναζήτησης. Οι αλγόριθμοι τοπικής αναζήτησης προσπαθούν ξεκινώντας από μια αρχική εφικτή λύση να βελτιώσουν τη λύση με κάποια μέθοδο αναζήτησης στη γειτονιά της λύσης.

Η βασική διαφορά των τριών κατηγοριών είναι ότι οι δύο πρώτες κατηγορίες χρησιμοποιούνται κυρίως για την παραγωγή αρχικών λύσεων ενώ η τρίτη για να την βελτίωσή τους (Μαρινάκης, Μαρινάκη, Ματσατσίνης, & Ζοπουνίδης, 2011). Οι αλγόριθμοι αυτοί περιγράφονται στη συνέχεια.

6.5.2 Άπληστοι αλγόριθμοι

Οι άπληστοι αλγόριθμοι είναι μια δημοφιλής τεχνική, η οποία προσπαθεί διαδοχικά να κατασκευάσει ένα χώρο λύσεων. Βασίζεται στην αρχή της προφανής λήψης της καλύτερης τοπικά επιλογής σε κάθε

στάδιο του αλγορίθμου, προκειμένου να βρει το ολικό βέλτιστο της αντικειμενικής συνάρτησης. Οι αλγόριθμοι απληστίας προσπαθούν να οδηγήσουν σε μια εφικτή λύση του προβλήματος, αλλά πολλές φορές χρειάζονται πάρα πολύ μεγάλο χρόνο, διότι λαμβάνουν υπόψη μόνο τις νέες λύσεις. Η τεχνική απληστίας, βρίσκει το πλησιέστερο τοπικό βέλτιστο, που όμως είναι χαμηλής ποιότητας λύσης. Το βασικό στοιχείο σε αυτή τη κατηγορία αλγορίθμων είναι ότι εξαρτώνται από το πρόβλημα που επιλύουν. Συνεπώς, διαφορετικοί αλγόριθμοι απληστίας χρησιμοποιούνται σε διαφορετικά προβλήματα.

6.5.3 Προσεγγιστικοί αλγόριθμοι

Οι ευρετικές μέθοδοι μπορεί να είναι χρήσιμες στην πράξη, συνήθως όμως υπάρχει η ανάγκη εγγυήσεων για την ποιότητα των λύσεων. Τέτοιες εγγυήσεις παρέχουν οι προσεγγιστικοί αλγόριθμοι. Ένας προσεγγιστικός αλγόριθμος, συνοδεύεται και από έναν λόγο προσέγγισης. Ο λόγος προσέγγισης είναι ο λόγος του κόστους της λύσης του συγκεκριμένου προσεγγιστικού αλγορίθμου προς το κόστος της βέλτιστης λύσης. Γίνεται προσπάθεια σχεδιασμού προσεγγιστικών αλγόριθμων με λόγο όσο το δυνατό κοντά στη μονάδα. Αν πρόκειται για πρόβλημα ελαχιστοποίησης, ο λόγος αυτός είναι μεγαλύτερος της μονάδας, ενώ για πρόβλημα μεγιστοποίησης είναι μικρότερος. Σημειώνεται εδώ ότι οι προσεγγιστικοί αλγόριθμοι δε συμπεριφέρονται πάντα το ίδιο καλά. Άλλες φορές συμβάλλουν στην κατανόηση του προβλήματος, βοηθώντας στον ορισμό αξιόπιστων ευρετικών.

Ένας προσεγγιστικός αλγόριθμος είναι πάντοτε πολυωνυμικός και εκτιμάται από τη χειρότερη περίπτωση του πιθανώς σχετικού λάθους σε όλα τα πιθανά παραδείγματα του προβλήματος. Μια οικογένεια από προσεγγιστικούς αλγορίθμους για ένα πρόβλημα ονομάζεται πλήρως πολυωνυμικό προσεγγιστικό διάγραμμα, εάν ο αλγόριθμος είναι προσεγγιστικός αλγόριθμος και ο χρόνος εκτέλεσης του είναι πολυωνυμικός. Η αποτελεσματικότητα ενός προσεγγιστικού αλγορίθμου είναι ένα πολύ σημαντικό στοιχείο. Εφ' όσον γίνεται η υπόθεση, ότι κάθε προσεγγιστικός αλγόριθμος είναι πολυωνυμικός, υπάρχει μια τεράστια ποικιλία πολυωνυμικών αλγορίθμων που κάποιοι από αυτούς είναι αναποτελεσματικοί και χωρίς καμία πρακτική σημασία. Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο είναι ο χρόνος που απαιτείται από ένα πολυωνυμικό αλγόριθμο έτσι ώστε να προσεγγίσουμε μια καλύτερη λύση.

6.5.4 Τοπική αναζήτηση

Η τοπική αναζήτηση βασίζεται στην αρχαιότερη μέθοδο βελτιστοποίησης, στη μέθοδο δοκιμής και σφάλματος. Η τοπική αναζήτηση έχει αποδειχθεί πολύ επιτυχημένη στην πράξη σε ένα πολύ μεγάλο αριθμό από προβλήματα συνδυαστικής βελτιστοποίησης. Οι αλγόριθμοι τοπικής αναζήτησης ξεκινούν από μία υπάρχουσα λύση και προσπαθούν να τη βελτιώσουν μεταβάλλοντας ορισμένα τμήματά της. Αυτό αρκεί όταν στόχος είναι απλώς καλές λύσεις οι οποίες εντοπίζονται εύκολα. Δοθέντος ενός προβλήματος βελτιστοποίησης επιλέγεται η γειτονιά στην οποία εφαρμόζεται αναζήτηση για να βρεθεί μια καλύτερη λύση από την αρχική αν υπάρχει κάποιο σημείο που να έχει μικρότερο κόστος από το κόστος που έχουμε αυτή τη στιγμή. Η επιλογή της γειτονιάς αναζήτησης εξαρτάται από το πρόβλημα που επιλύεται και από τον αλγόριθμο τοπικής αναζήτησης που χρησιμοποιείται για να επιλυθεί το πρόβλημα αυτό. Όταν διαπιστώνεται η ύπαρξης μίας καλύτερης λύσης, αντικαθίσταται η υπάρχουσα και η αναζήτηση συνεχίζεται μέχρι το σημείο που συναντάται κάποιο τοπικό ελάχιστο στο οποίο η λύση δεν βελτιώνεται περισσότερο.

Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό της τοπικής αναζήτησης είναι το γεγονός ότι μπορεί να εκκινείται από πολλά διαφορετικά αρχικά σημεία και να επιλέγεται το καλύτερο ως βέλτιστη λύση. Σε αυτές τις περιπτώσεις μια άλλη απόφαση που πρέπει να παρθεί είναι πόσα θα είναι τα αρχικά σημεία. Το επόμενο πρόβλημα που πρέπει να επιλυθεί ώστε η εφαρμοζόμενη τοπική αναζήτηση να οδηγεί σε ικανοποιητικά αποτελέσματα είναι η σωστή επιλογή της γειτονιάς, όπου θα πραγματοποιηθεί η αναζήτηση. Τέλος, το σημαντικότερο ίσως στοιχείο για την επιτυχία της διαδικασίας είναι η επιλογή της μεθόδου που θα χρησιμοποιηθεί για την αναζήτηση. Στη βιβλιογραφία του προβλήματος υπάρχουν

αρκετές μέθοδοι που έχουν εφαρμοστεί, η κάθε μία όμως από αυτές εστιάζεται στο πρόβλημα το οποίο επιλύεται. Συνοπτικά, τα σημαντικότερα προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν κατά τη διάρκεια της φάσης της σχεδίασης ενός αλγορίθμου τοπικής αναζήτησης είναι:

1. Η επιλογή της γειτονιάς, και αυτό σχετίζεται με την ανησυχία που υπάρχει για το αν είναι ή όχι εφικτή η λύση.

2. Η ποιότητα της αρχικής λύσης. Είναι ένα πολύ σημαντικό στοιχείο, γιατί όσο καλύτερη είναι η αρχική λύση τόσο περισσότερες πιθανότητες υπάρχουν να οδηγηθούμε ευκολότερα και γρηγορότερα σε βελτίωση της λύσης με τη χρήση της τοπικής αναζήτησης.

3. Η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση της αρχικής λύσης.

Η διαδικασία τοπικής αναζήτησης οδηγεί σε κάποιο τοπικό ελάχιστο. Το τοπικό ελάχιστο εμφανίζεται όταν για όλα τα σημεία μέσα στη γειτονιά αναζήτησης δεν υπάρχει πιθανότητα να βρεθεί κάποια καλύτερη λύση. Ο στόχος είναι η εύρεση ένα όσο το δυνατό καλύτερο τοπικό ελάχιστο. Δύο διαφορετικές γειτονιές αναζήτησης, για το ίδιο πρόβλημα, θα παράγουν δύο διαφορετικά τοπικά ελάχιστα. Πολλές φορές έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι που εξερευνούν μονάχα ένα μέρος από τη γειτονιά αναζήτησης και όχι ολόκληρη, ενώ στη συνέχεια χρησιμοποιούν μία διαφορετική γειτονιά αναζήτησης. Οι γειτονιές αναζήτησης που εξετάζουν ονομάζονται γειτονιές αναζήτησης μεταβλητού μήκους.

6.5.4.1 Αναρρίχηση λόφου

Η αναρρίχηση λόφου είναι μια τοπική τεχνική αναζήτησης, η οποία κινείται από την μια λύση στην άλλη, σε μια γειτονιά λύσεων. Τέτοιοι αλγόριθμοι αντικαθιστούν σταθερά την τρέχουσα λύση με μια καλύτερη από τις γειτονικές, στην περίπτωση που κάποια από αυτές είναι καλύτερη από την τρέχουσα. Εάν η ποιότητα της νέας λύσης είναι καλύτερη από την προηγούμενη, αυτή η κίνηση γίνεται αποδεκτή και η αναζήτηση συνεχίζεται από την νέα λύση. Αν μια γειτονιά δεν οδηγεί σε μια βελτίωση λύση, η κίνηση αυτή θα απορριφτεί και η αναζήτηση συνεχίζεται από την τρέχουσα κατάσταση. Το κύριο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι η διαδικασία αναζήτησης ενδέχεται να παγιδευτεί σε ένα τοπικό ελάχιστο, το οποίο δεν είναι το ολικό, δηλαδή η βέλτιστη λύση του προβλήματος. Ο αλγόριθμος είναι αποτελεσματικός, αλλά έχει ένα σημαντικό μειονέκτημα που ονομάζεται πρόωρη σύγκλιση. Πολλές μεθευρετικές παραλλαγές τη μεθόδου έχουν αναπτυχθεί. Μια χρήσιμη παραλλαγή για απλή αναρρίχηση λόφων θεωρεί μια σειρά κινήσεων από την τρέχουσα κατάσταση και επιλέγει τη καλύτερη λύση ως την επόμενη γειτονιά.. Αυτή η μέθοδος είναι γνωστή ως αναζήτηση κλίσης ή απότομη ανάβαση λόφου. Μια μέθοδο αναρρίχησης λόφου χρησιμοποιεί ο Davies (1972) στη βελτιστοποίηση κατακόρυφης χάραξης όπως θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο.

6.5.5 Ποιότητα επίλυσης

Ένα σημείο που πρέπει να διευκρινιστεί αφορά την ποιότητα της λύσης. Οι ευρετικοί αλγόριθμοι δουλεύουν γρήγορα και αποτελεσματικά. Η ποιότητα της λύσης όμως που παρέχουν είναι ένα εντελώς διαφορετικό θέμα. Σε μερικά προβλήματα, όπως αναφέρθηκε, είναι αδύνατο να βρεθεί η βέλτιστη λύση για κάποιο πρόβλημα σε ικανοποιητικό χρόνο. Πριν από την εμφάνιση της μεθόδου ανάλυσης των προσεγγιστικών αλγορίθμων η απόδοση ενός ευρετικού αλγορίθμου κρινόταν από δοκιμαστικά τρεξίματα σε ένα σύνολο από παραδείγματα προβλημάτων αναφοράς και συγκρινόταν με την απόδοση άλλων αλγορίθμων που επέλυαν το ίδιο πρόβλημα. Ένας απλός αλλά και ο πιο συνηθισμένος τρόπος απόδειξης είναι η δημιουργία μικρότερων παραδειγμάτων, τα οποία μπορούν να επιλυθούν με κάποια ακριβή μέθοδο, ώστε να διαπιστωθεί πόσο κοντά στο βέλτιστο είναι η λύση με τη χρήση του ευρετικού αλγορίθμου. Ένας άλλος τρόπος είναι η δημιουργία ενός φράγματος αποδεκτής λύσης με την επίλυση ενός χαλαρωμένου προβλήματος, για παράδειγμα με τη διαδικασία διακλάδωσης και οριοθέτησης, και

έτσι όλες οι λύσεις των οποίων η τιμή δεν θα παραβιάζει την τιμή του φράγματος θα είναι ικανοποιητικές.

Αυτές οι μέθοδοι είχαν πάντοτε κάποια προβλήματα. Αρχικά, το σύνολο των προβλημάτων που δοκιμαζόταν ήταν ένα μικρό δείγμα αλλά συνήθως όχι αντιπροσωπευτικό όλων των παραδειγμάτων ενός συγκεκριμένου προβλήματος. Επίσης, μια καλή βελτίωση της λύσης σε κάποιο παράδειγμα σε σύγκριση με κάποιον άλλο αλγόριθμο δεν σημαίνει και γενικά βελτίωση της λύσης σε οποιοδήποτε παράδειγμα. Είναι ξεκάθαρο ότι χρειάζεται μια ανάλυση για το πόσο καλή είναι η λύση που μπορεί να παρέχει ένας αλγόριθμος απληστίας και γενικότερα ένας ευρετικός αλγόριθμος. Οι περισσότερες μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί παρουσιάζουν σημαντικά προβλήματα όσον αφορά την ποιότητα της λύσης που επιστρέφουν και αυτό γιατί αν κάποια στιγμή βρεθούν σε τοπικό ελάχιστο είναι πολύ δύσκολο να απεγκλωβιστούν. Μία από τις μεθόδους που έχουν αναπτυχθεί ώστε να αποφεύγουν τα τοπικά ελάχιστα είναι η μέθοδος Lin-Kernighan.

6.5.6 Αρχικές λύσεις

Η δημιουργία μίας αρχικής λύσης είναι μία πολύ σημαντική διαδικασία για την αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου. Αν η αρχική λύση είναι καλή μπορεί να οδηγήσει πιο γρήγορα τον αλγόριθμο σε σύγκλιση. Από την άλλη μεριά μία πολύ κακή αρχική λύση θεωρητικά θα αργήσει να συγκλίνει σε κάποια καλή λύση. Συνήθως, υπάρχουν δύο τρόποι για να δημιουργηθεί μία αρχική λύση. Ο πρώτος τρόπος είναι με τη χρήση μίας τυχαιοποιημένης διαδικασίας κατάλληλα προσαρμοσμένης στο πρόβλημα που επιλύουμε και ο δεύτερος τρόπος με τη χρήση κάποιου αλγόριθμου απληστίας. Από τη μέθοδο που θα χρησιμοποιήσουμε στη φάση της τοπικής αναζήτησης εξαρτάται και ο τρόπος που Θα επιλέξουμε για να δημιουργήσουμε τις αρχικές λύσεις. Έτσι, για παράδειγμα, σε ένα συνεχές πρόβλημα είναι καλύτερο να δημιουργηθούν οι αρχικές λύσεις με τυχαίο τρόπο. Αντίθετα, σε ένα πρόβλημα συνδυαστικής βελτιστοποίησης είναι πιο αποτελεσματική η δημιουργία αρχικών λύσεων με έναν αλγόριθμο απληστίας. Επίσης, στην περίπτωση αλγορίθμου που χρησιμοποιεί έναν πληθυσμό από άτομα για να βελτιώσει τις λύσεις του κατά τη διάρκεια των επαναλήψεων, τότε είτε θα δημιουργηθούν αρχικές λύσεις με τυχαίο τρόπο, είτε θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν πολλοί διαφορετικοί αλγόριθμοι απληστίας, ή συνδυασμός των δύο μεθόδων, όπως για παράδειγμα στη διαδικασία άπληστης τυχαιοποιημένης προσαρμοστικής αναζήτησης GRASP.

6.6 Μεθευρετικές μέθοδοι

Οι μεθευρετικοί αλγόριθμοι εφαρμόζουν γενικές στρατηγικές αναζήτησης, οι οποίες συνήθως είναι εμπνευσμένες από τις φυσικές διαδικασίες. Οι αλγόριθμοι αυτοί καθοδηγούν κατάλληλα ευρετικές μεθόδους με σκοπό να διερευνήσουν το ευρύτερο τμήμα του χώρου λύσεων του προβλήματος. Ένας μεθευρετικός αλγόριθμος είναι ένα σύνολο εννοιών που μπορούν να χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν μια ευρετική μέθοδο και μπορούν να εφαρμοστούν σε ένα ευρύ σύνολο διαφορετικών προβλημάτων. Με άλλα λόγια, ένας μεθευρετικός αλγόριθμος μπορεί να θεωρηθεί, σε γενικό πλαίσιο, ως ένας αλγόριθμος που μπορεί να εφαρμοστεί σε διαφορετικά προβλήματα βελτιστοποίησης, με σχετικά λίγες τροποποιήσεις, ώστε να προσαρμοσθεί σε ένα συγκεκριμένο πρόβλημα. Οι μεθευρετικοί αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν τα τελευταία χρόνια, διερευνούν λύσεις σε μη εφικτές περιοχές ή ακόμη και σε περιοχές όπου η συνάρτηση στόχου έχει τις χειρότερες λύσεις. Σκοπός αυτών των κινήσεων είναι η αποφυγή του εγκλωβισμού του αλγορίθμου σε τοπικά ελάχιστα, επιτυγχάνοντας λύσεις οι οποίες είναι πλησιέστερα στις βέλτιστες.

Μια μεθευρετική τεχνική ορίζεται ως μια επαναληπτική διαδικασία που συνδυάζει έξυπνα διαφορετικές έννοιες για την εξερεύνηση και την εκμετάλλευση του χώρου αναζήτησης. Μαθαίνοντας στρατηγικές που χρησιμοποιούνται για την δομή των πληροφοριών, μπορούν να βρουν σχεδόν αποτελεσματικά βέλτιστες λύσεις. Η βασική επαναληπτική διαδικασία που καθοδηγεί τον αλγόριθμο, τροποποιεί τις ευρετικές τεχνικές για την αποτελεσματική παραγωγή υψηλής ποιότητας λύσεων. Αυτή

μπορεί να χειριστεί ένα πλήρες ή μη πλήρες σύνολο ή μια συλλογή λύσεων σε κάθε επανάληψη. Οι δευτερεύουσες ευρετικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται μπορεί να είναι υψηλού ή χαμηλού επίπεδου, για παράδειγμα μια απλή τοπική αναζήτηση, ή απλά μια μέθοδος κατασκευής.

Ο κύριος στόχος των μεθευρετικών είναι να αποφευχθούν τα μειονεκτήματα της επαναληπτικής βελτίωσης που δεν επιτρέπει στην τοπική αναζήτηση να ξεφεύγει από τα τοπικά βέλτιστα. Αυτό επιτυγχάνεται είτε επιτρέποντας κινήσεις από τον ένα χώρο αναζήτησης στον άλλο, είτε δημιουργώντας νέες αρχικές λύσεις για την τοπική αναζήτηση με έναν διαφορετικό τρόπο από την παραγωγή τυχαίων αρχικών λύσεων. Πολλές από τις μεθόδους μπορεί να εισάγουν μια αρχική λύση που θεωρείται ότι είναι κοντά στην βέλτιστη, έτσι ώστε οι λύσεις υψηλής ποιότητας να παράγονται γρήγορα. Αρκετές μεθευρετικές προσεγγίσεις βασίζονται σε πιθανολογικές αποφάσεις που λαμβάνονται κατά τη διάρκεια της αναζήτησης. Όμως, η βασική διαφορά στην καθαρή δειγματοληπτική έρευνα είναι ότι οι μεθευρετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούν την τυχαιότητα, όχι με τρόπο άγνωστο αλλά με μια οργανωμένη μορφή.

6.6.1 Ιδιότητες

Πρέπει να επισημανθεί ότι στους μεθευρετικούς αλγορίθμους, όπως και στους ευρετικούς, μεγάλο ρόλο παίζουν η εμπειρία και ο πειραματισμός. Οι τιμές των παραμέτρων σε έναν αλγόριθμο ρυθμίζονται με βάση τα χαρακτηριστικά του προβλήματος που πρόκειται να επιλυθεί. Επιπλέον σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με πολλές παραμέτρους ή αρκετά μεγάλο χώρο λύσεων, όπως στα συνεχή προβλήματα είναι πιθανό ακόμα και οι μεθευρετικοί αλγόριθμοι να μη φτάνουν στη βέλτιστη λύση καθώς είναι αδύνατον να εξεταστούν όλες οι πιθανές λύσεις. Μπορούν όμως να βρουν μία περιοχή γύρω από τη βέλτιστη λύση, ή μία λύση πολύ κοντά στη βέλτιστη που μπορεί να γίνει αποδεκτή. Συνεπώς, πολλές φορές ο όρος βέλτιστη λύση στη βιβλιογραφία προσδιορίζει μία εφικτή λύση που είναι αποδεκτή ή βρίσκεται πολύ κοντά στη βέλτιστη. Οι ιδιότητες των μεθευρετικών μεθόδων έχουν ως εξής:

1. Είναι στρατηγικές που κατευθύνουν τη διαδικασία αναζήτησης.

2. Στόχος είναι η αποτελεσματική διερεύνηση του χώρου αναζήτησης για εύρεση βέλτιστων λύσεων.

3. Μπορεί να είναι από απλές τοπικές διαδικασίες αναζήτησης μέχρι και πολύπλοκες μαθηματικές διαδικασίες.

4. Οι μεθευρετικοί αλγόριθμοι είναι στοχαστικοί.

5. Μπορούν να ενσωματώσουν μηχανισμούς για αποφυγή κλειστών χώρων αναζήτησης.

6. Οι βασικές έννοιες τους επιτρέπουν την περιγραφή ενός αφηρημένου επίπεδου.

7. Οι μεθευρετικοί αλγόριθμοι μπορούν να επιλύσουν γενικά προβλήματα.

8. Μπορούν να κάνουν χρήση των συγκεκριμένων τομέων γνώσης με τη μορφή των ευρετικών τεχνικών που ελέγχονται από το ανώτερο επίπεδο στρατηγικής.

9. Μπορούν να χρησιμοποιήσουν την εμπειρία αναζήτησης που ενσωματώνεται με κάποια μορφή μνήμης για την καθοδήγηση της αναζήτησης.

6.6.2 Εντατικοποίηση και διαφοροποίηση

Η αναζήτηση η οποία πραγματοποιείται από μια μεθευρετική προσέγγιση θα πρέπει να είναι ικανή για εντατική διερεύνηση στους τομείς του χώρου αναζήτησης με υψηλής ποιότητας λύσεις και μετακίνηση σε ανεξερεύνητες περιοχές του, όταν είναι απαραίτητο. Συνεπώς, τα δυο κύρια συστατικά κάθε μεθευρετικού αλγορίθμου είναι η επίταση ή εντατικοποίηση και η διαφοροποίηση. Οι έννοιες της εντατικοποίησης και της διαφοροποίησης είναι οι ισχυρές κινητήριες δυνάμεις των μεθευρετικών αλγορίθμων που τους παρέχουν υψηλή απόδοση. Κάθε προσέγγιση πρέπει να σχεδιάζεται με στόχο την αποτελεσματική διερεύνηση ενός χώρου αναζήτησης. Πίσω από έναν μεθευρετικό αλγόριθμο, η εντατικοποίηση και η διαφοροποίηση επιτυγχάνονται με διαφορετικούς τρόπους. Μια έμμεση αναφορά στην έννοια της «τοποθεσίας» συχνά εισάγεται όταν η εντατικοποίηση και η διαφοροποίηση εμπλέκονται. Η έννοια της «περιοχής» ή «γειτονιάς» του χώρου αναζήτησης και της «θέσης» δεν μπορεί παρά να εκφράζονται με έναν ασαφή τρόπο, όπου πάντα θα εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της αναζήτησης, καθώς και από τον ορισμό των μετρικών χώρων αναζήτησης ή αλλιώς των αποστάσεων μεταξύ των λύσεων.

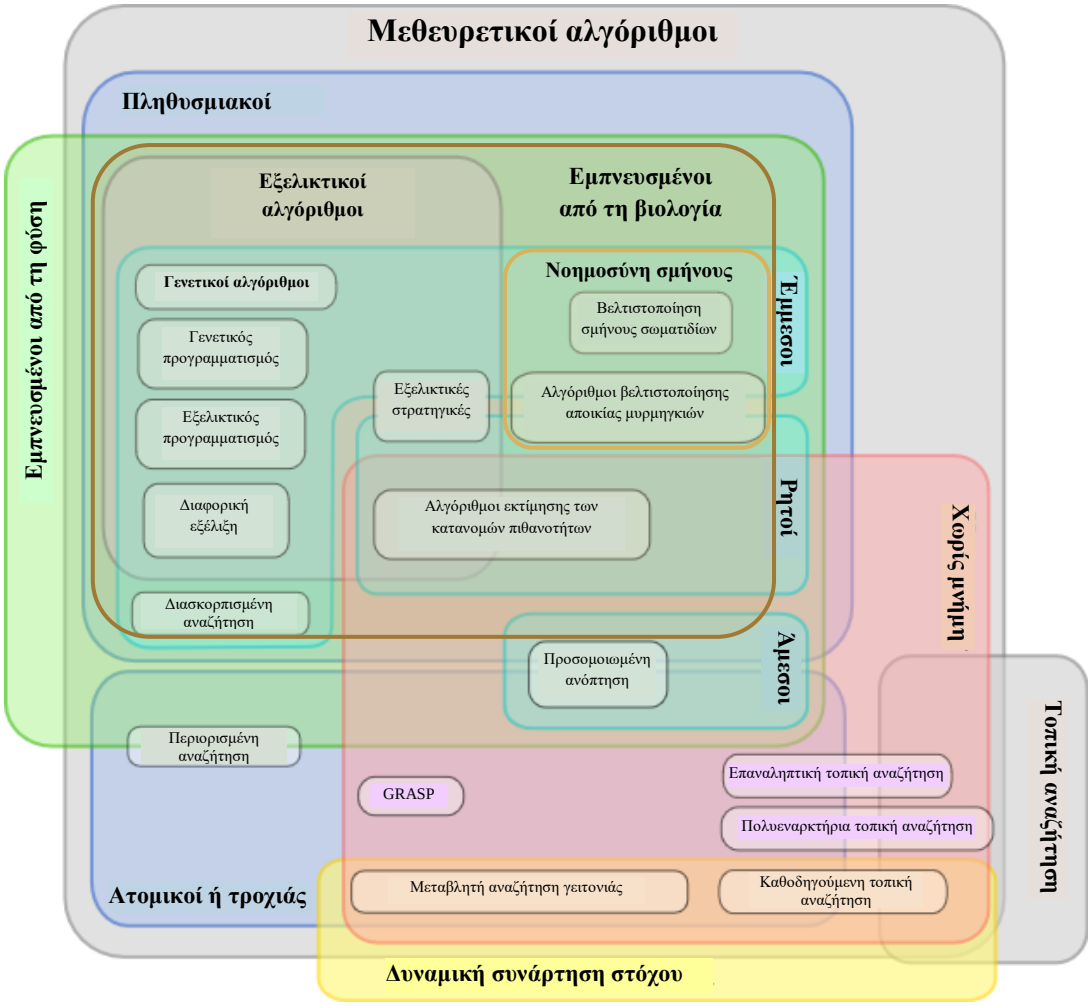
Η εντατικοποίηση αφορά την αναζήτηση σε μια μικρή περιοχή στην οποία έχει ήδη εντοπιστεί μια καλή λύση. Συνεπώς η αναζήτηση εστιάζεται σε τοπικό επίπεδο εκμεταλλευόμενη την πληροφορία ότι υπάρχει μια καλή λύση σε αυτήν την περιοχή. Οι καλύτερες λύσεις πρέπει να καταγράφονται προκειμένου να εξεταστούν άμεσα οι γειτονιές τους. Η μνήμη συνδέεται στενά με την εφαρμογή των στρατηγικών εντατικοποίησης. Η διαφοροποίηση σχετίζεται με την αναζήτηση σε όλο το χώρο λύσεων με τη βοήθεια της τυχαιότητας η οποία δεν επιτρέπει στον αλγόριθμο να εγκλωβίζεται σε τοπικά βέλτιστα. Ένας αποδοτικός μεθευρετικός αλγόριθμος πρέπει να επιτυγχάνει έναν ισορροπημένο συνδυασμό μεταξύ αυτών των δύο διαδικασιών. Αυτή η ισορροπία είναι απαραίτητη, ώστε σε σύντομο χρονικό διάστημα να προσδιορίζονται περιοχές του χώρου αναζήτησης με ποιοτικές λύσεις και παράλληλα να μη χάνεται χρόνος σε περιοχές που έχουν ήδη εξερευνηθεί ή δεν προσφέρουν καλές λύσεις. Μεγάλη σημασία έχει ότι η δυναμική ισορροπία δίνεται μεταξύ της διαφοροποίησης και της εντατικοποίησης. Ο όρος διαφοροποίηση γενικά αναφέρεται στην εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης, ενώ ο όρος της εντατικοποίησης αναφέρεται στην εκμετάλλευση της συσσωρευμένης εμπειρίας αναζήτησης. Η ισορροπία μεταξύ της διαφοροποίησης και εντατικοποίησης, όπως αναφέρθηκε ανωτέρω, είναι σημαντική διότι από τη μία πλευρά εντοπίζονται γρήγορα οι περιφέρειες στο χώρο αναζήτησης με υψηλή ποιότητα λύσεων και από την άλλη δεν χάνεται πολύς χρόνος σε περιοχές του χώρο αναζήτησης που είτε έχουν ήδη διερευνηθεί είτε δεν παρέχουν υψηλής ποιότητας λύσεις.

Άλλοι αλγόριθμοι, όπως οι εξελικτικοί, σχετίζονται με έννοιες όπως η εκμετάλλευση και η εξερεύνηση. Ωστόσο, οι όροι εκμετάλλευση και εξερεύνηση έχουν κάπως πιο περιορισμένο νόημα. Στην πραγματικότητα, οι έννοιες της εκμετάλλευσης και εξερεύνησης συχνά αναφέρονται σε μάλλον βραχυπρόθεσμες στρατηγικές που συνδέονται με την τυχαιότητα, ενώ η εντατικοποίηση και η διαφοροποίηση αναφέρονται σε μακροπρόθεσμες στρατηγικές που συνδέονται κυρίως στη χρήση μνήμης. Δεδομένου ότι οι διαφορετικοί τρόποι χρήσης της μνήμης γίνονται ολοένα και πιο σημαντικοί σε όλους τους τομείς των μεταευρετικών αλγορίθμων, οι όροι της εντατικοποίησης και της διαφοροποίησης όλο και περισσότερο υιοθετούνται. Οι αλγόριθμοι της οικογένειας των μεθευρετικών χρησιμοποιούν μεθόδους προκειμένου να συνεχίσουν να ψάχνουν για λύσεις κοντά σε προηγούμενες. ή να μη δώσουν μεγάλη βαρύτητα σε ήδη δοκιμασμένες λύσεις. Μια μεθευρετική μέθοδος είναι επιτυχής σε ένα δεδομένο πρόβλημα βελτιστοποίησης, εάν μπορεί να παρέχει μια ισορροπία μεταξύ της εκμετάλλευσης, δηλαδή των συσσωρευμένων αναζητήσεων, και της εξερεύνησης του χώρου αναζήτησης για τον εντοπισμό περιοχών με υψηλής ποιότητας λύσεις σε ένα πρόβλημα με βέλτιστο τρόπο. Η εντατικοποίηση ψάχνει προσεκτικά και εντατικά γύρω από τις καλές λύσεις που έχουν βρεθεί στο παρελθόν από την διαδικασία αναζήτησης. Η διαφοροποίηση αντιθέτως, καθοδηγεί την αναζήτηση σε περιοχές που δεν έχουν επισκεφθεί. Συνοψίζοντας, διαφορετικές ιδέες μεθευρετικών αλγορίθμων θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τους αυτές τις δυο έννοιες και οι μεθευρετικοί αλγόριθμοι θα πρέπει να είναι σχεδιασμένοι έτσι ώστε η εντατικοποίηση και η διαφοροποίηση να έχουν ισορροπημένους ρόλους.

6.6.3 Κατηγορίες μεθευρετικών αλγορίθμων

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για την ταξινόμηση και περιγραφή των μεταευρετικών αλγορίθμων. Διαφοροποιούνται μεταξύ τους ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους. Είναι δυνατές αρκετές ταξινομήσεις, η κάθε μια από αυτές είναι αποτέλεσμα μιας συγκεκριμένης άποψης. Οι πιο διαδεδομένες κατηγορίες μεθευρετικών αλγορίθμων φαίνονται στο επόμενο σχήμα ενώ στα επόμενα εδάφια περιγράφονται τα κριτήρια των διαφόρων ταξινομήσεων.

Σχήμα 6.2: Πολυεπίπεδη ταξινόμηση μεθευρετικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης



6.6.3.1 Πληθυσμιακοί και ατομικοί αλγόριθμοι

Οι μεθευρετικοί αλγόριθμοι μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με πολλούς τρόπους . Ένας από αυτούς είναι οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν πληθυσμούς και εκείνοι που χρησιμοποιούν την τροχιά. Οι πληθυσμιακοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούν ένα πλήθος ατόμων που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, όπως για παράδειγμα η μέθοδος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων που χρησιμοποιεί έναν πληθυσμό υποψηφίων λύσεων μετακινόντας τον στον χώρο αναζήτησης. Όλοι οι αλγόριθμοι αυτής της ομάδας διαθέτουν εργαλεία που επιτρέπουν την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των ατόμων του πληθυσμού προκειμένου να αποφύγουν κακές λύσεις. Αντίθετα ένας αλγόριθμος βασισμένος στην τροχιά, είναι η προσομοιωμένη ανόπτηση, που χρησιμοποιεί ένα στοιχείο την οποία μετακινεί τμηματικά στον χώρο των λύσεων. Μια μετακίνηση σε καλύτερη λύση γίνεται πάντα αποδεκτή, ενώ μια μέτρια μετακίνηση γίνεται αποδεκτή με κάποια πιθανότητα. Η δεύτερη κατηγορία είναι οι ατομικοί αλγόριθμοι ή αλγόριθμοι τροχιάς. Εδώ υπάρχει ένα άτομο που κινείται στο χώρο αναζήτησης για την εύρεση λύσεων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αλγορίθμου τροχιάς είναι η προσομοιωμένη ανόπτηση. Ο

αλγόριθμος αυτός εργάζεται με μία ενιαία λύση και μοιράζεται μια τροχιά του χώρου αναζήτησης κατά τη διάρκεια της διαδικασία αναζήτησης.

6.6.3.2 Τοπική και ολική αναζήτηση

Μία προσέγγιση που μπορεί να ακολουθηθεί για την ταξινόμηση των μεθευρετικών αλγορίθμων είναι η στρατηγική που ακολουθείται στην αναζήτηση. Για παράδειγμα μπορεί να επιδιώκεται η βελτίωση της μιας λύσης σε τοπικό επίπεδο. Αυτή η προσέγγιση όμως δεν εξασφαλίζει την εύρεση μιας ολικά βέλτιστης λύσης. Για τον λόγο αυτό έχουν προταθεί πολλοί μεθευρετικοί αλγόριθμοι για τη βελτίωση των τοπικών μεθόδων. Υπάρχουν πολλές εμφανείς διαφορετικές φιλοσοφίες στους μεθευρετικούς αλγορίθμους. Μερικές από αυτές γίνονται αντιληπτές ως επεκτάσεις των αλγορίθμων τοπικής αναζήτησης. Ο στόχος αυτού του είδους των μεθευρετικών αλγορίθμων είναι να ξεφύγουν από τα τοπικά ελάχιστα προκειμένου να προχωρήσουν στην εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης και να ανακαλύψουν το ολικό βέλτιστο. Σε αυτούς περιλαμβάνονται η προσομοιωμένη ανόπτηση, η περιορισμένη αναζήτηση , η αναζήτηση μεταβλητής γειτονιάς και άλλες οι οποίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν τόσο ως μέθοδοι τοπικής αναζήτησης όσο και ως μέθοδοι ολικής αναζήτησης. Γενικά, οι πληθυσμιακοί αλγόριθμοι αποτελούν μεθόδους ολικής αναζήτησης.

Οι αλγόριθμοι τοπικής αναζήτησης μπορούν να θεωρηθούν ως οι απλούστεροι μεθευρετικοί αλγόριθμοι. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η αρχικοποίηση γίνεται με μια δεδομένη λύση, όπως όλοι οι μεθευρετικοί αλγόριθμοι. Η λύση παράγεται είτε με τυχαίο τρόπο είτε με κάποιο αλγόριθμο απληστίας. Σε κάθε επανάληψη ο αλγόριθμος αντικαθιστά την τρέχουσα λύση με μία γειτονική λύση που βελτιώνει τη συνάρτηση στόχου. Η αναζήτηση σταματά όταν όλες οι υποψήφιες γειτονιές έχουν εξερευνηθεί και καμία καλύτερη λύση δεν έχει βρεθεί, πράγμα που σημαίνει ότι βρέθηκε ένα τοπικό ελάχιστο. Σε μεγάλες γειτονιές αναζήτησης οι υποψήφιες λύσεις μπορεί να είναι ένα υποσύνολο της συνολικής γειτονιάς. Η μη εξερεύνηση όλης της γειτονιάς γίνεται για την επιτάχυνση της διαδικασίας. Οι αλγόριθμοι τοπικής αναζήτησης μπορεί να ταξινομηθούν περαιτέρω ανάλογα με τον τρόπο που δημιουργείται η γειτονιά αναζήτησης για παράδειγμα αν η γειτονιά δημιουργείται με κάποιο καθορισμένο τρόπο ή αν η γειτονιά αναζήτησης παράγεται με στοχαστικό τρόπο είτε ανάλογα με το τρόπο που επιλέγεται μία καλύτερη λύση.

6.6.3.3 Πηγή έμπνευσης

Υπάρχουν εμπνευσμένοι από τη φύση αλγόριθμοι, όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι, και μη εμπνευσμένοι από τη φύση, όπως η καθοδηγούμενη τοπική αναζήτηση. Η ταξινόμηση αυτή είναι κατά κάποιον τρόπο δυσνόητη για τους εξής λόγους. Πρώτον, πολλοί υβριδικοί αλγόριθμοι δεν ταιριάζουν σε καμία κατηγορία. Δεύτερον, μερικές φορές είναι δύσκολο να αποδοθεί σαφώς ένας αλγόριθμος σε μία από τις δύο κατηγορίες, διότι τα χαρακτηριστικά του μπορεί να μην είναι ξεκάθαρα εμπνευσμένα από την φύση. Για παράδειγμα, μπορεί να γίνει ο ισχυρισμός ότι η χρήση μνήμης στην περιορισμένη αναζήτηση δεν είναι εμπνευσμένη από τη φύση. Η ταξινόμηση αυτή αναλύεται περισσότερο σε επόμενη ενότητα.

6.6.3.4 Δυναμική και στατική λειτουργία στόχου

Οι μεθευρετικοί αλγόριθμοι μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τον τρόπο χρήσης της συνάρτηση στόχου. Ενώ μερικοί αλγόριθμοι κρατούν την ίδια συνάρτηση στόχου δίνοντας στο πρόβλημα μια εκπροσώπηση, κάποιοι άλλοι, όπως ο αλγόριθμος καθοδηγούμενης τοπικής αναζήτησης τροποποιούν τη συνάρτηση στόχου κατά τη διάρκεια της αναζήτησης. Η ιδέα αυτή βασίζεται στο ότι πρέπει να ξεφύγουν από τα τοπικά ελάχιστα τροποποιώντας το πεδίο αναζήτησης. Γι' αυτόν τον λόγο, κατά τη διάρκεια της έρευνας, η συνάρτηση στόχου μεταβάλλεται προσπαθώντας να ενσωματώσει πληροφορίες που συλλέγονται κατά τη διάρκεια της διαδικασία αναζήτησης.

6.6.3.5 Χρήση μνήμης

Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό για την ταξινόμηση είναι η χρήση του ιστορικού αναζήτησης, με την χρήση μνήμης ή όχι. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν ελάχιστη μνήμη εκτελούν μια διαδικασία Markov, καθώς οι πληροφορίες που χρησιμοποιούν αποκλειστικά για τον προσδιορισμό της επόμενης ενέργειας είναι η τρέχουσα κατάσταση της διαδικασίας αναζήτησης. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τρόποι για να γίνει χρήση της μνήμης. Συνήθως υπάρχει η διάκριση μεταξύ της χρήσης της βραχυπρόθεσμης και μακροπρόθεσμης μνήμη. Η πρώτη συνήθως παρακολουθεί τις πρόσφατες κινήσεις που εκτελέσθηκαν, επισκέπτεται τις λύσεις ή, εν γένει, τις αποφάσεις που λαμβάνονται. Η δεύτερη συνήθως είναι μια συσσώρευση συνθετικών παραμέτρων για την αναζήτηση. Η χρήση της μνήμης αναγνωρίζεται ως ένα από τα θεμελιώδη στοιχεία ενός ισχυρού μεθευρετικού αλγορίθμου.

6.6.3.6 Δομές γειτονιάς

Οι περισσότεροι αλγόριθμοι λειτουργούν σε μία ενιαία δομή γειτονιάς. Με άλλα λόγια, η τοπολογική κατάσταση του φυσικού τοπίου δεν επηρεάζεται κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου. Άλλοι μεθευρετικοί, όπως η μεταβλητή αναζήτηση γειτονιάς, χρησιμοποιούν ένα σύνολο δομών γειτονιάς, το οποίο δίνει τη δυνατότητα να διαφοροποιείται η αναζήτηση από την εναλλαγή διαφορετικών ταιριαστών τοπίων. Διακρίνεται διαφορετική φιλοσοφία αλγόριθμων όπως οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης αποικίας μυρμηγκιών και οι εξελικτικοί αλγόριθμοι. Αυτοί προσπαθούν να βρουν συσχετίσεις μεταξύ των μεταβλητών απόφασης για τον εντοπισμό περιοχών υψηλής ποιότητας λύσεων στο χώρο αναζήτησης. Κατά μία έννοια, εκτελούν μια προκατειλημμένη δειγματοληψία του χώρου αναζήτησης. Για παράδειγμα, στους εξελικτικούς αλγορίθμους αυτό επιτυγχάνεται με ανασυνδυασμό των λύσεων και στους αλγόριθμους βελτιστοποίησης αποικίας μυρμηγκιών με δειγματοληψία στο χώρο αναζήτησης σε κάθε επανάληψη σύμφωνα με μια κατανομή πιθανοτήτων.

6.6.4 Ατομικοί αλγόριθμοι

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι κύριοι μεθευρετικοί ατομικοί αλγόριθμοι, ενώ στις επόμενες υποενότητες περιγράφονται συνοπτικά δύο από αυτούς.

Πίνακας 6.2: Μεθευρετικοί αλγόριθμοι τροχιάς

Προσαρμοστική μνήμη	Adaptive memory
Αλγόριθμος με χρήση πιστωτή	Demon algorithm
Επεκτεινόμενη αναζήτηση γειτονιάς	Expanding neighborhood search
Αλγόριθμος του μεγάλου κατακλυσμού	Great deluge algorithm
Άπληστη τυχαία προσαρμοστική αναζήτηση	Greedy randomized adaptive search procedure
Καθοδηγούμενη τοπική αναζήτηση	Guided local search
Επαναληπτική τοπική αναζήτηση	Iterated local search
Πολυεναρκτήρια τοπική αναζήτηση	Multi-start local search method
Μέθοδος εισαγωγής θορύβου	Noisy method
Επανασύνδεση διαδρομών	Path relinking
Διαδρομή από εγγραφή σε εγγραφή	Record-to-record travel
Προσομοιωμένη ανόπτηση	Simulated annealing
Μέθοδος ομαλοποίησης	Smoothing method
Περιορισμένη αναζήτηση	Tabu search
Μέθοδος αποδοχής κατωφλίου	Threshold accepted
Μεταβλητή αναζήτηση γειτονιάς	Variable neighborhood search

6.6.4.1 Προσομοιωμένη ανόπτηση

Η προσομοιωμένη ανόπτηση βασίζεται στην διαδικασία ανόπτησης των μετάλλων, δηλαδή στην θέρμανση τους σε υψηλές θερμοκρασίες και στη συνέχεια η αργή ψύξη τους σε θερμοκρασία δωματίου. Έτσι στην βελτιστοποίηση κάθε λύση αποτελεί μια ενεργειακή στάθμη και ο αλγόριθμος επιδιώκει να βρεθεί στην χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη δηλαδή τη βέλτιστη λύση. Η μεταφορά αυτού του μοντέλου σε συνδυαστικά προβλήματα, όπου τα ενεργειακά επίπεδα ενός συστήματος αντιστοιχούν στις διάφορες εφικτές λύσεις για ένα πρόβλημα και η ενέργεια του συστήματος για τη λειτουργία του κόστους μιας συνάρτησης, πρέπει να ελαχιστοποιηθούν. Η προσομοιωμένη ανόπτηση είναι μια γενική τεχνική. Συγκρινόμενη με την τοπική αναζήτηση πλεονεκτεί στο ότι έχει τη δυνατότητα να μην παγιδεύεται σε τοπικά βέλτιστα. Δίνει λύσεις καλής ποιότητας και έχει μικρό χρόνο εκτέλεσης. Είναι ασυμπτωτικά βέλτιστη, δηλαδή αν εκτελείται επ' άπειρον θα βρει τη βέλτιστη λύση. Κατά συνέπεια η προσέγγιση εξαρτάται και από το χρόνο εκτέλεσης.

Η προσομοιωμένη ανόπτηση μπορεί να θεωρηθεί ως μια παραλλαγή της μεθόδου αναρρίχηση λόφων η οποία προσπαθεί να αποφύγει την παγίδευση σε τοπικά ελάχιστα. Αντί μόνο να αποδέχεται γειτονικές λύσεις που έχουν ως αποτέλεσμα μία βελτίωση, δέχεται και κάποιες λύσεις που είναι χειρότερες, οι οποίες μπορεί να γίνουν αποδεκτές τυχαία με μια ορισμένη πιθανότητα. Αυτή η πιθανότητα εξαρτάται από την αύξηση του κόστους και μίας παραμέτρου ελέγχου, δηλαδή της θερμοκρασίας ανόπτησης στη φυσική. Όσο μικρότερη είναι η αύξηση του κόστους και υψηλότερη η θερμοκρασία τόσο πιο πιθανές βέλτιστες λύσεις γίνονται δεκτές. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ανόπτησης, η θερμοκρασία σταδιακά μειώνεται σύμφωνα με το χρονοδιάγραμμα ψύξης. Αυτό σημαίνει ότι ο αλγόριθμος γίνεται όλο και πιο επιλεκτικός στην αποδοχή νέων λύσεων. Στο τέλος της διαδικασίας μόνο κινήσεις, οι οποίες στην πράξη οδηγούν σε μια βελτίωση γίνονται αποδεκτές. Η διεργασία αναζήτησης τερματίζεται όταν φτάνει σε ένα κατώτερο όριο η θερμοκρασία ή το κόστος. Συμπερασματικά, στα μειονεκτήματά της συγκαταλέγονται ότι ασχολείται με μόνο μια λύση σε κάθε βήμα, ενώ δεν κάνει αξιοποίηση της πληροφορίας που έχει υποστεί επεξεργασία σε προηγούμενα στάδια, μη αποκτώντας έτσι μια γενική εικόνα του χώρου αναζήτησης. Όπως θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο η μέθοδος αυτή έχει χρησιμοποιηθεί στη βελτιστοποίηση χαράξεων από τον Akay (2003) και τον Stamos (2008).

6.6.4.2 Περιορισμένη αναζήτηση

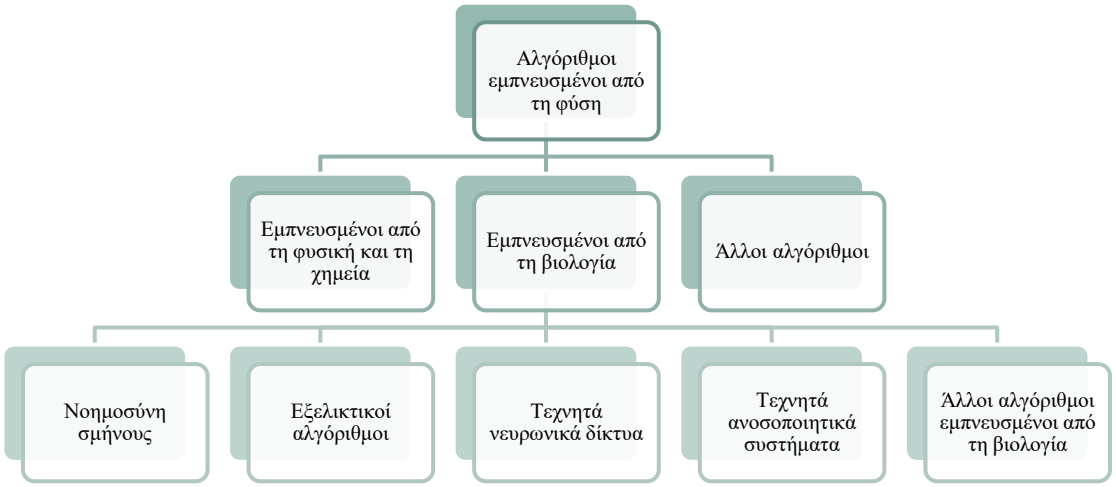
Δύο πολύ σημαντικά στοιχεία της περιορισμένης αναζήτησης ή αναζήτησης tabu, όπως αλλιώς ονομάζεται είναι η εντατικοποίηση και οι στρατηγικές διαφοροποίησης. Επιβάλλονται στρατηγικές που βασίζονται στην τροποποίηση επιλογής κανόνων ώστε να ενθαρρύνεται ο συνδυασμός κινήσεων και τα χαρακτηριστικά μνήμης για την εύρεση μιας καλής λύσης. Μπορεί επίσης να ξεκινήσει μια κίνηση επιστροφής στις ελκυστικές περιοχές για την αναζήτηση πιο επιμελών λύσεων. Ο αλγόριθμος περιορισμένης αναζήτησης επεκτείνει την ιδέα να αποφευχθούν τα τοπικά βέλτιστα με τη χρήση δομών μνήμης. Το πρόβλημα της προσομοιωμένης ανόπτησης είναι ότι ο αλγόριθμος επαναλαμβάνει απλά το δικό του κομμάτι, καθώς μεταπηδά από την μια γειτονιά στην άλλη. Η περιορισμένη αναζήτηση απαγορεύει την επανάληψη των κινήσεων που έχουν γίνει πρόσφατα. Αυτό για παράδειγμα, μπορεί να το καταφέρει με ένα κριτήριο τερματισμού, χρησιμοποιώντας έναν αριθμό επαναλήψεων ή έναν καθορισμένο αριθμό επαναλήψεων που δεν θα επηρεάζουν την καλύτερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Επίσης σταματά σε οποιαδήποτε επανάληψη όταν δεν υπάρχουν επόμενες κινήσεις στην τοπική γειτονιά. Τη μέθοδο αυτή έχουν χρησιμοποιήσει στη βελτιστοποίηση οδικών χαράξεων οι Lee & Cheng (2001b) και ο Aruga (2005).

6.7 Μεθευρετικοί αλγόριθμοι εμπνευσμένοι από τη φύση

Η φύση έχει εμπνεύσει με διάφορους τρόπους πολλούς ερευνητές καθώς οι περισσότεροι σύγχρονοι μεθευρετικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης είναι εμπνευσμένοι από τη φύση. Με έμφαση στην πηγή έμπνευσης των αλγορίθμων μπορούν να προκύψουν διάφορες ταξινομήσεις με τις κύριες κατηγορίες

να αποτελούν αυτές των επιστημών της βιολογίας της φυσικής και της χημείας. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται μια ταξινόμηση των μεθευρετικών αλγορίθμων εμπνευσμένων από τη φύση.

Σχήμα 6.3: Ταξινόμηση αλγορίθμων εμπνευσμένων από τη φύση



6.7.1 Αλγόριθμοι βασισμένοι στη φυσική και τη χημεία

Εκτός από τη βιολογία, πηγή έμπνευσης για πολλούς μεθευρετικούς αλγορίθμους αποτέλεσε η φυσική και η χημεία. Η ανάπτυξη αυτών βασίστηκε στη μίμηση ορισμένων φυσικών νόμων, όπως η ηλεκτρική φόρτιση και η βαρύτητα. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται ορισμένοι τέτοιοι μεθευρετικοί αλγόριθμοι. Ο αλγόριθμος της προσομοιωμένης ανόπτησης περιγράφηκε σε προηγούμενο εδάφιο.

Πίνακας 6.3: Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης βασισμένοι στη φυσική και τη χημεία

Αλγόριθμος μεγάλης έκρηξης μεγάλης σύνθλιψης	Big bang-big crunch
Αλγόριθμος μαύρης τρύπας	Black hole
Βελτιστοποίηση κεντρικής δύναμης	Central force optimization
Αναζήτηση φορτισμένου συστήματος	Charged system search
Βελτιστοποίηση ηλεκτρομαγνητισμού	Electro-magnetism optimization
Αλγόριθμος γαλαξιακής αναζήτησης	Galaxy-based search algorithm
Αναζήτηση βαρυτικής έλξης	Gravitational search
Ευφυής σταγόνα νερού	Intelligent water drop
Δυναμική σχηματισμού ποταμών	River formation dynamics
Αυτοκινούμενα σωματίδια	Self-propelled particles
Προσομοιωμένη ανόπτηση	Simulated annealing
Αναζήτηση στοχαστικής διάχυσης	Stochastic diffusion search
Σπειροειδής βελτιστοποίηση	Spiral optimization
Αλγόριθμος υδρολογικού κύκλου	Water cycle algorithm

6.7.2 Αλγόριθμοι βασισμένοι στη βιολογία

Οι αλγόριθμοι οι οποίοι έχουν εμπνευστεί από τη βιολογία αποτελούν την πλειοψηφία των αλγορίθμων που έχουν εμπνευστεί από τη φύση γενικότερα. Οι σημαντικότερες υποκατηγορίες αυτών των

αλγορίθμων βασίζονται στη νοημοσύνη σμήνους και τη διαδικασία της εξέλιξης. Βέβαια, υπάρχουν και άλλοι αλγόριθμοι που δεν ανήκουν σε καμία από αυτές τις δύο υποκατηγορίες.

6.7.2.1 Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα είναι μοντέλα παράλληλης επεξεργασίας, των οποίων η οργάνωση προσπαθεί να μιμηθεί το δίκτυο των νευρώνων του ανθρώπινου εγκεφάλου. Τα νευρωνικά δίκτυα προέρχονται από τον τρόπο λειτουργίας του ανθρωπίνου εγκεφάλου. Ο εγκέφαλος αποτελείται νευρώνες, οι οποίοι είναι μαζικά διασυνδεδεμένοι κατά μέσο όρο από διάφορες χιλιάδες διασυνδέσεις ανά νευρώνα. Κάθε νευρώνας είναι ένα εξειδικευμένο κύτταρο το οποίο έχει τη δυνατότητα μετάδοσης ενός ηλεκτροχημικού σήματος. Ένας νευρώνας μεταδίδει ένα ηλεκτροχημικό σήμα όταν το συνολικό σήμα το οποίο λήφθηκε στο ίδιο, υπερβεί ένα συγκεκριμένο επίπεδο, δηλαδή, το κατώτατο όριο βολής. Η ανάπτυξή τους σήμερα είναι αρκετά δυναμική και οι εφαρμογές που στηρίζονται σε αυτά πάρα πολλές. Ο υπολογισμός ξεφεύγει από τη βασική λειτουργία επίλυσης πράξεων και μπορεί να προσεγγίζει ένα πρόβλημα με έναν αφηρημένο μαθηματικό τρόπο. Ένα δίκτυο μαθαίνει μέσα από εκπαίδευση, θυμάται ή ξεχνά μια μεταβλητή, όπως το μυαλό μας. Συνεπώς αφού εκπαιδευτεί αποκτά μια νέα ικανότητα, αυτή της γενίκευσης και έτσι μπορεί να επιλύει νέα προβλήματα. Οι τεχνητοί νευρώνες, είναι μη-γραμμικά υπολογιστικά στοιχεία που λειτουργούν παράλληλα και οργανώνονται σε μοτίβα, και σε κάθε σύναψη αντιστοιχεί ένα βάρος, το συναπτικό βάρος. Η πληροφορία από την εκμάθηση αποθηκεύεται στα συναπτικά βάρη που προσαρμόζονται με βάση τα δεδομένα εκπαίδευσης.

Στην κλασική μορφή, τα νευρωνικά δίκτυα περιέχουν πολλά επίπεδα νευρώνων ή αθροιστικών μονάδων, όπου κάθε είσοδος πολλαπλασιάζεται με κάποιο συντελεστή βαρύτητας και όλες μαζί αθροίζονται, ενώ στη συνέχεια μεταφέρεται το αποτέλεσμα στο επόμενο στρώμα. Αν οι νευρώνες είναι αρκετοί, τότε το δίκτυο προσεγγίζει τη λύση ενός προβλήματος με περισσότερη ακρίβεια. Ωστόσο, συχνά παρουσιάζονται συναρτήσεις τόσο περίπλοκες που για να αναπαραχθούν από το νευρωνικό δίκτυο με ικανοποιητική ακρίβεια απαιτείται υπερβολικά μεγάλος αριθμός μονάδων. Λύση σε αυτό το πρόβλημα έδωσε, μερικώς, η χρήση της μονάδος Σίγμα-Πι, στην οποία συντελεστές βαρύτητας εφαρμόζονται όχι μόνο σε κάθε είσοδο, αλλά και σε δεύτερης και ίσως σε υψηλότερης τάξης δυνάμεις της εισόδου. Η μέθοδος αυτή αποδείχτηκε ισχυρότερη, χωρίς όμως να μπορεί να αντιμετωπίσει προβλήματα μεγάλης πολυπλοκότητας με πολλές εισόδους, διότι το πλήθος των συντελεστών βαρύτητας αυξάνεται εντυπωσιακά. Μια παραλλαγή της μονάδας Σίγμα-Πι είναι η μονάδα γινομένου. Μ' αυτήν υπολογίζεται το γινόμενο όλων των εισόδων, υψωμένης της καθεμίας σε μια δύναμη

6.7.2.2 Τεχνητά ανοσοποιητικά συστήματα

Όπως μαρτυρά και το όνομά τους είναι εμπνευσμένοι από το ανοσοποιητικό σύστημα των ανώτερων οργανισμών. Μιμούνται τις βασικές λειτουργίες του ανοσοποιητικού συστήματος όπως η αναγνώριση, η καταστροφή, η εκμάθηση και η μνήμη παθογόνων εισβολέων. Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται οι κύριοι αλγόριθμοι που έχουν αναπτυχθεί.

Πίνακας 6.4: Αλγόριθμοι τεχνητών ανοσοποιητικών συστημάτων

Αλγόριθμος επιλογής κλώνων	Clonal selection algorithm
Αλγόριθμος αρνητικής επιλογής	Negative selection algorithm
Αλγόριθμοι ανοσοποιητικών δικτύων	Immune network algorithms
Αλγόριθμοι δενδριτικών κυττάρων	Dendritic cell algorithms

6.7.2.3 Αλγόριθμοι βασισμένοι στη νοημοσύνη σμήνους

Πρόκειται για μια τεχνική τεχνητής νοημοσύνη, με βάση τη μελέτη της συλλογικής συμπεριφοράς των αποκεντρωμένων, αυτοοργανωμένων συστημάτων. Η νοημοσύνη σμήνους περιλαμβάνει τη συλλογική συμπεριφορά πολλαπλών στοιχείων που αλληλεπιδρούν ακολουθώντας ορισμένους απλούς κανόνες.

Ενώ κάθε στοιχείο μπορεί να θεωρηθεί ότι δεν έχει νοημοσύνη, αντιθέτως το σύστημα αυτών των στοιχείων μπορεί να επιδεικνύει αυτοοργανωτική συμπεριφορά και συνεπώς να διέπεται από μιας μορφής συλλογική νοημοσύνη. Πολλοί αλγόριθμοι έχουν αναπτυχθεί από τέτοια συστήματα νοημοσύνης σμήνους. Οι αλγόριθμοι αυτοί χρησιμοποιούνται ευρέως και αυτό συμβαίνει για αρκετούς λόγους. Ένας βασικός λόγος αφορά το γεγονός πως στους αλγόριθμους αυτούς, συνήθως η πληροφορία διαμοιράζεται μεταξύ των στοιχείων ώστε η αυτοοργάνωση, η συνεξέλιξη και η εκμάθηση κατά τη διάρκεια των επαναλήψεων να βοηθούν στην υψηλή τους απόδοση. Ένας άλλος λόγος αφορά το γεγονός πως τα πολλαπλά στοιχεία μπορούν να παραλληλιστούν εύκολα, ώστε η βελτιστοποίηση να γίνει πιο πρακτική. Δύο από τις πιο επιτυχημένες μορφές αυτής της προσέγγισης είναι η βελτιστοποίηση αποικίας μυρμηγκιών και η βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται ορισμένοι αλγόριθμοι που ανήκουν στην κατηγορία αυτή.

Πίνακας 6.5: Αλγόριθμοι βασισμένοι στη νοημοσύνη σμήνους
(Πηγή: Fister, Yang, Fister, Brest, & Fister, 2013, Ιδία επεξεργασία)

Επιταχυμένη βελτιστοποίηση σωματιδίων	Accelerated particle swarm optimization
Βελτιστοποίηση αποικίας μυρμηγκιών	Ant colony optimization
Αποικία τεχνητών μελισσών	Artificial bee colony
Αλγόριθμος τροφοληψίας βακτηριών	Bacterial foraging optimization algorithm
Αλγόριθμος νυχτερίδας	Bat algorithm
Βελτιστοποίηση αποικίας μελισσών	Bee colony optimization
Σύστημα μελισσών	Bee system
Κυψέλη μελισσών	BeeHive
Αναζήτηση λύκου	Wolf search
Αλγόριθμος μελισσών	Bees algorithm
Βελτιστοποίηση σμήνους μελισσών	Bees swarm optimization
Αγριομέλισσες	Bumblebees
Αγέλη γατών	Cat swarm
Καθοδηγούμενη αναζήτηση	Consultant-guided search
Αναζήτηση του κούκου	Cuckoo search
Στρατηγική αετού	Eagle strategy
Αλγόριθμος ταχέως σμήνους βακτηρίων	Fast bacterial swarming algorithm
Αλγόριθμος πυγολαμπίδας	Firefly algorithm
Σμήνος ψαριών	Fish school/swarm
Βελτιστοποίηση δικτυώματος σμήνους	Good lattice swarm optimization
Βελτιστοποίηση σμήνους πυγολαμπίδων	Glowworm swarm optimization
Πρότυπο ιεραρχικού σμήνους	Hierarchical swarm algorithm
Σμήνος κριλ	Krill herd
Αναζήτηση πιθήκου	Monkey search
Βελτιστοποίηση πολλαπλών σμηνών	Multi-swarm optimization
Βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων	Particle swarm optimization
Βελτιστοποίηση ομάδας αραχνών	Social spider optimization
Αλγόριθμος εικονικών μυρμηγκιών	Virtual ant algorithm
Εικονικές μέλισσες	Virtual bees
Αλγόριθμος αβαρούς σμήνους	Weightless swarm algorithm

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων προσομοιώνει την κοινωνική συμπεριφορά ορισμένων οργανισμών στη φύση, όπως τα σμήνη πουλιών και τα κοπάδια ψαριών. Η PSO ασχολείται με προβλήματα στα οποία μια καλύτερη λύση μπορεί να αναπαρασταθεί ως ένα σημείο ή μια επιφάνεια σε ένα χώρο αρκετών διαστάσεων. Το κύριο πλεονέκτημα της είναι ότι οι πληροφορίες είναι εντυπωσιακά ανθεκτικές στις τοπικά βέλτιστες τιμές ενός προβλήματος. Χαρακτηριστικό του αλγορίθμου είναι η ύπαρξη μνήμης που κληρονομείται από γενιά σε γενιά. Αυτό έχει σαν πλεονέκτημα ότι λύσεις που έχουν απορριφθεί δεν επαναλαμβάνονται. Ο αλγόριθμος αυτός έχει χρησιμοποιηθεί στη βελτιστοποίηση οδικών χαράξεων από τους Bosurgi, Pellegrino, & Sollazzo (2013) ενώ μια τροποποιημένη του μορφή έχει χρησιμοποιηθεί από τους Shafahi & Bagherian (2013).

Ο αλγόριθμος της αποικίας μυρμηγκιών, όπως διαφαίνεται και από το όνομα του, είναι εμπνευσμένος από την συμπεριφορά των μυρμηγκιών στη φύση και συγκεκριμένα από τον τρόπο με τον οποίο αυτά αναζητούν το βέλτιστο μονοπάτι μεταξύ της αποικίας και της πηγής της τροφής. Τα μυρμήγκια χτίζουν λύσεις με την κίνηση τους στο γράφημα ενός προβλήματος και οι αλλαγές γίνονται με τέτοιο τρόπο ώστε μελλοντικά τα μυρμήγκια να μπορούν να δημιουργήσουν καλύτερες λύσεις. Ο αλγόριθμος αυτός έχει χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση της κατακόρυφης χάραξης από τους Miao, Li, Yang, & Huo (2009)

6.7.2.4 Εξελικτικοί αλγόριθμοι

Η θεωρία της εξέλιξης των ειδών που διατυπώθηκε αρχικά από τον Κάρολο Δαρβίνο, αποτέλεσε πηγή έμπνευσης για ένα πλήθος μεθόδων που εφαρμόζονται σε προβλήματα βελτιστοποίησης. Η εξέλιξη ενός είδους στη φύση βασίζεται στη φυσική επιλογή, καθώς οι οργανισμοί που είναι περισσότερο προσαρμοσμένοι στο περιβάλλον τους επιβιώνουν, στην αναπαραγωγή, όπου κατά τη δημιουργία απογόνων κληρονομούνται χαρακτηριστικά των γονέων τους και στη μετάλλαξη, που αφορά τυχαία μεταβολή στο γενετικό υλικό ενός οργανισμού. Οι ερευνητές, παρατηρώντας κοινά χαρακτηριστικά μεταξύ της βιολογικής εξέλιξης και της βελτιστοποίησης, οδηγήθηκαν στην ανάπτυξη της εξελικτικής υπολογιστικής, ενός πολύ σημαντικού κλάδου της υπολογιστικής νοημοσύνης. Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι παρουσιάζουν επιτυχία στην αντιμετώπιση της πρόωρης σύγκλισης λαμβάνοντας υπόψη μια σειρά από λύσεις ταυτόχρονα.

Πίνακας 6.6: Εξελικτικοί αλγόριθμοι

Κυτταρικοί γενετικοί αλγόριθμοι	Cellular genetic algorithms
Κυτταρικοί μιμητικοί αλγόριθμοι	Cellular memetic algorithms
Συνεξελικτικοί αλγόριθμοι	Coevolutionary algorithms
Πολιτιστικοί αλγόριθμοι	Cultural algorithms
Αλγόριθμος διαφορικής εξέλιξης	Differential evolution
Αλγόριθμοι εκτίμησης κατανομών πιθανοτήτων	Estimation of distribution algorithms
Εξελικτικός προγραμματισμός	Evolutionary programming
Εξελικτικές στρατηγικές	Evolutionary strategies
Γενετικοί αλγόριθμοι	Genetic algorithms
Αναζήτηση μουσικής αρμονίας	Harmony Search
Γενετικοί αλγόριθμοι πληθυσμών-νησιών	Island genetic algorithms
Μιμητική διαφορική εξέλιξη πληθυσμών-νησιών	Island memetic differential evolution
Μιμητικοί αλγόριθμοι	Memetic algorithms
Αλγόριθμος μιμητικής διαφορικής εξέλιξης	Memetic differential evolution
Διασκορπισμένη αναζήτηση	Scatter search

Οι εξελικτικές στρατηγικές και οι γενετικοί αλγόριθμοι προέρχονται από την μίμηση της διαδικασίας της εξέλιξης των ειδών στη φύση. Κατ' αναλογία με τη θεωρία του Δαρβίνου της φυσικής διαλογής, στην οποία επιβιώνει ο ισχυρότερος, έτσι και στην επίλυση του προβλήματος επιδιώκεται η επικράτηση της βέλτιστης λύσης. Οι δύο αυτοί αλγόριθμοι βασίζονται στο ίδιο σκεπτικό και διαφοροποιούνται στον τρόπο με τον οποίο γίνεται η διαλογή των ατόμων-λύσεων, η διασταύρωση και η μετάλλαξη τους. Η διαλογή αποτελεί το μηχανισμό επίτασης του αλγορίθμου, ενώ η διασταύρωση και η μετάλλαξη καθορίζουν τη διαφοροποίηση. Περισσότερες πληροφορίες για τους γενετικούς αλγορίθμους παρατίθενται στην επόμενη ενότητα.

6.7.2.5 Άλλοι αλγόριθμοι εμπνευσμένοι από τη βιολογία

Πολλοί αλγόριθμοι εμπνευσμένοι από τη βιολογία δεν ανήκουν σε κάποια από τις προηγούμενες κατηγορίες. Ορισμένοι από αυτούς τους αλγόριθμους παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 6.7: Αλγόριθμοι βασισμένοι στη βιολογία που δεν ανήκουν στις άλλες κατηγορίες (Πηγή: Fister, Yang, Fister, Brest, & Fister, 2013, Ιδία επεξεργασία)

Πρότυπο ατμοσφαιρικών νεφών	Atmosphere clouds model
Βελτιστοποίηση βιογεωγραφίας	Biogeography-based optimization
Βελτιστοποίηση καταιγισμού ιδεών	Brain storm optimization
Ηχοεντοπισμός δελφινιών	Dolpin echolocation
Κάλεσμα ιαπωνικών δενδροβατράχων	Japanese tree frogs calling
Εξελικτικός αλγόριθμος οικολογίας	Eco-inspired evolutionary algorithm
Αλγόριθμος ασπροπάρη	Egyptian vulture
Αναζήτηση κοπαδιού ψαριών	Fish-school search
Αλγόριθμος επικονίασης άνθους	Flower pollination algorithm
Γονιδιακή έκφραση	Gene expression
Μετανάστευση σολομού	Great salmon run
Βελτιστοποίηση ομαδικής αναζήτησης	Group search optimizer
Αλγόριθμος εμπνευσμένος από τον άνθρωπο	Human-inspired algorithm
Βελτιστοποίηση ζιζανίων	Invasive weed optimization
Βελτιστοποίηση μελισσών	OptBees
Αλγόριθμος ορυζώνα	Paddy field algorithm
Αλγόριθμος διάδοσης κατσαρίδων	Roach infestation algorithm
Εξέλιξη βασίλισσας μέλισσας	Queen-bee evolution
Αλγόριθμος τυχαίων αλμάτων βατράχων	Shuffled frog leaping algorithm
Βελτιστοποίηση αποικίας τερμιτών	Termite colony optimization

6.7.3 Άλλοι αλγόριθμοι

Κατά την ανάπτυξη αλγορίθμων αρκετοί ερευνητές εμπνεύστηκαν από άλλες πηγές πέραν της βιολογίας της φυσικής και της χημείας. Συνεπώς αρκετοί αλγόριθμοι είναι δύσκολο να τοποθετηθούν στις προηγούμενες κατηγορίες καθώς έχουν αναπτυχθεί βάσει χαρακτηριστικών που αντλούνται από άλλες πηγές όπως την κοινωνία και τα ανθρώπινα συναισθήματα. Για τον λόγο αυτό ορισμένοι αλγόριθμοι εντάσσονται σε ξεχωριστή κατηγορία όπως παρουσιάζεται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 6.8: Άλλοι αλγόριθμοι
(Πηγή: Fister, Yang, Fister, Brest, & Fister, 2013, Ιδία επεξεργασία)

Βελτιστοποίηση αναρχικής κοινωνίας	Anarchic society optimization
Αναζήτηση τεχνητής συνεργασίας	Artificial cooperative search
Αναζήτηση οπισθόδρομης βελτιστοποίησης	Backtracking optimization search
Αλγόριθμος διαφορικής αναζήτησης	Differential search algorithm
Γραμματική εξέλιξη	Grammatical evolution
Αλγόριθμος ανταγωνιστικών αποικιοκρατών	Imperialist competitive algorithm
Αλγόριθμος πρωταθλήματος	League championship algorithm
Βελτιστοποίηση κοινωνικής ευαισθησίας	Social emotional optimization

6.8 Γενετικοί αλγόριθμοι

Οι γενετικοί αλγόριθμοι αποτελούν μια μέθοδο αναζήτησης βέλτιστων λύσεων σε πολλά μαθηματικά προβλήματα, και ειδικότερα σε προβλήματα πολλών παραμέτρων, με σκοπό την εύρεση αποδεκτών, σύμφωνα με κάποιο κριτήριο λύσεων. Ανήκουν στο κλάδο της επιστήμης υπολογιστών , ενώ ο τρόπος λειτουργίας τους είναι εμπνευσμένος από τη βιολογία.

Η ανάπτυξη όμως των γενετικών αλγορίθμων, στη μορφή με την οποία χρησιμοποιούνται ευρέως στις μέρες μας, πραγματοποιήθηκε από τον Holland (1975). Ο Holland αποδείχτηκε πρωτοπόρος των γενετικών αλγορίθμων, καθώς θεώρησε ότι κάποιες από τις ιδέες και λειτουργίες που εφαρμόζει η φύση στα συστήματά της θα μπορούσαν να έχουν αποτελέσματα, στην περίπτωση που αυτοί ενσωματώνονταν σε αλγορίθμους για υπολογιστές, με τρόπο τέτοιο, ώστε να προκύψουν αποδοτικές τεχνικές επίλυσης δύσκολων προβλημάτων. Αποτέλεσμα αυτής της εργασίας ήταν οι γενετικοί αλγόριθμοι, μια νέα, εξελισσόμενη και πολλά υποσχόμενη τεχνική αναζήτησης και βελτιστοποίησης, που αποτελεί εργαλείο για την επίλυση προβλημάτων αναζήτησης και βελτιστοποίησης. Οι αρχές των γενετικών αλγορίθμων έχουν αναπτυχθεί αρκετά και περιγραφεί σε αρκετά κείμενα όπως αυτά των Goldberg (1989) και Michalewicz (1996).

Η βασική ιδέα των γενετικών αλγορίθμων είναι η μίμηση των μηχανισμών της βιολογικής εξέλιξης που συναντώνται στη φύση, δηλαδή της διαδικασίας που οδηγεί στην αύξηση της ικανότητας ενός πληθυσμού να μπορεί να επιβιώσει σε κάποιο συγκεκριμένο περιβάλλον, που ονομάζεται Εξελικτική Προσαρμογή. Δανείζονται την ορολογία τους από τη σύγχρονη γενετική. Οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται εκτενώς ως εργαλείο βελτιστοποίησης, και μάλιστα, αποσκοπούν στην εξυπηρέτηση πολύπλοκων και με πολύ αυστηρούς περιορισμούς προβλημάτων, τα οποία είναι δυνατόν να επιλυθούν μόνο προσεγγιστικά από τους σημερινούς υπολογιστές.

Όπως είδαμε στην προηγούμενη ενότητα, οι γενετικοί αλγόριθμοι, ανήκουν σε μία ευρύτερη κατηγορία αλγορίθμων, τους εξελικτικούς αλγόριθμους, οι οποίοι με τη σειρά τους ανήκουν στη ευρύτερη ομάδα των μεθευρετικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης, ενώ η ευρεία χρήση τους οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στο στοχαστικό χαρακτήρα που ακολουθούν κατά τη διάρκεια της επαναληπτικής διαδικασίας για τον εντοπισμό της βέλτιστης λύσης. Βέλτιστη, θεωρείται η λύση η οποία ελαχιστοποιεί ή μεγιστοποιεί την συνάρτηση στόχου, ενώ ικανοποιεί τους περιορισμούς του προβλήματος. Παρόλα αυτά, οι εξελικτικοί αλγόριθμοι και κατ' επέκταση οι γενετικοί, δε μπορούν να εγγυηθούν την εύρεση της βέλτιστης λύσης, αλλά μιας «καλής» λύσης.

Παρόλο που όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι γενετικοί αλγόριθμοι ανήκουν στην κατηγορία των στοχαστικών αλγορίθμων, διαφέρουν αρκετά από τους αλγορίθμους οι οποίοι εφαρμόζουν τυχαίες μεθόδους αναζήτησης και βελτιστοποίησης, αφού είναι έχουν τη δυνατότητα να συνδυάζουν στοιχεία

τόσο από άμεσες όσο και από στοχαστικές τεχνικές αναζήτησης. Για το λόγο αυτό, θεωρούνται πιο «εύρωστοι» από τις υπάρχουσες μεθόδους άμεσης αναζήτησης. Επιπλέον, σε αντίθεση με τις άλλες μεθόδους αναζήτησης οι οποίες επεξεργάζονται μόνο ένα σημείο του διαστήματος αναζήτησης, οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να διατηρούν έναν πληθυσμό πιθανών λύσεων πάνω στον οποίο πειραματίζονται. Με τον τρόπο αυτό, ένας γενετικός αλγόριθμος πραγματοποιεί αναζήτηση σε πολλές κατευθύνσεις και δίνει τη δυνατότητα καταγραφής και ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ αυτών των κατευθύνσεων.

Έπειτα, αξίζει να αναφερθούν τα πέντε βασικά τμήματα που περιλαμβάνει ένας γενετικός αλγόριθμος για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα, τα οποία είναι τα παρακάτω:

1. Αναπαράσταση των πιθανών λύσεων του προβλήματος.
2. Δημιουργία ενός αρχικού πληθυσμού των πιθανών λύσεων.
3. Μία συνάρτηση καταλληλότητας η οποία κατατάσσει τις λύσεις.
4. Γενετικούς τελεστές για τη δημιουργία λύσεων, και τέλος.
5. Τιμές για τις διάφορες παραμέτρους που χρησιμοποιεί ο γενετικός αλγόριθμος, όπως για παράδειγμα μέγεθος του πληθυσμού, ή πιθανότητες εφαρμογές των γενετικών τελεστών.

6.8.1 Βήματα εκτέλεσης γενετικών αλγορίθμων

Τα βασικά βήματα τα οποία ακολουθούνται συνήθως για την επίλυση προβλημάτων με τη χρήση γενετικών αλγορίθμων, είναι τα ακόλουθα(Λυκοθανάσης, 2001):

1. Κωδικοποίηση της λύσης
2. Κατάρτιση αρχικού πληθυσμού
3. Αποτίμηση πληθυσμού μέσω συνάρτησης καταλληλότητας
4. Επιλογή
5. Διασταύρωση
6. Μετάλλαξη
7. Αντικατάσταση

6.8.2 Κωδικοποίηση της λύσης

Ένας από τους βασικότερους παράγοντες για μια επιτυχημένη βελτιστοποίηση ενός προβλήματος με χρήση γενετικών αλγορίθμων αποτελεί ο τρόπος με το οποίο γίνεται αναπαράσταση και κωδικοποίηση των υποψήφιων λύσεων, ή αλλιώς, η γενετική αναπαράσταση των λύσεων. Ο πιο διαδεδομένος τρόπος αναπαράστασης των υποψήφιων λύσεων είναι η μετατροπή των μεταβλητών σχεδιασμού σε μια σειρά δυαδικών ψηφίων τα οποία ονομάζονται δυαδικές συμβολοσειρές. Επίσης είναι δυνατή και η αναπαράσταση των λύσεων με τη χρήση ακεραίων ή πραγματικών αριθμών ή ακόμη και χαρακτήρων, όπως τα γράμματα της αλφαβήτου. Υπάρχουν τέλος και πιο σύνθετοι τρόποι γενετικής αναπαράστασης όπως η δενδροειδής κωδικοποίηση. Στην παρούσα εργασία οι μεταβλητές απόφασης θεωρούνται πραγματικές οπότε και κωδικοποιούνται με αυτή τη μορφή.

6.8.3 Κατάρτιση αρχικού πληθυσμού

Στο στάδιο αυτό δημιουργείται τυχαία ένας πληθυσμός από υποψήφιες πιθανές λύσεις. Κάθε μέλος του πληθυσμού αντιστοιχεί σε μια σειρά συγκεκριμένου μήκους που αποτελεί τη συνολική κωδικοποίηση που επιλέγεται για το σύνολο των μεταβλητών σχεδιασμού του προβλήματος. Κάθε τέτοια σειρά ονομάζεται γονότυπος ή χρωμόσωμα. Ένα βασικό χαρακτηριστικό που πρέπει να ορίζεται πάντοτε κατά την επίλυση προβλημάτων με χρήση γενετικών αλγορίθμων αποτελεί το μέγεθος του πληθυσμού, του αριθμού δηλαδή των χρωμοσωμάτων που συνθέτουν κάθε πληθυσμό. Είναι καλό το μέγεθος του πληθυσμού να είναι επαρκώς μεγάλο και να παραμένει σταθερό κατά τη διάρκεια λειτουργίας του γενετικού αλγορίθμου, καθώς πληθυσμοί οι οποίοι αποτελούνται από μικρό αριθμό χρωμοσωμάτων μειώνουν τις πιθανότητες πραγματοποίησης της διαδικασίας της διασταύρωσης με αποτέλεσμα να εξετάζεται ένα μικρό κομμάτι του χώρου αναζήτησης.

6.8.4 Αποτίμηση πληθυσμού μέσω συνάρτησης καταλληλότητας

Η συνάρτηση στόχου αποτελεί έναν από τους πιο καθοριστικούς παράγοντες για τη διαδικασία αναζήτησης, γιατί ορίζει τη μορφή του χώρου αναζήτησης. Υπολογίζεται για κάθε μέλος του πληθυσμού και αποτελεί την προς βελτιστοποίηση συνάρτηση. Ο υπολογισμός της συνάρτησης στόχου ενός χρωμοσώματος που αντιστοιχεί σε κάποιες τιμές του συνόλου των παραμέτρων σχεδιασμού του προβλήματος είναι ανεξάρτητος από τις τιμές των παραμέτρων σχεδιασμού κάθε άλλου μέλους του πληθυσμού. Ωστόσο, η ποιότητα και η βαθμονόμηση ενός μέλους ορίζεται σε σχέση με τα υπόλοιπα μέλη του πληθυσμού.

6.8.5 Επιλογή

Σκοπός της διαδικασίας της επιλογής, δηλαδή του τρόπου με τον οποίο θα επιλεχθούν τα χρωμοσώματα κάθε πληθυσμού ώστε να παράγουν απογόνους, αποτελεί η προτίμηση εκείνων των οποίων έχουν τις περισσότερες πιθανότητες επιβίωσης και κατά συνέπεια και αναπαραγωγής ώστε να δημιουργήσουν ακόμα πιο ικανούς απογόνους. Αυτό μεταφράζεται σε υψηλές τιμές της συνάρτησης καταλληλότητας. Όσο μεγαλύτερη η τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας, τόσο μεγαλύτερη η πιθανότητα επιλογής του ατόμου. Ωστόσο, πρέπει να διατηρούνται οι ισορροπίες καθώς υπάρχει ο κίνδυνος κατακλυσμού του πληθυσμού από χρωμοσώματα τα οποία μπορεί να έχουν υψηλές τιμές συνάρτησης καταλληλότητας εν συγκρίσει με τα υπόλοιπα αλλά να απέχουν πολύ από τη βέλτιστη τιμή, μειώνοντας έτσι τη διαφορετικότητα εντός του πληθυσμού που απαιτείται για την αλλαγή και την εξέλιξή του. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται ένας δείκτης επιλογής που καθορίζει τον βαθμό στον οποίο προτιμούνται τα πιο κατάλληλα άτομα στη διαδικασία επιλογής.

6.8.6 Διασταύρωση

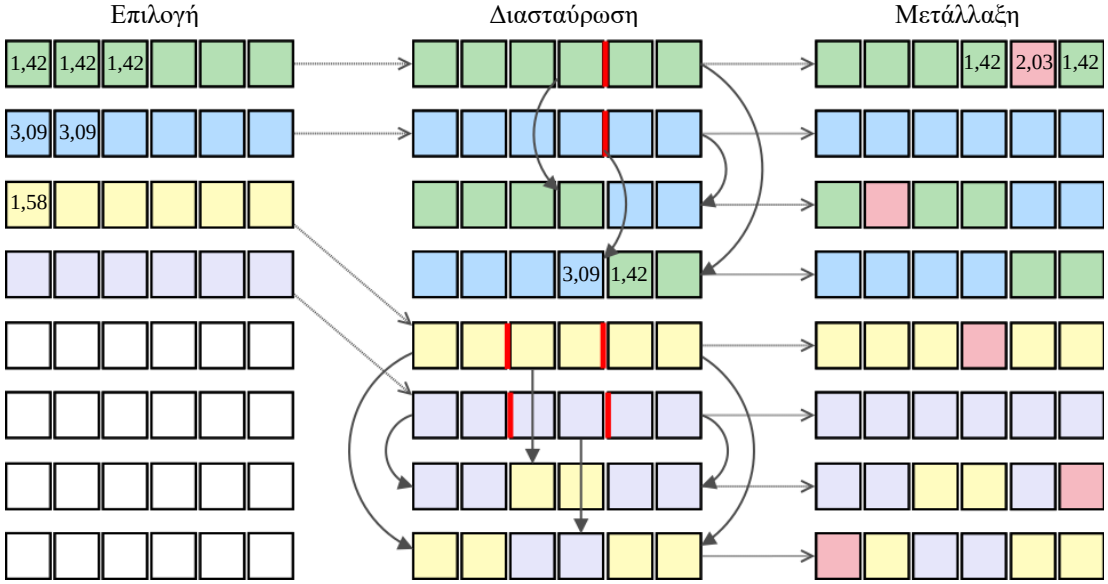
Η διαδικασία της διασταύρωσης, η οποία εφαρμόζεται με χρήση των τελεστών διασταύρωσης, αποτελεί το βασικότερο διαχωριστικό χαρακτηριστικό των γενετικών αλγορίθμων από τους υπόλοιπους εξελικτικούς αλγορίθμους. Η διαδικασία διασταύρωσης επιλέγει τυχαία μια θέση, και ανταλλάσσει τις αλυσίδες των γονιδίων πριν ή και μετά από αυτή τη θέση ανάμεσα στα δύο χρωμοσώματα για να παράγει δύο απογόνους. Η διασταύρωση ενός σημείου αποτελεί την πιο απλουστευμένη μορφή αυτής της διαδικασίας. Ωστόσο, χάρη στη μεγάλη αποτελεσματικότητά της, χρησιμοποιείται ευρέως και η διασταύρωση δύο σημείων, ενώ χρησιμοποιείται ακόμα και η ομοιόμορφη διασταύρωση.

6.8.7 Μετάλλαξη

Κατά τη διαδικασία της μετάλλαξης, οι τελεστές μετάλλαξης, επιλέγουν με τυχαίο τρόπο κάποια γονίδια από τα χρωμοσώματα των μελών του πληθυσμού και μεταβάλλουν την τιμή τους με κάποια τυχαία τιμή εντός του πεδίου αναζήτησης της συγκεκριμένης μεταβλητής απόφασης. Παρόλο που

όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η διαδικασία της διασταύρωσης αποτελεί το βασικό εργαλείο που διαφοροποιεί τους γενετικούς αλγορίθμους, η διαδικασία της μετάλλαξης είναι απαραίτητη γιατί εξασφαλίζει την ύπαρξης μιας μόνιμης κατάστασης σε κάποια θέση, και έτσι λειτουργεί υποστηρικτικά.

Σχήμα 6.4: Βήματα εκτέλεσης γενετικών αλγορίθμων



6.8.8 Αντικατάσταση

Μόλις παραχθούν οι απόγονοι πρέπει να καθοριστεί ποια από τα υπάρχοντα μέλη του πληθυσμού θα αντικατασταθούν. Η διαδικασία αντικατάστασης είναι παρόμοια με τη διαδικασία επιλογής, όπου λαμβάνεται η απόφαση για το ποια από τα υπάρχοντα μέλη επιλέγονται πρόκειται να αναπαραχθούν. Όπως και για την επιλογή έτσι και για την αντικατάσταση υπάρχουν πολλοί τρόποι με τους οποίους μπορεί να καθοριστεί η διαδικασία αντικατάστασης. Για παράδειγμα στην περίπτωση που το μέγεθος του δειγματοληπτικού χώρου είναι ίσο με το μέγεθος του πληθυσμού μπορεί να επιλέγεται η αντικατάσταση ενός ατόμου τυχαία ή να γίνεται αντικατάσταση του πιο αδύναμου, δηλαδή αυτού που έχει τη χαμηλότερη συνάρτηση καταλληλότητας. Σε έναν δειγματοληπτικό χώρο που είναι μεγαλύτερος από τον πληθυσμό μια στρατηγική που μπορεί να ακολουθηθεί είναι τόσο οι γονείς, όσο και οι απόγονοι να ανταγωνίζονται για την επιβίωση.

6.8.9 Πλεονεκτήματα γενετικών αλγορίθμων

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα τα οποία προκύπτουν από τη χρήση των γενετικών αλγορίθμων, είναι τα παρακάτω (Λυκοθανάσης, 2001):

1. Έχουν τη δυνατότητα να επιλύουν δύσκολα προβλήματα γρήγορα και αξιόπιστα. Μάλιστα, η αποδοτικότητα των γενετικών αλγορίθμων αποτελεί ένα βασικό λόγο για τη χρησιμοποίησή τους. Μπορούν να αντιμετωπίσουν την επίλυση προβλημάτων με πολλές, δύσκολα προσδιορισμένες λύσεις, ενώ ακόμη συναρτήσεις που παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις, δε δημιουργούν πρόβλημα στη χρήση των γενετικών αλγορίθμων, σε σύγκριση με άλλες μεθόδους.

2. Είναι εύκολα επεκτάσιμοι και εξελίξιμοι, καθώς οι γενετικοί αλγόριθμοι δεν αντιστέκονται σε αλλαγές, επεκτάσεις και μετεξελίξεις, ανάλογα με την κρίση του σχεδιαστή.

3. Για τη βελτιστοποίηση με γενετικούς αλγορίθμους απαιτείται μόνο η γνώση της αντικειμενικής συνάρτησης και όχι πρόσθετων πληροφοριών. Αυτό σημαίνει πως δεν απαιτούν περιορισμούς στις συναρτήσεις που επεξεργάζονται, σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους οι οποίες απαιτούν την ύπαρξη περιορισμών, με αποτέλεσμα να καθίστανται δύσκαμπτες και ακατάλληλες. Επίσης, οι γενετικοί αλγόριθμοι «επικοινωνούν» με το περιβάλλον τους μέσω της συνάρτησης καταλληλότητας, χωρίς να ενδιαφέρονται για τη σημασία της υπό εξέταση πληροφορίας, και με αυτό τον τρόπο εγγυάται η επιτυχία τους ανεξαρτήτως της σημασίας του προβλήματος, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει πως δεν υπάρχουν άλυτα προβλήματα για τους γενετικούς αλγορίθμους.

4. Έχουν τη δυνατότητα να συνεργάζονται εύκολα με τα ήδη υπάρχοντα μοντέλα και συστήματα. Αυτό συμβαίνει καθώς οι γενετικοί αλγόριθμοι δίνουν ένα σημαντικό πλεονέκτημα, να μπορούν να χρησιμοποιηθούν με πρόσθετο τρόπο στα μοντέλα που χρησιμοποιούνται σήμερα, χωρίς να απαιτούν τον επανασχεδιασμό τους. Επίσης, μπορούν να συνεργαστούν με τους υπάρχοντες κώδικες, καθώς χρησιμοποιούν μόνο πληροφορίες της διαδικασίας ή της συνάρτησης που θα βελτιστοποιήσουν, χωρίς να ενδιαφέρει άμεσα ο ρόλος της στο σύστημα ή όλη δομή του συστήματος.

5. Έχουν τη δυνατότητα να συμμετέχουν σε υβριδικές μορφές με άλλες μεθόδους. Παρόλο που οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν μεγάλη ισχύ, σε ορισμένες περιπτώσεις προβλημάτων, δίνεται η δυνατότητα χρησιμοποίησης ενός υβριδικού σχήματος γενετικού αλγορίθμου με διαφορετική μέθοδο, κάτι το οποίο συμβαίνει χάρη στην ευελιξία που προσφέρουν οι γενετικοί αλγόριθμοι.

6. Μπορούν να εφαρμοστούν σε πολύ περισσότερα πεδία από οποιαδήποτε άλλη μέθοδο. Το χαρακτηριστικό μάλιστα που τους δίνει αυτή τη δυνατότητα είναι η ελευθερία επιλογής των κριτηρίων που καθορίζουν την επιλογή μέσα στο τεχνικό περιβάλλον. Κατ' αυτόν τον τρόπο, οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πλήθος τομέων, όπως την οικονομία, το σχεδιασμό μηχανών ή ακόμα και την επίλυση μαθηματικών εξισώσεων.

7. Οι γενετικοί αλγόριθμοι αποτελούν τη μοναδική μέθοδο που εξερευνά το χώρο αναζήτησης και ταυτόχρονα εκμεταλλεύεται την ήδη επεξεργασμένη πληροφορία. Με το τυχαίο ψάξιμο γίνεται καλή εξερεύνηση του χώρου, αλλά δεν γίνεται εκμετάλλευση της πληροφορίας, ενώ με την αναζήτηση γίνεται καλή εκμετάλλευση της πληροφορίας, αλλά όχι καλή εξερεύνηση, δύο ανταγωνιστικά χαρακτηριστικά, τα οποία είναι επιθυμητό να συνυπάρχουν ταυτόχρονα. Οι γενετικοί αλγόριθμοι επιτυγχάνουν το βέλτιστο συνδυασμό εξερεύνησης και εκμετάλλευσης, κάτι το οποίο τους καθιστά αποδοτικούς και ελκυστικούς.

8. Έχουν από τη φύση τους το στοιχείο του παραλληλισμού. Ένας γενετικός αλγόριθμος, σε κάθε του βήμα επεξεργάζεται μεγάλες ποσότητες πληροφορίας, καθώς κάθε άτομο θεωρείται αντιπρόσωπος πολλών άλλων. Έχει υπολογιστεί ότι 10 άτομα αντιπροσωπεύουν περίπου 1000. Έτσι, μπορούν να καλύψουν μεγάλους χώρους σε μικρούς χρόνους.

9. Επιδέχονται παράλληλη υλοποίηση. Έχουν τη δυνατότητα να εκμεταλλευτούν τα πλεονεκτήματα των παράλληλων μηχανών, αφού εύκολα μπορούν να δεχτούν παράλληλη υλοποίηση. Το χαρακτηριστικό αυτό τους καθιστά ακόμη περισσότερο αποδοτικούς, ενώ σπανίως συναντάται στις παραδοσιακές μεθόδους.

6.8.10 Σύγκριση γενετικών αλγορίθμων και άλλων τεχνικών βελτιστοποίησης

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα έχει αναπτυχθεί μεγάλο πλήθος τεχνικών βελτιστοποίησης για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης. Τα κύρια στοιχεία που διαχωρίζουν τους γενετικούς αλγόριθμους από άλλες τεχνικές βελτιστοποίησης είναι:

1. Χρησιμοποιούν μια κωδικοποιημένη αναπαράσταση των μεταβλητών και όχι τις ίδιες τις μεταβλητές του προβλήματος.

2. Η αναζήτηση γίνεται από έναν πληθυσμό και όχι σε ένα μόνο σημείο.

3. Χρησιμοποιούν μόνο τις τιμές της συνάρτησης στόχου και δεν απαιτείται επιπρόσθετη πληροφορία, όπως οι παράγωγοί της.

4. Χρησιμοποιούν πιθανοθεωρητικούς και όχι ντετερμινιστικούς τελεστές, χωρίς όμως όλη η διαδικασία βασίζεται στην τύχη.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται ορισμένα μειονεκτήματα και περιορισμοί άλλων τεχνικών βελτιστοποίησης.

Πίνακας 6.9: Μειονεκτήματα τεχνικών βελτιστοποίησης

Μέθοδοι	**Μειονεκτήματα**
Μέθοδοι βασισμένοι στην κλίση	- Απαιτούν παραγωγίσιμη συνάρτηση στόχου - Παγίδευση σε τοπικά βέλτιστα
Απαρίθμηση	- Μη αποδοτική
Τυχαία αναζήτηση	- Μη αποδοτική
Προσομοιωμένη ανόπτηση	- Αναζήτηση με ένα άτομο - σημείο - Δεν χρησιμοποιεί τη γνώση προηγούμενων κινήσεων
Δυναμικός προγραμματισμός	- Απαιτεί ανεξαρτησία υποπροβλημάτων

Οι γενετικοί αλγόριθμοι λοιπόν, σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω πλεονεκτούν αισθητά στην επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης συγκριτικά με άλλες τεχνικές. Το πρόβλημα που διαμορφώνεται στην παρούσα εργασία είναι μη κυρτό και για το λόγο αυτό πολλές τεχνικές κρίνονται ακατάλληλες. Αντίθετα, τα αποτελέσματα που δίνουν οι γενετικοί αλγόριθμοι σε πολλές περιπτώσεις είναι καλύτερα από αυτά των παραδοσιακών μεθόδων, ενώ ακόμα παρατηρείται το γεγονός ότι οι τιμές της συνάρτησης στόχου παρουσιάζουν μικρή τυπική απόκλιση. Επιπρόσθετα, η ανάγκη για μίας λύσης σε αποδεκτό χρόνο, είναι ένας βασικός λόγος που επιλέχθηκε η χρήση τους. Όσο αυξάνεται το μέγεθος του προβλήματος, τόσο υπερτερεί η χρήση των γενετικών αλγορίθμων σε συγκριτικά με άλλες μεθόδους σε ό, τι αφορά στην εξοικονόμηση χρόνου.

7 Βελτιστοποίηση και Οδικά Έργα

Έχοντας γνωρίσει τις μεθόδους βελτιστοποίησης, στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια ανασκόπηση της εφαρμογής των μεθόδων στον οδικό σχεδιασμό. Συγκεκριμένα, γίνεται εκτενής περιγραφή των προτύπων βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων που έχουν αναπτυχθεί από διάφορους ερευνητές ανά τον κόσμο. Τα προβλήματα βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων χωρίζονται σε τέσσερις βασικές κατηγορίες. Οι δύο πρώτες κατηγορίες αφορούν ξεχωριστά το πρόβλημα βελτιστοποίησης της κατακόρυφης χάραξης και το αντίστοιχο πρόβλημα της οριζοντιογραφικής χάραξης. Οι άλλες δύο κατηγορίες αφορούν τη βελτιστοποίηση στις τρεις διαστάσεις, η οποία μπορεί είτε να γίνεται ταυτόχρονα ή σε στάδια.

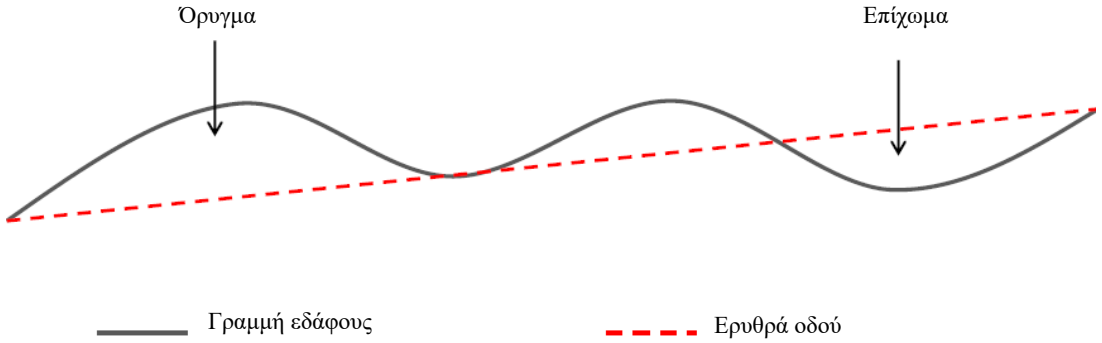
Σε κάθε κατηγορία προβλήματος βελτιστοποίησης της χάραξης περιγράφονται οι βασικές προσεγγίσεις που έχουν υιοθετηθεί για την επίλυση του προβλήματος ενώ δίνονται περισσότερες λεπτομέρειες για κάθε πρότυπο ξεχωριστά. Στο τέλος του κεφαλαίου γίνεται συγκριτική ανάλυση των προσεγγίσεων αυτών, ενώ αναγνωρίζονται τα κριτήρια αξιολόγησης ενός ικανοποιητικού προτύπου βελτιστοποίησης και σχολιάζεται η έλλειψη προόδου στην εφαρμογή προτύπων βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων. Σκόπιμη κρίνεται η έναρξη του κεφαλαίου με μια σύντομη αναφορά στα μαθηματικά πρότυπα που έχουν αναπτυχθεί και αφορούν τη βελτιστοποίηση χωματουργικών εργασιών των οδικών έργων ώστε να οριοθετηθεί με πιο σαφή τρόπο το πρόβλημα της βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων στη συνέχεια.

7.1 Βελτιστοποίηση χωματουργικών εργασιών οδών

Για την οριοθέτηση του προβλήματος της βελτιστοποίησης των χωματουργικών εργασιών θεωρείται δεδομένη τόσο η οριζοντιογραφική, όσο και η κατακόρυφη χάραξη. Κατά την κατασκευή μιας οδού τα χωματουργικά αποτελούν την κύρια εργασία, η οποία περιλαμβάνει την εκσκαφή, μεταφορά και επιχωμάτωση μεγάλων ποσοτήτων εδαφικών υλικών.

Η κίνηση γαιών και τα οδοστρώματα απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή από τους εργολήπτες, δεδομένου ότι αυτές οι δραστηριότητες αφορούν τη μεταφορά χιλιάδων τόνων υλικού αλλά και μεγάλο αριθμό βαρέως μηχανικού εξοπλισμού. Για τον λόγο αυτόν, είναι απαραίτητο η μεταφορά υλικών μεταξύ εκσκαφών, επιχωμάτων και λατομείων να γίνεται με στόχο την επίτευξη ελάχιστου κατασκευαστικού κόστους. Κατά συνέπεια, η βελτιστοποίηση των χωματουργικών εργασιών αποτελεί το πρόβλημα ελαχιστοποίησης του συνολικού κόστους εκσκαφής, επιχωμάτωσης και μεταφοράς για μια καθορισμένη χάραξη, η οποία δεν υπόκειται σε τροποποιήσεις. Οι περιοχές εκσκαφών και επιχωμάτων καθορίζονται από την τομή της γραμμής εδάφους με την ερυθρά της οδού κατά τη μηκοτομή, όπως παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.

Σχήμα 7.1: Όρυγμα και επίχωμα κατά τη μηκοτομή
(Πηγή: Mondal, 2014)



Η μέθοδος της χρησιμοποίησης του διαγράμματος μάζας είναι ο πιο διαδεδομένος για τη διανομή χωματισμών και καταμερισμού του εξοπλισμού. Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιείται ευρέως στον κατασκευαστικό κλάδο για τον προσδιορισμό των ποσοτήτων υλικού προς μεταφορά. Πρακτικά, η μέθοδος αποτελείται από μια γραφική αναπαράσταση του όγκου χωματισμών υποδεικνύοντας πώς να επιτευχθεί εξισορρόπηση μεταξύ τμημάτων εκσκαφών και επιχωμάτων. Το διάγραμμα μάζας δε μπορεί να εφαρμοστεί σε μη γραμμικά οδικά έργα, όπως σε μια αστική περιοχή, ή μεγάλες περιοχές χωματουργικών εργασιών. Αυτό το πρότυπο είναι επίσης ακατάλληλο για εργασίες οδοστρωσίας χρησιμοποιώντας μικτά είδη εδαφικών υλικών, τα οποία αναμιγνύονται είτε σε μονάδες παραγωγής, ή στο εργοτάξιο.

Με στόχο την αντιμετώπιση των μειονεκτημάτων του διαγράμματος μάζας, αναπτύχθηκαν πρότυπα γραμμικού προγραμματισμού. Η εφαρμογή γραμμικού προγραμματισμού για τη βελτιστοποίηση των χωματουργικών συζητήθηκε αρχικά από τους Stark & Nicholls (1972). Στη συνέχεια, οι Mayer & Stark (1981) ανέπτυξαν ένα πρότυπο, το οποίο ελαχιστοποιεί το κόστος κίνησης γαιών, ενώ ισορροπεί τις ποσότητες σε κάθε διατομή. Ένα παρόμοιο πρότυπο αναπτύχθηκε από τον Nandgaonkar (1981). Οι Oglesby & Hicks (1982) χρησιμοποίησαν έναν συνδυασμό μιας γραφικής μεθόδου, δηλαδή του διαγράμματος μάζας και γραμμικού προγραμματισμού. Το πρόβλημα προσεγγίστηκε έπειτα από τους Easa (1987)(1988b) (1989), Christian & Caldera (1988), Jayawardane & Price (1994a) (1994b), Son, Mattila, & Myers (2005), Moselhi & Alshibani (2009), Hare, Koch, & Lucet (2011) και de Lima, Nobre Júnior, de Athayde Prata, & Weissman (2013).

Οι Mayer & Stark (1981) χρησιμοποίησαν πρώτοι τον όρο των logistics χωματουργικών εργασιών. Αυτός αποτελεί εφαρμογή γενικότερα των logistics στην κίνηση γαιών και την οδοστρωσίας. Σε αυτήν την εργασία υπάρχει ισχυρή σύνδεση μεταξύ των ροών υλικών στον τομέα της βιομηχανίας και της κίνησης γαιών.

Σύμφωνα με τους Mayer & Stark (1981) το διάγραμμα μάζας δεν μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα για περιπτώσεις όπου:

1) Το κόστος μεταφοράς δεν είναι ανάλογο της απόστασης μεταφοράς

2) Τα χαρακτηριστικά του εδάφους μεταβάλλονται κατά μήκος της προτεινόμενης χάραξης

3) Πλεονάζουν ποσότητες υλικών και πρέπει να μεταφερθούν εκτός του οδικού τμήματος

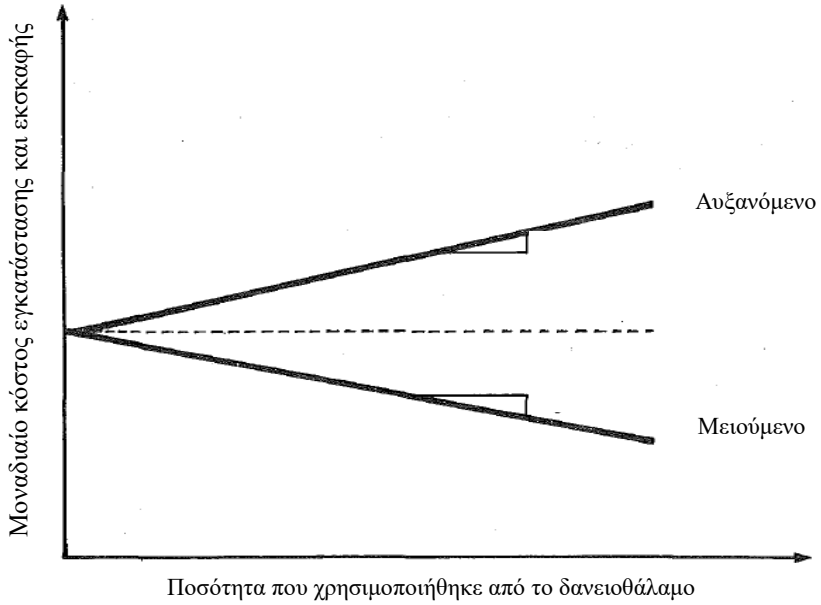
4) Τα μη χρήσιμα υλικά εκκαθάρισης πρέπει να απομακρυνθούν από τη χάραξη

Το πρότυπο των Mayer & Stark (1981) περιλαμβάνει λεπτομέρειες, όπως συντελεστές ασφάλειας των επιχωμάτων, κατανομή των υλικών αποθέσεων, υλικά διαφορετικών στρωμάτων και βαθμού συμπύκνωσης. Το πρότυπο αυτό ελαχιστοποιεί το κόστος κίνησης γαιών, χρησιμοποιώντας συνεχείς

μεταβλητές. Παρ' όλα αυτά οι συγγραφείς δεν έκαναν διάκριση μεταξύ της κίνησης γαιών και της οδοστρωσίας.

Ο Easa (1987) θεώρησε ότι η μονάδα κόστους των χωματουργικών εργασιών δεν είναι πάντα σταθερή, ενώ στη συνέχεια(1988b) παρουσίασε στη συνέχεια ένα πρότυπο τετραγωνικού προγραμματισμού για τη διανομή εκχωμάτων για γραμμικές μονάδες κόστους συμπληρώνοντας τις προηγούμενες προσεγγίσεις μαθηματικού προγραμματισμού. Το μη σταθερό αλλά γραμμικό μοναδιαίο κόστος εγκατάστασης και εκσκαφής από δανειοθάλαμο εκφράστηκε με τη σχέση του παρακάτω σχήματος. Σύμφωνα με τον συγγραφέα δεν εξασφαλίζεται ολικό βέλτιστο στην περίπτωση μειούμενο μοναδιαίου κόστους.

Σχήμα 7.2: Γραμμικό μοναδιαίο κόστος εγκατάστασης και εκσκαφής από δανειοθάλαμο (Πηγή: Easa, 1988b, Ιδία επεξεργασία)



Σε σχέση με το διάγραμμα μάζας το πρότυπο του Easa(1988b) δίνει τη δυνατότητα θεώρησης διαφορετικών συντελεστών επιπλήσματος ή διόγκωσης και συμπύκνωσης. Επίσης, μπορεί να ληφθεί υπ' όψιν η εγκατάσταση δανειοθαλάμων και χώρων απόθεσης με τα κόστη εγκατάστασης και λειτουργίας τους. Αν και είχε θεωρηθεί σταθερό μοναδιαίο κόστος κίνησης γαιών δινόταν η δυνατότητα εισαγωγής στο πρότυπο περιπτώσεων όπου το κόστος μεταφοράς δεν ήταν ανάλογο της απόστασης μεταφοράς. Δεν μπορεί να γίνει εφαρμογή του προτύπου σε περιπτώσεις που απαιτείται ανάμιξη των υλικών εκσκαφών της οδού και δανειοθαλάμων καθώς και σε περιπτώσεις εκσκαφής ακατάλληλων υλικών από τους δανειοθαλάμους.

Οι Christian & Caldera (1988) παρουσίασαν ένα πρότυπο για τη βελτιστοποίηση των εργασιών κίνησης γαιών που βασίζεται σε ένα τυπικό πρόβλημα μεταφοράς. Οι συγγραφείς έλαβαν υπ' όψιν αποθέσεις σε τμήματα εκσκαφών και επιχωμάτων στην περίπτωση διαφορών μεταξύ των ποσοτήτων εκσκαφών και επιχωμάτων. Επίσης, συμπεριλήφθηκε υψηλό μοναδιαίο κόστος αν η μεταφορά εκχωμάτων είναι αδύνατη μεταξύ δύο σημείων. Ο Easa (1989) συμπεριέλαβε ορισμένες διορθώσεις στο πρότυπο των Christian & Caldera.

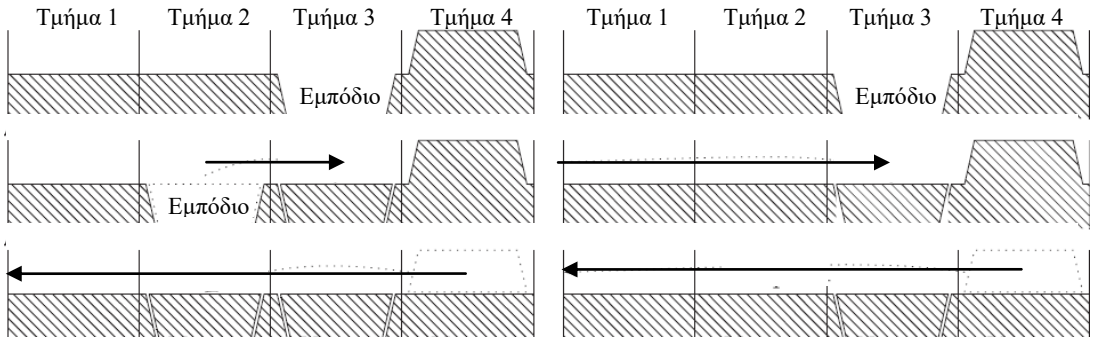
Χρησιμοποιώντας ένα αρκετά περίπλοκο πρότυπο, οι Jayawardane & Price (1994a) (1994b) εισήγαγαν τη δυνατότητα να λαμβάνεται υπ' όψιν η απόδοση του εξοπλισμού και η διάρκεια των εργασιών. Βέβαια, στο πρότυπο αυτό δεν καλύφθηκαν άλλα θέματα όπως η χρήση ασφαλτικών μιγμάτων και υλικών οδοστρωσίας και η κατανομή συγκροτημάτων ανάμιξης.

Οι Son, Mattila, & Myers (2005) παρουσίασαν ένα πρότυπο γραμμικού προγραμματισμού για τον καθορισμό της ποσότητας εκχωμάτων προς μεταφορά, τις ελάχιστες αποστάσεις μεταφοράς και τις τοποθεσίες δανειοθαλάμων και χώρων απόθεσης που θα χρησιμοποιούνταν για τη μεταφορά εκχωμάτων.

Οι Moselhi & Alshibani (2009) προσέγγισαν το θέμα της βελτιστοποίησης των χωματουργικών εργασιών συμπεριλαμβάνοντας διάφορους παράγοντες, όπως τους διαθέσιμους πόρους των εργοληπτών, περιορισμούς χρόνου και προϋπολογισμού, χαρακτηριστικά του έργου και του εδάφους, έμμεσα κόστη και τεχνικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού. Η προτεινόμενη προσέγγιση χρησιμοποιεί γενετικούς αλγορίθμους, γραμμικό προγραμματισμό και ένα σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών για την υποστήριξη της διαδικασίας λήψης αποφάσεων.

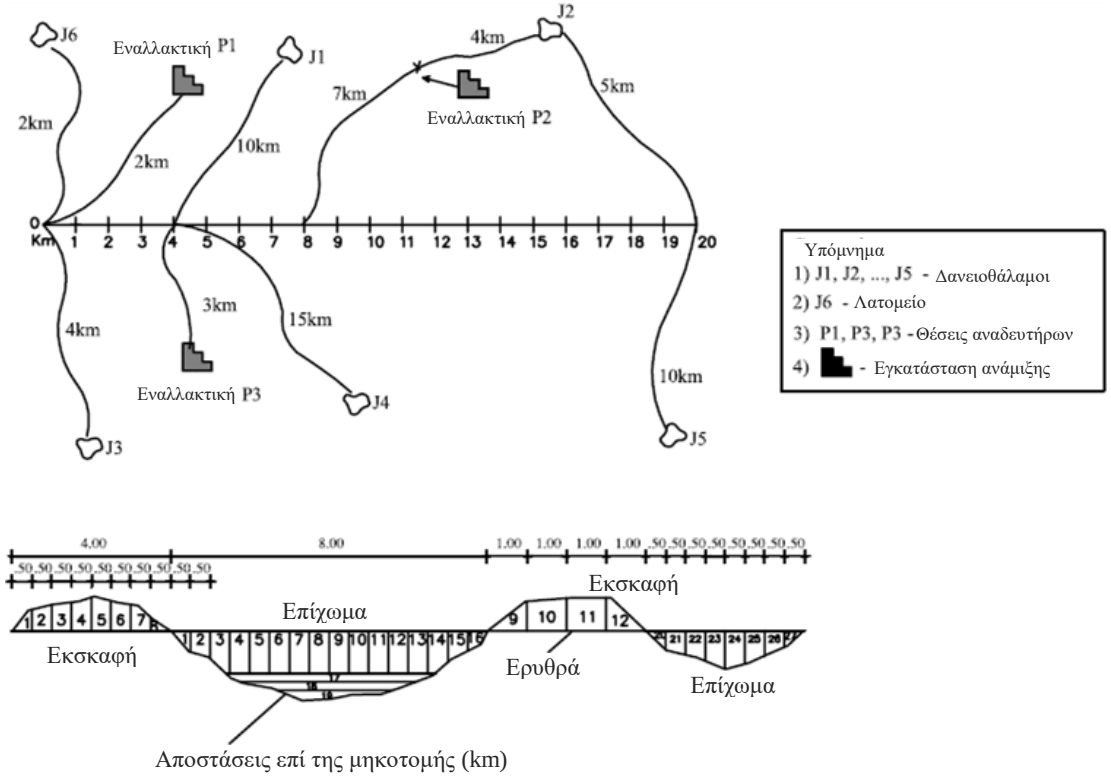
Οι Hare, Koch, & Lucet (2011) πρότειναν ένα πρότυπο μικτού ακέραιου προγραμματισμού για την βελτιστοποίηση των χωματουργικών εισάγοντας περιοχές φυσικών εμποδίων (blocks). Τα εμπόδια αυτά αφορούν για παράδειγμα υδατορρεύματα συστάδες δένδρων, όρη, λόφους ή άλλα τοπογραφικά χαρακτηριστικά που πρέπει να αντιμετωπιστούν πριν τη μεταφορά υλικών πάνω από αυτήν την περιοχή. Η συμπερίληψη αυτών των φυσικών εμποδίων καθιστά το πρότυπο αρκετά πιο δύσκολο ως προς την επίλυση και για το λόγο αυτό αναπτύσσονται επίσης στρατηγικές μείωσης του χρόνου υπολογισμού. Στο πρόβλημα λήφθηκαν υπ' όψιν περιορισμοί ώστε να αποφεύγονται μη ρεαλιστικές περιπτώσεις όπου υπάρχοντα εμπόδια καλύπτονται με χωματισμούς από άλλα τμήματα της οδού δημιουργώντας νέα εμπόδια όπως στο επόμενο σχήμα.. Στην αριστερή πλευρά παρουσιάζεται η μηκοτομή μιας οδού με εμπόδιο, το οποίο αντιμετωπίζεται με λανθασμένο τρόπο δημιουργώντας νέο εμπόδιο σε άλλο τμήμα της οδού, ενώ στη δεξιά πλευρά το εμπόδιο αντιμετωπίζεται ορθά με μεταφορά εκχωμάτων από δανειοθάλαμο. Για την επίλυση χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό επίλυσης μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού MILP του Gurobi® Optimizer 3.0.1.

Σχήμα 7.3: Μηκοτομή οδού με εμπόδιο
(Πηγή: Hare, Koch, & Lucet, 2011, Ιδία επεξεργασία)



Οι de Lima, Nobre Júnior, de Athayde Prata, & Weissman (2013) εισήγαγαν ορισμένες καινοτομίες. Αρχικά, όσον αφορά την κίνηση γαιών και την οδοστρωσία, το πρότυπό τους έδινε τη δυνατότητα τη διανομή των υλικών σε στρώσεις όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Επίσης, το πρότυπο παρείχε τη δυνατότητα αξιολόγησης και επιλογής της θέσης των εγκαταστάσεων ανάμιξης υλικών με κριτήριο τόσο τις αποστάσεις, όσο και της απαιτούμενης σύνθεσης υλικών για την κατασκευή των στρωμάτων βάσης και υποβάσης. Τέλος, με βάση την σύνθεση των υλικών το πρότυπο καθορίζει τη βέλτιστη διανομή υλικών από δανειοθαλάμους και λατομεία ενώ υπάρχει και η πιθανότητα ανάδευσης παρά την οδό εκτός των καθορισμένων εγκαταστάσεων. Η επίλυση του προβλήματος μικτού ακέραιου προγραμματισμού γίνεται με το λογισμικό LINGO™ 6.0.

Σχήμα 7.4: Αποστάσεις δανειοθαλάμων και εγκαταστάσεων ανάμιξης από σημεία πύκνωσης (Πηγή: de Lima, Nobre Júnior, de Athayde Prata, & Weissman, 2013)

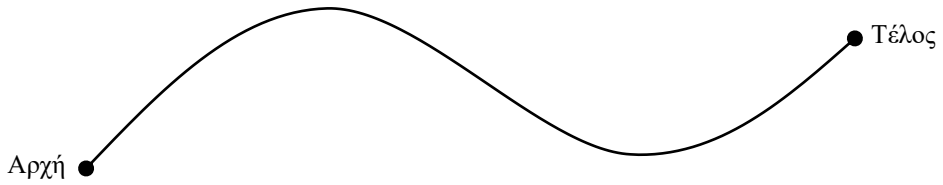


7.2 Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων

Στη συμβατική μέθοδο οδικού σχεδιασμού που ακολουθείται η εύρεση μια ικανοποιητικής χάραξης γίνεται μέσω μιας περίπλοκης επαναληπτικής διαδικασίας. Περιλαμβάνει μια σειρά βημάτων, ξεκινώντας από τη μελέτη σκοπιμότητας που ακολουθείται από την προκαταρκτική μελέτη και την επιλογή των οδικών διαδρόμων και τελικά τη μελέτη της χάραξης που εστιάζεται στις λεπτομέρειες της που αφορούν την ελαχιστοποίηση των χωματουργικών εργασιών και τους περιορισμούς της οριζοντιογραφίας και της μηκοτομής. Προσεγγίζοντας τη διαδικασία αυτή με μεθόδους βελτιστοποίησης ορίζεται το πρόβλημα ως εξής:

Ορισμός 7.1 *Η βελτιστοποίηση οδικών χαράξεων αφορά το πρόβλημα της εύρεσης μια καμπύλης, που να συνδέει δύο σημεία, ελαχιστοποιώντας το κόστος και ικανοποιώντας περιορισμούς του οδικού σχεδιασμού.*

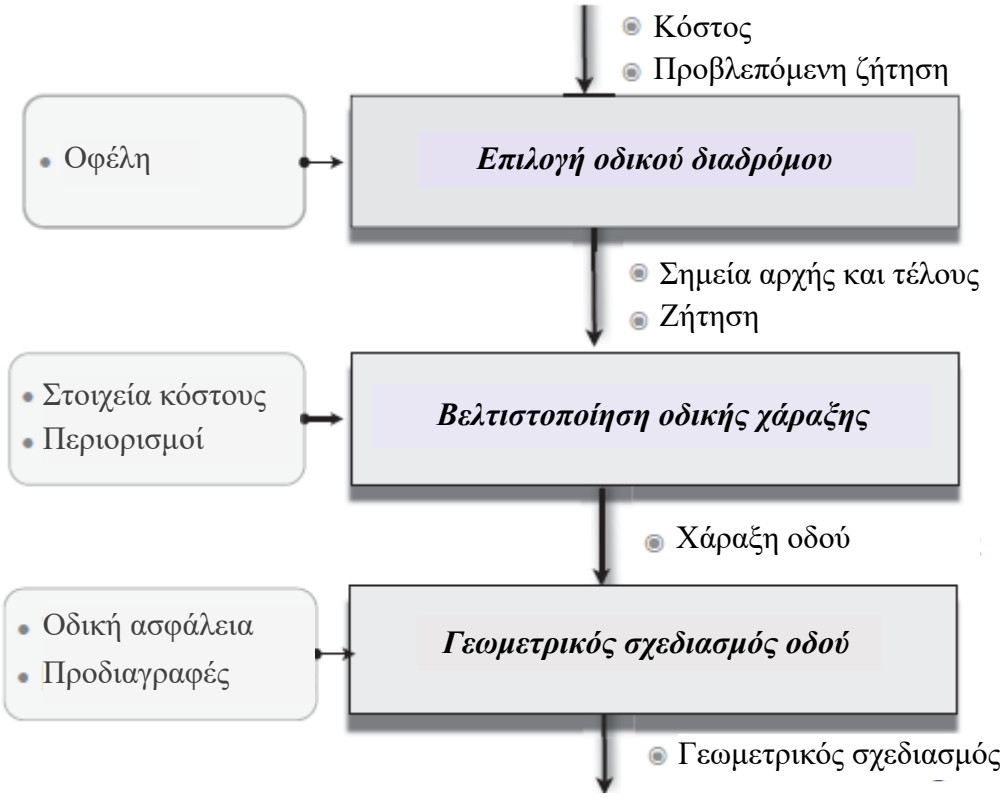
Σχήμα 7.5: Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων



Η εύρεση της βέλτιστης χάραξης μεταξύ δύο σημείων αποτελεί αρκετά δύσκολο πρόβλημα, λόγω της πολύπλοκης δομής των στοιχείων κόστους που σχετίζονται με αυτήν αλλά και των περιορισμών. Επίσης, ο συνεχής χώρος αναζήτησης της λύσης του προβλήματος οδηγεί σε άπειρο αριθμό

εναλλακτικών λύσεων του προβλήματος. Αφού, η επιφάνεια του εδάφους έχει ακανόνιστο σχήμα, οποιαδήποτε μικρή αλλαγή στην χάραξη μπορεί να προκαλέσει σημαντική μεταβολή του συνολικού κόστους. Για τους παραπάνω λόγους συνήθως η προσέγγιση της χάραξης γίνεται εντός ενός προκαθορισμένου οδικού διαδρόμου, η θέση του οποίου έχει αποτελέσει επίσης αντικείμενο βελτιστοποίησης. Η θέση της βελτιστοποίησης της οδικής χάραξης στον οδικό σχεδιασμό βρίσκεται σύμφωνα με τους Angulo, Castillo, García-Ródenas, & Sánchez-Vizcaíno, (2012) μεταξύ των διαδικασιών επιλογής του οδικού διαδρόμου και του τελικού γεωμετρικού σχεδιασμού της οδού

Σχήμα 7.6: Η θέση της βελτιστοποίησης χάραξης στον οδικό σχεδιασμό (Πηγή: Angulo, Castillo, García-Ródenas, & Sánchez-Vizcaíno, 2012)



Βέβαια, όπως θα δούμε τα περισσότερα μαθηματικά πρότυπα βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων που έχουν αναπτυχθεί απευθύνονται περισσότερο στα πρώτα στάδια του οδικού σχεδιασμού με προσανατολισμό στην υποβοήθηση της λήψης αποφάσεων στο στάδιο της προκαταρκτικής μελέτης. Στην παρούσα εργασία γίνεται μια πιο λεπτομερής προσέγγιση, ώστε το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης της χάραξης να έρθει πιο κοντά σε αυτό του τελικού γεωμετρικού σχεδιασμού της οδού σχεδιασμού και απευθύνεται κυρίως στο στάδιο της προμελέτης μιας οδού. Για τον λόγο αυτόν έχει γίνει εκτενής έρευνα των προδιαγραφών του γεωμετρικού σχεδιασμού ώστε να αντληθούν χρήσιμοι περιορισμοί.

Με βάση την έρευνα γύρω από το πρόβλημα της βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων, έχουν αναπτυχθεί διάφορα πρότυπα τα οποία χωρίζονται σε τέσσερις βασικές κατηγορίες. Αυτές οι κατηγορίες αφορούν τη βελτιστοποίηση της κατακόρυφης χάραξης, τη βελτιστοποίηση της οριζοντιογραφικής χάραξης, την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση της χάραξης στις τρεις διαστάσεις και τέλος τη βελτιστοποίηση σε οριζοντιογραφία και μηκοτομή κατά στάδια. Στις επόμενες ενότητες περιγράφονται οι προσεγγίσεις και τα χαρακτηριστικά των προτύπων που ανήκουν σε κάθε κατηγορία.

7.3 Βελτιστοποίηση κατακόρυφης χάραξης

Η πλειοψηφία των ερευνών που έχουν γίνει στο αντικείμενο της βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων έχει εστιάσει στη μελέτη της κατακόρυφης χάραξης. Ο κύριος λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι η χάραξη κατά τη μηκοτομή επηρεάζει μόνο έναν ορισμένο αριθμό κατηγοριών κόστους, όπως για παράδειγμα τα χωματουργικά κόστη, ενώ άλλα στοιχεία κόστους μπορούν να αγνοηθούν κατά τη βελτιστοποίηση. Τα προγράμματα βελτιστοποίησης κατακόρυφης χάραξης ήταν πρώτα που έκαναν την εμφάνισή τους και σε ορισμένες περιπτώσεις αποτελούν υποπρογράμματα συστημάτων βελτιστοποίησης της οριζοντιογραφίας της οδού. Στα πρότυπα αυτά η οριζοντιογραφική χάραξη θεωρείται δεδομένη, καθώς ως γνωστόν η μηκοτομή αποτελεί ανάπτυγμα με οδηγό καμπύλη τον άξονα της οδού. Κάποια πρότυπα βελτιστοποίησης της κατακόρυφης χάραξης αντιμετωπίζουν ταυτόχρονα το πρόβλημα της κίνησης γαιών, ενώ άλλα όχι. Στην υπάρχουσα βιβλιογραφία συναντώνται αρκετές προσεγγίσεις στη βελτιστοποίηση της κατακόρυφης χάραξης.

Πίνακας 7.1: Έρευνα στη βελτιστοποίηση κατακόρυφων χαράξεων

Προσέγγιση	**Βιβλιογραφικές Αναφορές**
Αριθμητική αναζήτηση	Calogero (1968), Hayman (1970), Robinson (1972a)(1972b) (1973) (1976), Davies (1972), Pearman (1973), Goh, Chew, & Fwa (1988)
Πλήρης απαρίθμηση	Easa (1988a)
Δυναμικός προγραμματισμός	Antoniotti (1969), Schacke (1972), Puy Huarte (1973), Murchland (1973), Goh, Chew, & Fwa (1988), Fwa (1989) Göktepe, Lav, & Altun (2005), Göktepe, Altun, & Ahmedzade (2009)
Γραμμικός προγραμματισμός	ReVelle, Whitlatch, & Wright (1997), Moreb (1996) (2009), Moreb & Aljohani (2002) (2004), Aljohani & Moreb (2003), Koch & Lucet (2010)
Μικτός ακέραιος προγραμματισμός	Trypia (1979), Rahman (2012), Hossain (2013), Hare, Hossain, Lucet, & Rahman (2014), οι Hare, Lucet, & Rahman (2015)
Τοπική ευρετική αναζήτηση με ακέραιο προγραμματισμό	Lee & Cheng (2001b)
Γενετικοί αλγόριθμοι	Fwa, Chan, & Sim (2002), Aruga, Sessions, & Akay (2005), Göktepe, Lav, & Altun (2009), Göktepe & Karasahin (2011)
Προσομοιωμένη ανόπτηση	Akay (2003)

7.3.1 Αριθμητική αναζήτηση για τη μηκοτομή

Τα πρότυπα που χρησιμοποιούν αριθμητική αναζήτηση για τη βελτιστοποίηση της κατακόρυφης χάραξης ξεπερνούν ορισμένες ελλείψεις άλλων προσεγγίσεων, όπως η απαρίθμηση και ο δυναμικός προγραμματισμός, που περιγράφονται παρακάτω, καθώς το πεδίο αναζήτησης αποτελεί συνεχές και όχι διακριτό σύνολο. Κατά συνέπεια, παρέχεται μεγαλύτερη ευελιξία στη διαμόρφωση της χάραξης. Βέβαια, η δυσκολία επίλυσης αυξάνεται καθώς τα προβλήματα που διαμορφώνονται είναι μη γραμμικά, ή και ενδεχομένως μη κυρτά.

7.3.1.1 Το πρότυπο του Calogero

Το πρώτο πρόγραμμα βελτιστοποίησης της κατακόρυφης χάραξης που εντοπίζεται, αναπτύχθηκε στο UCL από τον Calogero (1968), ο οποίος χρησιμοποίησε έναν αλγόριθμο τετραγωνικού προγραμματισμού, παράλληλα με έναν τυπικό αλγόριθμο διανομής χωματισμών για τα χωματουργικά κόστη. Το σύστημα απαιτεί τον ορισμό σημείων πύκνωσης σε συχνά διαστήματα κατά μήκος της μηκοτομής του εδάφους, στις οποίες η χιλιομετρική θέση και το υψόμετρο του εδάφους είναι γνωστά. Τα ίδια σημεία χρησιμοποιούνται για να προσδιορίσουν τις λεπτομέρειες της βέλτιστης χάραξης. Σε

κάθε σημείο το εμβαδό των χωματισμών της διατομής εκφράζεται με μια τετραγωνική συνάρτηση. Το κόστος χρηστών εκφράζεται με μια τετραγωνική συνάρτηση της κατά μήκος κλίσης, ενώ τα τεχνικά έργα προσεγγίζονται με μια τετραγωνική συνάρτηση του ύψους εκσκαφής ή επιχωμάτωσης. Περιορισμοί μπορούν να εφαρμοστούν σε μορφή μέγιστης καμπυλότητας, κυρτή και κοίλη, μέγιστη κατά μήκος κλίση, σημεία υποχρεωτικής διέλευσης ή σημεία με περιορισμό μέγιστου ή ελάχιστου υψομέτρου. Το μέσο κόστος χωματουργικών ανά κυβικό μέτρο θεωρείται για την πρώτη εκτέλεση μέσω ενός αλγορίθμου τετραγωνικού προγραμματισμού. Οι όγκοι εκσκαφών και επιχωματώσεων σε κάθε χιλιομετρική θέση εισάγονται στη συνέχεια σε έναν αλγόριθμο μεταφοράς που παρέχει λεπτομέρειες για τη βέλτιστη στρατηγική μεταφοράς και βελτιωμένες εκτιμήσεις της μονάδας χωματουργικού κόστους σε σχέση με κάθε χιλιομετρική θέση. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου επιτευχθεί σύγκλιση.

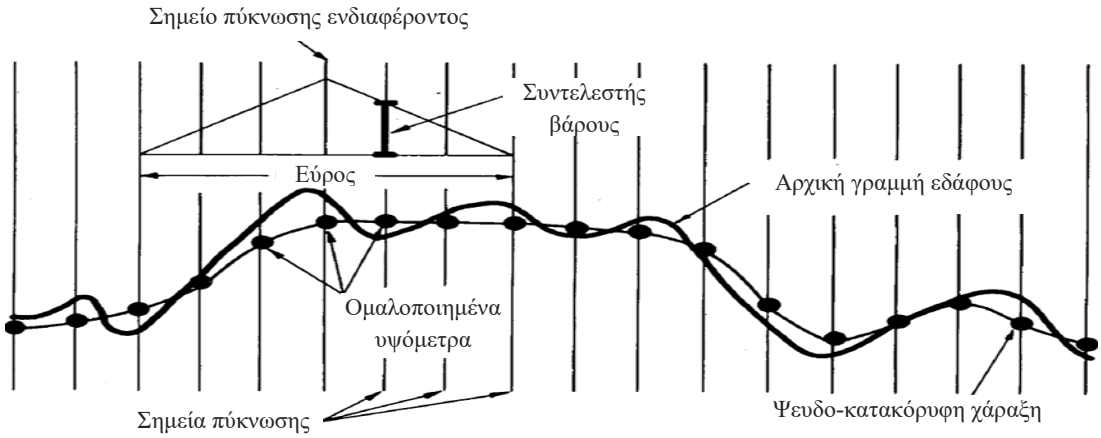
7.3.1.2 Το πρότυπο του Hayman

Ο Hayman (1970) πρότεινε ένα πρότυπο, του οποίου οι μεταβλητές απόφασης ήταν συνεχείς και αφορούσαν τα υψόμετρα σε κάθε σημείο πύκνωσης. Η χάραξη προέκυπτε ενώνοντας αυτά τα σημεία με ευθύγραμμα τμήματα. Η μέθοδος αναζήτησης που χρησιμοποίησε στην έρευνά του μπορεί να χαρακτηριστεί ως γραμμική. Αρχικά, ορίζεται μια τυχαία επίλυση. Έπειτα, ένα νέο σημείο δημιουργείται μετακινώντας το αρχικό προς την κατεύθυνση της κλίσης με μέγεθος βήματος το οποίο βελτιστοποιείται επίσης. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου όλα τα μεγέθη βήματος να είναι μηδενικά. Στη συνέχεια η υπολογιστική σειρά αλλάζει λύνοντας ένα βοηθητικό πρόβλημα που αναζητεί μια εφικτή κατεύθυνση και ονομάζεται μέθοδος επιτρεπόμενων διευθύνσεων. Ο αλγόριθμος καταλήγει σε μια λύση ελαφρώς καλύτερη από την προηγούμενη, ενώ είναι φανερό πως η προσέγγιση αυτή δεν εγγυάται το ολικό βέλτιστο. Πρακτικά, χρησιμοποιούνται αρκετές αρχικές λύσεις ώστε να αυξηθεί η πιθανότητα να βρεθεί μια σχετικά ικανοποιητική λύση.

7.3.1.3 Το πρόγραμμα VENUS

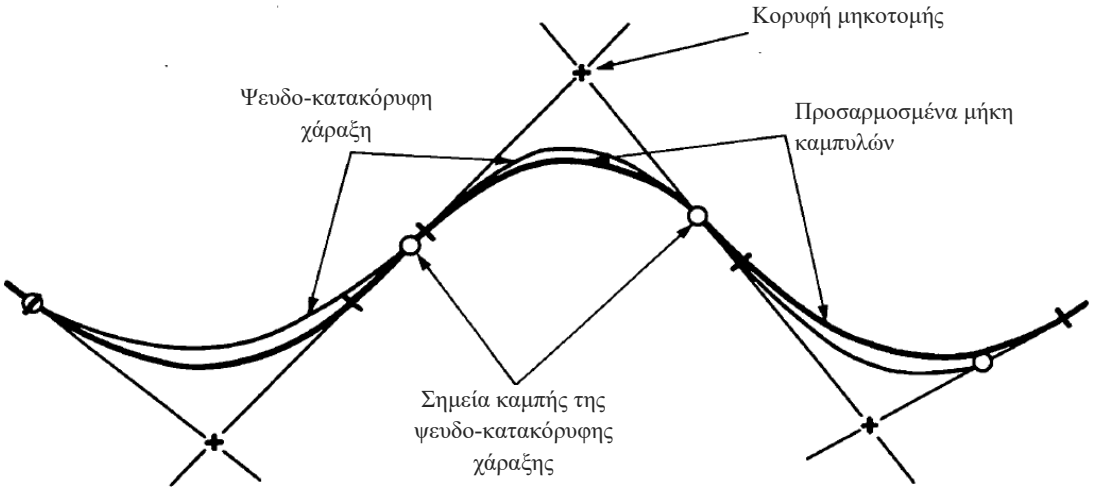
Ο Robinson (1973) παρουσίασε το πρόγραμμα VENUS, το οποίο παράγει αυτόματα μια επαρκή αρχική λύση της κατακόρυφης χάραξης, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω έρευνα. Ο αλγόριθμος αρχικοποιείται με μια προσεγγιστική χάραξη που προκύπτει από την ομαλοποίηση της γραμμής εδάφους σε κάθε στάση λαμβάνοντας υπ' όψιν τα υψόμετρα εδάφους των εντός ενός καθορισμένου εύρους εκατέρωθεν σημείων πύκνωσης της αρχικής γραμμής εδάφους. Για την ομαλοποίηση λαμβάνεται ένας συντελεστής βάρους αντιστρόφως ανάλογος με την απόστασή κάθε σημείου από το σημείο ενδιαφέροντος όπως στο φαίνεται επόμενο σχήμα. Η ομαλοποιημένη γραμμή εδάφους που προκύπτει ονομάζεται ψευδο-κατακόρυφη χάραξη. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η διαδικασία ομαλοποίησης της γραμμής εδάφους.

Σχήμα 7.7: Διαδικασία ομαλοποίησης γραμμής εδάφους
(Πηγή: Robinson, 1972a, Ιδία επεξεργασία)



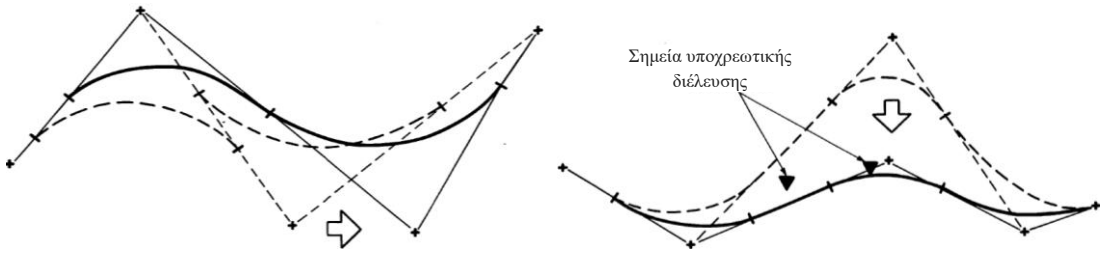
Η ψευδο-κατακόρυφη χάραξη στη συνέχεια τροποποιείται ώστε να περνά από σημεία υποχρεωτικής διέλευσης μέσω μια συνάρτησης προσαρμογής. Εφαπτόμενα τμήματα που συνδέονται με παραβολικές καμπύλες προσαρμόζονται στα σημεία καμπής με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, ώστε να παραχθεί μια αρχική λύση. Η χάραξη αυτή ονομάζεται προκαταρκτική και απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.

Σχήμα 7.8: Διαμόρφωση προκαταρκτικής χάραξης
(Πηγή: Robinson, 1972a, Ιδία επεξεργασία)



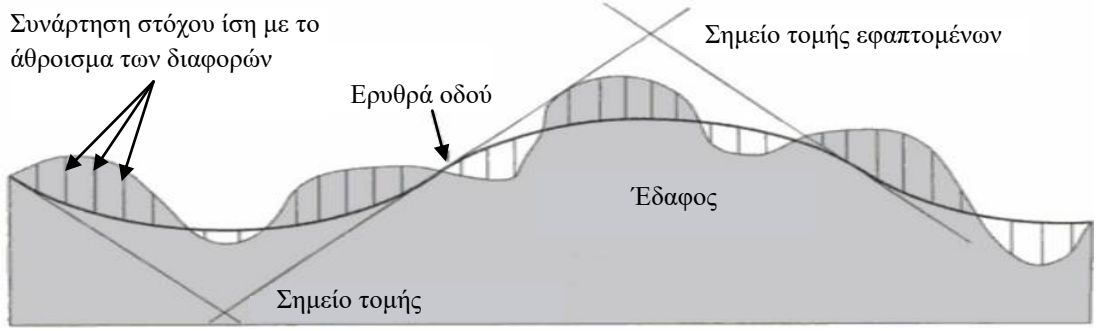
Η προκαταρκτική χάραξη στη συνέχεια τροποποιείται αλλάζοντας τις χιλιομετρικές θέσεις των σημείων τομής των εφαπτομένων καθώς και τα μήκη των καμπυλών, ώστε να εξασφαλίζονται όλοι οι γεωμετρικοί περιορισμοί. Οι περιορισμοί αντιμετωπίζονται κατά σειρά για κάθε καμπύλη και αφορούν την εξασφάλιση της συνέχειας της χάραξης μέσω της απαλοιφής των επικαλύψεων των καμπυλών και την εξασφάλιση του ελάχιστου μήκους κάθε καμπύλης. Στη συνέχεια διατηρώντας σταθερές τις χιλιομετρικές θέσεις και τα μήκη των καμπυλών, τροποποιούνται τα υψόμετρα των σημείων τομής ώστε να εξασφαλιστούν οι περιορισμοί μέγιστης κλίσης, σημείων υποχρεωτικής διέλευσης και ελάχιστης ακτίνας καμπυλότητας. Το αποτέλεσμα που προκύπτει καλείται εφικτή κατακόρυφη χάραξη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αρχική λύση σε οποιονδήποτε αλγόριθμο αναζήτησης. Ορισμένες από τις διορθώσεις απεικονίζονται σχηματικά παρακάτω.

Σχήμα 7.9: Διόρθωση συνέχειας και σημείων υποχρεωτικής διέλευσης
(Πηγή: Robinson, 1976)



Στο τελικό στάδιο, οι παράμετροι κάθε καμπύλης τροποποιούνται ώστε να ελαχιστοποιηθεί η συνάρτηση στόχου που αποτελείται από τις συνολικές διαφορές μεταξύ της γραμμής εδάφους και του επιπέδου της οδού σε κάθε σημείο πύκνωσης όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Αυτή η διαδικασία ελαχιστοποιεί τη συνολική επιφάνεια εκχωμάτων επί της μηκοτομής. Είναι ένα απλό και αποτελεσματικό εργαλείο ελαχιστοποίησης των χωματισμών. Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται η μηκοτομή μιας οδού όπου απεικονίζονται οι διαφορές υψομέτρων μεταξύ κατακόρυφης χάραξης και γραμμής εδάφους. Το συνολικό άθροισμα αυτών των διαφορών αποτελεί τη συνάρτηση στόχου του προγράμματος.

Σχήμα 7.10: Αποστάσεις της ερυθράς της οδού από τη γραμμή εδάφους στα σημεία πύκνωσης (Πηγή: Gallagher, 2002, Ιδία επεξεργασία)

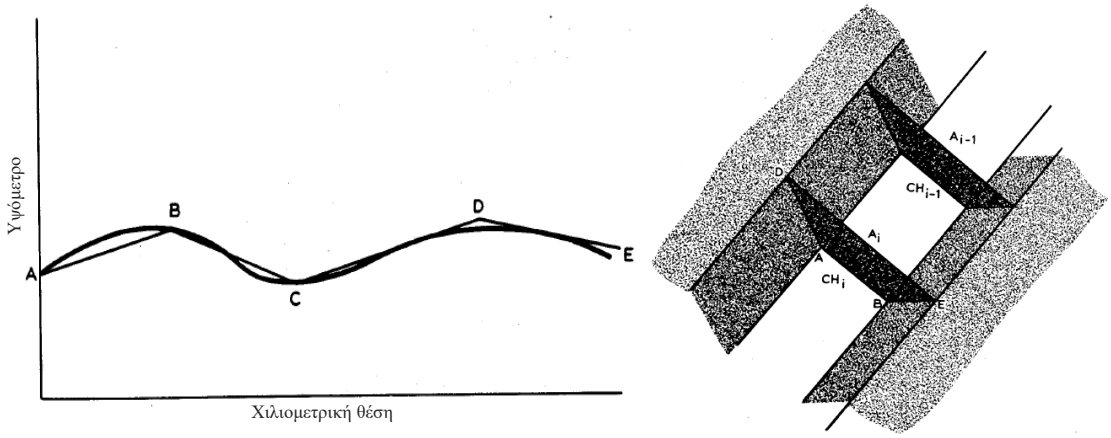


Το πρόγραμμα VENUS μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτοτελώς χωρίς να υπάρχει πρόθεση να χρησιμοποιηθεί άλλο πρόγραμμα του συστήματος βελτιστοποίησης HOPS. Δεν στοχεύει να βελτιστοποιήσει την κατακόρυφη χάραξη με ακρίβεια αλλά παράγει αποτελέσματα που προσεγγίζουν αυτά που μπορούν να επιτευχθούν με το MINERVA με ελάχιστο κόστος και προσπάθεια όσον αφορά τη συλλογή δεδομένων. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με το VENUS δίνονται στις σχετικές εκθέσεις του TRRL από τον Robinson (1972a)(1972b)(1976).

7.3.1.4 Το πρόγραμμα MINERVA

Το πρόγραμμα MINERVA, το οποίο περιγράφει αναλυτικά ο Davies (1972), ήταν το κύριο πρόγραμμα βελτιστοποίησης της κατακόρυφης χάραξης του συστήματος HOPS. Σε αυτό εισάγεται η κατακόρυφη χάραξη που παράγεται από το VENUS και πιθανώς τροποποιείται από το JANUS. Οι μεταβλητές απόφασης που ορίζονται στο πρόγραμμα MINERVA είναι οι συντεταγμένες κάθε σημείου τομής πάνω στην κατακόρυφη επιφάνεια επί της οριζοντιογραφίας καθώς και το μήκος της κατακόρυφης καμπύλης για κάθε σημείο. Η τεχνική βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται είναι μια μονοπαραγοντική άμεση τοπική αναζήτηση αναρρίχησης λόφων, η οποία ξεκινώντας από μια αρχική εφικτή λύση, αλλάζει την τιμή μιας μόνο μεταβλητής απόφασης κάθε φορά έως ότου η συνάρτηση στόχου να μην παρουσιάζει καμία βελτίωση. Ο αλγόριθμος εξετάζει κατά μήκος τη διαδρομή την αύξηση ή μείωση της τιμής κάθε μεταβλητής, επιδιώκοντας να μειώσει το συνολικό κόστος χωματουργικών και κατασκευών. Μετά από κάθε επανάληψη, η χάραξη επιδιορθώνεται ώστε να εξασφαλιστεί συμμόρφωση με τους περιορισμούς και τα προσκείμενα τμήματα να συνδέονται ομαλά.

Σχήμα 7.11: Προσαρμογή κατακόρυφων καμπυλών και διατομές οδού σε εκσκαφή (Πηγή: Davies, 1972, Ιδία επεξεργασία)



Αντίθετα με άλλα πρότυπα, στα οποία η χάραξη αναπαριστάται είτε με ευθύγραμμα τμήματα, είτε με πολυώνυμα, ή με συναρτήσεις spline, το πρόγραμμα MINERVA έχει σχεδιαστεί, έτσι ώστε να

καταλήγει σε μια λύση που μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα. Δηλαδή, η χάραξη που προκύπτει από το πρόγραμμα αποτελείται από ευθύγραμμα τμήματα μεταξύ των οποίων παρεμβάλλονται παραβολικές καμπύλες. Κατά συνέπεια, λόγω της προσπάθειας που γίνεται ώστε να προκύπτει μια ρεαλιστική χάραξη, είναι ευνόητο ότι η συνάρτηση στόχου και οι περιορισμοί που διαμορφώνονται είναι αρκετά περίπλοκοι και το πρόβλημα γίνεται δισεπίλυτο.

Προφανώς, η τελική λύση αποτελεί τοπικό και όχι ολικό βέλτιστο ενώ ο αλγόριθμος δεν είναι αρκετά αποδοτικός. Ένα άλλο χαρακτηριστικό αυτής της προσέγγισης είναι ότι η λύση που προκύπτει μπορεί να ακολουθεί ένα συγκεκριμένο πρότυπο, εξαρτώμενο από τον βαθμό κάθε μεταβλητής που άλλαξε. Προκειμένου να ξεπεραστεί το πρόβλημα των πολλαπλών τοπικών μεγίστων, το πρόγραμμα εκτελείται αρκετές φορές με διαφορετικές αρχικές λύσεις και τελικά επιλέγεται η επίλυση με τη χαμηλότερη τιμή της συνάρτησης στόχου.

7.3.1.5 Το συνεχές πρότυπο των Goh, Chew & Fwa

Στην εργασία των Goh, Chew & Fwa (1988) παρουσιάστηκε ένα διακριτό και ένα συνεχές πρότυπο για την βελτιστοποίηση της κατακόρυφης χάραξης. Το διακριτό πρότυπο περιγράφεται στην επόμενη ενότητα. Το συνεχές πρότυπο αρχικά διατυπώθηκε σαν πρόβλημα λογισμού των μεταβολών. Επειδή όμως είναι αρκετά δύσκολο να επιλυθούν οι απαραίτητες συνθήκες, δηλαδή οι εξισώσεις Euler - Lagrange, το αρχικό πρότυπο μετατρέπεται σε πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου χρησιμοποιώντας μαθηματικές τεχνικές της θεωρίας βέλτιστου ελέγχου (Teo & Goh, 1987) (Goh & Teo, 1988). Η χάραξη στο πρότυπο αυτό παραμετροποιείται από ένα σύνολο κυβικών συναρτήσεων spline. Κατά συνέπεια, οι περιορισμοί στην κλίση και τη καμπυλότητα διαμορφώνονται εύκολα λόγω της διαθεσιμότητας της πρώτης και δεύτερης παραγώγου αυτών των συναρτήσεων. Σημειώνεται ότι αυτοί οι δύο περιορισμοί πρέπει να ικανοποιούνται σε έναν άπειρο αριθμό σημείων κατά μήκος της χάραξης, ενώ είναι αδύνατο να γίνει καταγραφή των περιορισμών για όλα τα σημεία. Για την διευκόλυνση των υπολογισμών, οι περιορισμοί μετατρέπονται σε μονοδιάστατους μέσω μιας διαδικασίας που χρησιμοποιείται στη θεωρία βέλτιστου ελέγχου. Το τελικό πρότυπο στη συνέχεια γίνεται ένα μη γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης γενικών περιορισμών με τους συντελεστές των όρων των συναρτήσεων spline ως μεταβλητές απόφασης.

Οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν αυτό το συνεχές πρότυπο, καθώς και το αντίστοιχο πρότυπο διακριτού δυναμικού προγραμματισμού, που περιγράφεται σε επόμενο εδάφιο, για την επίλυση του ίδιου προβλήματος. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η προσέγγιση δυναμικού προγραμματισμού υπερέχει ως προς την απλότητα υπολογισμών και διατύπωσης, καθώς το συνεχές πρότυπο γίνεται ιδιαίτερα περίπλοκο αν ληφθούν υπ' όψιν τα κόστη κίνησης γαιών. Παρ' όλα αυτά το συνεχές πρότυπο έχει μεγαλύτερη ευελιξία και δίνει τη δυνατότητα αναβάθμισης σε πρόβλημα τρισδιάστατης χάραξης.

7.3.1.6 Κριτική θεώρηση αριθμητικής αναζήτησης για την κατακόρυφη χάραξη

Γενικά, για την βελτιστοποίηση οδικών χαράξεων η θεώρηση ενός συνεχούς προτύπου παρέχει μεγαλύτερη ευελιξία στη διαμόρφωση της χάραξης δίνοντας την δυνατότητα ρεαλιστικών αποτελεσμάτων. Από την άλλη πλευρά όμως, η θεώρηση αυτή παρουσιάζει δυσκολίες τόσο στη διατύπωση, όσο και στους αλγόριθμους επίλυσης. Ακόμη, τα προβλήματα αυτού του είδους καταλήγουν σε αφ' ενός μη γραμμική και αφ' ετέρου μη κυρτή μορφή. Κατά συνέπεια, υπάρχει η πιθανότητα εμφάνισης τοπικών βέλτιστων που δημιουργούν δυσκολίες.

Για μη γραμμικά πρότυπα βελτιστοποίησης όπως το πρόγραμμα MINERVA ή το πρότυπο του Hayman είναι καλύτερο να κατανοηθεί η συμπεριφορά της συνάρτησης στόχου αντί της αυθαίρετης δοκιμής διαφορετικών αρχικών λύσεων. Ο Pearman (1973) πρότεινε την χρησιμοποίηση τυχαίας δειγματοληψίας για την λήψη εφικτών αρχικών λύσεων καθώς και την χρήση στατιστικής ανάλυσης για την εκτίμηση της κατανομής συχνοτήτων της συνάρτησης στόχου. Συζητήσεις σχετικά με το πρόγραμμα βρίσκονται στους Pearman (1973) και OECD (1973).

7.3.2 Δυναμικός προγραμματισμός για τη μηκοτομή

Ο δυναμικός προγραμματισμός είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιημένη μέθοδος για τη βελτιστοποίηση της κατακόρυφης χάραξης καθώς το πρόβλημα προσαρμόζεται αρκετά καλά στη δομή αυτής της προσέγγισης. Η τεχνική αυτή απαιτεί τον διαχωρισμό του προβλήματος σε ένα σύνολο σταδίων απόφασης για την εύρεση της βέλτιστης στρατηγικής. Σε κάθε στάδιο του προτύπου δυναμικού προγραμματισμού αναζητείται μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας η βέλτιστη τιμή μιας μεταβλητής, η οποία για το πρόβλημα της κατακόρυφης χάραξης μπορεί να αναφέρεται στην κατά μήκος κλίση ενός γραμμικού τμήματος ή στο υψόμετρο σε μια συγκεκριμένη απόσταση ή στάση. Η έξοδος κάθε σταδίου θεωρείται σαν δεδομένο εισόδου του επόμενου σταδίου. Κατά συνέπεια, ο υπολογισμός του σωρευτικού κόστους των διαδοχικών σταδίων αποτελεί το βέλτιστο κόστος του προβλήματος και οι βέλτιστες τιμές απόφασης κάθε σταδίου αποτελούν τη λύση του προβλήματος, η οποία λαμβάνεται όταν επιλυθεί και το τελευταίο στάδιο. Αυτή η προσέγγιση έχει την ευελιξία είτε για ευθεία επίλυση από την αρχή προς το τέλος, ή αντίστροφη από το τέλος προς την αρχή.

7.3.2.1 Το πρόγραμμα APPOLON

Ο Antoniotti (1969) παρουσίασε το πρόγραμμα APPOLON, το οποίο είχε στόχο τον καθορισμό της κατακόρυφης χάραξης έχοντας δεδομένη την οριζοντιογραφική χάραξη. Το πρόγραμμα περιλαμβάνει τρεις βασικές λειτουργίες που είναι η έρευνα, η ομαλοποίηση και η αξιολόγηση, οι οποίες και περιγράφονται. Η χάραξη αρχικά θεωρείται ότι αποτελείται από ευθύγραμμα τμήματα. Προκύπτει μια πολύπλοκη συνάρτηση κόστους και χρησιμοποιείται δυναμικός προγραμματισμός για τον καθορισμό της βέλτιστης χάραξης. Ένα πρόγραμμα βέλτιστης διανομής χωματισμών με βάση το διάγραμμα μάζας χρησιμοποιείται για την αναθεώρηση του κόστους των χωματουργικών. Ένα σημείο κάθε φορά μετακινείται με τη σειρά του έως ότου φτάσει μια επιλεγμένη καμπύλη που δημιουργείται από τα σημεία που το περικλείουν. Δηλαδή, σε τελικό στάδιο τα ευθύγραμμα τμήματα που έχουν προκύψει λόγω οικονομικών κριτηρίων, στη συνέχεια τροποποιούνται βάσει ορισμένων γεωμετρικών κριτηρίων. Δεδομένης της εποχής του, το πρόγραμμα φαίνεται να βασίζεται σε μια λογική προσέγγιση. Παρ' όλα αυτά η διαδικασία τροποποίησης μιας αρχικής κατακόρυφης χάραξης, η οποία λαμβάνεται μέσω δυναμικού προγραμματισμού μπορεί να οδηγήσει ορισμένες φορές σε σημαντικές διαφοροποιήσεις της τελικής χάραξης οδηγώντας τη μακριά από τη βέλτιστη λύση.

7.3.2.2 Το πρόγραμμα OPYGAR

Ο Puy Huarte (1973) παρουσίασε ένα πρότυπο δυναμικού προγραμματισμού ενσωματώνοντας πρότυπα γραμμικού προγραμματισμού και προβλημάτων μεταφοράς για τη βελτιστοποίηση της κατακόρυφης χάραξης. Το πρόγραμμα ονομάστηκε OPYGAR και αναπτύχθηκε στην Ισπανία. Το πρόγραμμα υποδιαιρείται σε δύο φάσεις. Κατά την πρώτη φάση, δεδομένου του κόστους μεταφοράς χωματισμών, χρησιμοποιείται δυναμικός προγραμματισμός για την παραγωγή της βέλτιστης χάραξης κατά τη μηκοτομή. Ο περιορισμός κατά μήκος κλίσης υπόκειται σε επεξεργασία, περιορίζοντας το σύνολο των εφικτών σημείων, σε σχέση με ένα δεδομένο σημείο στο τρέχον στάδιο. Με βάση τη χάραξη που προκύπτει, βρίσκεται μια νέα τιμή του κόστους μεταφοράς χωματισμών εφαρμόζοντας το πρότυπο του προβλήματος μεταφοράς, που επιλύεται με τον Ουγγρικό Αλγόριθμο. Με δεδομένο το νέο κόστος χρησιμοποιείται πάλι δυναμικός προγραμματισμός για την εύρεση της νέας βέλτιστης χάραξης. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου επιτευχθεί σύγκλιση. Κατά τη δεύτερη φάση, η τελική χάραξη που βρέθηκε προηγούμενα, προσεγγίζεται από ένα σύνολο κυβικών πολυωνυμικών συναρτήσεων. Στη συνέχεια εκτελείται ένα πρόγραμμα γραμμικού προγραμματισμού για την ελαχιστοποίηση της απόλυτης τιμής της καμπυλότητας σε κάθε ενδιάμεσο σημείο.

Η χάραξη στην πρώτη φάση αναπαρίσταται από ευθύγραμμα τμήματα και μπορεί να είναι αρκετά διαφορετική από την τελική χάραξη. Σημειώνεται ότι το πρότυπο του Puy Huarte (1973) είναι αρκετά παρόμοιο με αυτό του Easa (1988a), όπου το διάγραμμα μάζας παράγεται μέσω γραμμικού προγραμματισμού ενώ η χάραξη λαμβάνεται με απαρίθμηση στις κορυφές της πολυγωνικής. Η χάραξη στο πρόγραμμα OPYGAR αρχικά παράγεται μέσω ενός προτύπου δυναμικού προγραμματισμού και

στη συνέχεια εξομαλύνεται χρησιμοποιώντας ένα πρότυπο γραμμικού προγραμματισμού, ενώ το κόστος μεταφοράς βελτιστοποιείται λύνοντας το πρόβλημα μεταφοράς. Πρέπει να αναφερθεί ότι το πρόγραμμα OPYGAR εξετάζει πιθανούς τοίχους αντιστήριξης και γέφυρες αν η διαφορά μεταξύ της μηκοτομής του εδάφους και της ερυθράς της οδού υπερβαίνει ορισμένες τιμές. Αυτό το χαρακτηριστικό βελτιώνει την εφαρμογή και την ευελιξία του προγράμματος.

7.3.2.3 Το πρόγραμμα VALOR

Ο Murchland (1973) χρησιμοποίησε επίσης μια προσέγγιση δυναμικού προγραμματισμού με παρεμβολή για να βελτιστοποιήσει την κατακόρυφη χάραξη ελαχιστοποιώντας τα χωματουργικά κόστη για τη βελτίωση υπαρχουσών οδών. Αυτό το πρόγραμμα ονομάστηκε VALOR. Βέβαια, σύμφωνα με τον Gallagher (2002), το πρόγραμμα VALOR συντάχθηκε αρχικά γύρω στο 1970 από τον Mike Cottell και χρησιμοποιήθηκε για την ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής νέων οδών ή βελτίωσης υπαρχουσών με περιορισμούς ως προς την καμπυλότητα. Η δοκιμή του προγράμματος δεν χαρακτηρίστηκε με πλήρη επιτυχία, λόγω της περιορισμένης υπολογιστικής ικανότητας των διαθέσιμων υπολογιστών εκείνης της περιόδου.

Αντίθετα με άλλα πρότυπα δυναμικού προγραμματισμού στα οποία η χάραξη αναπαρίσταται με ευθύγραμμα τμήματα, ο Murchland (1973) χρησιμοποίησε ένα σύνολο τετραγωνικών συναρτήσεων spline με ίσα διαστήματα για την αναπαράστασή της. Το πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι οι πρώτες και δεύτερες παράγωγοι της χάραξης μπορούν να βρεθούν σε οποιοδήποτε σημείο κατά μήκος της χάραξης, οπότε οι περιορισμοί στην κατά μήκος κλίση αλλά και στην εναλλαγή κατά μήκος κλίσεων μπορούν να διατυπωθούν εύκολα. Ο συγγραφέας επέλεξε τετραγωνικές συναρτήσεις spline καθώς η χάραξη είναι λεία παντού, δηλαδή η πρώτη παράγωγος είναι συνεχής, και διαθέτουν αυτήν την ιδιότητα έχοντας το χαμηλότερο βαθμό από την οικογένεια των συναρτήσεων spline. Εκτός από περιορισμούς στην κατά μήκος κλίση, την καμπυλότητα και το υψόμετρο, το πρότυπο λαμβάνει υπ' όψιν έναν περιορισμό ελάχιστης κλίσης για λόγους απορροής, και περιορισμό στην συχνή αλλαγή της κατά μήκος κλίσης για την αποφυγή του φαινομένου του κυματισμού στην προοπτική εικόνα της οδού. Αναπόφευκτα, το μαθηματικό πρότυπο που προκύπτει, δηλαδή ένα μη κυρτό πρόβλημα βελτιστοποίησης με πολλά τοπικά ελάχιστα, είναι αρκετά περίπλοκο και δύσκολο να επιλυθεί. Αρκετές μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί για την επίλυση του προβλήματος και συγκεκριμένα γραμμικός προγραμματισμός, μικτός ακέραιος προγραμματισμός, μια μέθοδο εξομάλυνσης, τυχαία αναζήτηση, άμεση αναζήτηση και δυναμικός προγραμματισμός. Μεταξύ αυτών η προσέγγιση του δυναμικού προγραμματισμού με παρεμβολή μπορεί να επιλύσει το πρόβλημα εξασφαλίζοντας μια ικανοποιητική λύση. Οι μεταβλητές απόφασης σε κάθε στάδιο του δυναμικού προγραμματισμού περιλαμβάνουν όχι μόνο τα υψόμετρα αλλά και την κλίση της ερυθράς της οδού. Η επιλογή της κλίση απαιτείται γιατί οι πρώτες παράγωγοι των τετραγωνικών συναρτήσεων spline μεταξύ δύο συνεχόμενων διαστημάτων πρέπει να είναι συνεχείς στις ενδιάμεσες στάσεις. Στη συνέχεια μέσω της συνθήκης τετραγώνων, το σύνολο των συναρτήσεων spline μπορεί να επιλυθεί σε σειρά.

Η διαπλάτυνση και γενικότερα η ανακατασκευή μιας υπάρχουσας οδού μπορεί να προκαλέσει πρόβλημα καθώς το κόστος μια τέτοιας αναβάθμισης είναι ευαίσθητο ως προς το υψόμετρο της ερυθράς καθώς από τη μια πλευρά αν αυτό αυξηθεί απαιτεί δαπανηρά υλικά, ενώ από την άλλη η ελάττωση του υψομέτρου της ερυθράς μπορεί να σημαίνει την κάλυψη μεγαλύτερης επιφάνειας ή την αποξήλωση και ανακατασκευή σε χαμηλότερο επίπεδο. Το πρόγραμμα VALOR αναπτύχθηκε για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, λαμβάνοντας διατομές ανά μικρά διαστήματα, με ακριβή υψομετρική πληροφορία της υπάρχουσας οδού. Στο πρόγραμμα η οριζοντιογραφική χάραξη λαμβάνεται ως δεδομένη με τη δυνατότητα μικρών αλλαγών σε αυτήν εκτός του πλαισίου του προγράμματος. Το πλεονέκτημα του προτύπου του Murchland (1973) είναι ότι οι συνεχείς συναρτήσεις για την αναπαράσταση της χάραξης παρέχουν μια λεία χάραξη με τις πρώτες και δεύτερες παραγώγους. Η χάραξη, όμως, έχει τον περιορισμό να πρέπει να περνά από ένα πεπερασμένο σύνολο σημείων σε κάθε στάση. Επίσης, οι μεγάλες υπολογιστικές απαιτήσεις είναι ένα ακόμη αδύνατο σημείο του προτύπου.

7.3.2.4 Το διακριτό πρότυπο των Goh, Chew, & Fwa

Οι Goh, Chew, & Fwa (1988) παρουσίασαν ένα διακριτό και ένα συνεχές πρότυπο για την βελτιστοποίηση της κατακόρυφης χάραξης, το οποίο αναπτύχθηκε στο NUS. Το διακριτό πρότυπο χρησιμοποιεί δυναμικό προγραμματισμό για την επίλυση του προβλήματος, ενώ το συνεχές όπως περιγράφτηκε στην προηγούμενη ενότητα χρησιμοποιεί μια αριθμητική μέθοδο αναζήτησης. Τα κόστη που λαμβάνονται υπ' όψιν περιλαμβάνουν χωματουργικά και λειτουργικά κόστη οχημάτων, ενώ η χάραξη αναπαριστάται με ευθύγραμμα τμήματα. Επιπροσθέτως, οι συγγραφείς παρείχαν λεπτομερή διατύπωση για τον υπολογισμό του κόστους χωματουργικών και μια σαφή περιγραφή της διαδικασίας δυναμικού προγραμματισμού.

Σχήμα 7.12: Γεωμετρία του διακριτού προτύπου δυναμικού προγραμματισμού (Πηγή: Goh, Chew, & Fwa, 1988)

Ο Fwa (1989) παρουσίασε το ίδιο πρότυπο δυναμικού προγραμματισμού για την βελτιστοποίηση της κατακόρυφης χάραξης, όπου χρησιμοποιήθηκε το ίδιο αριθμητικό παράδειγμα με μεγαλύτερη έμφαση στην ανάλυση ευαισθησίας. Το κύριο εύρημα ήταν ότι η καλύτερη επιλογή βήματος για την οριζοντιογραφία ήταν στα 60 m ενώ για την μηκοτομή 0,5 m. Η ανάλυση ευαισθησίας επίσης έδειξε ότι η χαλάρωση στους περιορισμούς της μέγιστης κατά μήκος κλίσης και στην αλληλουχία τους, μειώνουν σημαντικά το συνολικό κόστος. Βέβαια, το συνολικό κόστος δεν είναι ευαίσθητο στην περαιτέρω χαλάρωση του περιορισμού στις εναλλαγές των κλίσεων μετά από μια ορισμένη τιμή, καθώς γίνεται μη δεσμευτικός και ο περιορισμός της μέγιστης κλίσης επικρατεί στη συμπεριφορά της χάραξης.

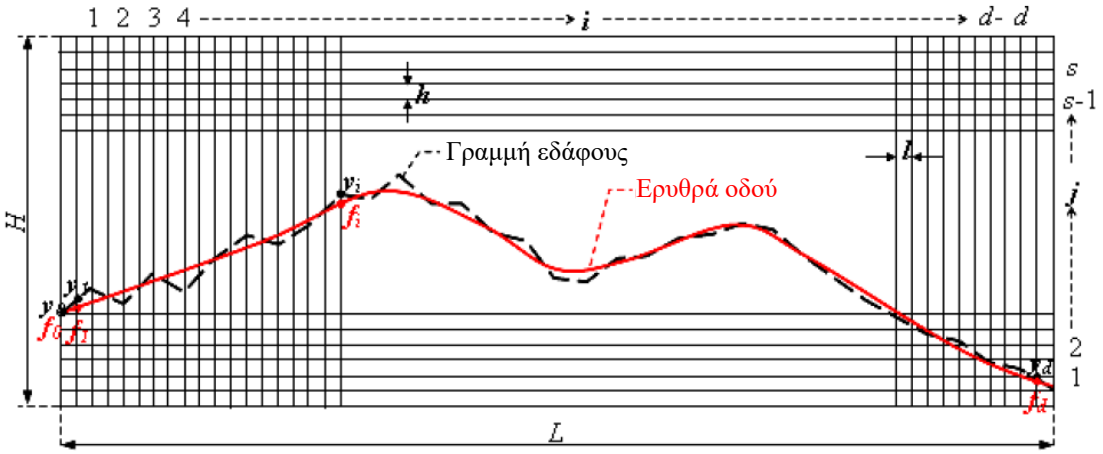
Οι περιορισμοί στην κλίση και την καμπυλότητα που έθεσαν οι Goh, Chew, & Fwa (1988) και ο Fwa (1989) στα πρότυπα τους είχαν δομηθεί κατά τρόπο παρόμοιο με τον Hayman (1970). Παρ' όλα αυτά, ο Hayman έλαβε υπ' όψιν περισσότερους περιορισμούς σε σχέση με την ευστάθεια των πρανών και την ισορροπία των υλικών. Κατά τον υπολογισμό του όγκου των χωματισμών, η διατύπωση του Hayman επιτρέπει την ύπαρξη κεκλιμένης γραμμής εδάφους στη διατομή της οδού ενώ οι Goh και Fwa υπέθεσαν επίπεδο έδαφος στη διατομή.

7.3.2.5 Το πρότυπο WGLM δυναμικού προγραμματισμού

Οι Göktepe, Lav, & Altun (2005) θεώρησαν τη βελτιστοποίηση της κατακόρυφης χάραξης ως ένα περιορισμένο μη γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης, το οποίο μπορεί να επιλυθεί με μια τεχνική βελτιστοποίησης πολλαπλών σταδίων. Η προσέγγισή τους βασίστηκε στη βελτιστοποίηση των χωματουργικών. Το δισδιάστατο πρόβλημα κατανεμήθηκε σε φατνία ενός πλέγματος οριζόντιων και κατακόρυφων γραμμών όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Το μέγεθος των φατνίων επηρεάζει άμεσα τόσο την ακρίβεια, όσο και την απαιτούμενη υπολογιστική ικανότητα. Κάθε κατακόρυφο διάστημα θεωρήθηκε ως ένα στάδιο της διαδικασίας, για το οποίο καθοριζόταν η βέλτιστη τιμή υψομέτρου μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας. Ένας δισδιάστατος πίνακας κατά μήκος της Χ-συντεταγμένης της χάραξης χρησιμοποιήθηκε για τα δεδομένα υψομέτρων εδάφους. Σε κάθε κατακόρυφη γραμμή του πλέγματος και με βάση τα υπάρχοντα υψομετρικά δεδομένα εδάφους αλλά

και τα δεδομένα εισόδου από το προηγούμενο στάδιο προέκυπτε η βέλτιστη τιμή υψομέτρου της χάραξης. Στο τελευταίο στάδιο αναζήτησης, το σύνολο των τιμών των μεταβλητών απόφασης καθόριζε τη βέλτιστη λύση. Σύμφωνα με τον Al-Hadad (2011) πέραν της μαθηματικής προτυποποίησης δεν υπήρχαν ουσιαστικές διαφορές μεταξύ του προτύπου των Göktepe, Lav, & Altun (2005) με αυτό του Fwa (1989).

Σχήμα 7.13: Μηκοτομή προτύπου δυναμικού προγραμματισμού (Πηγή: Göktepe, Lav, & Altun, 2005)



Οι Göktepe, Altun, & Ahmedzade (2009) επέκτειναν το προηγούμενο πρότυπο συνδυάζοντάς το με τη μέθοδο σταθμισμένης γραμμής εδάφους WGLM. Με αυτόν τον τρόπο η ελαχιστοποίηση των χωματουργικών εργασιών βασιζόταν στην ισορρόπηση των ποσοτήτων εκσκαφών και επιχωμάτων στις προκύπτουσες διατομές της χάραξης. Στην εργασία αυτή διαπιστώθηκε ότι βρίσκοντας την ερυθρά της χάραξης όσο το δυνατόν πιο κοντά σε ένα προκαθορισμένο υψόμετρο του κεντρικού άξονα, τα υψόμετρα με τα οποία ισορροπούν οι ποσότητες εκσκαφών και επιχωμάτων, είναι πιθανό να ελαχιστοποιήσουν το κόστος των χωματουργικών και τελικά του συνολικού κόστους της συνάρτησης στόχου της χάραξης.

Έμφαση δόθηκε στη μέγιστη κατά μήκος κλίση, αλλά δεν παρουσιάστηκαν απαιτήσεις ως προς την καμπυλότητα. Τα χωματουργικά κόστη ήταν το μόνο στοιχείο στη συνάρτηση στόχου, ενώ κατασκευαστικά και άλλα κόστη εξαρτώμενα από το μήκος που δεν συμπεριλήφθηκαν έχουν επίσης επιπτώσεις στη βελτιστοποίηση της κατακόρυφης χάραξης. Τέλος, για μεγαλύτερη ακρίβεια στους υπολογισμούς των όγκων χωματισμών χρησιμοποιήθηκε ασαφής λογική για τον καθορισμό των συντελεστών επιπλήσματος και συμπύκνωσης (Göktepe, Lav, Altun, & Altintas, 2008).

7.3.2.6 Κριτική θεώρηση δυναμικού προγραμματισμού στην κατακόρυφη χάραξη

Γενικά, η εφαρμογή δυναμικού προγραμματισμού για τη βελτιστοποίηση της κατακόρυφης χάραξης είναι αρκετά επιτυχής σε σχέση με τη βελτιστοποίηση της οριζόντιας χάραξης. Βέβαια, η προσέγγιση αυτή περιορίζει τις κορυφές της πολυγωνικής της χάραξη, σε διέλευση από ένα διακριτό σύνολο σημείων σε κάθε στάση. Κατά συνέπεια, εξετάζεται μόνον ένα υποσύνολο του χώρου αναζήτησης και θα ήταν αδύνατη η επέκταση για κάλυψη όλου του χώρου. Επίσης, τα περισσότερα πρότυπα δυναμικού προγραμματισμού αναπαριστούν τη χάραξη με μια όδευση ευθυγράμμων τμημάτων και ακόμη και στην περίπτωση που προσαρμόζονται καμπύλες στην χάραξη αυτό δε συμβαδίζει με το πεδίο αναζήτησης. Αυτός είναι ένας έμφυτος περιορισμός του δυναμικού προγραμματισμού καθώς είναι αδύνατη η προσαρμογή καμπυλών πριν την εύρεση της βέλτιστης λύσης. Από αυτήν την άποψη, το πρότυπο του Murchland (1973) είναι χρησιμότερο, αφού προσδιορίζει τη συμπεριφορά της χάραξης μέσα σε κάθε σκέλος του συνολικού προβλήματος ξεχωριστά. Βέβαια, όπως έχει αναφερθεί, η επιλογή σε κάθε στάδιο γίνεται πιο περίπλοκη, αφού πρέπει πρώτα να προσδιοριστεί η κατά μήκος κλίση σε κάθε σημείο μέσα από ένα συνεχές σύνολο. Για το λόγο αυτό το πρότυπο του Murchland

χρειάζεται παρεμβολή για να ανταπεξέλθει στην προσέγγιση αυτή. Αξίζει να σημειωθεί, ότι στον δυναμικό προγραμματισμό, κάθε μεταβλητή ενός επόμενου σταδίου θεωρείται ανεξάρτητη από τις υπόλοιπες και είναι δύσκολος ο συσχετισμός μιας τιμής μεταβλητής ενός τελικού σταδίου με μια τιμή ενός αρχικού σταδίου. Κατά συνέπεια, χάνεται η δυνατότητα διαφορετικών συνδυασμών που μπορεί να επιφέρουν χαμηλότερα κόστη.

7.3.3 Πλήρης απαρίθμηση

Ο Easa (1988a) ανέπτυξε ένα μαθηματικό πρότυπο το οποίο επιλέγει το συνδυασμό των κατά μήκος κλίσεων των κλάδων, ο οποίος ελαχιστοποιεί τα κόστη των χωματουργικών εργασιών, ενώ ταυτόχρονα πληροί τις γεωμετρικές προδιαγραφές που έχουν τεθεί. Η αρχικοποίηση της διαδικασίας περιλαμβάνει την είσοδο των δεδομένων που αφορούν τον ορισμό στάσεων ανά ίσα διαστήματα, στις οποίες γίνεται ανάγνωση του υψομέτρου του εδάφους, τον αριθμό των κορυφών της πολυγωνικής της μηκοτομής και τα πεδία ορισμού του υψομέτρου τους καθώς επίσης και τον προσδιορισμό γεωμετρικών στοιχείων, όπως το πλάτος της οδού, οι κλίσεις των πρανών, η ταχύτητα μελέτης, τα υψόμετρα αρχής και τέλους, το συνολικό μήκος του υπό εξέταση τμήματος και άλλες ειδικεύσεις. Στη συνέχεια το υψόμετρο των κορυφών της πολυγωνικής αυξάνεται κατά μια προκαθορισμένη τιμή και προσδιορίζονται οι υψομετρικές διαφορές της πολυγωνικής με τη γραμμή εδάφους σε κάθε στάση. Σε κάθε επανάληψη επιλέγεται ένας συνδυασμός κορυφών για να ελεγχθεί εάν η κατακόρυφη χάραξη που έχει προκύψει είναι εφικτή, καθώς γίνεται έλεγχος των περιορισμών που περιλαμβάνουν τη μέγιστη και ελάχιστη κατά μήκος κλίση, την ελάχιστη απόσταση μεταξύ αντίρροπων καμπυλών, το πεδίο ορισμού των υψομέτρων σε κάθε στάση και άλλα. Αν κάποιος από τους περιορισμούς δεν ικανοποιείται, τότε ο συνδυασμός απορρίπτεται. Η χάραξη που παράγεται προσομοιάζει με τη συμβατική μέθοδο, δηλαδή προσαρμόζοντας μια παραβολική καμπύλη μεταξύ των διαδοχικών κλάδων. Όταν βρεθεί μια εφικτή χάραξη τότε υπολογίζονται οι όγκοι χωματισμών για κάθε τμήμα μεταξύ των στάσεων ενώ ελέγχεται αν επαρκεί η διαθέσιμη χωρητικότητα των δανειοθαλάμων και χώρων αποθέσεων με ταυτόχρονη απόρριψη της χάραξης σε περίπτωση που η συνθήκη αυτή δεν ικανοποιείται. Αντίθετα, στην περίπτωση που ικανοποιείται η συνθήκη χρησιμοποιείται μια υπορουτίνα γραμμικού προγραμματισμού για τη βελτιστοποίηση της κατανομής των χωματισμών για το συγκεκριμένο συνδυασμό. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου εξαντληθεί το σύνολο των συνδυασμών των υψομέτρων των κορυφών της πολυγωνικής και τελικώς επιλέγεται εκείνος με το μικρότερο κόστος χωματουργικών.

Το παραπάνω πρότυπο λαμβάνει υπ' όψιν αρκετούς παράγοντες και ο υπολογισμός των χωματισμών γίνεται με βάση μια ρεαλιστική χάραξη αντί των τμηματικά ευθύγραμμων τμημάτων που χρησιμοποιούνται στα περισσότερα πρότυπα δυναμικού προγραμματισμού. Παρ' όλα αυτά η προσέγγιση της απαρίθμησης είναι μια εξαντλητική διαδικασία που απαιτεί υψηλές υπολογιστικές δυνατότητες και για το λόγο αυτό οι εφαρμογές ήταν αρκετά απλοποιημένες περιλαμβάνοντας έως δύο κορυφές πολυγωνικής. Σε αυτό συντείνει το γεγονός ότι οι κορυφές της πολυγωνικής λαμβάνουν διακριτές τιμές, οπότε ελέγχεται μόνο ένα υποσύνολο του συνόλου αναζήτησης. Κατά συνέπεια απαιτείται μια αρκετά μικρή τιμή αύξησης του υψομέτρου καθιστώντας το μέγεθος του προβλήματος αρκετά μεγάλο. Τέλος, το πρότυπο αυτό λαμβάνει υπ' όψιν μόνο χωματουργικά κόστη και αγνοεί άλλους παράγοντες όπως τα κόστη χρηστών.

Σημειώνεται ότι το πρότυπο του Easa είναι παρόμοιο με αυτό του Puy Huarte (1973). Το διάγραμμα μάζας παράγεται μέσω γραμμικού προγραμματισμού ενώ η χάραξη λαμβάνεται με απαρίθμηση στις κορυφές της πολυγωνικής. Βέβαια, όπως αναφέρθηκε η χάραξη στο πρόγραμμα OPYGAR αρχικά παράγεται μέσω ενός προτύπου δυναμικού προγραμματισμού και στη συνέχεια εξομαλύνεται χρησιμοποιώντας ένα πρότυπο γραμμικού προγραμματισμού, ενώ το κόστος μεταφοράς βελτιστοποιείται λύνοντας το πρόβλημα μεταφοράς.

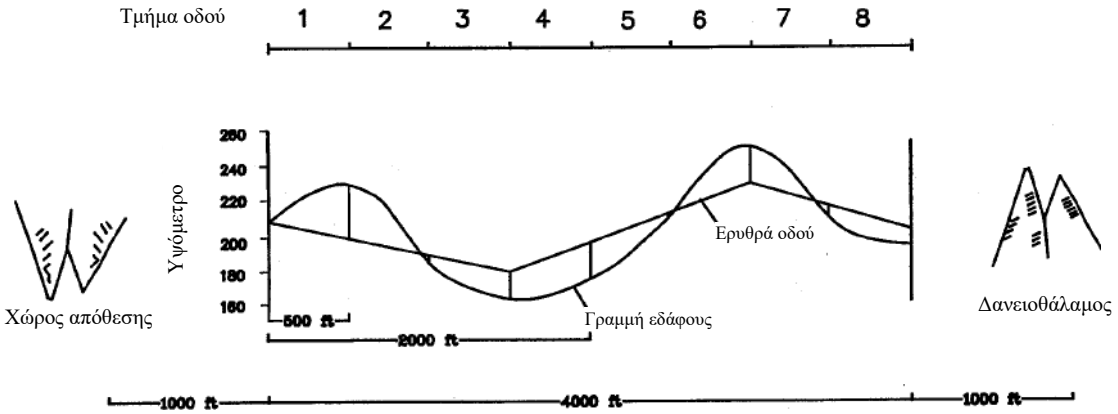
7.3.4 Γραμμικός προγραμματισμός

Ο γραμμικός προγραμματισμός έχει χρησιμοποιηθεί σε αρκετές έρευνες για το σχεδιασμό της διανομής των εκχωμάτων και για την επιλογή των κατά μήκος κλίσεων που ελαχιστοποιούν το κόστος των χωματουργικών.

7.3.4.1 Το πρότυπο του Moreb

Σε αντίθεση με το πρότυπο του Easa, ο Moreb (1996) συνδύασε τα στάδια του ορισμού των κατά μήκος κλίσεων και της διανομής εκχωμάτων σε ένα μόνο στάδιο. Η χάραξη διαιρέθηκε σε ορισμένα μικρότερα τμήματα και η αναζήτηση αφορούσε την επιλογή των βέλτιστων υψομέτρων των γραμμών κατά μήκος κλίσεων. Τα τμήματα αυτά ορίζονται από τη χιλιομετρική θέση και το υψόμετρο στο μέσο του καθενός, ενώ τα εφαπτόμενα τμήματα διερχόμενα από αυτά τα σημεία συνδέουν τα σημεία αρχής και τέλους. Η αναζήτηση περιελάμβανε μια επαναληπτική διαδικασία έως ότου βρεθεί ένας συνδυασμός που ελαχιστοποιεί τα κόστη των χωματουργικών εργασιών. Αξίζει να αναφερθεί ότι το παραπάνω πρότυπο εξετάστηκε με την εφαρμογή μόνο τριών κορυφών πολυγωνικής και δεν προέκυψαν ρεαλιστικές χαράξεις οδών. Συγκεκριμένα, κατά την εφαρμογή του προτύπου παράγεται μια χάραξη μόνο με εφαπτόμενα τμήματα χωρίς να περιλαμβάνονται καμπύλες, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.

Σχήμα 7.14: Μηκοτομή οδού τριών εφαπτόμενων τμημάτων (Πηγή: Moreb, 1996)



7.3.4.2 Το πρότυπο των ReVelle, Whitlatch, & Wright

Οι ReVelle, Whitlatch, & Wright (1997) ανέπτυξαν ένα πρότυπο γραμμικού προγραμματισμού για την βελτιστοποίηση της κατακόρυφης χάραξης με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του κόστους των χωματουργικών εργασιών. Σε αντίθεση με άλλα πρότυπα όπου οι μεταβλητές απόφασης είναι τα υψόμετρα της χάραξης σε κάθε στάση, το συγκεκριμένο πρότυπο χρησιμοποιεί ένα πολυώνυμο πέμπτου βαθμού για την απεικόνιση της χάραξης χωρίς γνώση των υψομέτρων σε κάθε στάση. Κατά συνέπεια, η πρώτη και δεύτερη παράγωγος του πολυωνύμου μπορούν να υπολογιστούν χωρίς δυσκολία συμμετέχοντας στη διαμόρφωση των περιορισμών κλίσεων και εναλλαγής κλίσεων.

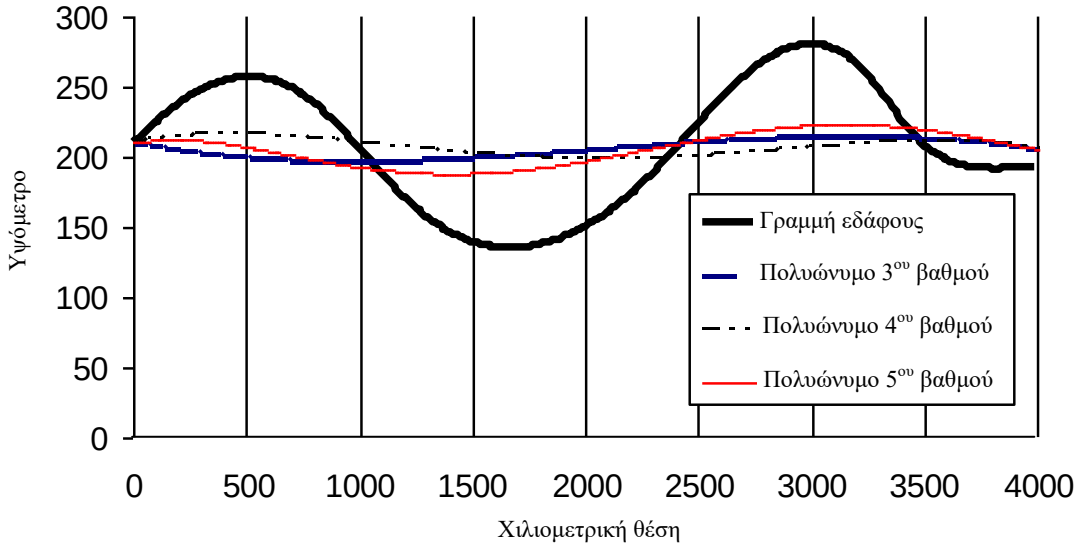
Ένα από τα πλεονεκτήματα αυτής της προσέγγισης είναι ότι η χάραξη αποτελεί μια λεία καμπύλη, όπου το υψόμετρο σε οποιοδήποτε σημείο της μπορεί να βρεθεί εύκολα εισάγοντας την απόστασή του από το σημείο αρχής. Το δεύτερο πλεονέκτημα αφορά το γεγονός ότι υπάρχουν ανεπτυγμένοι αλγόριθμοι, όπως η μέθοδος Simplex για την επίλυση του προβλήματος. Παρ' όλα αυτά δεν υπάρχουν στοιχεία ότι μια ρεαλιστική χάραξη μπορεί να απεικονιστεί από ένα πολυώνυμο πέμπτου βαθμού. Μάλιστα, σύμφωνα με τους Chapra & Canale (1988) πολυώνυμα μεγάλου βαθμού τείνουν να κάμπτουν απότομα την καμπύλη, γεγονός ανεπιθύμητο στις οδικές χαράξεις. Ακόμη, οι όγκοι χωματισμών υπολογίζονται με απλοποιημένο τρόπο χωρίς να λαμβάνονται υπ' όψιν οι κλίσεις των πρανών, καθώς τόσο αυτές όσο και άλλοι παράγοντες όπως το οδόστρωμα ή τα λειτουργικά κόστη

συμμετείχαν στη συνάρτηση στόχου τότε η τελευταία θα ήταν μη γραμμική. Τέλος, οι περιορισμοί μεγίστων και ελαχίστων κατά μήκος κλίσεων αλλά και εναλλαγής τους εξετάζονται μόνο στις θέσεις των στάσεων, χωρίς να εξασφαλίζεται ότι οι συγκεκριμένοι περιορισμοί ικανοποιούνται σε όλες τις υπόλοιπες θέσεις.

7.3.4.3 Το πρότυπο των Moreb & Aljohani

Σε αντίθεση με το προηγούμενο πρότυπο οι Moreb & Aljohani (2002) χρησιμοποίησαν ένα πολυώνυμο δευτέρου βαθμού, ενώ στη συνέχεια έδωσαν μεγαλύτερη ευελιξία στην αναπαράσταση της χάραξης εισάγοντας ως παράμετρο τον βαθμό του πολυωνύμου(Aljohani & Moreb, 2003). Μια απεικόνιση των αποτελεσμάτων της εφαρμογής του προτύπου παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.

Σχήμα 7.15: Μηκοτομή πολυωνυμικών κατακόρυφων χαράξεων (Πηγή: Aljohani & Moreb, 2003, Ιδία επεξεργασία)



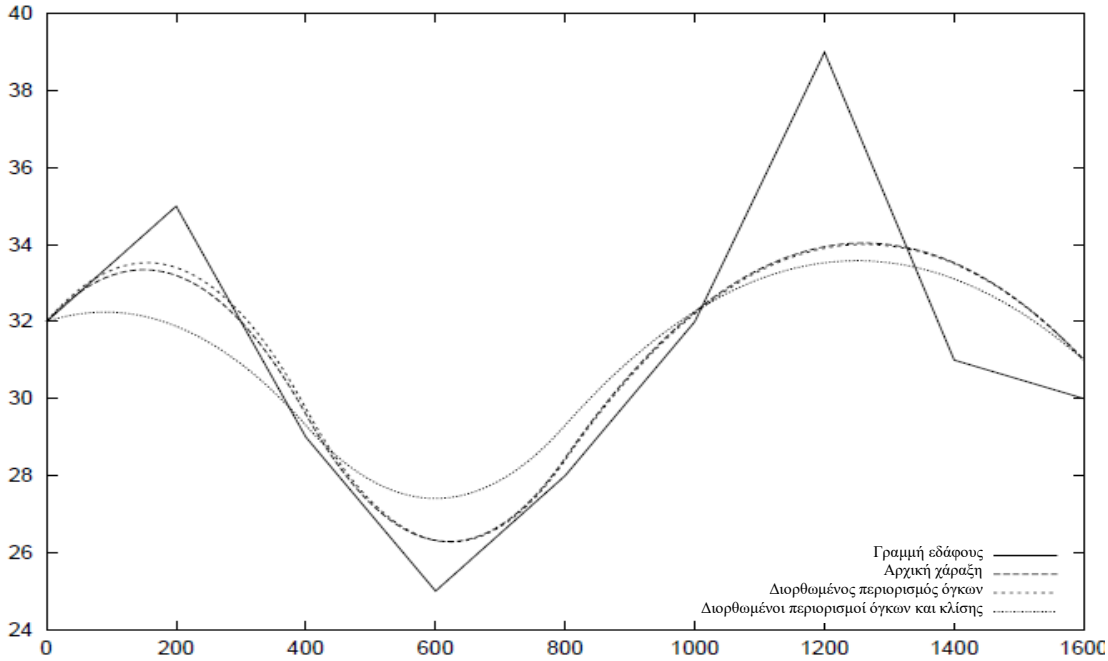
Στο παραπάνω πρότυπο, όμως, δημιουργείται πρόβλημα, καθώς η λύση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο του πολυωνύμου. Αφού διαπιστώθηκε αυτή η αδυναμία, χρησιμοποιήθηκε μια τετραγωνική συνάρτηση spline αντί μιας πολυωνυμικής συνάρτησης για την αναπαράσταση της κατακόρυφης χάραξης, συνδυάζοντας με αυτόν τον τρόπο τμηματικούς ορισμούς πολυωνύμων δευτέρου βαθμού(Moreb & Aljohani, 2004). Το πρότυπο αυτό επεκτάθηκε στη συνέχεια από τον Moreb (2009) προσθέτοντας περιορισμούς για την εξασφάλιση της ομαλότητας στα σημεία που ενώνονται τα πολυωνυμικά τμήματα, ενώ ταυτόχρονα γενίκευσε την τεχνική χρησιμοποιώντας τμηματικούς ορισμούς πολυωνύμων οποιουδήποτε βαθμού.

7.3.4.4 Το πρότυπο των Koch & Lucet

Οι Koch & Lucet (2010) αύξησαν την ακρίβεια του προηγούμενου προτύπου διορθώνοντας δύο περιορισμούς που είχαν εισάγει οι Moreb & Aljohani (2004) και Moreb (2009). Ο πρώτος περιορισμός εξασφαλίζει ότι ο όγκος εκχωμάτων που μεταφέρεται από ή προς ένα τμήμα τις οδού ισούται με τον όγκο που προκύπτει από το γινόμενο της επιφάνειας του τμήματος με την υψομετρική διαφορά της στάθμης της οδού με τη γραμμή εδάφους. Ο δεύτερος περιορισμός αφορούσε τη συμμόρφωση της κατά μήκος κλίσης κάθε τμήματος με μέγιστες και ελάχιστες τιμές. Και στις δύο περιπτώσεις οι Koch & Lucet (2010) έθεσαν σχέσεις που να εξασφαλίζουν την απαλοιφή του μικρού σφάλματος που ενυπήρχε. Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται η μηκοτομή μια χάραξης που προέκυψε με την εφαρμογή των βελτιωμένων περιορισμών σε σχέση με το αρχικό πρότυπο. Επίσης, ανέφεραν πως μόνο μια γραμμική ή τετραγωνική συνάρτηση spline μπορούσε να χρησιμοποιηθεί διατηρώντας τη γραμμική μορφή του προτύπου, καθώς συναρτήσεις τρίτου βαθμού και άνω οδηγούν σε μη

γραμμικότητα της συνάρτησης στόχου ως προς το βελτιωμένο περιορισμό κλίσεων. Τέλος, σημειώνεται ότι το πρότυπο αυτό δεν λαμβάνει υπ' όψιν περιοχές φυσικών εμποδίων ή περιοχές αποκλεισμού (blocks), οι οποίες δεν επιτρέπουν τη μεταφορά εκχωμάτων, αλλά ούτε και τις κλίσεις των πρανών. Κατά συνέπεια, υστερεί σε απαιτούμενη ακρίβεια υπολογισμών για πρακτικές εφαρμογές.

Σχήμα 7.16: Μηκοτομή χαράξεων τετραγωνικών spline με διορθωμένους περιορισμούς (Πηγή: Koch & Lucet, 2010, Ιδία επεξεργασία)



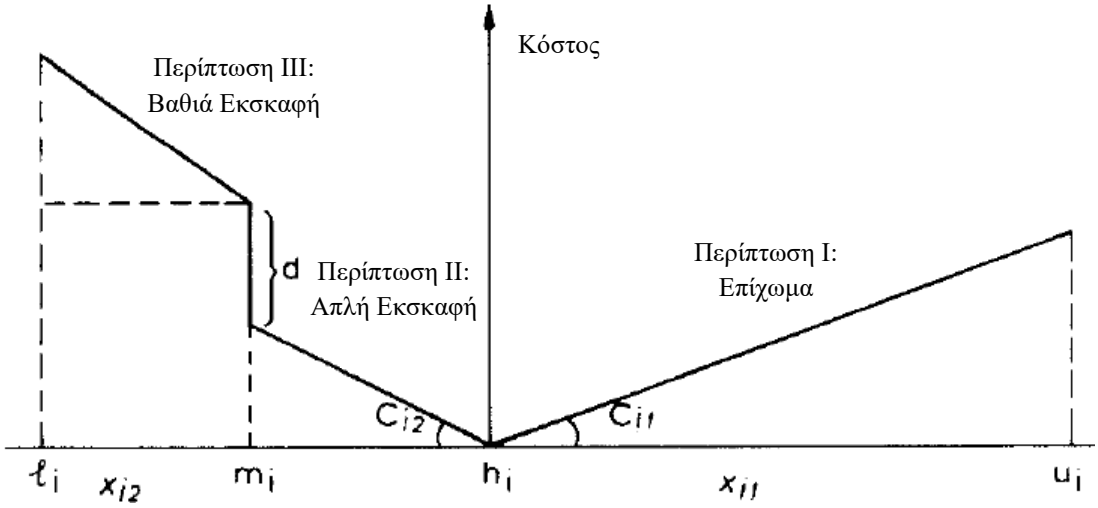
7.3.5 Μικτός ακέραιος προγραμματισμός για τη μηκοτομή

Η Trypia (1979) ανέπτυξε στην ΑΣΟΕΕ ένα πρότυπο για την ελαχιστοποίηση του κόστους της ποσότητας χωματισμών βάσει ορισμένων περιορισμών σχεδιασμού, όπως η διατήρηση της κατά μήκος κλίσης εντός αποδεκτών ορίων. Με δεδομένη την οριζοντιογραφική χάραξη, οι εναλλακτικές κλίσεις της χάραξης παράγονται μέσω ενός καννάβου. Στο πρότυπο αυτό ο χρήστης επιλέγει την πυκνότητα των n σημείων του καννάβου, ώστε να ανταποκρίνεται στο ανάγλυφο του εδάφους. Η πυκνότητα αυτή μπορεί να αυξηθεί σε περιπτώσεις όπου τα χαρακτηριστικά του εδάφους παρουσίαζαν μεγάλη διακύμανση, γεγονός που επιδρούσε σημαντικά στην αύξηση του χρόνου επίλυσης.

Το πρότυπο χρησιμοποιούσε μικτό ακέραιο προγραμματισμό για τον καθορισμό των υψομέτρων κάθε τμήματος της οδού σε συμμόρφωση με τους περιορισμούς κατά μήκος κλίσης. Το άθροισμα του υψομέτρου τους εδάφους $\mathrm{h_i}$ με το ύψος επιχώματος x_{i1} ή εκσκαφής x_{i2} σε κάθε σημείο i περιορίζονται από άνω και κάτω όρια $\mathrm{u_i}$ και ℓ_i αντίστοιχα. Μία δυαδική μεταβλητή χρησιμοποιήθηκε για τον καθορισμό κάθε τμήματος ως εκσκαφή ή επίχωμα. Ο περιορισμός κατά μήκος κλίσης περιλαμβάνει έναν απλό ορισμό μιας μέγιστης τιμής από τον χρήστη.

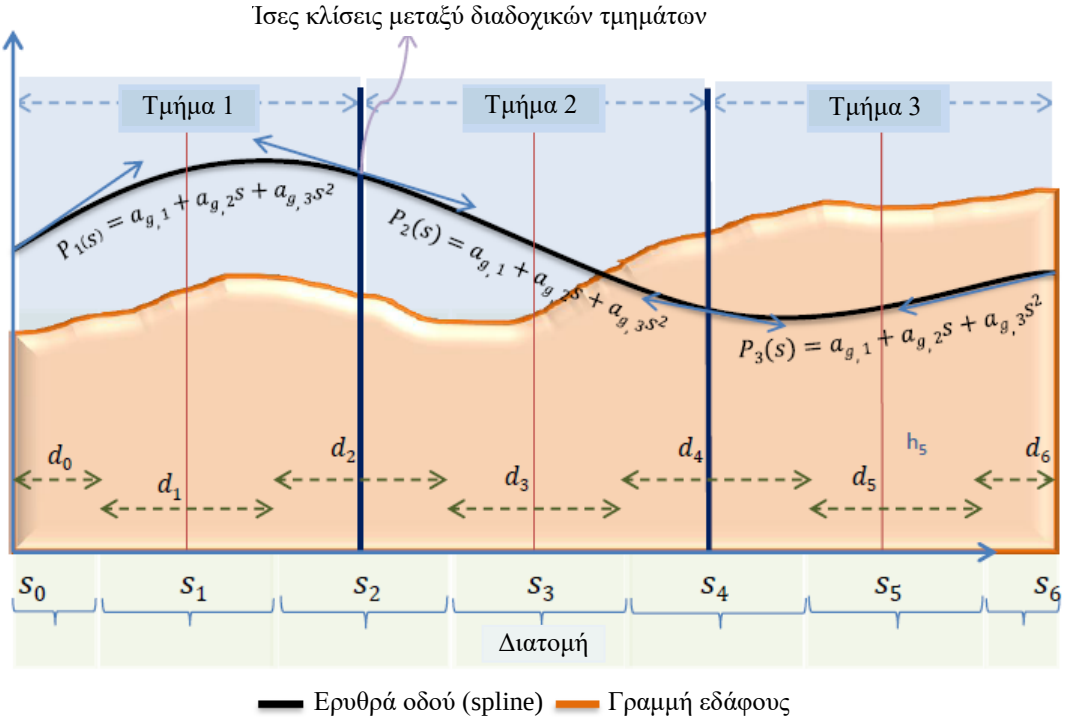
Η συνάρτηση στόχου τελικά αποτελείτο από το άθροισμα του συνολικού κόστους επιχωμάτων και εκσκαφών με βάση τους αντίστοιχους σταθερούς συντελεστές κόστους $\mathrm{c_{i1}}$,$\mathrm{c_{i2}}$ και $\mathrm{c_{i3}}$. Όπως σε όλα τα προβλήματα μικτού ακέραιου προγραμματισμού που χρησιμοποιούν τεχνικές κλάδου και φραγής, ο χρόνος επίλυσης αυξάνεται με παραγοντικό ή εκθετικό ρυθμό σε σχέση με το μέγεθος του προβλήματος. Οι συναρτήσεις κόστους για την εκσκαφή και την επιχωμάτωση διατυπώθηκαν με βάση τις συνθήκες του εδάφους και τον χρησιμοποιούμενο μηχανικό εξοπλισμό. Για παράδειγμα, το πρότυπο έδινε τη δυνατότητα να θεωρηθεί ότι η εκσκαφή σε βάθος μεγαλύτερο από $\mathrm{m_i}$, προκαλεί ένα σταθερό κόστος $\mathrm{d_i}$ όπως φαίνεται και στο επόμενο σχήμα.

Σχήμα 7.17: Παράδειγμα συνάρτησης κόστους
(Πηγή: Trypia, 1979, Ιδία επεξεργασία)



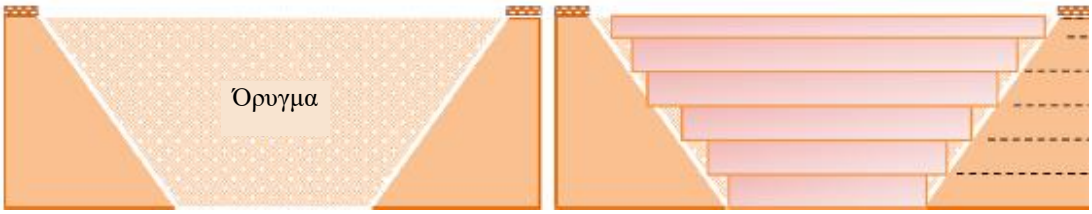
Ο Rahman (2012) σε εργασία του στο UBC επέκτεινε τα πρότυπα των (Moreb, 2009) (Koch & Lucet, 2010) (Hare, Koch, & Lucet, 2011) παρουσιάζοντας δύο πρότυπα για την κατακόρυφη χάραξη ελαχιστοποιώντας τα κόστη των χωματουργικών. Το πρώτο, το οποίο ονομάστηκε τετραγωνικό πρότυπο βασίζεται σε μια προσέγγιση μικτού ακέραιου και γραμμικού προγραμματισμού. Το δεύτερο πρότυπο ροής ψευδο-δικτύου είναι μια τροποποίηση του προβλήματος ελάχιστου κόστους ροής σε δίκτυο το οποίο μετατρέπεται σε ένα άλλο πρότυπο μικτού ακέραιου προγραμματισμού με αρκετά λιγότερες μεταβλητές. Στα δύο πρότυπα λαμβάνονται υπ' όψιν οι κλίσεις των πρανών καθώς επίσης και φυσικά εμπόδια, αλλά μόνο όταν θεωρείται ένα είδος υλικού, γεγονός που δεν ανταποκρίνεται σε ρεαλιστική κατάσταση και δεν επιτρέπει στα πρότυπα να προσεγγίζουν ικανοποιητικά το πραγματικό κόστος κατασκευής. Η αδυναμία αυτή μελετήθηκε και διορθώθηκε από τον Hossain (2013).

Σχήμα 7.18: Αναπαράσταση κατακόρυφης χάραξης με τετραγωνική spline
(Πηγή: Hossain, 2013, Ιδία επεξεργασία)



Οι Hare, Hossain, Lucet, & Rahman (2014) βελτίωσαν το πρότυπο ως προς τον χρόνο επίλυσης. Στη συνέχεια οι Hare, Lucet, & Rahman (2015) πρότειναν ένα πρότυπο μικτού ακέραιου προγραμματισμού για την κατακόρυφη χάραξη λαμβάνοντας υπ' όψιν και τις κλίσεις των πρανών .

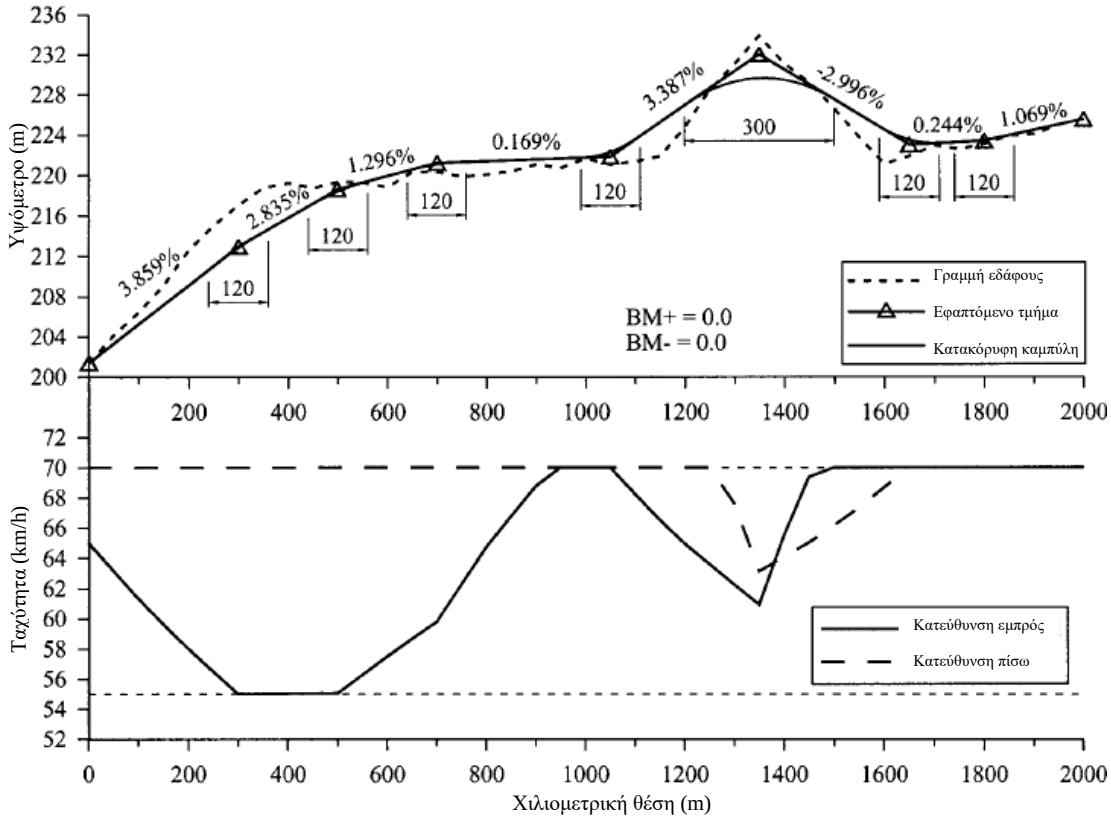
Σχήμα 7.19: Προσέγγιση για τον υπολογισμό των χωματισμών
(Πηγή: Hare, Hossain, Lucet, & Rahman, 2014, Ιδία επεξεργασία)



7.3.6 Τοπική αναζήτηση με ακέραιο προγραμματισμό για τη μηκοτομή

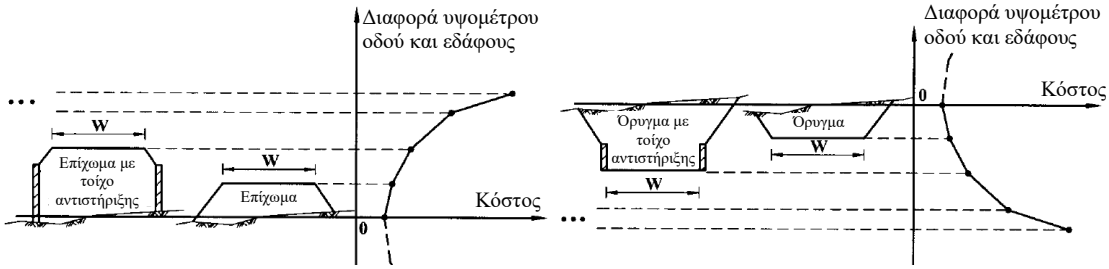
Οι Lee & Cheng (2001b) πρότειναν μια ευρετική μέθοδο τριών επιπέδων για τη βελτιστοποίηση της κατακόρυφης χάραξης. Αυτό έγινε προκειμένου το περίπλοκο μη γραμμικό πρότυπο μικτούς ακέραιου προγραμματισμού να μετατραπεί σε γραμμικό. Το πρόβλημα αρχικά είναι μη γραμμικό, λόγω της χρήσης σχέσεων παραβολικών καμπυλών για τη διατύπωση των περιορισμών. Η μετατροπή γίνεται καθορίζοντας τις θέσεις των κορυφών της πολυγωνικής της μηκοτομής χρησιμοποιώντας περιορισμένη αναζήτηση χωρίς να δίνονται περισσότερες λεπτομέρειες. Στα αποτελέσματα του προτύπου περιλαμβάνεται εκτός της μηκοτομής και το διάγραμμα ταχυτήτων των βαρέων οχημάτων κατά μήκος της οδού ενώ σε άλλη εργασία τους βελτιστοποιούν την κατακόρυφη χάραξη των στοιχείων των ανισόπεδων κόμβων (Lee & Cheng, 2001a).

Σχήμα 7.20: Βελτιστοποιημένη κατακόρυφη χάραξη και διάγραμμα ταχυτήτων
(Πηγή: Lee & Cheng, 2001b, Ιδία επεξεργασία)



Τα στοιχεία κόστους που λαμβάνονται υπ' όψιν αφορούν τους χωματισμούς, τις απαλλοτριώσεις, την απορροή, και την προστασία της κλίσης των πρανών. Το μοναδιαίο κόστος του όγκου χωματισμών δεν θεωρείται σταθερό αλλά μεταβάλλεται με το ύψος ή το βάθος των πρανών, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

Σχήμα 7.21: Κόστος σε σχέση με διαφορά υψομέτρου ερυθράς οδού και γραμμής εδάφους (Πηγή: Lee & Cheng, 2001b, Ιδία επεξεργασία)



7.3.7 Γενετικοί αλγόριθμοι για τη μηκοτομή

Όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, ένας γενετικός αλγόριθμος είναι μια εξελικτική τεχνική αναζήτησης που χρησιμοποιείται για την επίλυση σχετικά περίπλοκων προβλημάτων βελτιστοποίησης. Βασίζεται στις αρχές της φυσικής επιλογής και της επιβίωσης του ισχυρότερου. Ένας γενετικός αλγόριθμος πραγματοποιεί αναζήτηση προς πολλές κατευθύνσεις διατηρώντας έναν πληθυσμό πιθανών λύσεων και προωθεί τη διαμόρφωση και ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ αυτών των κατευθύνσεων. Εξαιτίας των δυσκολιών της αναπαράστασης της οδικής χάραξης, καθώς επίσης της πολυπλοκότητας του κόστους και των περιορισμών που ενυπάρχουν στο πρόβλημα, η προσέγγιση φαίνεται να προσαρμόζεται αρκετά καλά στο πρόβλημα βελτιστοποίησης της χάραξης.

Κατά τη διαδικασία επίλυσης, αρχικά δημιουργείται ένα σύνολο επιλύσεων, που ονομάζονται γονείς, επιλέγοντας τυχαίες τιμές των δεδομένων. Στη συνέχεια, μέσω γενετικών τελεστών, όπως η αναπαραγωγή, η διασταύρωση και η μετάλλαξη δημιουργείται ένα σύνολο λύσεων με βάση του προγόνους, γνωστές ως απόγονοι. Έπειτα, ένα νέο σύνολο προγόνων διαμορφώνεται με την επιλογή των καλύτερων λύσεων από τα αρχικά σύνολα προγόνων και απογόνων. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου παρατηρηθούν αμελητέες διαφορές μεταξύ διαδοχικών συνόλων επιλύσεων. Η καλύτερη λύση της τελευταίας επανάληψης επιλέγεται ως η βέλτιστη λύση.

7.3.7.1 Το πρότυπο των Fwa, Chan, & Sim

Οι Fwa, Chan, & Sim (2002) ανέπτυξαν ένα πρότυπο στο NUS, βασισμένο σε γενετικό αλγόριθμο για την ανάλυση της βέλτιστης κατακόρυφης χάραξης, λαμβάνοντας υπ' όψιν τα μήκη των εφαπτόμενων τμημάτων, σημεία σταθερού υψομέτρου και περιορισμούς στη σχέση οριζοντιογραφικών και κατακόρυφων καμπυλών. Το πρότυπο επίσης περιελάμβανε τον περιορισμό μέγιστης κατά μήκος κλίσης. Στο πρότυπο αυτό το πεδίο επίλυσης αναπαριστάται με έναν πλέγμα οριζόντιων και κατακόρυφων γραμμών. Οι κατακόρυφες γραμμές κατανέμονταν ανά ίσα διαστήματα κατά μήκος μιας προσχεδιασμένης οριζοντιογραφικής χάραξης. Τα υψόμετρα επί των γραμμών αυτών αντιμετωπίζονταν ως μεταβλητές απόφασης. Η συνάρτηση στόχου που χρησιμοποιήθηκε αφορούσε την ελαχιστοποίηση του κόστους των χωματουργικών και της κατασκευής των οδοστρωμάτων. Η λύση, δηλαδή το χρωμόσωμα στη δομή του γενετικού αλγορίθμου, αναπαρίσταται με μια σειρά φατνίων. Κάθε φατνίο είχε μια θέση επί της μηκοτομής και μια τιμή υψομέτρου. Η εφαρμογή του αλγορίθμου περιορίζεται πάντα σε μια προκαθορισμένη οριζοντιογραφική χάραξη με γνωστά μήκη, ενώ δεν μπορεί να επεκταθεί για ταυτόχρονη βελτιστοποίηση οριζοντιογραφικής και κατακόρυφης χάραξης όπου τα μήκη της πρώτης δεν είναι γνωστά. Για το λόγο αυτό, η συγκεκριμένη αναπαράσταση θεωρήθηκε ως μια τεχνική για την επίλυση μόνο ειδικών προβλημάτων. Η αναζήτηση στον αρχικό πληθυσμό περιορίστηκε αρχικά από μια στενά καθορισμένη περιοχή για την αποφυγή μη

εφικτών λύσεων. Τα όρια αυτής της περιοχής ορίζονταν από τέσσερις γραμμές, με κλίσεις ίσες με την ορισμένη μέγιστη τιμή της κατά μήκος κλίσης, σχεδιασμένες κατά τη θετική και αρνητική φορά από τα δύο άκρα. Αυτή η προσέγγιση μπορούσε να μειώσει τον αριθμό των παραγόμενων μη εφικτών λύσεων αποφεύγοντας την αναζήτηση εκτός της ορισμένη περιοχής. Επίσης, η μέθοδος μπορούσε να μειώσει τον χρόνο υπολογισμού της διαδικασίας επειδή θα αξιολογούσε μικρότερο αριθμό εναλλακτικών.

Μια άλλη προσέγγιση που ονομάστηκε μέθοδος γωνίας αναζήτησης υιοθετήθηκε επίσης για τον περιορισμό της αναζήτησης στις επόμενες παραγωγές. Με τη μέθοδο αυτήν, η αναζήτηση περιορίστηκε, καθώς ο κατακόρυφος χώρος οριζόταν από τις γραμμές μέγιστης θετικής και αρνητικής κατά μήκος κλίσης από ένα σημείο υψομέτρου αμέσως πριν την κατακόρυφη γραμμή του πλέγματος στην οποία εστιαζόταν η αναζήτηση. Ο επιπλέον υπολογισμός αυτής της προσέγγισης μπορεί να επιβαρύνει τη διαδικασία αλλά σε αντάλλαγμα ο συνολικός χρόνος της διαδικασίας μπορεί να μειωθεί αφού παράγονται λιγότερες μη εφικτές εναλλακτικές λύσεις. Η σκοπιμότητα μιας λύσης με αυτήν τη μέθοδο είναι εγγυημένη ως προς τα χωματουργικά κόστη. Μια μέθοδος μπορεί να δημιουργεί μεγαλύτερες ποσότητες εκσκαφών και επιχωμάτων αν δεν έχει εφαρμοστεί μια προσέγγιση περιορισμού ορίων αναζήτησης. Η εργασία δεν αποκάλυπτε αν χρησιμοποιήθηκαν μέθοδοι δυαδικών ή πραγματικών αριθμητικών αναπαραστάσεων. Επίσης, δεν δόθηκαν λεπτομέρειες των τελεστών μετάλλαξης και διασταύρωσης με αποτέλεσμα τη δύσκολη κατανόηση της συμπεριφοράς του αλγορίθμου. Ακόμη, αναφέρθηκε ότι τόσο η διασταύρωση, όσο και η μετάλλαξη ήταν σημαντικές για την παραγωγή της λύσης χωρίς όμως να αναφέρεται αν ο σχεδιασμός των τελεστών είχε βασιστεί στον τυπικό γενετικό αλγόριθμο ή ήταν προσαρμοσμένος στο συγκεκριμένο πρόβλημα. Για τον λόγο αυτό δεν μπορούν να γίνουν σχόλια χωρίς να είναι γνωστή η φύση των δύο τελεστών.

Η έρευνα έδειξε ότι ένας πληθυσμός 600 και παραπάνω ατόμων δε δημιουργούσε διαφορά στην αποδοτικότητα του αλγορίθμου και για το λόγο αυτό υιοθετήθηκε ένα μέγεθος πληθυσμού 700 ατόμων. Σε κάθε επανάληψη, το 90% των απογόνων συνδυαζόταν με το καλύτερο 10% των προγόνων για την επόμενη αναπαραγωγή. Οι πιθανότητες διασταύρωσης και μετάλλαξης ήταν 0,55 και 0,03 αντίστοιχα. Ο πληθυσμός συνέκλινε κοντά στην 500ή επανάληψη με σημαντικές βελτιώσεις μέσα τις πρώτες 150 επαναλήψεις. Δεν δόθηκαν αναλυτικές πληροφορίες, όπως κάποιο γράφημα ή διάγραμμα, το οποίο να δείχνει τη συμπεριφορά της επίλυσης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Οι μη εφικτές λύσεις αντιμετωπίστηκαν χρησιμοποιώντας μια σταθερή στατική ποινή σε κάθε παραβίαση περιορισμού. Αυτή η προσέγγιση βοήθησε στην εύκολη απομάκρυνση των μη εφικτών λύσεων. Εν τω μεταξύ, ήταν δύσκολη η διάκριση μεταξύ δύο λύσεων με διαφορετικά επίπεδα παραβιάσεων. Για παράδειγμα, η προσέγγιση αυτή χρησιμοποιεί την ίδια ποινή για μια παραβίαση του περιορισμού κατά μήκος κλίσης χωρίς να παίζει ρόλο το μέγεθος αυτής της παραβίασης.

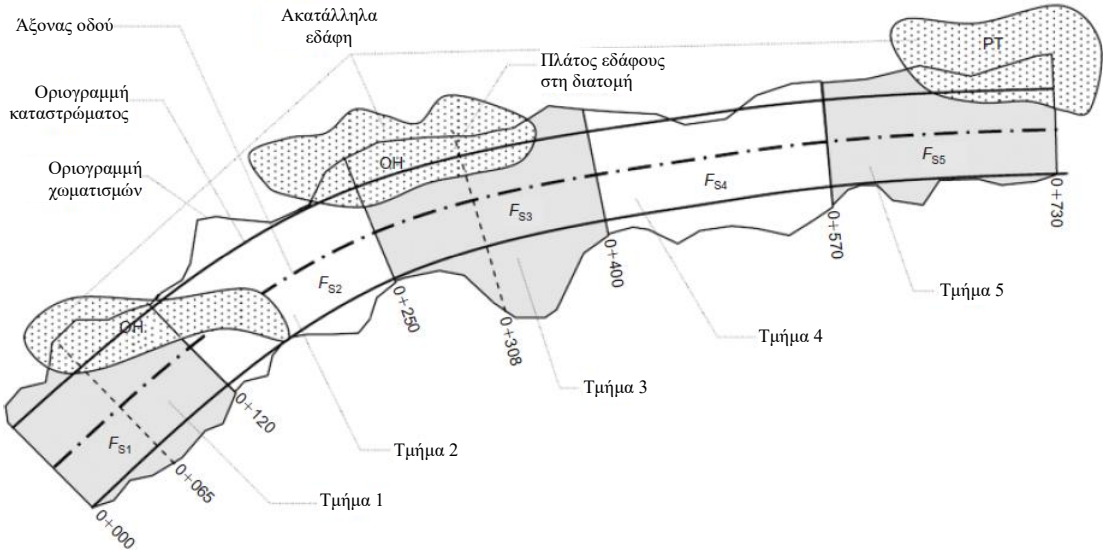
Είναι σημαντικό να αναφερθεί, ότι η έρευνα έδειξε πως οι τεχνικές γενετικών αλγορίθμων παρέχουν ένα ευέλικτο εργαλείο σε σχέση με άλλες τεχνικές βελτιστοποίησης για την επίλυση του προβλήματος της κατακόρυφης χάραξης με διαφορετικές παραμέτρους. Το πρότυπο ήταν αρκετά ευέλικτο και ήταν ικανό να συμπεριλάβει μια μεγάλη ποικιλία περιορισμών. Εκτός των περιορισμών κατά μήκος κλίσης και καμπυλότητας, λαμβάνονται επίσης υπ' όψιν τα κρίσιμα μήκη για τον έλεγχο των κλίσεων, σταθερά σημεία υψομέτρου και μέριμνα για την υπέρθεση οριζοντιογραφικών και κατακόρυφων καμπυλών. Αυτοί οι περιορισμοί δε λαμβάνονται συνήθως υπ' όψιν στα περισσότερα πρότυπα που βασίζονται σε άλλες προσεγγίσεις, καθώς είναι δύσκολη η προτυποποίησή τους. Βέβαια, και σε αυτήν την περίπτωση η χάραξη μπορεί να διέλθει πεπερασμένο σύνολο υψομέτρων σε κάθε σημείο. Κατά συνέπεια, ελέγχεται μόνο ένα υποσύνολο του πεδίου αναζήτησης και δεν εξασφαλίζεται η απαίτηση για ολικό βέλτιστο (Fan, 2004). Τέλος, η προκύπτουσα χάραξη αναπαρίσταται με ευθύγραμμα τμήματα, υστερώντας με τον τρόπο αυτόν σε απαιτούμενη ακρίβεια για πραγματική εφαρμογή.

7.3.7.2 Το πρότυπο WGLM γενετικών αλγορίθμων

Διαπιστώνοντας τις ελλείψεις του δυναμικού προγραμματισμού οι Göktepe, Lav, & Altun (2009) στράφηκαν προς τους γενετικούς αλγορίθμους. Η προσέγγιση βασίστηκε σε μια μέθοδο προσαρμογής

κατακόρυφων καμπυλών για τη βελτιστοποίηση της κατακόρυφης χάραξης. Όπως στο πρότυπο δυναμικού προγραμματισμού (Göktepe, Altun, & Ahmedzade, 2009), έτσι και στο αντίστοιχο των γενετικών αλγορίθμων οι συγγραφείς ενσωμάτωσαν και τη μέθοδο σταθμισμένης γραμμής εδάφους WGLM για τη βελτιστοποίηση των χωματουργικών. Με αυτόν τον τρόπο η ελαχιστοποίηση των χωματουργικών εργασιών βασιζόταν στην ισορρόπηση των ποσοτήτων εκσκαφών και επιχωμάτων στις προκύπτουσες διατομές της χάραξης. Για μεγαλύτερη ακρίβεια στους υπολογισμούς των όγκων χωματισμών χρησιμοποιήθηκε και πάλι ασαφής λογική για τον καθορισμό των συντελεστών επιπλήσματος και συμπύκνωσης (Göktepe, Lav, Altun, & Altintas, 2008). Οι εδαφικές παράμετροι λαμβάνονται υπ ‘ όψιν και συνεπώς οδικά τμήματα με ετερογενή εδάφη μπορούν να εξεταστούν όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Τέλος εισάγεται μια τεχνική για την εκτίμηση της καταλληλότητας των εδαφικών υλικών. Περισσότερες πληροφορίες δίνουν οι Göktepe & Karasahin (2011).

Σχήμα 7.22: Οριζοντιογραφία οδού με περιοχές ετερογενών και ακατάλληλων εδαφικών υλικών (Πηγή: Göktepe, Lav, & Altun, 2009, Ιδία επεξεργασία)



7.3.7.3 Το πρότυπο των Aruga, Sessions, & Akay

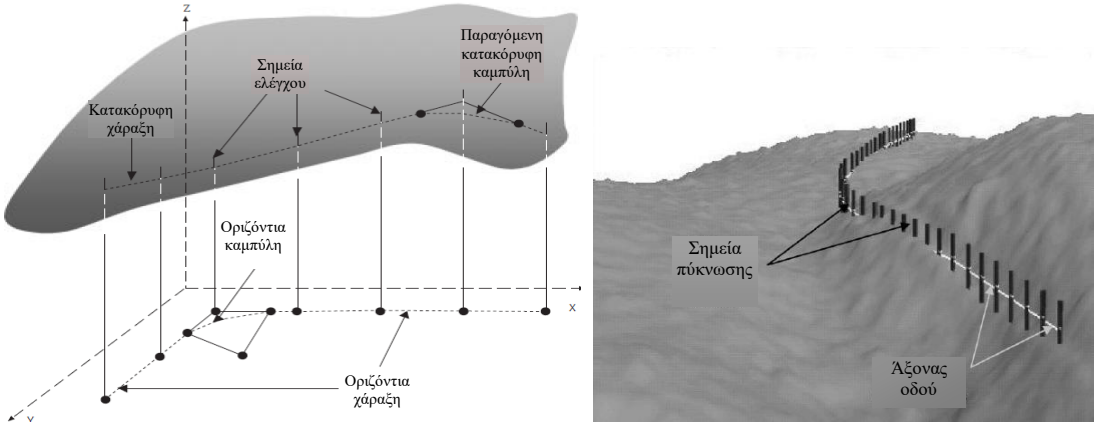
Σε έρευνα των Aruga, Sessions, & Akay (2005) έγινε σύγκριση ενός προτύπου γενετικών αλγορίθμων με ένα πρότυπο περιορισμένης αναζήτησης που χρησιμοποιήθηκαν για τη βελτιστοποίηση μιας αρχικής κατακόρυφης χάραξης δασικής οδού. Έχοντας, δεδομένη την οριζοντιογραφική χάραξη οι δύο αλγόριθμοι χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία εναλλακτικών κατακόρυφων χαράξεων τροποποιώντας τα υψόμετρα και τις χιλιομετρικές θέσεις των κορυφών της μηκοτομής. Η βελτιστοποίηση έγινε με βάση το κόστος κατασκευής και συντήρησης, ενώ γραμμικός προγραμματισμός χρησιμοποιήθηκε σε κάθε επίλυση για την εύρεση της βέλτιστης διανομής χωματισμών. Και οι δύο μεθευρετικές τεχνικές εντόπισαν λύσεις κοντά στο βέλτιστο σε λογικούς χρόνους. Βέβαια, η λύση χαμηλότερου κόστους ήταν αυτή που προέκυψε μέσω του προτύπου γενετικών αλγορίθμων αλλά η επίλυση με περιορισμένη αναζήτηση γινόταν σε μικρότερο χρόνο. Τελικώς, ο Aruga (2005), κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η περιορισμένη αναζήτηση προσαρμόζεται καλύτερα στο πρόβλημα βελτιστοποίησης των δασικών οδών.

7.3.8 Προσομοιωμένη ανόπτηση

Ο Akay (2003) ανέπτυξε ένα σύστημα για την τρισδιάστατη χάραξη δασικών οδών χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο προσομοιωμένης ανόπτησης για τη γρήγορη αξιολόγηση εναλλακτικών χαράξεων και την επιλογή της διαδρομής ελάχιστου κόστους. Με βάση μια ορισμένη από τον χρήστη οριζοντιογραφική χάραξη το σύστημα μπορεί να βελτιστοποιήσει την κατακόρυφη χάραξη. Τα στοιχεία κόστους αφορούν την κατασκευή, συντήρηση και τα κόστη μεταφοράς υπό τους

περιορισμούς του γεωμετρικού σχεδιασμού δασικών οδών, περιβαλλοντικών απαιτήσεων και οδικής ασφάλειας. Το πρότυπο αυτό δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άλλες κατηγορίες οδών καθώς οι παράμετροι σχεδιασμού δασικών οδών ορίζονται με διαφορετικό τρόπο (Akay, 2004). Επίσης, τα έργα δασικών οδών συνήθως περιλαμβάνουν συνήθως ένα μέγιστο κόστος κατασκευής, ενώ στα υπόλοιπα οδικά έργα λαμβάνονται υπ' όψιν και άλλοι κοινωνικοοικονομικοί παράγοντες. Στο σύστημα TRACER ο μελετητής ορίζει τις κορυφές μιας αρχικής χάραξης επί του τρισδιάστατου μοντέλου εδάφους ενώ στη συνέχεια το σύστημα παράγει εναλλακτικές χρησιμοποιώντας μια τοπική αναζήτηση και προσαρμόζοντας την κατακόρυφη χάραξη, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το κόστος κατασκευής.

Σχήμα 7.23: Παραγωγή αρχικής χάραξης και βελτιστοποιημένη κατακόρυφη χάραξη (Πηγή: Akay, 2003, Ιδία επεξεργασία)



Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης, εξετάζονται όλες οι τεχνικά εφικτές κατά μήκος κλίσεις των τμημάτων εντός των προκαθορισμένων υψομέτρων μέσω της μεθόδου της προσομοιωμένης ανόπτησης, η οποία εφαρμόζεται σχετικά εύκολα αφού καθοριστούν οι παράμετροι του αλγορίθμου. Για κάθε αλλαγή στην κατακόρυφη χάραξη, το σύστημα υπολογίζει τις διατομές, τους όγκους χωματισμών και την στερεοπαροχή ελαχιστοποιώντας το κόστος των χωματουργικών και μέσω γραμμικού προγραμματισμού καθορίζεται η βέλτιστη στρατηγική διανομής όπου το μοναδιαίο κόστος χωματουργικών θεωρείται σταθερό. Το σύστημα αυτό ουσιαστικά βελτιστοποιεί μόνο την κατακόρυφη χάραξη καθώς οι θέσεις των κορυφών της οριζοντιογραφικής χάραξης επιλέγονται από τον χρήστη, ενώ το σύστημα υπολογίζει τα υπόλοιπα αρχικά στοιχεία των χαράξεων βάσει των υπόλοιπων δεδομένων που έχει εισάγει ο χρήστης με να προειδοποιήσεις για πιθανή παραβίαση περιορισμών. Εφαρμογή του συστήματος έκαναν οι Akay & Sessions (2005).

7.3.9 Κριτική θεώρηση βελτιστοποίησης κατακόρυφης χάραξης

Τα συστήματα που περιγράφτηκαν αντιμετωπίζουν ξεχωριστά τον υπολογισμό της μονάδας κόστους χωματουργικών σε κάθε σημείο πύκνωσης, αφού έχει οριστεί μια αρχική μηκοτομή, χρησιμοποιώντας ένα τυποποιημένο αλγόριθμο μεταφοράς. Το μοναδιαίο κόστος χωματουργικών που προκύπτει από αυτό το ξεχωριστό υποπρόγραμμα εισάγεται στη συνέχεια στην επόμενη επανάληψη του κύριου προγράμματος κατακόρυφης βελτιστοποίησης.

Όπως όλα τα προγράμματα βελτιστοποίησης, ειδικά αυτά που λειτουργούν σε αρκετά λεπτομερές επίπεδο, υπάρχουν πολλά περιθώρια ελέγχου της ευαισθησίας της χάραξης που προκύπτει, ως προς ενδεχόμενες αλλαγές στις τιμές που απαρτίζουν τα δεδομένα εισόδου. Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι όλα τα πρότυπα βελτιστοποίησης της κατακόρυφης χάραξης βασίζονται σε μια προκαθορισμένη οριζοντιογραφική χάραξη και για το λόγο αυτό δεν αποτελούν παρά τοπικά βέλτιστες λύσεις του γενικότερου προβλήματος βελτιστοποίησης της χάραξης.

7.4 Βελτιστοποίηση οριζοντιογραφικής χάραξης

Τα πρότυπα για τη βελτιστοποίηση της χάραξης κατά την οριζοντιογραφία είναι περισσότερο πολύπλοκα και απαιτούν μεγαλύτερο πλήθος δεδομένων σε σχέση με τα αντίστοιχα πρότυπα βελτιστοποίησης της κατακόρυφης χάραξης (OECD, 1973). Οι βασικοί λόγοι βρίσκονται στο γεγονός πως ο καθορισμός της οριζοντιογραφική χάραξη αφορά περισσότερο κοινωνικοοικονομικούς περιβαλλοντικούς και πολιτικούς παράγοντες, ενώ το κόστος που σχετίζεται με την οριζοντιογραφική χάραξη επηρεάζεται και από την κατακόρυφη χάραξη. Παρ' όλα αυτά, η μείωση του γενικότερου συνολικού κόστους που μπορεί να επέλθει με τη βελτιστοποίηση της οριζοντιογραφικής χάραξης είναι κατά πολύ μεγαλύτερη, καθώς τα σημαντικότερα στοιχεία κόστους, όπως το κόστος γης, το κατασκευαστικό κόστος και το κοινωνικό και περιβαλλοντικό κόστος μεταβάλλονται αισθητά ως προς τη διαμόρφωση της χάραξης κατά την οριζοντιογραφία.

Πίνακας 7.2: Έρευνα στη βελτιστοποίηση οριζοντιογραφικών χαράξεων

Προσέγγιση	**Βιβλιογραφικές Αναφορές**
Δικτυακή βελτιστοποίηση	Roberts (1957), Gladding (1964), Turner (1968)(1969e)(1978), Turner & Miles (1970) (1971), OECD (1973), Athanassoulis & Calogero (1973), Craine & Heatherington (1974)
Λογισμός μεταβολών	Howard, Bramnick, & Shaw (1968), Shaw & Howard (1981) (1982), Thomson & Sykes (1988)
Μικτός ακέραιος προγραμματισμός	Easa & Mehmood (2007) (2008)
Τοπική ευρετική αναζήτηση με ακέραιο προγραμματισμό	Lee, Tsou, & Liu (2009)

Η πρόοδος στην ανάπτυξη προτύπων για τη βελτιστοποίησης οριζοντιογραφικής χάραξης εξελίσσεται αργά και ο αριθμός τους είναι σχετικά μικρός. Στην υπάρχουσα βιβλιογραφία συναντώνται δύο βασικές προσεγγίσεις που περιλαμβάνουν η δικτυακή βελτιστοποίηση, ο λογισμός μεταβολών ενώ έχουν αναπτυχθεί και πρότυπα που περιλαμβάνουν μικτό ακέραιο προγραμματισμό, ο οποίος στη μία περίπτωση συνδυάζεται με μια τοπική ευρετική μέθοδο αναζήτησης. Οι προσεγγίσεις αυτές περιγράφονται στις επόμενες υποενότητες.

7.4.1 Δικτυακή βελτιστοποίηση για την οριζοντιογραφία

Η βασική ιδέα αυτής της προσέγγισης είναι η διατύπωση της βελτιστοποίησης της οριζοντιογραφικής χάραξης ως ένα πρόβλημα δικτύου, στο οποίο η χάραξη αναπαρίσταται από τα τόξα που συνδέουν το σημείο αρχής με το σημείο τέλους. Η επίλυση του προβλήματος γίνεται με τη βοήθεια ορισμένων ανεπτυγμένων τεχνικών δικτυακής βελτιστοποίησης, όπως ο αλγόριθμος εύρεσης της συντομότερης διαδρομής ή αλγόριθμος του Dijkstra. Μελέτες που αναπτύχθηκαν αρχικά στο MIT και στο UM ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία (OECD, 1973). Πρέπει να αναφερθεί ότι σε κανένα από τα παρακάτω πρότυπα δεν λήφθηκε υπ' όψιν η μηκοτομή, αν και το σύστημα GCARS περιλαμβάνει το κόστος των χωματουργικών.

7.4.1.1 Το πρότυπο του Roberts

Ο Roberts (1957) ανέπτυξε ένα σύστημα που με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή συνδύαζε φωτογραμμετρικές μεθόδους και τεχνικές ανάλυσης αεροφωτογραφιών για την επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης θέσης της οδού. Καθώς το πρόβλημα γινόταν ολοένα και πιο περίπλοκο, πρότεινε τον διαχωρισμό του κόστους της οδού σε στοιχεία που επηρεάζουν τη θέση και ανέλυσε αυτά τα στοιχεία ξεχωριστά. Ορισμένα από τα στοιχεία κόστους που θεωρήθηκαν σημαντικά ήταν το κόστος γης, χωματουργικών, ο κυκλοφοριακός σχεδιασμός, καθώς και εδαφικά και υδρολογικά

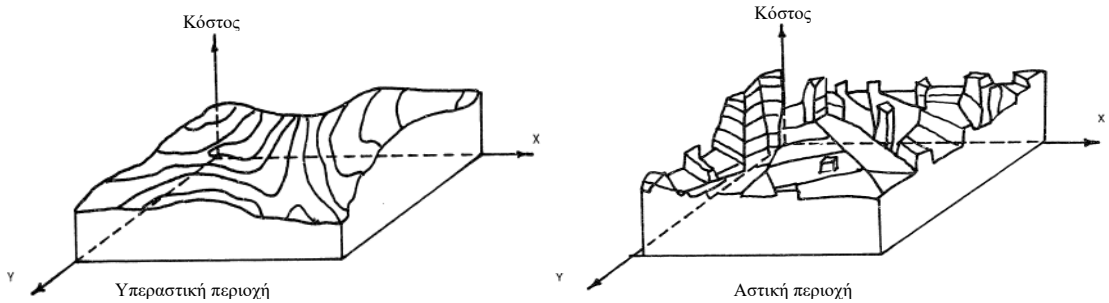
στοιχεία. Για κάθε στοιχείου κόστους, το σύστημα παρήγαγε ένα σύνολο κανονικοποιημένων χαρτογραφικών υποβάθρων με κατάλληλο μέγεθος φατνίων, τα οποία μετέτρεπε σε χάρτες που απεικόνιζαν το κόστος με οριογραμμές ίσου κόστους. Το συνολικό κόστος μεταξύ δύο δεδομένων θέσεων υπολογιζόταν βάση της περιοχής από την οποία διερχόταν η γραμμή που συνέδεε τα δύο σημεία. Η βέλτιστη λύση ήταν η διαδρομή ελάχιστου κόστους μέσα από αυτό το πρότυπο.

Για την επίλυση σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο, οι υπολογισμοί χωματισμών γίνονταν από την αριθμητική διαφορά του υψομέτρου κάθε φατνίου από το μέσο υψόμετρο του μοντέλου εδάφους. Θετική διαφορά αφορούσε εκσκαφή, ενώ αρνητική επίχωμα. Αυτό το πρότυπο χρησιμοποιώντας ένα απλοποιημένο πρότυπο κόστους, υστερούσε σε περιοχές έντονου αναγλύφου αφού το κόστος εξαρτάται και από την κατεύθυνση της χάραξης. Η διαδρομή ελάχιστου κόστους πρέπει να υπολογιστεί λαμβάνοντας υπ' όψιν όχι μόνον το κόστος που έχει η διέλευση της οδού από ένα σημείο του μοντέλου εδάφους αλλά και η κατεύθυνσή της. Για τον λόγο αυτόν, το πρότυπο μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε πρώιμα στάδια της διαδικασίας επιλογής οδικού διαδρόμου. Παρ' όλα αυτά, το πρότυπο αποτέλεσε μάλλον την πρώτη σημαντική προσπάθεια για την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής με ελάχιστο κόστος χρησιμοποιώντας σύστημα ηλεκτρονικού υπολογιστή.

7.4.1.2 Το σύστημα TAS

Ο Gladding (1964) σε εργασία του στο MIT πρότεινε έναν συνδυασμό υπολογισμού χωματουργικών με τεχνικές ελάχιστης διαδρομής και ανέπτυξε το σύστημα TAS. Αυτό αποτελούσε μια επέκταση του προτύπου του Roberts (1957), με τη διαφορά ότι το κόστος διέλευσης της χάραξης σε κάθε σημείου του εδάφους βασιζόταν τόσο στο κόστος, όσο και στην κατεύθυνση της χάραξης. Ιδανική θεωρείτο η περίπτωση σχετικά επίπεδων υπεραστικών περιοχών όπου η επιφάνεια κόστους είναι ομαλή. Το πρότυπο αρχικά παρήγαγε ένα μοντέλο εδάφους χρησιμοποιώντας ένα πλέγμα τετραγωνικών φατνίων.

Σχήμα 7.24: Επιφάνειες κόστους σε υπεραστικές και αστικές περιοχές (Πηγή: Gladding, 1964)



Στη συνέχεια γινόταν ομαλοποίηση του μοντέλου εδάφους κατά τέσσερις κατευθύνσεις λαμβάνοντας υπ' όψιν εκτός του προς ομαλοποίηση φατνίου και άλλα τρία φατνία προς κάθε μία από τις τέσσερις κατευθύνσεις. Το πρότυπο αυτό αναπτύχθηκε για την υποβοήθηση των σχεδιαστών αναζητώντας και παράγοντας εναλλακτικές χαράξεις αυτόματα. Ένας σημαντικός περιορισμός του προτύπου αφορούσε το γεγονός ότι οι απαιτήσεις μέγιστης κλίσης δεν λαμβάνονταν υπ' όψιν άμεσα κατά την ανάπτυξη του ομαλοποιημένου μοντέλου εδάφους. Ακόμη και έτσι όμως, το TAS ήταν το πρώτο πρότυπο που συνδύαζε υπολογισμούς εκσκαφών και επιχωμάτων με μια τεχνική ελάχιστου μήκους διαδρομής.

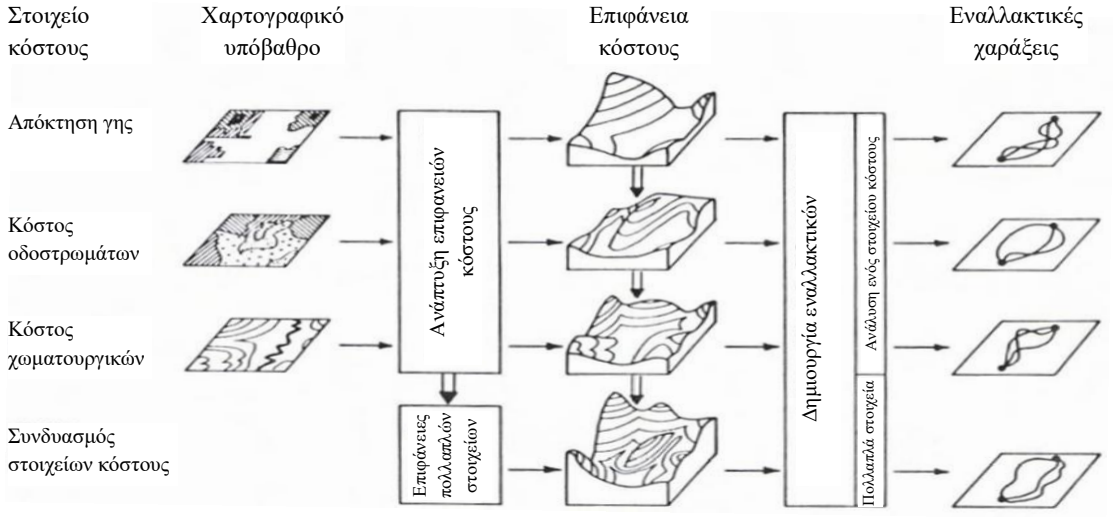
7.4.1.3 Το σύστημα GCARS

Το σύστημα GCARS αναπτύχθηκε αρχικά από τον Turner (1968) στο PU με στόχο την παραγωγή μιας σειράς βαθμολογημένων εναλλακτικών χρησιμοποιώντας τεχνικές ανάλυσης ελάχιστης διαδρομής. Το πρότυπο περιλαμβάνει τρεις κύριες διαδικασίες που αποτελούνται από την προετοιμασία των δεδομένων, την αναζήτηση εναλλακτικών χαράξεων και την επιλογή εκείνης με το μικρότερο κόστος. Οι εναλλακτικές χαράξεις καθορίζονται βάσει φυσικών και κοινωνικοοικονομικών περιορισμών. Υπάρχουν δύο σύνολα στοιχείων κόστους που επηρέαζαν την θέση της χάραξης. Τα στοιχεία που είναι

ανεξάρτητα από τη διαδρομή και αφορούν την τοπογραφία, το έδαφος, τη γεωλογία και τις χρήσεις γης και εκείνα που εξαρτώνται από την διαδρομή παράγοντες και περιλαμβάνουν το κόστος χρηστών, κοινωνικοοικονομικούς παράγοντες και την αισθητική της οδού. Αρχικά δημιουργείται μια σειρά προκαταρκτικών εναλλακτικών χαράξεων χρησιμοποιώντας το πρώτο σύνολο στοιχείων κόστους, ενώ στη συνέχεια χρησιμοποιείται το δεύτερο σύνολο στοιχείων για την τροποποίηση των προκαταρκτικών χαράξεων και τη δημιουργία των τελικών εναλλακτικών.

Για κάθε στοιχείο κόστους, τα δεδομένα συλλέγονται και μετατρέπονται σε μορφή συμβατή με το υπολογιστικό σύστημα. Το πρότυπο χρησιμοποιεί τοπογραφικούς χάρτες, εδαφοτεχνικούς χάρτες και αεροφωτογραφίες για τη μέτρηση των παραγόντων κόστους χωματουργικών, επιφάνειας και δεδομένων χρήσεων γης. Μια λεία επιφάνεια δημιουργείται για κάθε παράγοντα κόστους, ενώ μια τιμή εκχωρείται σε κάθε πλέγμα αναζήτησης χρησιμοποιώντας παλινδρόμηση. Το πρότυπο στη συνέχεια παράγει μια αθροιστική επιφάνεια όλων των παραγόντων. Χρησιμοποιώντας τεχνικές ελάχιστης διαδρομής μια σειρά εναλλακτικών παράγεται αυτόματα, ενώ η τελική επιλογή γίνεται από τον χρήστη. Στα δεδομένα εξόδου περιλαμβάνονται τα διαγράμματα των επιφανειών κόστους για κάθε παράγοντα.

Σχήμα 7.25: Βασικά στοιχεία του συστήματος GCARS
(Πηγή: Turner, 1978)



Το σύστημα GCARS θεωρεί την καλύτερη διαδρομή αυτήν που έχει το ελάχιστο μήκος ενώ οι κατά μήκος κλίσεις δεν ικανοποιούσαν τις απαιτήσεις του σχεδιασμού. Η κατεύθυνση της χάραξης καθορίζεται από την κλίση του εδάφους χωρίς να λαμβάνεται υπ' όψιν το τελικό κόστος κατασκευής. Άλλα στοιχεία κόστους, όπως αυτά της συντήρησης και λειτουργίας δε λαμβάνονται υπ' όψιν. Το συνολικό κόστος προκύπτει τελικά από το άθροισμα ενός γραμμικού συνδυασμού των διάφορων στοιχείων κόστους με σχετικά βάρη. Τελικά σχηματίζεται ένα πλεγματικό δίκτυο από τον πίνακα προτύπων κόστους ενώνοντας όλα τα σημεία και εκχωρώντας σε κάθε σύνδεση το κόστος διάσχισης του φατνίου. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την ανάπτυξη του συστήματος μπορούν να βρεθούν στους Turner & Miles (1970) (1971) και στα εγχειρίδια χρήσης και ανάπτυξης του συστήματος που συνέταξε ο Turner (1969a) (1969b) (1969c) (1969d).Λόγω ορισμένων προφανών ελαττωμάτων της αρχικής έκδοσης, το σύστημα GCARS βελτιώθηκε από τον Turner (1969e) επιτρέποντας κινήσεις κατά τις διαγώνιες του πίνακα του δικτύου, τροποποιώντας τα δικτυακά πλέγματα και ενσωματώνοντας περιβαλλοντικές επιπτώσεις στο πρότυπο(Turner, 1978).

7.4.1.4 Το πρότυπο των Athanassoulis & Calogero

Οι Athanassoulis & Calogero (1973) εργαζόμενοι στο UCL χρησιμοποίησαν επίσης τεχνικές δικτυακής βελτιστοποίησης για την προσέγγιση του προβλήματος της βέλτιστης διαδρομής. Αντίθετα

με το σύστημα GCARS, όπου το κόστος κάθε σύνδεσης υπολογίζεται από το μέσο όρο του εκχωρημένου κόστους των σημείων των δύο άκρων, ορίστηκαν γραμμές κόστους, όπως ποταμοί και γέφυρες, και περιοχές κόστους, όπως λίμνες και υγροτόπους, ως βάση υπολογισμού του κόστους κάθε σύνδεσης. Στη συνέχεια το κόστος μεταξύ οποιουδήποτε ζεύγους σημείων υπολογίζεται από το άθροισμα των γινομένων του μήκους εντός μιας συγκεκριμένης περιοχής και της μονάδας κόστους. Το πρότυπο αυτό υπολογίζει το κόστος των συνδέσεων με τρόπο σαφή και ακριβή.

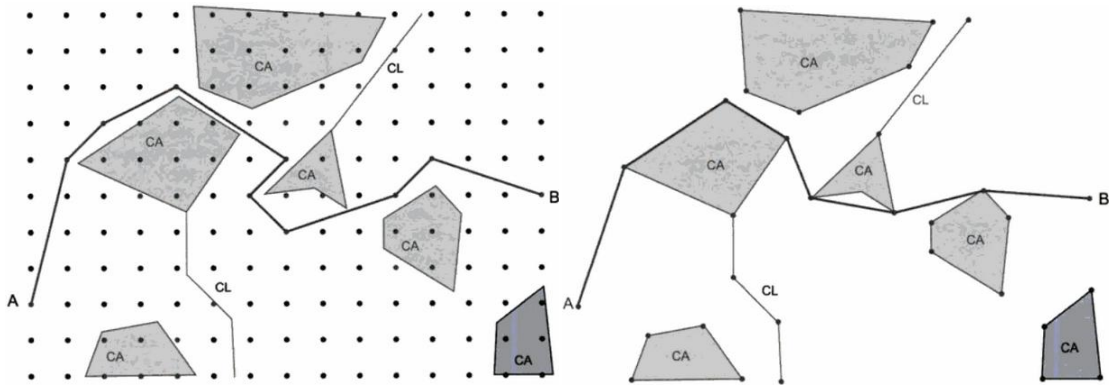
Για την εύρεση της βέλτιστης θέσης της διαδρομής, αντί να χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος εύρεσης της συντομότερης διαδρομής το πρόβλημα διατυπώθηκε ως τροποποιημένο πρόβλημα μεταφοράς, όπου μια μονάδα αγαθών πρέπει να μεταφερθεί από το σημείο αρχής στο σημείο τέλους. Στην πραγματικότητα αυτό αποτελεί το πρόβλημα μεταφόρτωσης ή γενικευμένο πρόβλημα ροής δικτύου. Όλα τα σημεία στο δίκτυο που προκύπτει θεωρούνται ως πιθανά σημεία αρχής ή προορισμού, έτσι ώστε η βέλτιστη διαδρομή να μπορεί να κινηθεί προς οποιαδήποτε κατεύθυνση προκειμένου να ενώσει δύο σημεία χωρίς να διέρχεται από άλλα σημεία. Το πρότυπο αυτό απαιτούσε μεγαλύτερους χρόνους επίλυσης για το ίδιο δίκτυο σε σχέση με το σύστημα GCARS, ενώ χρειάζεται και μεγαλύτερος αποθηκευτικός χώρος λόγω του ενσωματωμένου πίνακα κόστους.

Σε δημοσίευση των Athanassoulis & Calogero (1973) έγινε περιγραφή ενός προγράμματος εύρεσης της βέλτιστης διαδρομής μέσω ενός τετραγωνικού πλεγματικού δικτύου. Το πρότυπο αρχικά δημιουργεί έναν πίνακα του κόστους μετακίνησης από κάθε σημείο του τετραγωνικού πλεγματικού δικτύου προς όλα τα υπόλοιπα σημεία. Στη συνέχεια, γίνεται εύρεση της διαδρομής ελάχιστου κόστους από το σημείο αρχής στο σημείο τέλους χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο του τροποποιημένου προβλήματος μεταφοράς. Το πρότυπο παρουσιάζει τη βέλτιστη διαδρομή ως ένα σύνολο συνδετήριων τμημάτων μεταξύ των σημείων του πλεγματικού δικτύου. Η προσέγγιση αυτή δε λαμβάνει υπ' όψιν τις επιδράσεις διασταυρώσεων, οι οποίες έχουν την τάση ουσιαστικά να έλκουν την χάραξη πλευρικά προς την κατεύθυνση της μεγαλύτερης ζήτησης για κυκλοφορία. Επίσης, η χρήση του τροποποιημένου προβλήματος μεταφοράς ως αλγόριθμος επίλυσης είναι αρκετά περιοριστική λόγω των υψηλών υπολογιστικών απαιτήσεων. Δεν είναι ξεκάθαρο αν το πρότυπο αυτό έχει χρησιμοποιηθεί ποτέ σε κάποια πρακτική εφαρμογή, αλλά σίγουρα αποτέλεσε ένα σημαντικό βήμα προς την ανάπτυξη του προγράμματος BRUTUS του συστήματος HOPS.

7.4.1.5 Το πρότυπο των Craine & Heatherington

Οι Craine & Heatherington (1974) ανέπτυξαν περαιτέρω το πρότυπο των Athanassoulis & Calogero (1973) και πρότειναν μια σειρά βελτιώσεων. Αρχικά, από τον τρόπο που το πρόβλημα είχε δομηθεί, έγινε αντιληπτό ότι η μόνη λογική θέση για αλλαγή κατεύθυνσης της χάραξης ήταν το όριο μιας περιοχής κόστους (CA) ή μια γραμμή κόστους (CL). Για το λόγο αυτό το τετραγωνικό πλέγμα αντικαταστάθηκε από τα σημεία ορισμού των περιοχών και γραμμών κόστους, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

Σχήμα 7.26: Προσέγγιση των Athanassoulis & Calogero και των Craine & Heatherington (Πηγή: Gallagher, 2002, Ιδία επεξεργασία)



Στη συνέχεια δημιουργούνται τμήματα που συνδέουν δύο σημεία επί των γραμμών ή των περιοχών κόστους χωρίς να τέμνουν κάποια άλλη γραμμή ή περιοχή κόστους. Αυτό σημαίνει ότι δημιουργούνται πολύ λιγότερα εφικτά τμήματα σύνδεσης από ότι στο πρότυπο που αναπτύχθηκε στο UCL. Επίσης, ο υπολογισμός της μονάδας κόστους των εφικτών συνδέσεων είναι απλοποιημένο, καθώς δεν εμπλέκεται σε καμία περίπτωση περισσότερες από μία περιοχές κόστους και μία γραμμή κόστους. Ως προς τον μηχανισμό επίλυσης, οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν έναν δενδροειδή αλγόριθμο όπως αυτοί που χρησιμοποιούνται για την εύρεση της συντομότερης διαδρομής εντός ενός οδικού δικτύου. Αυτή η προσέγγιση αντιμετώπισε τους περιορισμούς που έθετε το μέγεθος του προβλήματος.

Το πρότυπο είχε και άλλα πλεονεκτήματα. Οι γραμμές μεταβλητού κόστους έδωσαν στους χρήστες την δυνατότητα να αντιμετωπίσουν τις επιπτώσεις της στρέφουσας κυκλοφορίας σε ενδιάμεσους κόμβους. Τέλος, δόθηκε η δυνατότητα πρόβλεψης κόμβων μεταξύ νέων οδών.

7.4.1.6 Το πρόγραμμα BRUTUS

Το πρόγραμμα BRUTUS, το οποίο αποτελεί τμήμα του συστήματος βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων HOPS, που αναπτύχθηκε από το TRRL και αφορά το στάδιο της προκαταρκτικής οδικής χάραξης. Η έρευνα του συστήματος αυτού ξεκίνησε το 1967 και ενώ ήταν εξ αρχής πρόθεση να συμπεριληφθεί ένα πρόγραμμα επιλογής διαδρομής σε ευρεία ζώνη, αυτό δεν έγινε για περισσότερο από μια δεκαετία. Το πρόγραμμα αυτό είναι το μόνο στο σύστημα HOPS, το οποίο παρουσιάζει την χάραξη ως μια σειρά συνδεδεμένων ευθυγράμμων τμημάτων αντί της συμβατικής καμπυλόγραμμης χάραξης.

Το πρόγραμμα βασίστηκε στη προϋπάρχουσα εργασία των Athanassoulis & Calogero (1973) αλλά προστέθηκε ένα πλήθος από ενδιαφέρουσες αλλαγές. Ο χρήστης έπρεπε να ορίσει το βασικό κόστος ανά μονάδα μήκους της οδού, το οποίο μπορούσε να εμπεριέχει κόστη ταξιδίου και ένα ποσό συντήρησης. Επιπρόσθετα κόστη έπρεπε να αναπαρασταθούν από περιοχές κόστους, γραμμές κόστους και σημεία κόστους. Όπως στην περίπτωση του προγράμματος των Craine & Heatherington (1974), η μεταβλητού κόστους γραμμική εγκατάσταση έδινε την ευκαιρία στο χρήστη να αξιολογήσει την επίπτωση των ενδιάμεσων διασταυρώσεων στην βέλτιστη χάραξη. Το πρόγραμμα ήταν φανερά μια βελτίωση του προκατόχου του και αντιμετωπίζει αποτελεσματικά διασταυρώσεις και οδούς που συνδέονται. Παρ' όλα αυτά η επιλογή της διατήρησης ενός ανεξάρτητου καννάβου για τον ορισμό της βέλτιστης χάραξης είναι προβληματική σε σχέση με την προσέγγιση που υιοθετήθηκε από τους Craine & Heatherington (1974) η οποία φαίνεται ανώτερη.

7.4.2 Λογισμός μεταβολών

Ο λογισμός μεταβολών έχει αναπτυχθεί για την ποσοτικοποίηση της διαδικασίας βελτιστοποίησης για ένα ορισμένο είδος προβλημάτων βελτιστοποίησης. Οι πολλές εφαρμογές που έχουν γίνει έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη της θεωρίας βέλτιστου ελέγχου. Το βασικό πρόβλημα στον λογισμό μεταβολών είναι η αναζήτηση μιας καμπύλης που συνδέει δύο σημεία στον χώρο, η οποία ελαχιστοποιεί το ολοκλήρωμα μιας συνάρτησης. Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων είναι σε κάποιο βαθμό παρόμοιο με το τυπικό πρόβλημα λογισμού μεταβολών. Οι Howard, Bramnick, & Shaw (1968) χρησιμοποίησαν τον λογισμό μεταβολών δημιουργώντας την αρχή βέλτιστης καμπυλότητας μιας οριζοντιογραφικής χάραξης. Μια παρόμοια εφαρμογή λογισμού μεταβολών στις μεταφορές έχουν κάνει οι Thomson & Sykes (1988), όπου μια θαλάσσια διαδρομή βελτιστοποιείται διαμέσου ενός δυναμικού πεδίου πάγου.

7.4.2.1 Το πρότυπο OCP

Η βασική προσέγγιση της αρχής βέλτιστης καμπυλότητας OCP είναι η υπόθεση της ύπαρξης μιας συνάρτησης κριτηρίου που ορίζεται εντός μιας περιοχής μεταξύ δύο σημείων όπου σχεδιάζεται η κατασκευή μιας οδού. Με άλλα λόγια, γίνεται η υπόθεση ότι υπάρχει μια συνεχής επιφάνεια κόστους

πάνω από την περιοχή μελέτης. Το πρότυπο στη συνέχεια παράγει μια χάραξη η οποία ακολουθεί τις περιοχές χαμηλού κόστους και αποφεύγει τις περιοχές υψηλού κόστους ώστε να συνδέσει τα δύο σημεία.

Σύμφωνα με την αρχή βέλτιστης καμπυλότητας, η καμπυλότητα της βέλτιστης οδού σε κάθε σημείο είναι ίση με τη λογαριθμική παράγωγο κατεύθυνσης της συνάρτησης κριτηρίου, δηλαδή της τοπικής συνάρτησης κόστους που είναι κάθετη στην οδό. Τα κριτήρια περιλαμβάνουν εκσκαφές και επιχωματώσεις, απαλλοτριώσεις, κόστος κατασκευής, κόστος συντήρησης και κόστος χρηστών. Κάθε κριτήριο αποτελούσε και ξεχωριστή συνάρτηση η οποία καθοριζόταν από μια τεχνική παρεμβολής δικυβικής spline .Κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης αρκετές χαράξεις ξεκινούν από το σημείο αρχής ακολουθώντας διαφορετικές κατευθύνσεις. Αυτές οι χαράξεις λαμβάνονται μέσω αριθμητικής ολοκλήρωσης της OCP για κάθε αρχική γωνία και επιλέγοντας τις διαδρομές που τερματίζουν στο σημείο τέλους . Βέλτιστη θεωρείται η καλύτερη από αυτό το διακριτό σύνολο.

Οι Shaw & Howard (1981) πρότειναν δύο μεθόδους αριθμητικής ολοκλήρωσης για την εφαρμογή της αρχής βέλτιστης καμπυλότητας. Η πρώτη είναι η ολοκλήρωση της συνάρτησης κριτηρίου κατά μήκος μιας σειράς κυκλικών τόξων που συνδέονται μεταξύ τους. Η άλλη χρησιμοποιεί ανάπτυξη σε σειρές Taylor τρίτου βαθμού για την προσέγγιση της διαδρομής. Χρησιμοποιήθηκες ένα παράδειγμα για τον έλεγχο της απόδοσης των δύο μεθόδων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η δεύτερη μέθοδος υπερέχει της πρώτης. Οι Shaw & Howard (1982) εφήρμοσαν την αρχή βέλτιστης καμπυλότητας για την εύρεση της βέλτιστης χάραξης σε μια μελέτη περίπτωσης αυτοκινητοδρόμου σε σχετικά επίπεδο έδαφος, όπου και έδειξαν πως γίνεται εξοικονόμηση σχεδόν 5% του κόστους σε σύγκριση με την επιλογή μιας ευθύγραμμης χάραξης αυξάνοντας το μήκος της μόνο με μια μικρή αύξηση του μήκους της χάραξης κατά 0,5%.

Παρ' όλο που οι Howard, Bramnick, & Shaw (1968) υποστήριξαν ότι ο καθορισμός μια τοπικής συνάρτησης κόστους δεν αποτελεί αδυναμία της OCP, εντούτοις φαίνεται πως αποτελεί σημαντικό πρόβλημα της εφαρμογής της OCP. Πρακτικά, οι συγγραφείς πρότειναν την παρεμβολή δικυβικής spline επί αρκετών διακριτών σημείων προκειμένου να δημιουργηθεί μια συνεχής ομαλοποιημένη επιφάνεια της τοπικής συνάρτησης κόστους. Βέβαια, η συνάρτηση αυτή μπορεί να μην είναι συνεχής αφού τουλάχιστον το κόστος απαλλοτριώσεων δεν είναι συνεχές μεταξύ διαφορετικών ζωνών. Συνεπώς, χρειάζεται περισσότερη επεξεργασία αφού εκτός των άλλων με τη συνάρτηση αυτή υπονοείται ότι το κόστος της οδού σε κάθε σημείο είναι καθορισμένο, γεγονός που δεν ανταποκρίνεται πολύ στην πραγματικότητα. Όπως διαπιστώθηκε στο δεύτερο κεφάλαιο το κόστος μιας οδού αποτελείται από διάφορα στοιχεία, ενώ φαίνεται πως υπάρχουν κάποιες απλουστεύσεις και παραδοχές πίσω από τον καθορισμό της τοπικής συνάρτησης κόστους. Παρά τα παραπάνω μειονεκτήματα, η βέλτιστη χάραξη που προκύπτει από την αρχή βέλτιστης καμπυλότητας είναι συνεχής και εξασφαλίζεται το ολικό βέλτιστο υπό τις συνθήκες και παραδοχές που έχουν γίνει.

7.4.3 Μικτός ακέραιος προγραμματισμός για την οριζοντιογραφία

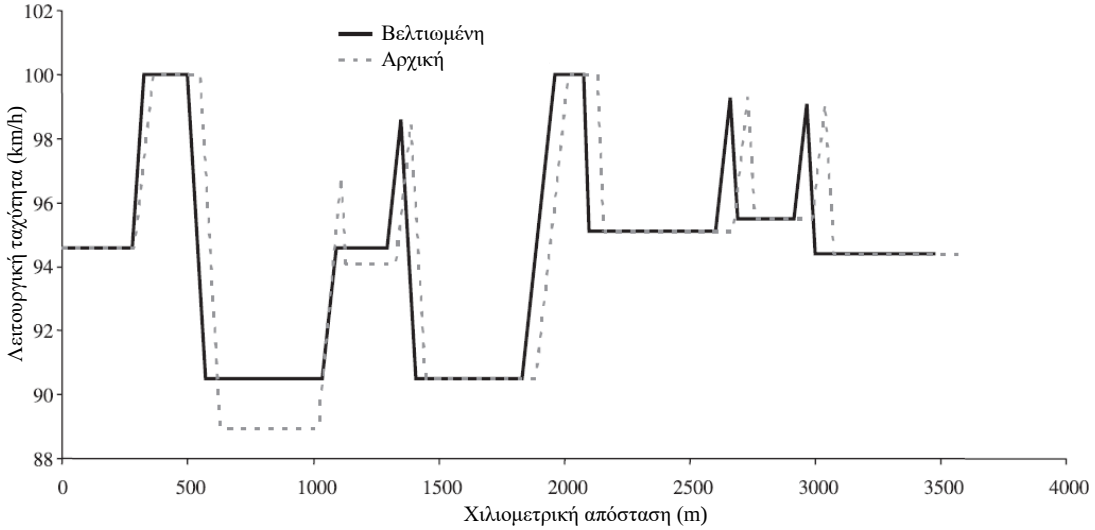
Ο μικτός ακέραιος μη γραμμικός προγραμματισμός αναφέρεται στο είδος του μαθηματικού προγραμματισμού με συνεχείς και διακριτές μεταβλητές και μη γραμμικότητες στη συνάρτηση στόχου και στους περιορισμούς.

Ένα τέτοιο πρότυπο αναπτύχθηκε από τους Easa & Mehmood (2007) (2008). Σε αντίθεση με τα υπόλοιπα πρότυπα βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων που εστιάζονται στην ελαχιστοποίηση του κόστους, σε αυτό το πρότυπο στόχο αποτελεί η μεγιστοποίηση της οδικής ασφάλειας. Η μέθοδος αυτή δεν σχεδιάστηκε μόνο για την θεώρηση της ασφάλειας μέσω των περιορισμών που είχαν και άλλες παραδοσιακές μέθοδοι, αλλά αντιθέτως συμπεριλήφθηκε και η εμπειρία πραγματικών οδικών ατυχημάτων. Οι συγγραφείς ανέφεραν ότι οι συγκρούσεις στις οριζοντιογραφικές καμπύλες αποτελούσαν σημαντικό πρόβλημα ασφάλειας. Συγκεκριμένα, ανέφεραν ότι η εμπειρία έχει δείξει πως η συχνότητα συγκρούσεων στα καμπύλα τμήματα είναι τρεις φορές μεγαλύτερη από τις ευθυγραμμίες.

Στην έρευνα, υπολογίστηκε η ετήσια συχνότητα σύγκρουσης στις οριζοντιογραφικές καμπύλες με βάση την ακτίνα και το μήκος των εφαπτόμενων. Έγινε, επίσης, φανερό ότι όταν το εφαπτόμενο μήκος υπερβαίνει μια τιμή μπορεί να αυξηθεί η πιθανότητα σύγκρουσης στην επερχόμενη καμπύλη. Για τον λόγο αυτόν, προτάθηκε ο συντελεστής μεταβολής συγκρούσεων CMF για την προσαρμογή της συχνότητας συγκρούσεων ώστε να αναπαριστά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οδού με πιο ακριβή τρόπο.. Οι μεταβλητές απόφασης του προτύπου περιελάμβαναν τις θέσεις των κορυφών της πολυγωνικής, τις ακτίνες και τα μήκη κυκλικών τόξων και τόξων συναρμογής, επικλίσεις, μήκη ευθυγραμμιών και πλάτη λωρίδων και ερεισμάτων. Το πρότυπο διατυπώθηκε ώστε να βρίσκει τις τιμές που μεγιστοποιούν την ασφάλεια, ελαχιστοποιώντας τη πιθανότητα συγκρούσεων με βάση γεωμετρικούς, λειτουργικούς και φυσικούς περιορισμούς. Το πρότυπο διατυπώθηκε ως ένα πρόβλημα μη γραμμικού ακέραιου προγραμματισμού και επιλύθηκε από το πακέτο λογισμικού LINGO για την εύρεση μιας ολικής βέλτιστης λύσης

Το πρότυπο λειτουργεί ικανοποιητικά για τη βελτιστοποίηση των στοιχείων σχεδιασμού της οριζοντιογραφικής χάραξης. Όμως, η ικανότητα του προτύπου για βελτιστοποίηση μια πραγματικής χάραξης είναι αρκετά περιορισμένη. Αρχικά, ο αριθμός των κορυφών της πολυγωνικής αποτελεί δεδομένου εισόδου, ενώ κανονικά απαιτείται μια ελεύθερη αναζήτηση ανεξάρτητη από τον αριθμό των κορυφών για την εύρεση μιας βέλτιστης λύσης. Ακόμη, η συνάρτηση στόχου συσχετίζεται μόνο με τις βέλτιστες διαστάσεις των στοιχείων σχεδιασμού ως προς τη συχνότητα συγκρούσεων χωρίς να λαμβάνονται υπ' όψιν άλλα στοιχεία κόστους, όπως το κόστος κατασκευής. Επίσης, το πρότυπο δεν έλαβε υπ' όψιν το ενδεχόμενο χαράξεων με οπισθόδρομα τμήματα, ενώ δεν δόθηκαν πληροφορίες σχετικά με τη λειτουργία του συστήματος LINGO. Τέλος, δεν λήφθηκαν υπ' όψιν οι επιπτώσεις που έχουν τα στοιχεία σχεδιασμού της κατακόρυφης χάραξης στη συχνότητα συγκρούσεων. Για αυτούς τους λόγους, το πρότυπο είναι περισσότερο χρήσιμο για την αξιολόγηση μιας ήδη βελτιστοποιημένης ως προς το κόστος χάραξης, παρά για την χρησιμοποίηση της ασφάλειας ως μοναδικό στόχο της βελτιστοποίησης.

Σχήμα 7.27: Σύγκριση ταχυτήτων κατά μήκος της χάραξης πριν και μετά τη βελτιστοποίηση (Πηγή: Easa & Mehmood, 2008)



7.4.4 Τοπική αναζήτηση με ακέραιο προγραμματισμό για την οριζοντιογραφία

Οι Lee, Tsou, & Liu (2009) ανέπτυξαν μια μέθοδο σχεδιασμού δύο σταδίων για την επίλυση του προβλήματος της βελτιστοποίησης της χάραξης κατά την οριζοντιογραφία. Αρχικά, με μια προσέγγιση ευρετικής αναζήτησης γειτονιάς γίνεται επιλογή μιας ικανοποιητικής οριζοντιογραφικής χάραξης ευθυγράμμων τμημάτων (Lee & Liu, 2006), ενώ σε δεύτερη φάση γίνονταν προσαρμογές στην χάραξη, έτσι ώστε να ικανοποιούνται ορισμένες απαιτήσεις. Το πρόβλημα διατυπώθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε η

τελική λύση να έχει το ελάχιστο δυνατό μήκος, να διέρχεται από ορισμένες σταθμισμένες περιοχές ελέγχου και να αποφεύγονται περιοχές μη διέλευσης. Τα μήκη των ευθυγράμμων τμημάτων που αποτελούν την χάραξη υποβάλλονται σε περιορισμούς για την κατάλληλη προσαρμογή καμπυλών. Το πρότυπο έπειτα χρησιμοποιεί μια τιμή της συνάρτησης στόχου για τη σύγκριση της νέας λύσης με την προηγούμενη. Αυτή η προσέγγιση δημιουργεί μόνο μια υποψήφια λύση αρχικά, η οποία βελτιώνεται με διαδοχικές επαναλήψεις.

Στο πρώτο στάδιο, η προσεγγιστική οριζοντιογραφική χάραξη ευθυγράμμων τμημάτων συνδέει τα σημεία αρχής και τέλους με ενδιάμεσες κορυφές πολυγωνικής. Τα ευθύγραμμα τμήματα βελτιώνονται στη συνέχεια μέσω αλλαγών. Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος εκτός του ότι επιβάλλει τη μετακίνηση των κορυφών της πολυγωνικής σε τυχαία επιλεγμένα σημεία, προσθέτει ή αφαιρεί επίσης κορυφές με τυχαίο τρόπο. Σε αυτό το στάδιο επιδιώκεται μια γρήγορη και ικανοποιητική εύρεση μιας αρχικής προσεγγιστικής λύσης, ενώ το δεύτερο στάδιο επικεντρώνεται περισσότερο στην προσαρμογή της αρχικής χάραξης κάνοντας μικρές αλλαγές.

Η διατύπωση της συνάρτησης στόχου έχει βασιστεί στο σταθμισμένο άθροισμα των μηκών των ευθύγραμμων τμημάτων ενώ έχουν ενσωματωθεί και όροι που αναπαριστούν ποινές για περιοχές ελέγχου και περιοχές μη διέλευσης. Πιο συγκεκριμένα έχει εφαρμοστεί μια προσέγγιση ελαφρών ποινών ανάλογα με το βάθος εισχώρησης της χάραξης σε μια περιοχή μη διέλευσης και της απόστασης μεταξύ χάραξης και των σταθμισμένων περιοχών ελέγχου. Αυτή η προσέγγιση ενισχύει την ευρετική μέθοδο για τον διαχωρισμό των διαφορετικών λύσεων ανάλογα με την ποιότητά τους. Αν και η προσέγγιση που έχει υιοθετηθεί παράγει λείες και ρεαλιστικές οριζοντιογραφικές χαράξεις, η λύση δεν αποτελεί κάτι περισσότερο από ένα τοπικό βέλτιστο εξαιτίας των αιτίων που αναφέρονται παρακάτω.

1) Το πρότυπο παράγει μόνο μία υποψήφια αρχική επίλυση, το οποίο ίσως να μην είναι επαρκές για την αναζήτηση αρκετών περιοχών για εναλλακτικές λύσεις.

2) Το συνολικό μήκος της χάραξης των ευθυγράμμων τμημάτων θεωρείται ως μήκος της χάραξης, ενώ στην πραγματικότητα η χάραξη περιλαμβάνει καμπύλες οι οποίες δεν λαμβάνονται υπ' όψιν στον υπολογισμό του μήκους.

3) Το μόνο κρίσιμο στοιχείο κόστους που λήφθηκε υπ' όψιν στη συνάρτηση στόχου ήταν το κόστος του μήκους, ενώ άλλοι σημαντικοί παράγοντες δεν συμπεριλήφθηκαν.

4) Οι περιορισμένες περιοχές αναπαρίστανται με ορθογώνια σχήματα στο πρότυπο.

Το σχήμα των περιοχών ελέγχου και μη διέλευσης που χρησιμοποιήθηκαν ως περιορισμοί ήταν αρκετά απλουστευμένο. Δεν χρησιμοποιήθηκαν σύνθετες περιοχές μελέτης με διαφορετικές χρήσεις γης για τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας του προτύπου.

7.5 Ταυτόχρονη βελτιστοποίηση τρισδιάστατων χαράξεων

Παρ' όλο που έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος στην ανάπτυξη μαθηματικών προτύπων βελτιστοποίησης κατακόρυφης χάραξης, η ανάπτυξη προτύπων που βελτιστοποιούν ταυτόχρονα την οριζοντιογραφική και την κατακόρυφη χάραξη δεν είναι ιδιαίτερα επιτυχής, καθώς το πρόβλημα επηρεάζεται από περισσότερους παράγοντες και οι γεωμετρικοί υπολογισμοί είναι ιδιαίτερα πολύπλοκοι. Οι σημαντικότερες προσεγγίσεις στο πρόβλημα της βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων με ταυτόχρονη επίλυση του προβλήματος στις τρεις διαστάσεις παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα και περιγράφονται στις παρακάτω υποενότητες.

Πίνακας 7.3: Έρευνα στην ταυτόχρονη βελτιστοποίηση χαράξεων στις τρεις διαστάσεις

Προσέγγιση	**Βιβλιογραφικές Αναφορές**
Δυναμικός προγραμματισμός	O'Brien & Bennett (1969), Hogan (1973), Nicholson (1973), Nicholson, Elms, & Williman (1975) (1976), Li, Pu, Zhao, & Liu (2013)
Αριθμητική αναζήτηση	Chew, Goh, & Fwa (1989)
Γενετικοί αλγόριθμοι	Jong (1998), Jha (2000), Kim (2001), Jong & Schonfeld (2003), Jha & Schonfeld (2004) (Kim, Jha, & Son, 2005) (Jha, Schonfeld, Jong, & Kim, 2006) (Kim, Jha, Schonfeld, & Kim, 2007) (Kang, Schonfeld, & Jong, 2007) Kang (2008), (Kang, Schonfeld, & Yang, 2009) (Kang, Yang, Schonfeld, & Jha, 2010)
Ευρετική με μετασχηματισμό αποστάσεων	Mandow & Pérez-de-la-Cruz (2004), de Smith (2006)
Τοπική ευρετική αναζήτηση με ακέραιο προγραμματισμό	Cheng & Lee (2006)
Νοημοσύνη σμήνους	Shafahi & Bagherian (2013), Bosurgi, Pellegrino, & Sollazzo (2013)
Πολλαπλοί στόχοι	Maji (2008), Yang, Kang, Schonfeld, & Jha (2014), Hirpa, Hare, Lucet, Pushak, & Tesfamariam (2016)

7.5.1 Δυναμικός προγραμματισμός στις τρεις διαστάσεις

Η δομή των προτύπων δυναμικού προγραμματισμού για τη βελτιστοποίηση της τρισδιάστατης χάραξης αφορά τον ορισμό των σταδίων του, ως κατακόρυφα επίπεδα κατανεμημένα σε ίσα διαστήματα και κάθετα επί του τμήματος που ενώνει τα σημεία αρχής και τέλους. Σε κάθε στάδιο, οι καταστάσεις βρίσκονται σε έναν δισδιάστατο πλέγμα αναζήτησης. Ενώνοντας τα ευθύγραμμα τμήματα από την αρχή προς το τέλος μέσω των πλεγμάτων κάθε σταδίου δημιουργείται η τρισδιάστατη χάραξη.

7.5.1.1 Το σύστημα OPTLOC

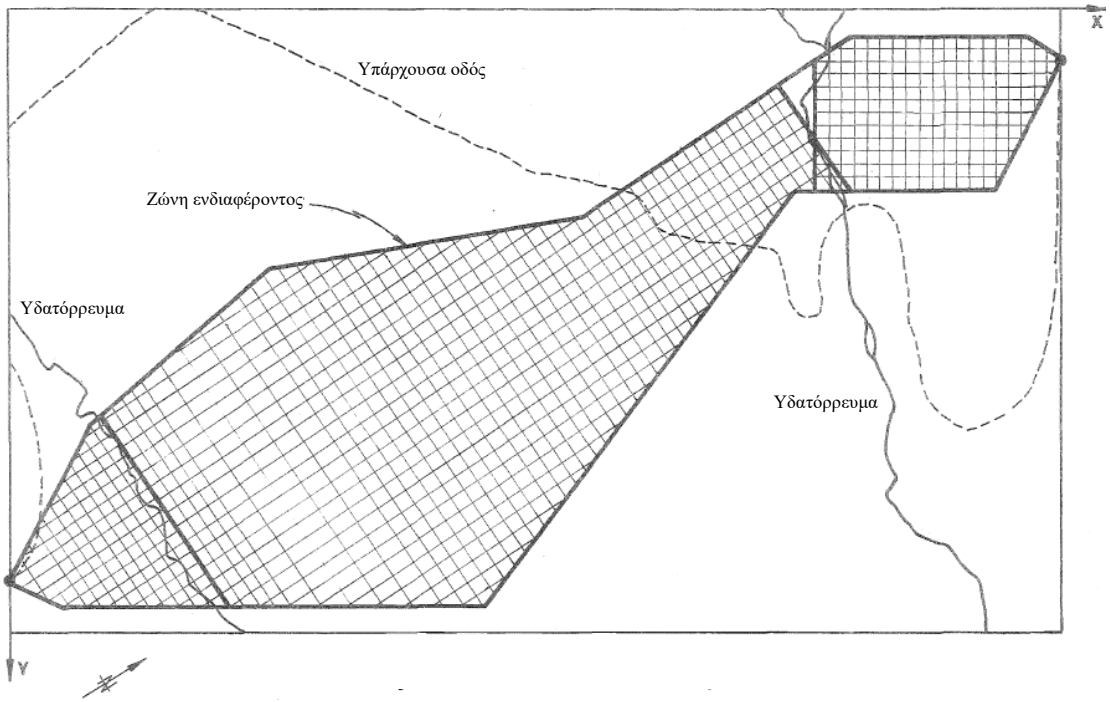
Οι O'Brien & Bennett (1969) παρουσίασαν το πλαίσιο ενός συστήματος, γνωστό ως OPTLOC, για τον καθορισμός της βέλτιστης θέσης υπεραστικών οδικών συνδέσεων. Αυτό χρησιμοποίησε έναν τροποποιημένο αλγόριθμο δυναμικού προγραμματισμού με ένα τρισδιάστατο πλέγμα ικανό να αντιμετωπίσει το πρόβλημα της κατακόρυφης και οριζοντιογραφικής χάραξης ταυτόχρονα. Το κόστος αφορούσε την κατασκευή, συντήρηση και τους χρήστες, ενώ είχαν καθοριστεί περιορισμοί για την κατά μήκος κλίση, την καμπυλότητα και τη θέση της οδού. Έμφαση δόθηκε στο γεγονός ότι το σύστημα δεν αποτελούσε προσπάθεια πλήρους αυτοματοποίησης της διαδικασίας εύρεσης μιας χάραξης. Ο Hogan (1973) έδωσε περισσότερες πληροφορίες για το σύστημα. Χρησιμοποιείται ένα αρχικό πλέγμα χαμηλής ακρίβειας, το οποίο βελτιώνεται μετά από μια επαναληπτική διαδικασία και επιλέγεται μια χάραξη στο επιθυμητό επίπεδο ακριβείας. Το σύστημα έχει χρησιμοποιηθεί από τη δασική υπηρεσία των Η.Π.Α για τη βελτιστοποίηση της χάραξης οδών.

7.5.1.2 Το πρότυπο του Nicholson

Ο Nicholson (1973) πρότεινε μια βελτίωση του προηγούμενου συστήματος αναπτύσσοντας στο UC δύο υπολογιστικά προγράμματα ταυτόχρονης βελτιστοποίησης της οριζοντιογραφίας και της μηκοτομής. Το πρώτο από τα δύο προγράμμα ονομάστηκε EFMORL και χρησιμοποιούσε δυναμικό προγραμματισμό για τον καθορισμό μια ζώνη ενδιαφέροντος εντός της περιοχής μελέτης. Έχοντας καθορίζει το σύστημα αναφοράς και τις συντεταγμένες των σημείων αρχής και τέλους εντός της περιοχής μελέτης, η διαδρομή χωριζόταν σε έναν αριθμό σταδίων. Η αναπαράσταση της επιφάνειας του εδάφους γινόταν με έναν περιορισμένο αριθμό σημείων του πλέγματος προκειμένου το πρόγραμμα

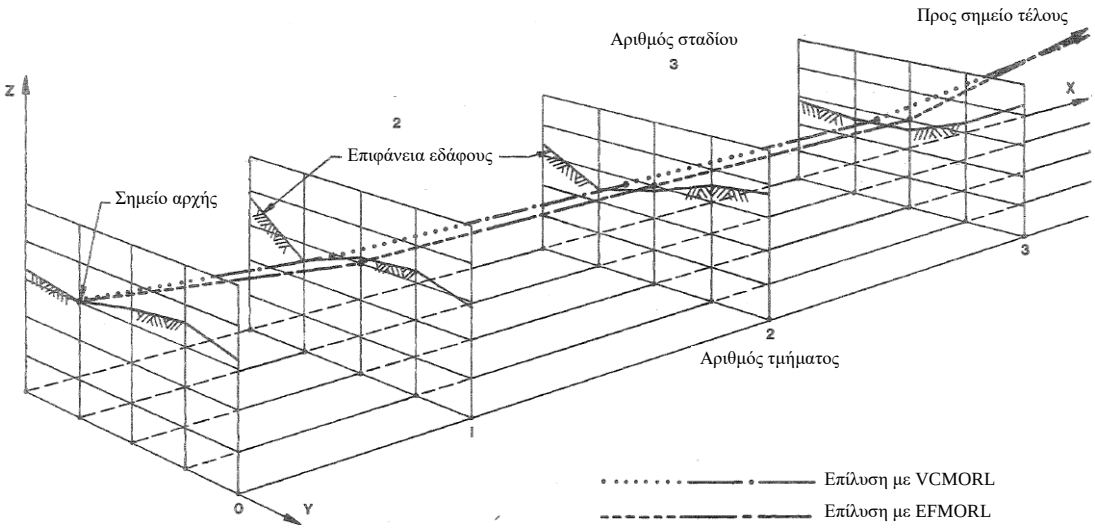
να μπορεί να αξιολογήσει μεγάλο πλήθος εναλλακτικών χωρίς να υπερβαίνει την αποθηκευτική ικανότητα του υπολογιστικού συτσήματος. Βέβαια, αυτή η προσαρμογή δυσχεραίνει την αποδοτικότητα του προγράμματος για περιοχές με έντονο ανάγλυφο.

Σχήμα 7.28: Ζώνη ενδιαφέροντος και πλέγμα
(Πηγή: Nicholson, 1973, Ιδία επεξεργασία)



Το δεύτερο πρόγραμμα, που ονομάστηκε VCMORL, χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση της βέτιστης χάραξης που ελαχιστοποιεί το κόστος κατασκευής και χρήσης μιας οδού. Η εφαρμογή του προτύπου σε ένα πραγματικό πρόβλημα έδειξε ότι το πρότυπο αυτό ήταν ανώτερο από τη σημβατική προσέγγιση καθορισμού της θέσης μιας οδού. Παρ' όλα αυτά η μέθοδος δεν μπορούσε να διαχειριστεί εύκολα τους περιορισμούς καμπυλότητας και αλλαγής της κατά μήκος κλίσης, καθώς οι περιορισμοί για την επιτρεπόμενη οριζοντιογραφική και κατακόρυφη καμπυλότητα επηρέαζαν την αλλαγή κατεύθυνσης σε κάθε στάδιο.

Σχήμα 7.29: Προοπτική απεικόνιση αρχικών σταδίων δυναμικού προγραμματισμού
(Πηγή: Nicholson, 1973)

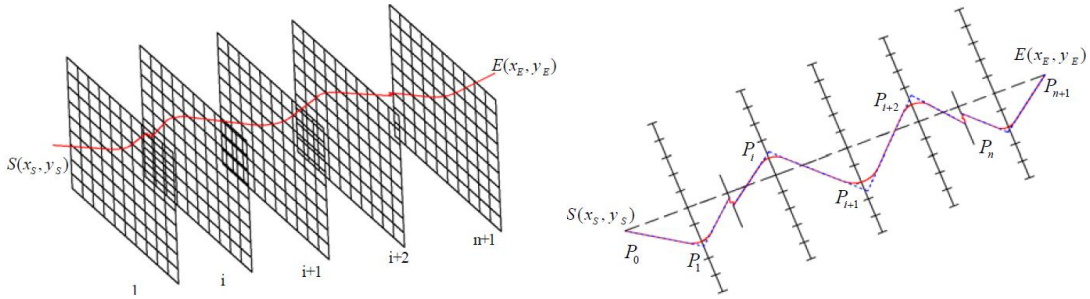


Οι Nicholson, Elms, & Williman (1975)(1976) συνόψισαν τις διαδικασίες αναφέροντας ότι το πρότυπο σε πρώτο στάδιο αναζητά έναν σχετικά τραχύ κάνναβο σημείων για την προκαταρτική χάραξη και στη συνέχεια υιοθετείται λογισμός μεταβολών για τον επαναπροσδιορισμό της χάραξης ώστε να μπορεί να αποκλίνει από τα σημεία του καννάβου.

7.5.1.3 Το πρότυπο των Li, Pu, Zhao, & Liu

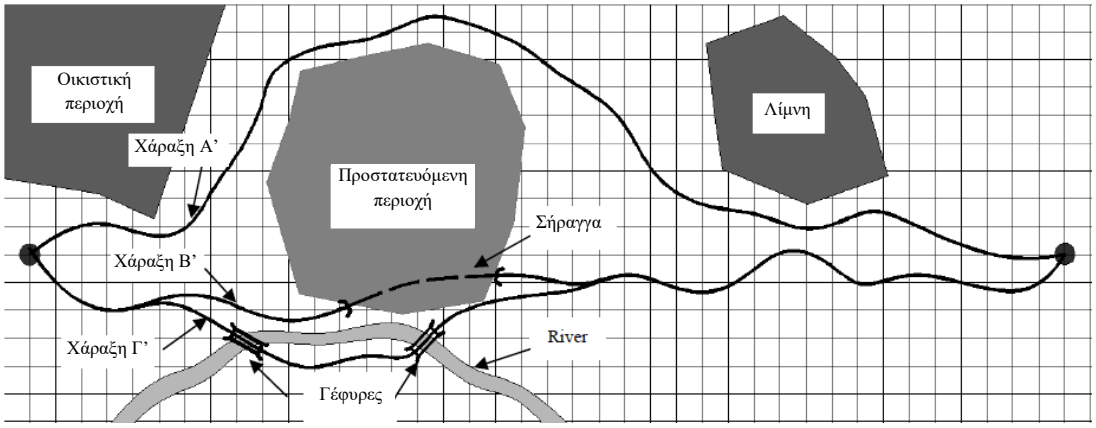
Οι Li, Pu, Zhao, & Liu (2013) ανέπτυξαν επίσης ένα πρότυπο δυναμικού προγραμματισμού για τη βελτιστοποίηση των προκαταρκτικών οδικών χαράξεων με τη διαφορά ότι περιλαμβάνονται δύο στάδια στη διαδικασία. Αρχικά, χρησιμοποιείται ένα τρισδιάστατο πλέγμα στο οποίο εφαρμόζεται δυναμικός προγραμματισμός με αναζήτηση δύο κατευθύνσεις με την κατακόρυφη χάραξη να προκύπτει με προσαρμογή ελαχίστων τετραγώνων στο ομαλοποιημένο έδαφος.

Σχήμα 7.30: Τρισδιάστατο πλέγμα αναζήτησης σε προοπτική και επίπεδη απεικόνιση (Πηγή: Li, Pu, Zhao, & Liu)



Η αναζήτηση σε δύο κατευθύνσεις δημιουργεί ορισμένες εναλλακτικές και έτσι δεν αποκλείονται λύσεις με αυξημένο αρχικό κόστος. Στο επόμενο στάδιο, με χρήση της μεθόδου επιτάχυνσης συζυγών κατευθύνσεων Powell και τη θεώρηση περιορισμών οι εναλλακτικές αυτές υποβάλλονται σε μικρές τροποποιήσεις και οι τελικές λύσεις μπορεί να αποκλίνουν από τα αρχικά σημεία του πλέγματος προκειμένου σύμφωνα με τους συγγραφείς να προσεγγίσουν το ολικό βέλτιστο.

Σχήμα 7.31: Τελικές εναλλακτικές που αποκλίνουν από τα σημεία του πλέγματος (Πηγή: Li, Pu, Zhao, & Liu)



7.5.1.4 Κριτική θεώρηση δυναμικού προγραμματισμού για την τρισδιάστατη χάραξη

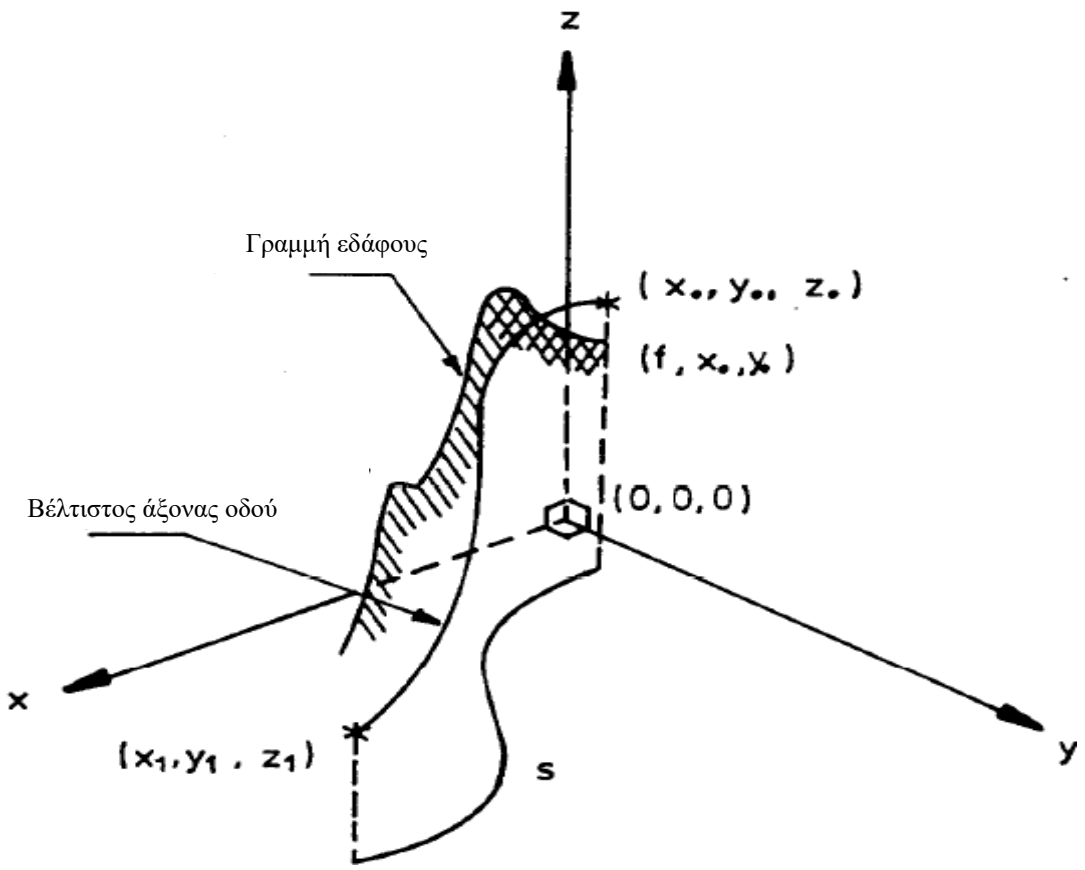
Η εφαρμογή δυναμικού προγραμματισμού για τη βελτιστοποίηση της χάραξης στις τρεις διαστάσεις έχει ορισμένα ελαττώματα. Αρχικά, υπάρχει δυσκολία διαχείρισης οπισθόδρομων χαράξεων. Επίσης, η τελική λύση είναι πολύ χονδροειδής τόσο για την οριζοντιογραφική, όσο και για την κατακόρυφη χάραξη και υπάρχει δυσκολία στην αντιμετώπιση των απαιτήσεων καμπυλότητας κατά την οριζοντιογραφία και τη μηκοτομή. Τέλος, οι απαιτήσεις αποθήκευσης δεδομένων μπορούν να

αποτελέσουν ανασταλτικό παράγοντα για την αναζήτηση της λύσης σε έναν κάνναβο μεγαλύτερης ακρίβειας εξ' αρχής.

7.5.2 Αριθμητική αναζήτηση στις τρεις διαστάσεις

Το μόνο μαθηματικό πρότυπο αριθμητικής αναζήτησης, το οποίο βελτιστοποιεί ταυτόχρονα στις τρεις διαστάσεις αναπαριστώντας τη χάραξη με μία λεία τρισδιάστατη καμπύλη είναι αυτό των Chew, Goh, & Fwa (1989) που αναπτύχθηκε στο NUS. Αυτό αποτελεί επέκταση του συνεχούς προτύπου βελτιστοποίησης της κατακόρυφης χάραξης (Goh, Chew, & Fwa, 1988).

Σχήμα 7.32: Τρισδιάστατη χάραξη οδού σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων (Πηγή: Chew, Goh, & Fwa, 1989)



Το πρόβλημα αρχικά θεωρείται ως πρόβλημα λογισμού μεταβολών, όπου οι απαραίτητες συνθήκες είναι πολύ δύσκολο να επιλυθούν. Για τον λόγο αυτόν οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν ένα σύνολο κυβικών συναρτήσεων spline, για την παρεμβολή της χάραξης. Στη συνέχεια, οι περιορισμοί μετασχηματίστηκαν σε μία διάσταση με μια μέθοδο μεταγραφής περιορισμών, η οποία περιγράφεται από τους Teo & Goh (1987) και Goh & Teo (1988) και χρησιμοποιείται στη θεωρία βέλτιστου ελέγχου. Τελικώς, το πρότυπο γίνεται πρόβλημα περιορισμένου μη γραμμικού προγραμματισμού με τους πίνακες των συντελεστών των συναρτήσεων spline να αποτελούν τις μεταβλητές απόφασης. Σημειώνεται ότι η συνάρτηση στόχου περιέχει ολοκληρώματα, τα οποία είναι δύσκολο να υπολογιστούν. Για το λόγο αυτό προτείνεται μια αριθμητική προσαρμογή για τη διευκόλυνση των υπολογισμών κατά τη διάρκεια της αναζήτησης. Για την επίλυση χρησιμοποιείται μια μέθοδος μεταβλητής μετρικής και συγκεκριμένα ο αλγόριθμος quasi Newton descent, ενώ χρησιμοποιείται επίσης και μεταβλητή κλιμάκωση για τη βελτίωση της διαδικασίας σύγκλισης.

Όπως και τα πρότυπα αριθμητικής αναζήτησης για την κατακόρυφη χάραξη, η επίλυση στο πρότυπο αυτό εξασφαλίζει μόνο μια τοπικά βέλτιστη λύση. Ουσιαστικά, χρησιμοποιούνται διαφορετικές αρχικές λύσεις με βάση την κρίση του χρήστη για την εκκίνηση του προτύπου. Επίσης, η διαδικασία μεταβλητής κλιμάκωσης απαιτεί την αλληλεξάρτηση μεταξύ προγράμματος και χρήστη κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης. Συνεπώς, το πρότυπο δεν είναι πλήρως αυτοματοποιημένο. Ένα άλλο πιθανό μειονέκτημα είναι δύσκολο να συμπεριληφθούν στη συνάρτηση στόχου ασυνεχή στοιχεία κόστους εξαρτώμενα από τη θέση, όπως το κόστος απαλλοτριώσεων, καθώς ο αλγόριθμος απαιτεί τη χρήση μιας διαφορίσιμης συνάρτησης στόχου. Ανεξάρτητα από τα μειονεκτήματα και τις δυσκολίες που παρουσιάζονται το πρότυπο διαθέτει και ορισμένα θετικά χαρακτηριστικά, όπως ότι η αναπαράσταση της βελτιστοποιημένης χάραξης γίνεται με μια λεία καμπύλη, κάτι το οποίο δεν είναι δυνατό να γίνει μέσω της προσέγγισης δυναμικού προγραμματισμού.

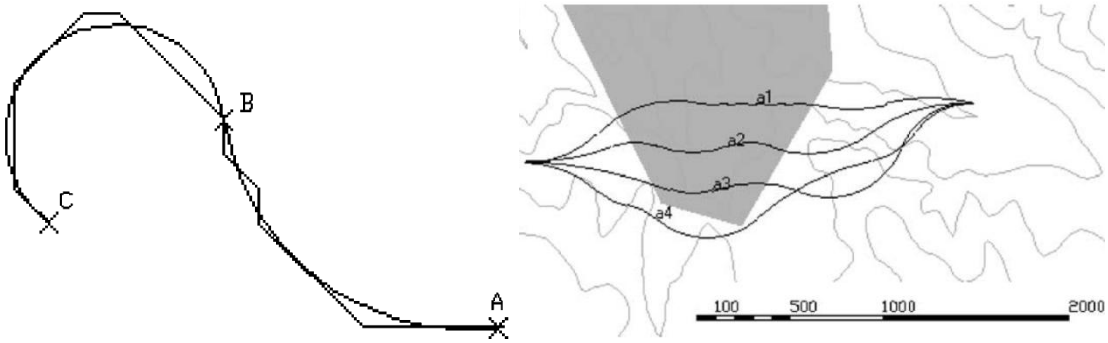
7.5.3 Ευρετική αναζήτηση με μετασχηματισμό απόστασης

Για τη βελτιστοποίησης της τρισδιάστατης χάραξης αναπτύχθηκαν δύο πρότυπα που ακολουθούν μια ευρετική μέθοδο με μετασχηματισμό απόστασης. Η περιοχή μελέτης αναπαρίσταται με έναν διακριτό κάνναβο σημείων στα οποία είναι γνωστά τα υψόμετρα. Τα πρότυπα αυτά περιγράφονται στα επόμενα εδάφια.

7.5.3.1 Το σύστημα Sindi

Οι Mandow & Pérez-de-la-Cruz (2004) ανέπτυξαν ένα σύστημα βασισμένο σε μια ευρετική μέθοδο βασισμένη στο μετασχηματισμό αποστάσεων για τη βελτιστοποίηση των οδικών χαράξεων. Το σύστημα αυτό ονομάστηκε Sindi και αναπτύχθηκε στο UMA. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί έναν διακριτό πλεγματικό χώρο αναζήτησης και απαιτεί μια διαδικασία δύο σταδίων για τον καθορισμό της χάραξης. Αρχικά, γίνεται αναζήτηση μιας σειράς σημείων του καννάβου που να συνδέουν τα σημεία αρχής και τέλους, ενώ στη συνέχεια τα τμήματα που ενώνουν τα σημεία αυτά προσεγγίζονται με μια καμπύλη οδική χάραξη με βάση τις απαιτήσεις σχεδιασμού. Οι περιορισμοί που διαμορφώνονται αφορούν το ελάχιστο μήκος τη χάραξης, το μέγιστο μήκος των χαράξεων ευθύγραμμων τμημάτων που συνδέουν τα σημεία του καννάβου, την ελάχιστη ακτίνα των κυκλικών τόξων, τη σχέση μεταξύ ακτινών διαδοχικών κυκλικών τόξων και τη μέγιστη κατά μήκος κλίση. Το σύστημα παράγει εναλλακτικές χαράξεις σε σχέση με τις προτιμήσεις του χρήστη.

Σχήμα 7.33: Μετατροπή ευθυγράμμων τμημάτων σε καμπύλη χάραξη και εναλλακτικές χαράξεις (Πηγή: Mandow & Pérez-de-la-Cruz, 2004)

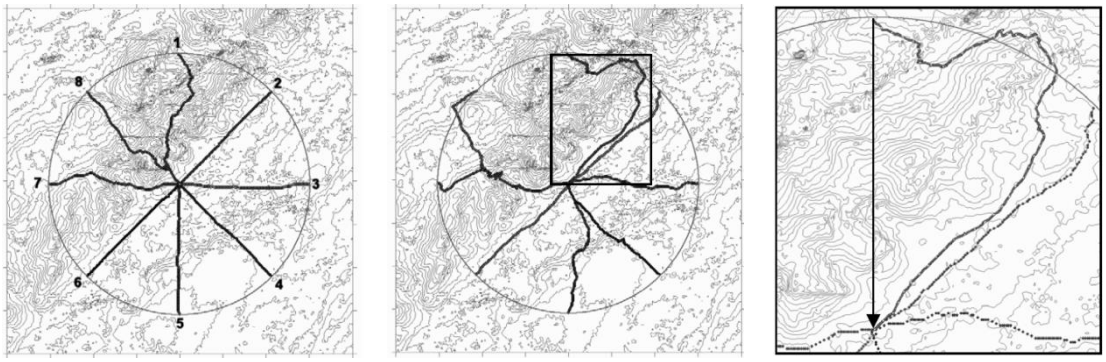


7.5.3.2 Το πρότυπο του de Smith

Ο de Smith (2006) ανέπτυξε ένα πρότυπο για την εύρεση του ελάχιστου δυνατού μήκους χάραξης για οδούς, σιδηροδρόμους και αγωγούς χρησιμοποιώντας έναν τροποποιημένο αλγόριθμο μετασχηματισμού αποστάσεων. Το πρότυπο καθορίζει τη βέλτιστη χάραξη βάση μιας διαδικασίας τεσσάρων βημάτων. Αρχικά, γίνεται καθορισμός τμηματικά ευθύγραμμης χάραξης ελάχιστου μήκους με εφαρμογή του μετασχηματισμού αποστάσεων υπό τον περιορισμό μιας μέγιστης κλίσης σε μια

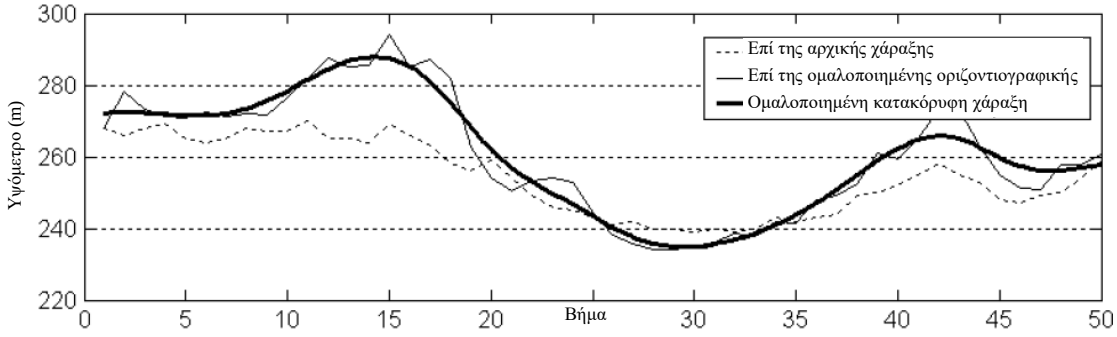
επιφάνεια κεκλιμένων επιπέδων. Στη συνέχεια γίνεται υπολογισμός των αποστάσεων των χαράξεων με βάση έναν πίνακα υψομέτρων. Έπειτα, γίνεται ομαλοποίηση της οριζοντιογραφικής χάραξης με παρεμβολή spline υπό τον περιορισμό μέγιστης καμπυλότητας. Μια άμεση αναζήτηση γειτονιάς χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση του καλύτερου γειτονικού φατνίου. Αυτή η προσέγγιση απαιτεί για κάθε φατνίο, την αναζήτηση σε οχτώ ορισμένες κατευθύνσεις. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται οχτώ εναλλακτικές για διαφορετικούς περιορισμούς μέγιστης κλίσης.

Σχήμα 7.34: Εναλλακτικές χαράξεις υπό τον περιορισμό μέγιστης κλίσης
(Πηγή: de Smith, 2006)



Με βάση την ομαλοποιημένη οριζοντιογραφική χάραξη γίνεται και η αντίστοιχη ομαλοποίηση της κατακόρυφης χάραξης. Η μέθοδος χρησιμοποιούσε συναρτήσεις spline για την καμπυλότητα τόσο της οριζοντιογραφικής, όσο και της κατακόρυφης χάραξης. Τα τέσσερα αυτά βήματα περιγράφονται με λεπτομερείς διαδικασίες. Βέβαια, εφ' όσον τα τέσσερα βήματα που απαιτεί η μέθοδος δεν είναι ενσωματωμένα αλλά μπορεί να απαιτηθεί μια συμβατική διαδικασία αξιολόγησης κόστους των εναλλακτικών, η διαδικασία μπορεί να γίνεται χρονοβόρα.

Σχήμα 7.35: Ομαλοποίηση κατακόρυφης χάραξης
(Πηγή: de Smith, 2006, Ιδία επεξεργασία)



Οι περιοχές εμποδίων και μη διέλευσης των χαράξεων και περιλαμβάνονται ως πρόσθετοι περιορισμοί στο πρώτο βήμα. Όμως, οι περιορισμοί αυτοί δεν χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερη ακρίβεια καθώς όλα τα όρια πρέπει να είναι παράλληλα με την ευθεία που ενώνει τα σημεία αρχής και τέλους. Κατά συνέπεια, η αναπαράσταση των σχημάτων των περιοχών αυτών δε γίνεται ρεαλιστικά.

7.5.3.3 Κριτική θεώρηση ευρετικών μεθόδων με μετασχηματισμό απόστασης

Όπως διαπιστώθηκε τα πρότυπα αυτής της μεθόδου χρησιμοποιούν ένα διακριτό πλέγμα ως χώρο αναζήτησης και χρησιμοποιούν μια διαδικασία δύο σταδίων όπου αρχικά αναζητείται μια σειρά σημείων του πλέγματος που να συνδέουν τα σημεία αρχής και τέλους και στη συνέχεια γίνεται προσέγγιση της χάραξης με βάση τους περιορισμούς σχεδιασμού. Η προσέγγιση που υιοθετήθηκε, ως τεχνική εύρεσης της ελάχιστης διαδρομής λαμβάνοντας υπ' όψιν κατά μήκος κλίση και καμπυλότητα, δεν ήταν αρκετή για την εύρεση μιας ικανοποιητικής λύσης. Επίσης, οι σημαντικές κατηγορίες

κόστους, που σχετίζονται με τη θέση, τους χρήστες και το περιβάλλον, καθώς επίσης και περιορισμοί, όπως αυτοί που αφορούν τα μήκη καμπυλών κατά την οριζοντιογραφία και τη μηκοτομή για απαιτήσεις μήκους ορατότητας δεν συμπεριλήφθηκαν στη διαμόρφωση του προτύπου. Η διαδικασία αναζήτησης περιορίστηκε μόνο σε γειτονικά φατνία και δεν εγγυόταν την έρευνα σε ολόκληρο τον χώρο αναζήτησης. Για τον λόγο αυτό, η λύση που προέκυπτε δεν μπορεί να θεωρηθεί κάτι άλλο πέραν μιας τοπικά βέλτιστης λύσης. Επίσης είναι δύσκολη η αναπαράσταση γεωγραφικών οντοτήτων στο υπάρχον πλέγμα. Η προσέγγιση ίσως είναι περισσότερο κατάλληλη για χαράξεις αγωγών, λόγω του γεγονότος ότι δεν απαιτούνται οι ίδιοι αυστηροί περιορισμοί κλίσεων και καμπυλότητας όπως στις οδικές χαράξεις.

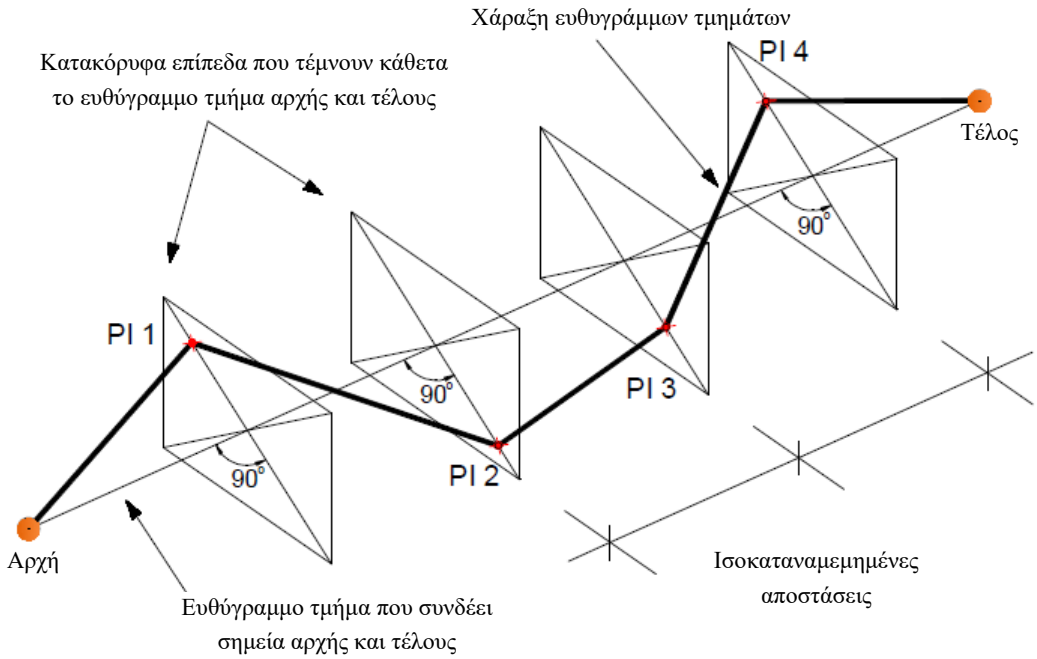
7.5.4 Γενετικοί αλγόριθμοι στις τρεις διαστάσεις

Οι γενετικοί αλγόριθμοι για τη βελτιστοποίηση οδικών χαράξεων χρησιμοποιήθηκαν αρχικά από τον Jong(1998) και αυτοί οι τροποποιημένοι αλγόριθμοι είναι οι πιο ευρέως διαδεδομένοι με βάση την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας. Οι γενετικοί αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν διέφεραν σημαντικά από τους τυπικούς γενετικούς αλγορίθμους καθώς αντί των δυαδικών τιμών χρησιμοποιήθηκαν πραγματικές τιμές στον καθορισμός των γονιδίων. Η προσέγγιση αυτή αποτέλεσε τομή στο πρόβλημα βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων και έκτοτε έχουν αναπτυχθεί πλήθος εργασιών θεωρώντας τις μεταβλητές απόφασης της χάραξης ως έναν χρωμόσωμα γενετικού αλγορίθμου.

7.5.4.1 Το πρότυπο HAO

Όπως αναφέρθηκε, το πρώτο πρότυπο για τη βελτιστοποίηση οδικής χάραξης στον τρισδιάστατο χώρο βασισμένο σε γενετικούς αλγορίθμους αναπτύχθηκε από τον Jong (1998). Στη συνάρτηση στόχου αυτού του προτύπου συμπεριλήφθηκαν κόστη εξαρτώμενα από τη θέση και το μήκος καθώς και κόστη χρηστών και χωματουργικών. Στη μέθοδο που ακολούθησε αρχικά ο χώρος αναζήτησης οριζόταν εντός ορθογώνιων επιπέδων κάθετα στο ευθύγραμμο τμήμα που συνέδεε το σημείο αρχής και τέλους.

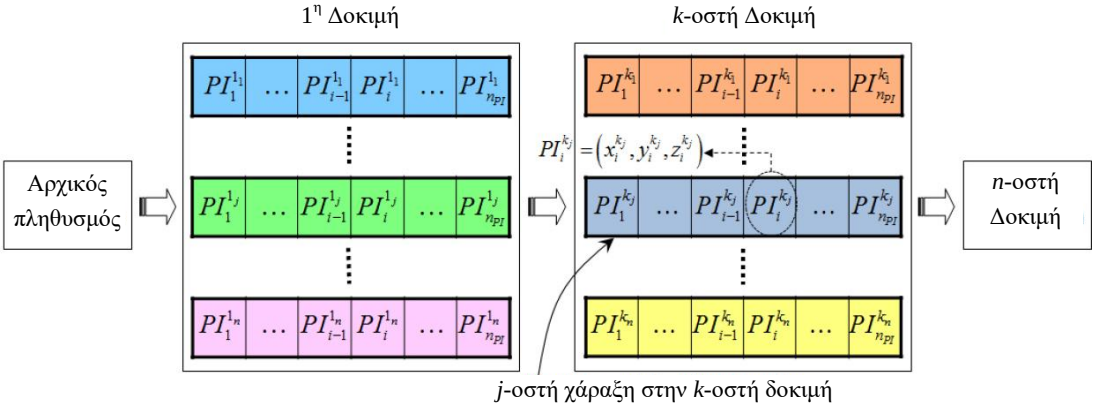
Σχήμα 7.36: Αναπαράσταση χάραξης με ευθύγραμμα τμήματα
(Πηγή: Al-Hadad, 2011, Ιδία επεξεργασία)



Για την αναπαράσταση της χάραξης ο χρησιμοποιήθηκαν κορυφές μιας τρισδιάστατης πολυγωνικής. Αυτές οι κορυφές κατανέμονται σε κατακόρυφα επίπεδα τοποθετημένα κάθετα σε ίσες αποστάσεις

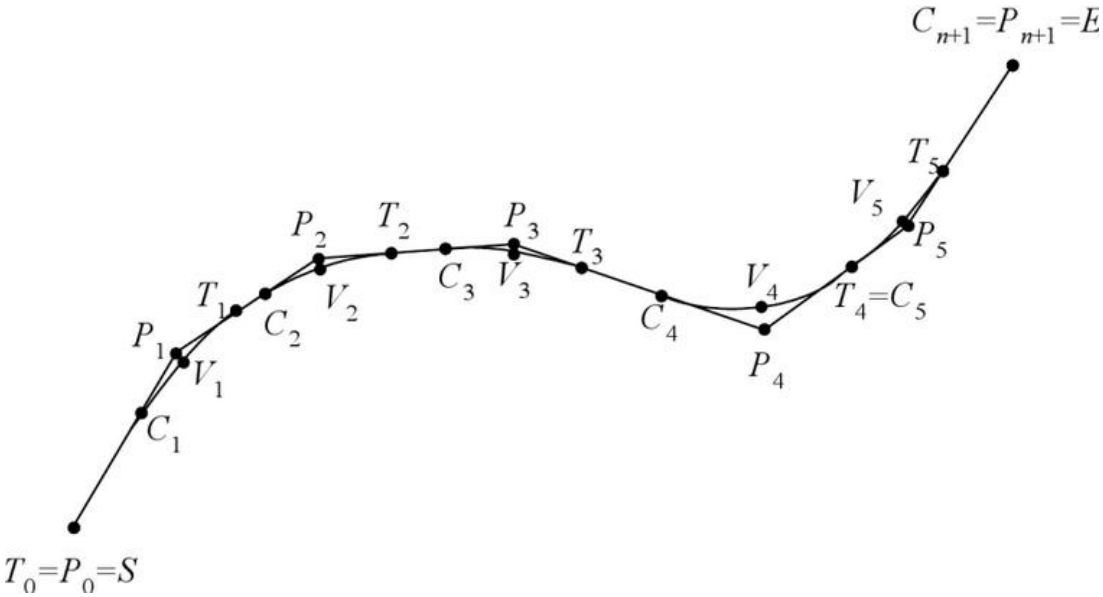
κατά μήκος του ευθύγραμμου τμήματος που ενώνει τα σημεία αρχής και τέλους, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Πρέπει να σημειωθεί ότι στο πρότυπο αυτό, κάθε κορυφή της πολυγωνικής στον τρισδιάστατο χώρο μπορεί να καθοριστεί μόνο με δύο μεταβλητές απόφασης. Το γεγονός αυτό διευκολύνει τη μείωση των διαστάσεων του χώρου αναζήτησης. Έπειτα, από τριγωνομετρικές σχέσεις γίνεται περαιτέρω μετατροπή των κορυφών σε ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Οι μεταβλητές απόφασης για κάθε κορυφή ήταν δύο και αφορούσαν την οριζόντια και κατακόρυφη μετατόπιση κάθε κορυφής ως προς το σημείο τομής του ευθύγραμμου τμήματος που ενώνει τα σημεία αρχής και τέλους με το κατακόρυφο επίπεδο. Παρακάτω παρουσιάζεται η αναπαράσταση των χρωμοσωμάτων του γενετικού αλγορίθμου που χρησιμοποιήθηκε στο πρότυπο.

Σχήμα 7.37: Γονότυπος αναπαράστασης μεταβλητών απόφασης προτύπου HAO (Πηγή: Kang, Jha, Shariat, Schonfeld, & Wang, 2011)



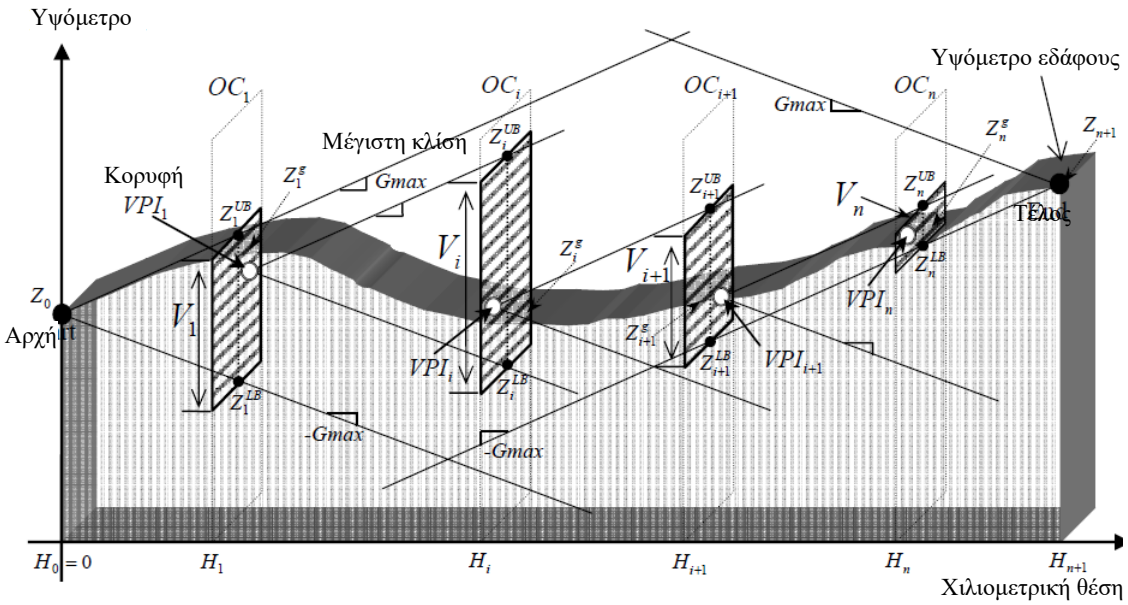
Τη δυνατότητα διαχείρισης περιπτώσεων όπου μπορεί να απαιτούνταν οπισθόδρομες χαράξεις παρουσίασαν οι Jong & Schonfeld (2003). Πλέον οι μεταβλητές απόφασης για κάθε κορυφή ήταν τρεις και αφορούσαν τις οριζοντιογραφικές συντεταγμένες της κορυφής της κύριας πολυγωνικής και το υψόμετρο της κορυφής της μηκοτομής. Για την κατακόρυφη χάραξη, γίνεται η απλουστευτική παραδοχή ότι τα υψόμετρα των σημείων των μέσων των κυκλικών τόξων ταυτίζονται με τις κορυφές της πολυγωνικής της μηκοτομής, ενώ ταυτόχρονα τα υψόμετρα που αποτελούν μεταβλητές απόφασης αναφέρονται στα σημεία αυτά. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι γεωμετρικές σχέσεις των σημείων μιας χάραξης, στην οποία V_i είναι το μέσο του i-στου κυκλικού τόξου.

Σχήμα 7.38: Εξάρτηση κορυφών μηκοτομής ως προς οριζοντιογραφική χάραξη (Πηγή: Jha, Schonfeld, Jong, & Kim, 2006)



Η διαδικασία ξεκινά δημιουργώντας μια χάραξη από ευθύγραμμα τμήματα ενώνοντας τα σημεία αρχής και τέλους διαμέσου των κορυφών αυτών. Στη συνέχεια, οι οριζοντιογραφική και η κατακόρυφη χάραξη προσαρμόζονται μέσω δύο διαφορετικών διαδικασιών. Για την οριζοντιογραφική χάραξη, λαμβάνεται η προβολή της τρισδιάστατης τμηματικά ευθύγραμμης χάραξης στο οριζόντιο επίπεδο και προσαρμόζονται οριζόντια κυκλικά τόξα επί των εφαπτόμενων τμημάτων που σχηματίζονται κατά την οριζοντιογραφία. Κατά τη διαδικασία αυτή τίθενται ποινές για την παραβίαση ορισμένου μήκους τόξου, καθώς και περιορισμοί της απόστασης των εφαπτόμενων τμημάτων. Στη συνέχεια, για την κατακόρυφη χάραξη προσαρμόζονται παραβολικές καμπύλες στην αντίστοιχη προβολή της αρχικής τρισδιάστατης τμηματικά ευθύγραμμης χάραξης στην κατακόρυφη επιφάνεια με οδηγό τον κεντρικό άξονα της χάραξης κατά την οριζοντιογραφία. Οι Kang, Schonfeld, & Jong (2007) βελτίωσαν το πρότυπο περιορίζοντας τον χώρο αναζήτησης με εφικτές τιμές που προκύπτουν από τους περιορισμούς μέγιστης κλίσης, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Η αναζήτηση κατά τη μηκοτομή περιορίστηκε από τις αποστάσεις της τομής των μέγιστων κατά μήκος κλίσεων από μια κορυφή με το επόμενο κατακόρυφο επίπεδο. Αυτή η μέθοδος είχε περιγραφεί αρχικά από τους Fwa, Chan, & Sim (2002) και θεωρήθηκε ότι βελτιώνει την υπολογιστική απόδοση και την ποιότητα της επίλυσης.

Σχήμα 7.39: Εφικτές τιμές πεδίου αναζήτησης
(Πηγή: Kang, 2008, Ιδία επεξεργασία)



Ο Kim (2001) ανέπτυξε μεθόδους για την προτυποποίηση κόμβων και τεχνικών έργων όπως γέφυρες και σήραγγες. Στην εργασία αυτή στηρίχτηκαν αρκετές επόμενες δημοσιεύσεις όπως αυτές των Kim, Jha, & Schonfeld (2004), στην οποία έκαναν θεώρηση του κόστους κατασκευής κόμβων και των Kim, Jha, Lovell, & Schonfeld (2004) όπου προτυποποίησαν τους κόμβους κατά τη βελτιστοποίηση. Οι Kim, Jha, Schonfeld, & Kim (2007) ασχολήθηκαν με την προτυποποίηση τεχνικών έργων στη διαδικασία βελτιστοποίησης. Οι Kang, Shariat, & Jha (2013) ανέπτυξαν πρότυπα για την αξιολόγηση της κατανάλωσης καυσίμων, των ελλείψεων στα μήκη ορατότητας και το κόστος των αναμενόμενων ατυχημάτων ανάλογα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά.

7.5.4.2 Το πρότυπο ΗΑΟ με σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών

Για τη βελτίωση της αποδοτικότητας του προτύπου διερευνήθηκε η πιθανότητα ενσωμάτωσης του προτύπου σε ένα σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών. Ορισμένα στοιχεία κόστους που αφορούν τις οδικές χαράξεις εξαρτώνται από τη γεωγραφική θέση, και για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε ένα τέτοιο σύστημα. Αυτά αφορούσαν κυρίως κόστος απαλλοτρίωσης, χωματουργικά και περιβαλλοντικά κόστη. Η πρώτη ενσωμάτωση αναπτύχθηκε από τον Jha (2000) και επεκτάθηκε από τους Jong, Jha, &

Schonfeld (2000) και Jha & Schonfeld (2004). Ο υπολογισμός του συνολικού κόστους που εξαρτάται από τη θέση αυτοματοποιήθηκε μέσω της χρήσης του συστήματος αντί για προγραμματισμό εντός του προτύπου, όπως στην εργασία του Jong (1998). Σύμφωνα με τους συγγραφείς, η χρησιμοποίηση ενός συστήματος γεωγραφικών πληροφοριών παρουσίαζε τα εξής πλεονεκτήματα:

1) Χρησιμοποίηση πραγματικών χαρτών.

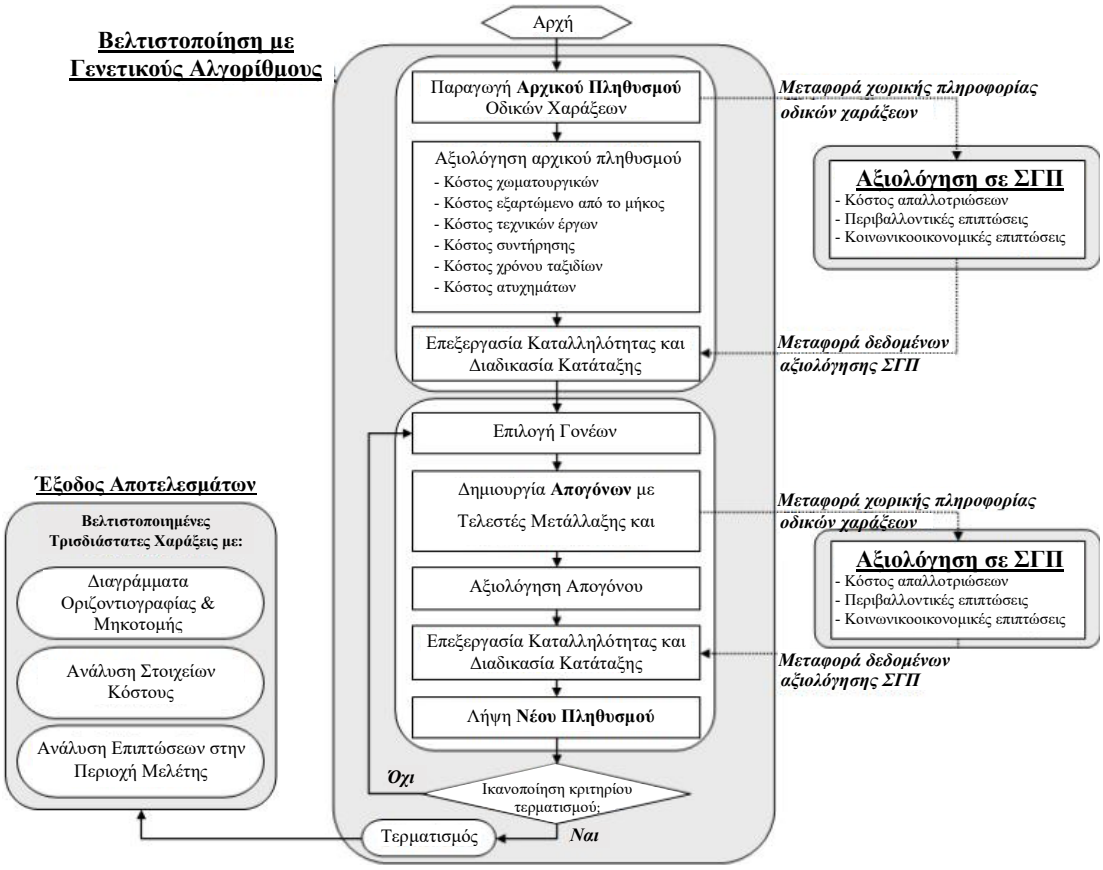
2) Ακριβής απεικόνιση των ευαίσθητων περιβαλλοντικά περιοχών.

3) Ευέλικτη αποθήκευση και χρησιμοποίηση των γεωγραφικών δεδομένων.

4) Ακριβείς υπολογισμοί εκτάσεων και κόστους απαλλοτρίωσης.

Το σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών χρησιμοποιήθηκε για τον ακριβή υπολογισμό της έκτασης περιοχών με ακανόνιστο σχήμα, τη θεώρηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων, όπως υγροτόπους και αποδέκτες και τη διατήρηση ορισμένων στοιχείων κόστους. Το σύστημα δημιουργεί μια ζώνη εκατέρωθεν του κεντρικού άξονα της χάραξης και γίνεται υπέρθεση του ορίου της χάραξης επί ενός πραγματικού χάρτη με διαφορετικά τμήματα γης. Τα τμήματα από τα οποία διέρχεται η χάραξη ταυτοποιούνται από το σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών και υπολογίζονται οι σχετιζόμενες εκτάσεις και το αντίστοιχο κόστος. Τα αποτελέσματα μεταβιβάζονται στο πρότυπο γενετικών αλγορίθμων για την ολοκλήρωση της διαδικασίας αναζήτησης. Η δομή του ενσωματωμένου προτύπου παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.

Σχήμα 7.40: Δομή ενσωματωμένου προτύπου ΗΑΟ με σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών (Πηγή: Kang, Jha, Shariat, Schonfeld, & Wang, 2011, Ιδία επεξεργασία)



Όπως είναι φυσικό για τους υπολογισμούς απαιτούνται γεωγραφικά δεδομένα σε ψηφιακή μορφή, όπως ψηφιοποιημένοι χάρτες. Σημειώνεται ότι το σύστημα δεν βοηθά τον αλγόριθμο να επιτύχει πιο

αποτελεσματική αναζήτηση, αλλά στόχος του είναι η παροχή χωρικής πληροφορίας για πιο ρεαλιστική και ακριβή χάραξη, αφού εκτός του ότι κάνει υπολογισμούς κόστους εξαρτώμενου από την γεωγραφική θέση, παρέχει χρήσιμα δεδομένα εισόδου σε ένα πρότυπο βελτιστοποίησης της οδικής χάραξης. Κατά τη διαδικασία αναζήτησης,, είναι απαραίτητη η συνεχής ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των δύο συστημάτων. Για τον λόγο αυτόν, η ενσωμάτωση ενός προτύπου βελτιστοποίησης της χάραξης σε ένα στο περιβάλλον ενός τέτοιου συστήματος επιβραδύνει σημαντικά τη διαδικασία αναζήτησης. Η διαφορά στη μορφή των δεδομένων των δύο συστημάτων προσθέτει μεγαλύτερο φόρτο επεξεργασίας των δεδομένων. Αυτές οι διαφορές επιβάλλουν την προεπεξεργασία των δεδομένων, ώστε να γίνουν συμβατά με το πρότυπο βελτιστοποίησης. Για τους λόγους αυτούς οι Kim, Jha, & Son (2005) βελτίωσαν την υπολογιστική απόδοση και την ποιότητα επίλυσης. Εφαρμογή σε μελέτες περίπτωσης έκαναν οι Schonfeld, Kang, & Jha (2005) ενώ συγκριτικές αναλύσεις κάνουν οι Kang, Jha & Schonfeld (2012). Οδηγίες χρήσης της εφαρμογής δίνουν οι Schonfeld, Jha, Kang, & Karri (2007).

Οι Jha & Kim (2004) εξέτασαν τις επιπτώσεις της ζήτησης στη βελτιστοποίηση οδικών χαράξεων διαμορφώνοντας μια συνάρτηση στόχου μεγιστοποίησης της ωφέλειας. Το πρότυπο δέχεται δεδομένα χρήσεων γης και καθορίζει τη βέλτιστη χάραξη βάσει της ελαστικότητας και της τιμής των διοδίων. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τις μεθοδολογίες, τους γενετικούς αλγόριθμους με τους βασικούς και ειδικευμένους προς το πρόβλημα τελεστές, την ενσωμάτωση γενετικών αλγορίθμων και συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών, τις συναρτήσεις κόστους αλλά και τη βελτίωση της υπολογιστικής απόδοσης των προτύπων γενετικών αλγορίθμων βρίσκονται στους Jha, Schonfeld, Jong, & Kim (2006).

7.5.4.3 Το πρότυπο HAO δύο επιπέδων σε οδικό δίκτυο

Ο Kang (2008) επέκτεινε το πρότυπο HAO ώστε να βελτιστοποιήσει μια τρισδιάστατη χάραξη εντός ενός απλού οδικού δικτύου. Η βελτιστοποίηση αφορούσε και τις θέσεις των σημείων αρχής και τέλους της χάραξης, καθώς οι συντεταγμένες τους δεν ήταν γνωστές . Το πρότυπο ήταν παρόμοιο με αυτό του Jong (1998) με τις εξής διαφορές:

1. Το πρότυπο αντιμετώπιζε τη βελτιστοποίηση της χάραξης εντός οδικού δικτύου.

2. Συμπεριλήφθηκαν συμμετρικά τόξα συναρμογής με προσαρμογή τους στη χάραξη.

3. Τα σημεία αρχής και τέλους της οδού δεν ήταν γνωστά και καθορίζονταν από το πρότυπο.

4. Στόχος της εργασίας εκτός από τη βελτιστοποίηση της χάραξης ήταν και η βελτίωση της κυκλοφοριακής ροής του δικτύου με την προσθήκη της νέας οδού. Για τον λόγο αυτόν αξιολογήθηκαν οι επιπτώσεις διαφόρων εναλλακτικών στην κυκλοφορία.

5. Χρησιμοποιήθηκαν οι τεχνικές περιορισμού του πεδίου αναζήτησης με τις εφικτές τιμές ενώ υιοθετήθηκαν διαφορετικές μέθοδοι διαχείρισης των περιορισμών.

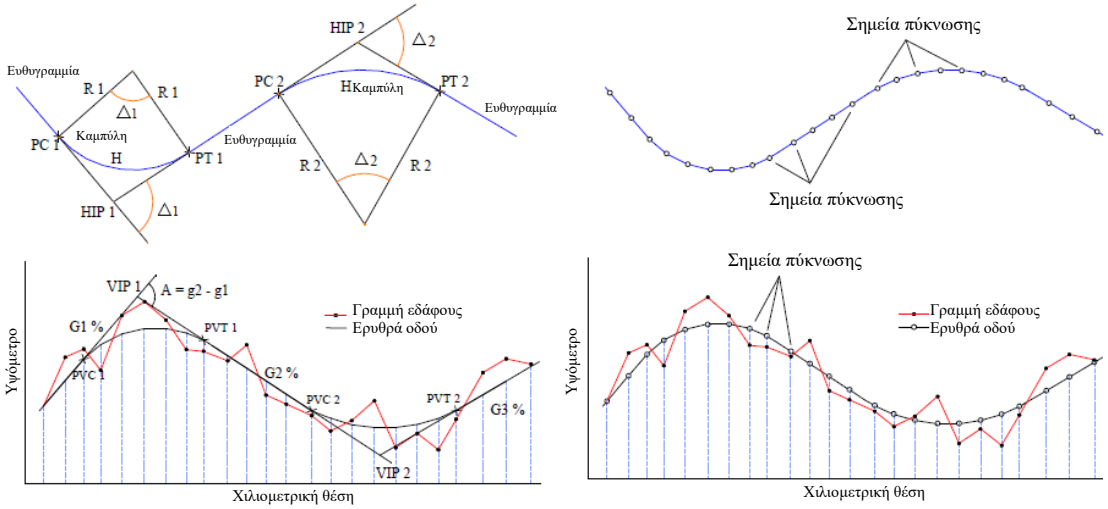
Στο πρότυπο του Kang (2008) ο χρήστης μπορούσε να ορίσει τα όρια της περιοχής αναζήτησης της βέλτιστης λύσης. Βέβαια, οι προτιμήσεις των χρηστών χωρίς να έχει αξιολογηθεί το σύνολο του χώρου αναζήτησης μπορεί να οδηγήσει σε βέλτιστες λύσεις μόνο εντός της καθορισμένης περιοχής. Ένας τέτοιος περιορισμός είναι από μόνος του μια περίπλοκη διαδικασία και μπορεί να μην είναι εύκολη η αναγνώριση ενός τέτοιου διαδρόμου από έναν άπειρο χρήστη σε μια σύνθετη περιοχή. Για το λόγο αυτό οι προτιμήσεις χρηστών για τον καθορισμός ενός οδικού διαδρόμου είναι δύσκολο να βοηθήσουν στην εύρεση μιας ολικά βέλτιστης λύσης καθώς δεν εξετάζονται καθόλου περιοχές εκτός αυτής.

7.5.4.4 Το πρότυπο του Al-Hadad

Ο Al-Hadad (2011) ανέπτυξε έναν πρότυπο γενετικών αλγορίθμων με διαφορετική προσέγγιση στη διαμόρφωση της χάραξης. Στην προσέγγιση αυτή τα σημεία πύκνωσης επί του άξονα της οδού στις

τρεις διαστάσεις χρησιμοποιούνται απευθείας για τη διαμόρφωση των υπόλοιπων στοιχείων. Η εργασία επίσης κάνει θεώρηση των προβλεπόμενων κόμβων ενώ λαμβάνονται υπ' όψιν περιβαλλοντικοί παράγοντες και η προσβασιμότητα. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν συγκεκριμένοι τελεστές γενετικών αλγορίθμων ενώ το κόστος περιελάμβανε στοιχεία όπως την κατασκευή, την απόκτηση γης, τις περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές, τις εδαφικές συνθήκες και τους χωματισμούς. Οι περιορισμοί αφορούν την οριζοντιογραφική και κατακόρυφη καμπυλότητα. Στα συμπεράσματα αναφέρθηκε ότι η διαδικασία χάραξης μέσω των σημείων πύκνωσης μπορούσε να απλουστευθεί σημαντικά ενώ μια χάραξη δεν μπορεί να θεωρηθεί βέλτιστη αν δεν περιλαμβάνεται και η θεώρηση κόμβων στη βελτιστοποίηση.

Εικόνα 7.1: Προσέγγιση αναπαράστασης χάραξης με σημεία πύκνωσης
(Πηγή: Al-Hadad, 2011, Ιδία επεξεργασία)



7.5.5 Περιορισμένη αναζήτηση

Ο Aruga (2005) ανέπτυξε ένα πρότυπο για την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση της οριζοντιογραφικής και της κατακόρυφης χάραξης μιας δασικής οδού χρησιμοποιώντας περιορισμένη αναζήτηση. Στο πρότυπο αυτό επιλέγεται ο αριθμός των κορυφών της πολυγωνικής από τον χρήστη και η βελτιστοποίηση γίνεται αυτόματα. Το πρότυπο χρησιμοποιεί δεδομένα LiDAR υψηλής ακρίβειας. Στην εργασία έγινε ανάλυση της συμπεριφοράς της περιορισμένης αναζήτησης ως προς την αρχική λύση και τον αριθμό των επαναλήψεων. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η επίλυση ήταν καλύτερη με αρχικές χαράξεις χαμηλότερου κόστους με μικρότερο αριθμό κορυφών. Στη συνέχεια οι Aruga, Tashaka, Sessions, & Miyata (2006) χρησιμοποίησαν τη μέθοδο εύρεσης ελάχιστης διαδρομής Dijkstra, κυβικές καμπύλες spline και περιορισμένη αναζήτηση για την εύρεση μια αρχικής χάραξης στο αρχικό πρότυπο του Aruga (2005). Οι Aruga, Chung, Akay, Sessions, & Miyata (2007) επέκτειναν το προηγούμενο πρότυπο περιορισμένης αναζήτησης ενσωματώνοντας την πρόβλεψη επιφανειακής διάβρωσης έτσι ώστε οι χρήστες μπορούν να βελτιστοποιήσουν οριζόντιες και κατακόρυφες χαράξεις δασικών οδών, υπό τον περιορισμός της μέγιστης επιτρεπόμενης στερεοπαροχής σε υδατορρεύματα.

7.5.6 Νοημοσύνη σμήνους

Οι Shafahi & Bagherian (2013) πρότειναν την χρήση ενός αλγορίθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων PSO για την εύρεση μιας κοντινής στο βέλτιστο λύσης. Για τη διαχείριση των περιορισμών εισήχθησαν συναρτήσεις ποινών. Όπως φάνηκε αυτή αποτελεί μια χρήσιμη εναλλακτική αντί της χρήσης γενετικών αλγορίθμων. Οι Kazemi & Shafahi (2013) ανέπτυξαν το προηγούμενο πρότυπο εισάγωντας μια παράλληλη διαδικασία δύο ακόμη αλγορίθμων PSO όπου τα σωματίδια επιλέγουν τυχαία μια αρχική κατεύθυνση.Οι περιορισμοί που λήφθηκαν υπ' όψιν αφρούσαν τη μέγιστη

καμπυλότητα κατά την οριζοντιογραφία, η μέγιστη κατά μήκος κλίση και το ελάχιστο μήκος κατακόρυφων καμπυλών.

Οι Bosurgi, Pellegrino, & Sollazzo (2013) χρησιμοποιήσαν την ίδια μέθοδο αλλά και ορισμένους τελεστές γενετικών αλγορίθμων λαμβάνοντας υπ' όψιν περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως τη γεωμορφολογία, τη σεισμικότητα και την πιθανότητα πλημμύρας και άλλους κινδύνους. Τα στοιχεία κόστους περιελάμβαναν την κατασκευή και συντήρηση που υπολογίζοντα βάσει του μήκους, την ευστάθεια πρανών και το κόστος γης βάσει της θέσης, και τα κόστη χωματουργικών για εκσκαφές, επιχώσεις και μεταφορά χωματισμών.

7.5.7 Πολλαπλοί στόχοι

Σε αντίθεση με τη βελτιστοποίηση οδικών χαράξεων με μια συνάρτηση στόχου, στην περίπτωση περισσότερων της μιας συναρτήσεων στόχου αυτές δεν εκφράζονται σε μονάδες κόστους. Η βιβλιογραφία γύρω από το θέμα της βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων πολλαπλών στόχων είναι αρκετά περιορισμένη, ενώ άλλες μέθοδοι όπως η ανάλυση κόστους οφέλους και η πολυκριτηριακή ανάλυση δεν είναι ικανές να ανταποκριθούν σε ένα τέτοιο πρόβλημα. Η πολύπλοκη δομή του προβλήματος σχεδιασμού μιας οδού καθιστά δύσκολη τη χρήση άλλων μεθοδολογιών. Συνεπώς, οι μεθοδολογίες που ακολουθούνται αποφεύγουν την μετατροπή των τιμών των συναρτήσεων στόχου σε μονάδες κόστους. Με άλλα λόγια, η βελτιστοποίηση χαράξεων πολλαπλών στόχων εξετάζει συναρτήσεις που εκφράζονται σε διαφορετικές μονάδες. Η μέθοδος έχει ευεργετικά αποτελέσματα όταν υπάρχουν αλληλοσυγκρουόμενοι στόχοι, δηλαδή όταν ελαχιστοποιώντας την τιμή του ενός, η τιμή ενός άλλου αυξάνεται. Για παράδειγμα, όπως είναι γνωστό μια πιο τεταμένη χάραξη αποφέρει μεγαλύτερο όγκο χωματισμών και κατασκευαστικό κόστος. Από την άλλη πλευρά μια τέτοια χάραξη προκαλεί εξοικονομήσεις στο κόστος χρηστών. Αντιμετωπίζοντας στόχους σαν και αυτούς ξεχωριστά η βελτιστοποίηση παρέχει ευελιξία και καλύτερο έλεγχο στην επιλογή της χάραξης.

7.5.7.1 Πρότυπο HAO πολλαπλών στόχων

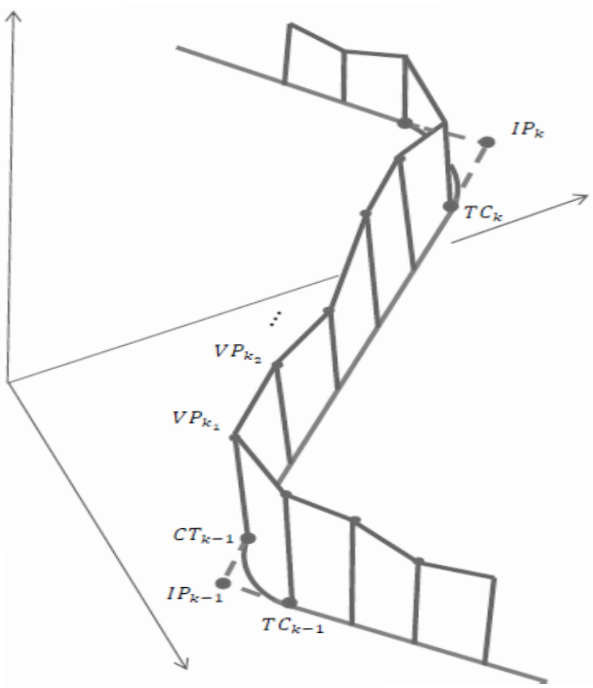
Σύμφωνα με τον Maji (2008) το πρότυπο HAO περιορίζεται μόνο στο συνολικό κόστος της χάραξης και δεν είναι σίγουρο ότι τελικώς λαμβάνεται το ολικό βέλτιστο για όλων των στοιχείων κόστους. Για τον λόγο αυτό ακολούθησε μια προσέγγιση πολλαπλών στόχων με παρόμοια προτυποποίηση με αυτή του αρχικού προτύπου. Σε αντίθεση με το απλό πρότυπο HAO όπου δημιουργείται μια τελική χάραξη, στο πρότυπο πολλαπλών στόχων δημιουργούνται πολλές εναλλακτικές. Οι Maji & Jha (2011) κάνουν ανάλυση πολλαπλών στόχων για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και το βιώσιμο οδικό σχεδιασμό, ενώ σε συγκριτική ανάλυση της βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων με το υπάρχον πρότυπο, οι Maji & Jha (2012) αναφέρουν ότι απαιτούνται υψηλότερες υπολογιστικές δυνατότητες στο πρότυπο πολλαπλών στόχων, καθώς διατηρούνται δύο πληθυσμοί για την εύρεση της λύσης. Τέλος, οι Yang, Kang, Schonfeld, & Jha (2014) αναπτύσσουν ένα πρότυπο πολλαπλών στόχων που υπολογίζει το αντιστάθμισμα μεταξύ των στόχων αυτών ενώ χρησιμοποιεί έναν υβριδικό γενετικό αλγόριθμο πολλαπλών στόχων HMOGA, ο οποίος επιτρέπει την ενσωμάτωση της εμπειρίας του χρήστη σε σχέση με τη σημαντικότητα κάθε στόχου.

7.5.7.2 Το πρότυπο του Hirpa

Οι Hirpa, Hare, Lucet, Pushak, & Tesfamariam (2016) ανέπτυξαν στο UBC ένα πρότυπο ταυτόχρονης βελτιστοποίησης της τρισδιάστατης χάραξης πολλαπλών συναρτήσεων στόχων εκ των οποίων η μία αφορά το κόστος που σχετίζεται με τον όγκο των χωματουργικών και η δεύτερη αφορά το κόστος που σχετίζεται με το μήκος της οδού. Μεταβλητές απόφασης αποτελούν οι συντεταγμένες των κορυφών της πολυγωνικής της οριζοντιογραφίας IP, οι αντίστοιχες ακτίνες των κυκλικών τόξων και τα υψόμετρα σε κορυφές της κατακόρυφης χάραξης της οδού VP, που ορίζονται σε ίσα διαστήματα επί της οριζοντιογραφίας. Η σχέση μεταξύ των κορυφών της οριζοντιογραφίας με τα σημεία υψομέτρου της οδού απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα. Για την επίλυσή του χρησιμοποιήθηκαν τρεις μέθοδοι που

περιελάμβαναν γενετικούς αλγορίθμους πολλαπλών στόχων MOGA, άμεση πολλαπλή αναζήτηση DMS, και τη μέθοδο βαρών WS.

Σχήμα 7.41: Προοπτική απεικόνιση τρισδιάστατης χάραξης
(Πηγή: Hirpa, Hare, Lucet, Pushak, & Tesfamariam, 2016)



7.5.8 Κριτική θεώρηση ταυτόχρονης βελτιστοποίησης τρισδιάστατης χάραξης

Παρ' όλο που έχει σημειωθεί αρκετή πρόοδος στην ανάπτυξη των προτύπων για τη βελτιστοποίηση της κατακόρυφης χάραξης, η ανάπτυξη προτύπων για τη βελτιστοποίηση της οριζοντιογραφικής και κατακόρυφης χάραξης ταυτόχρονα, δεν είναι ακόμη επιτυχής, καθώς υπάρχουν περισσότεροι παράγοντες που εμπλέκονται και μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στις γεωμετρικές απαιτήσεις για την τρισδιάστατη χάραξη. Όπως είδαμε πολλές από τις υπάρχουσες προσεγγίσεις, όπως αυτές των Hogan (1973), Goh, Chew, & Fwa (1988) καθώς και πολλές εργασίες του HAO, που βασίζεται στο πρότυπο του Jong (1998) βελτιστοποιούν ταυτόχρονα την οριζοντιογραφική και την κατακόρυφη χάραξη. Όλες αυτές οι προσεγγίσεις όμως κάνουν κάποια απλουστευτική παραδοχή ως προς τη σχέση της οριζοντιογραφικής κατακόρυφης χάραξης. Για παράδειγμα, στο πρότυπο του Jong (1998) οι κορυφές της πολυγωνικής μηκοτομής ταυτίζονται με αυτές της οριζοντιογραφίας. Βέβαια, στην πραγματικότητα, τόσο ο αριθμός όσο και η θέση των κορυφών της μηκοτομής μπορεί να μεταβάλλεται ανάλογα με το ανάγλυφο αφού καθοριστεί η οριζοντιογραφική χάραξη. Κατά συνέπεια, θεωρώντας τις κορυφές αυτές ταυτόσημες, περιορίζεται ουσιαστικά ο χώρος αναζήτησης σε ένα υποσύνολο των εφικτών λύσεων οδηγώντας σε μια επίλυση χαμηλότερης ποιότητας.

7.6 Βελτιστοποίηση τρισδιάστατης χάραξης δύο σταδίων

Η τρισδιάστατη χάραξη μιας οδού αποτελεί ουσιαστικά μία καμπύλη στον χώρο των τριών διαστάσεων. Η προβολή της τρισδιάστατης χάραξης στο οριζόντιο επίπεδο αποτελεί την οριζοντιογραφική χάραξη, ενώ η προβολή της στην κατακόρυφη επιφάνεια με οδηγό καμπύλη τον άξονα της οδού αποτελεί την κατακόρυφη χάραξη. Στην παρούσα ενότητα περιγράφονται τα πρότυπα βελτιστοποίησης της οριζοντιογραφικής χάραξης και της μηκοτομής κατά στάδια και όχι ως ένα ενιαίο πρόβλημα. Αν και σε ορισμένα πρότυπα δικτυακής βελτιστοποίησης, όπως αυτό του Parker (1977) και του Trietsch(1987a) γίνεται ο ισχυρισμός, ότι ,στην πραγματικότητα χρησιμοποιούν μια προσέγγιση

δύο σταδίων, δηλαδή αφού καθοριστεί η χάραξη κατά την οριζοντιογραφία, στη συνέχεια γίνονται οι υπολογισμοί για την κατακόρυφη χάραξη. Για το λόγο αυτό τα πρότυπα αυτά περιγράφονται στην ενότητα των προτύπων βελτιστοποίησης της οριζοντιογραφικής χάραξης.

Πίνακας 7.4: Έρευνα στην βελτιστοποίηση χαράξεων σε στάδια

Προσέγγιση	**Βιβλιογραφικές Αναφορές**
Αριθμητική αναζήτηση	Knight (1977)
Δικτυακή βελτιστοποίηση	Parker (1977), Trietsch (1987a)(1987b)
Γενετικοί αλγόριθμοι	Chan & Fan (2003), Fan(2004), (παρούσα εργασία)
Τοπική ευρετική αναζήτηση με ακέραιο προγραμματισμό	Cheng & Lee (2006)
Διακριτοί αλγόριθμοι	Mondal (2014), Mondal, Lucet, & Hare (2015), Pushak, Hare, & Lucet (2016)

7.6.1 Αριθμητική αναζήτηση δύο σταδίων

Στην κατηγορία αυτή εντάσσεται το πρόγραμμα NOAH (Knight, 1977) το οποίο αποτελεί το κύριο πρόγραμμα βελτιστοποίησης χάραξης του συστήματος HOPS. Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο παρόμοιο με αυτόν του προγράμματος MINERVA. Ο χρήστης πρέπει να παρέχει μια εφικτή οριζόντια χάραξη για την αρχικοποίηση του προγράμματος. Το πρόγραμμα στη συνέχεια παράγει τη μηκοτομή του εδάφους κατά μήκος της καθορισμένης οριζοντιογραφικής χάραξης. Η γραμμή εδάφους υποβάλλεται στην πλήρη διαδικασία βελτιστοποίηση της κατακόρυφης χάραξης του συστήματος HOPS όπως έχει περιγραφεί στα αντίστοιχα προγράμματα βελτιστοποίησης της κατακόρυφης χάραξης. Σε επόμενο στάδιο επιλέγονται μία προς μία οι οριζοντιογραφικές καμπύλες, οι οποίες μετατοπίζονται ελαφρώς πλευρικά και υπολογίζεται μια αναθεωρημένη μηκοτομή του εδάφους. Η κατακόρυφη χάραξη βελτιστοποιείται πάλι ώστε να διαπιστωθεί αν επιτελείται εξοικονόμηση κόστους. Αν διαπιστωθεί μείωση του συνολικού κόστους, τότε υιοθετείται η συγκεκριμένη αλλαγή στην χάραξη και επιλέγεται η επόμενη προς εξέταση οριζοντιογραφική καμπύλη. Όταν το πρόγραμμα εξετάσει ολόκληρη την διαδρομή, διορθώνει συνολικά την οριζοντιογραφική χάραξη σε σχέση με τους περιορισμούς. Στη συνέχεια η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου βρεθεί ο συνδυασμός χαμηλότερου κόστους. Στα δεδομένα εισαγωγής περιλαμβάνονται γραμμικά στοιχεία όπως οδοί, σιδηρόδρομοι, υδατορρεύματα και άλλα τοπογραφικά χαρακτηριστικά για τα οποία καθορίζεται το σχετιζόμενο κόστος διέλευσης. Εκτός αυτών καθορίζονται και επιφανειακά ή σημειακά στοιχεία επιρροής προκαλώντας ποινές κόστους. Αυτές οι απαιτήσεις είναι στην πραγματικότητα ταυτόσημες με αυτές του BRUTUS και του προτύπου των Craine & Heatherington (1974). Τα αντίστοιχα δεδομένα εισαγωγής για την κατακόρυφη χάραξη είναι τα ίδια με αυτά του προγράμματος MINERVA, συμπεριλαμβανομένου του ψηφιακού μοντέλου εδάφους της περιοχής μελέτης.

Για την αξιολόγηση του προγράμματος πραγματοποιήθηκε μια σειρά δοκιμών. Το πρόγραμμα κρίθηκε καταλληλότερο για το προκαταρκτικό σχεδιασμό οδών, γεγονός που δεν ανταποκρινόταν στον αρχικό στόχο. Ακόμη, επισημάνθηκε ότι η χρήση του προγράμματος απαιτούσε σημαντικό ποσό χρόνου και προσπάθειας. Το κόστος χρηστών ήταν το κύριο στοιχείο που καθόριζε τη διαδικασία βελτιστοποίησης, ενώ θα μπορούσαν να έχουν χρησιμοποιηθεί πολύ πιο απλοϊκά και οικονομικά εργαλεία. Βέβαια, σε κάθε περίπτωση το πρόγραμμα εκτελέστηκε και χωρίς τη συμπερίληψη του κόστους χρηστών για την εύρεση της χάραξης με το μικρότερο κόστος. Δοκιμές του προγράμματος που παρέχουν ικανοποιητική κατανόηση για τον τρόπο λειτουργίας κάνουν οι Davies & Broughton (1979). Το πρόγραμμα NOAH θα μπορούσε να περιγραφεί ως μια ανώτερη εκδοχή του BRUTUS, καθώς παράγει μια πιο ρεαλιστική οριζοντιογραφική χάραξη με καμπυλόγραμμη μορφή. Επίσης, η δυνατότητα της πλευρικής μετατόπισης οριζοντιογραφικών καμπυλών και του ελέγχου για

εξοικονόμηση κόστους δεν είναι διαθέσιμη στο BRUTUS. Η συνεισφορά αυτής της λειτουργίας εξαρτάται από το μέγεθος των χωματουργικών εργασιών. Βέβαια, μικρές εξοικονομήσεις στο κόστος των χωματουργικών που προκύπτουν από αυτές τις μετακινήσεις της χάραξης, μπορεί να αντισταθμίζονται από υψηλότερο κόστος οδοστρώματος μιας χάραξης μεγαλύτερου μήκους. Κατά συνέπεια, αν τα χωματουργικά δεν προκαλούν μεγάλες διαφορές, τότε η τελική χάραξη που παράγεται από το πλήρες πρόγραμμα NOAH θα είναι παρόμοια με αυτή του BRUTUS με τη διαφορά ότι αυτή θα αναπαριστάται με καμπυλόγραμμα στοιχεία.

7.6.2 Δικτυακή βελτιστοποίηση δύο σταδίων

Αν και ορισμένα πρότυπα δικτυακής βελτιστοποίησης, όπως αυτά του Parker (1977) και του Trietsch (1987a) υποστηρίζουν ότι έχουν τη δυνατότητα ταυτόχρονης επιλογής οριζοντιογραφίας και μηκοτομής, εντούτοις χρησιμοποιούν μια προσέγγιση βελτιστοποίησης δύο σταδίων καθώς η κατακόρυφη χάραξη καθορίζεται πριν την οριζοντιογραφική. Τα πρότυπα αυτά περιγράφονται στα επόμενα εδάφια.

7.6.2.1 Το πρότυπο του Parker

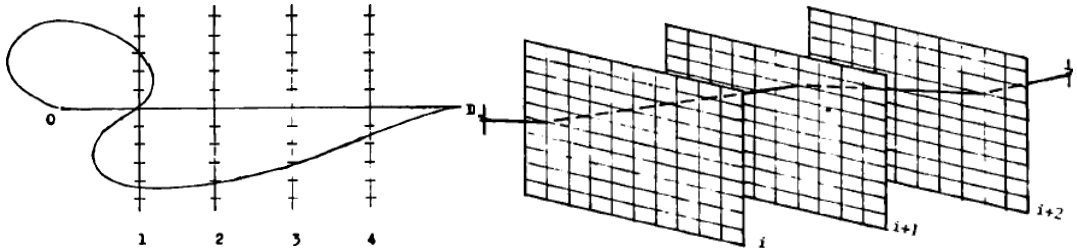
Ο Parker (1977) ανέπτυξε μια προσέγγιση δύο σταδίων για τη βελτιστοποίηση ενός οδικού διαδρόμου υπό τον περιορισμό μέγιστης κατά μήκος κλίσης. Αν και αυτή η προσέγγιση υποστήριζε ότι βελτιστοποιεί ταυτόχρονα στις τρεις διαστάσεις, στην πραγματικότητα αυτή γίνεται ξεχωριστά αφού η κατακόρυφη χάραξη καθορίζεται πριν τη βελτιστοποίηση της χάραξης κατά την οριζοντιογραφία. Στην προσέγγιση αυτή, η περιοχή ενδιαφέροντος χωρίζεται αρχικά σε ζώνες, όπου το μέσο υψόμετρο κάθε ζώνης λαμβάνεται από το υψόμετρο εδάφους στο κεντροειδές. Στη συνέχεια, παράγεται μια λεία επιφάνεια από τα υψόμετρα των κεντροειδών των ζωνών, ώστε κάθε οριζοντιογραφική χάραξη από την αρχή προς το τέλος να τέμνει την επιφάνεια αυτή με μια κατακόρυφη χάραξη που να ικανοποιεί τους περιορισμούς μέγιστης κατά μήκος κλίσης. Η λεία επιφάνεια δημιουργείται μέσω ενός δυωνυμικού αναπτύγματος προκαθορισμένου βαθμού και στις δύο διαστάσεις της οριζοντιογραφίας. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται γραμμική παλινδρόμηση για την ελαχιστοποίηση των υπολοίπων, που δημιουργούνται μεταξύ της επιφάνειας που προβάλλεται και της επιφάνειας του εδάφους. Έως ένα βαθμό η διαδικασία ομαλοποίησης της επιφάνειας είναι παρόμοια με αυτή του Turner (1968), όπου πάλι η επιφάνεια προκύπτει με γραμμική παλινδρόμηση χωρίς να λαμβάνονται υπ' όψιν όμως περιορισμοί κατά μήκος κλίσης. Στο δεύτερο στάδιο της προσέγγισης του, τα κεντροειδή των υποζωνών σχηματίζουν ένα πλεγματικό δίκτυο. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται ένα πρόγραμμα πολλαπλών διαδρομών για να προκύψει ένα σύνολο των καλύτερων χαράξεων, που ελαχιστοποιούν τις απόλυτες τιμές των υπολοίπων, που μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένα μέτρο ελαχιστοποίησης των χωματισμών. Το στάδιο αυτό είναι επίσης παρόμοιο με αυτό του Turner (1968) με τη διαφορά ότι λαμβάνονται λιγότερα στοιχεία κόστους στη συνάρτηση.

7.6.2.2 Τα πρότυπα του Trietsch

Σε εργασία του Trietsch (1987a) παρουσιάστηκε μια οικογένεια μεθόδων για τον προκαταρκτικό σχεδιασμό των οδικών χαράξεων. Οι μέθοδοι που προτάθηκαν απευθύνονται επίσης στις δύο διαστάσεις καθώς η βελτιστοποίηση οριζοντιογραφίας και μηκοτομής δεν γίνεται ταυτόχρονα. Στην εργασία περιλαμβάνονται 16 πρότυπα με διαφορετικές δομές και διαδικασίες υπολογισμού του κόστους. Ορισμένα από αυτά ανήκουν στην κατηγορία δικτυακής βελτιστοποίησης, ενώ άλλα στην προσέγγιση δυναμικού προγραμματισμού. Ο Trietsch(1987b) εφήρμοσε περαιτέρω τα αποτελέσματα στο σχεδιασμό ενός δικτύου οδών, ικανό να ικανοποιήσει την ζήτηση για κυκλοφορία ελαχιστοποιώντας το τελικό κόστος. Προτάθηκαν τέσσερα βασικά πλέγματα που περιελάμβαναν, φατνία σχήματος ορθογωνίου, τετραγώνου, έλλειψης και κηρήθρας. Το πλέγμα ορθογώνιων φατνίων χρησιμοποιείται κυρίως στον δυναμικό προγραμματισμό αλλά μπορεί επίσης να προτυποποιηθεί σε πρόβλημα δίκτυου. Το προφανές μειονέκτημα αυτού του πλέγματος είναι ότι στον δυναμικό προγραμματισμό δεν μπορεί να να διαχειριστεί οπισθόδρομες χαράξεις, οι οποίες είναι ορισμένες

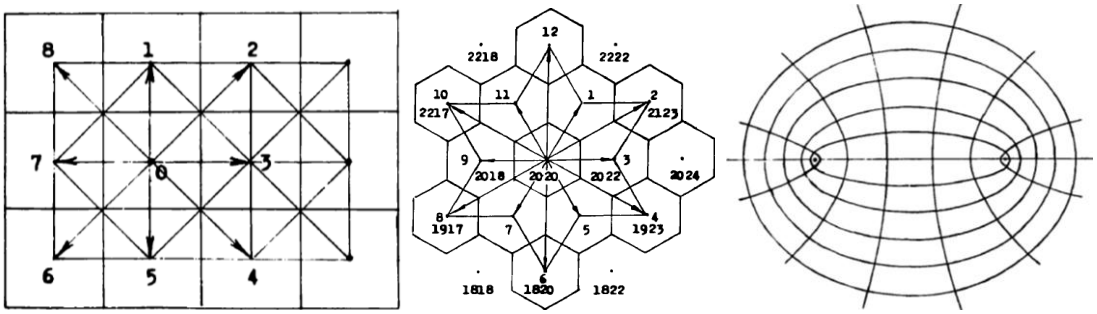
φορές απαραίτητες σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο. Μια χάραξη που δεν μπορεί να προσεγγιστεί από ένα τέτοιο πλέγμα παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.

Σχήμα 7.42: Οπισθόδρομη χάραξη και ορθογώνιο πλέγμα δυναμικού προγραμματισμού (Πηγή: Trietsch, 1987a)



Τα άλλα τρία είδη πλεγμάτων έχουν προταθεί για τις περιπτώσεις οπισθόδρομων χαράξεων με διαφορές ως προς τις επιλογές των γωνιών διεύθυνσης. Το πιο λεπτομερές πλέγμα, δηλαδή αυτό με φατνία σχήματος κηρήθρας επιτρέπει δώδεκα διαφορετικές κατευθύνσεις στις οποίες μπορεί να κινηθεί η χάραξη. Αφού οι απατήσεις καμπυλότητας δεν λαμβάνονταν υπ' όψιν στα πρώτα αυτά πρότυπα βελτιστοποίησης χαράξεων, ο Trietsch (1987a) έθεσε έμμεσα περιορισμούς ως προς τις επιτρεπόμενες κατευθύνσεις που μπορούσε να ακολουθήσει η χάραξη εισάγοντας έναν τροποποιημένο αλγόριθμο εύρεσης της ελάχιστης διαδρομής.

Σχήμα 7.43: Πλέγμα φατνίων τετραγώνων, κηρήθρας και ελλείψεων υπερβολών (Πηγή: Trietsch, 1987a)



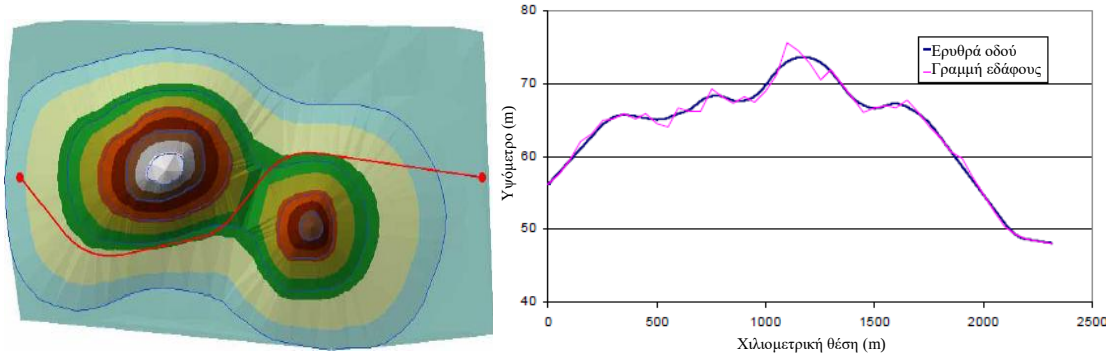
Η βέλτιστη χάραξη που προκύπτει από την προσέγγιση δικτυακής βελτιστοποίησης αναπαρίσταται από ευθύγραμμα τμήματα που την καθιστά πολύ αδρομερή. Στην πραγματικότητα πρόκειται για οδικό διάδρομο και όχι για χάραξη γεγονός που επιβεβαιώνεται και από το μέγεθος του εξαγωνικού φατνίου το οποίο λαμβάνεται με διάμετρο πεντακοσίων μέτρων. Αν χρειάζεται μια πιο ακριβής χάραξη ο αριθμός των φατνίων πρέπει να αυξηθεί και το μέγεθος τους να μειωθεί, ώστε να καλύπτουν ολόκληρη την περιοχή μελέτης. Βέβαια, το πρόβλημα δικτυακής βελτιστοποίηση αυξάνεται πολύ και γίνεται δισεπίλυτο. Άλλες ελλείψεις της προσέγγισης αυτής είναι ο υπολογισμός και η αποθήκευση των απαιτήσεων κόστους κάθε τμήματος. Για την εφαρμογή του αλγορίθμου ελάχιστης διαδρομής, το κόστος κάθε τμήματος πρέπει να έχει καθοριστεί πριν την εκτέλεση της διαδικασίας αναζήτησης. Αν το προκύπτον δίκτυο είναι πολύ μεγάλο, οι απαιτήσεις για υπολογιστική ισχύ και αποθήκευση είναι σημαντικές.

7.6.3 Γενετικοί αλγόριθμοι δύο σταδίων

Οι Chan & Fan (2003) ανέπτυξαν ένα πρότυπο βελτιστοποίησης της οριζοντιογραφικής και κατακόρυφης χάραξης χρησιμοποιώντας γενετικούς αλγόριθμους. Το πρότυπο λαμβάνει υπ' όψιν περιορισμούς της οριζοντιογραφικής και κατακόρυφης καμπυλότητας και μέγιστης κατά μήκος κλίσης χρησιμοποιώντας δεδομένα από ένα σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών. Περιλαμβάνονται διάφορα στοιχεία κόστους εξαρτώμενα από τη θέση και τον όγκο. Πρωτοτυπία του προτύπου αποτέλεσε μια

τεχνική εισαγωγής κενών γονίδια για να υποδηλώσουν κορυφές που δεν χρησιμοποιούνται. Έτσι, για πρώτη φορά ο αριθμός των κορυφών δεν χρειαζόταν να καθοριστεί από τον χρήστη αλλά υπήρχε μια μέγιστη τιμή του αριθμού κορυφών από την οποία χρησιμοποιούνταν όσες έκρινε το πρότυπο βελτιστοποίησης ότι χρειάζονταν. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με το πρότυπο έδωσε ο Fan (2004) περιγράφοντας μια προσέγγιση δύο επιπέδων για τη βελτιστοποίηση της οριζοντιογραφίας και της μηκοτομής μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας. Σε αντίθεση με τα πρότυπα ταυτόχρονης βελτιστοποίησης τρισδιάστατης χάραξης το πρότυπο αυτό μπορούσε να έχει διαφορετικό αριθμό κορυφών οριζοντιογραφία από τις κορυφές της μηκοτομής. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως το πρότυπο δύο σταδίων του Fan (2004) πετύχαινε αισθητά χαμηλότερο κόστος χωματουργικών από αυτό της ταυτόχρονης τρισδιάστατης βελτιστοποίησης του Jong (1998).

Σχήμα 7.44: Βελτιστοποιημένη οριζοντιογραφία και μηκοτομή
(Πηγή: Fan, 2004, Ιδία επεξεργασία)



Στην προσέγγιση με γενετικούς αλγόριθμους ανήκει και το πρότυπο RoadEvolver, που αναπτύσσεται στην παρούσα εργασία. Γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται για τη βελτιστοποίηση της οριζοντιογραφικής και της κατακόρυφης χάραξης σε δύο στάδια. Βέβαια, το πρότυπο αυτό περιλαμβάνει σημαντικές διαφοροποιήσεις από τα υπόλοιπα πρότυπα που επιτρέπουν τη χρήση του στο στάδιο της προμελέτης.

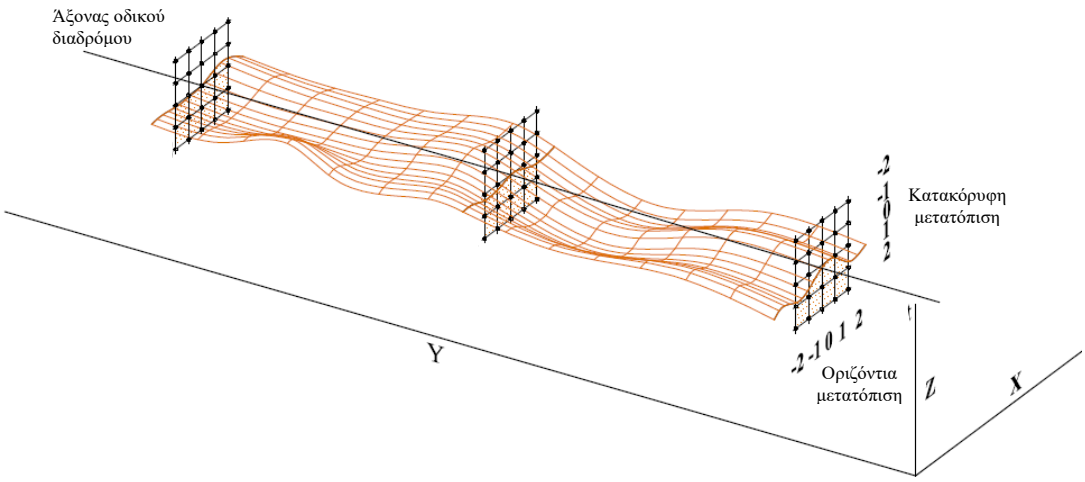
7.6.4 Τοπική αναζήτηση με μικτό ακέραιο προγραμματισμό δύο σταδίων

Οι Cheng & Lee (2006) επεκτείνοντας το προηγούμενο πρότυπο βελτιστοποίησης κατακόρυφης χάραξης (Lee & Cheng, 2001b) πρότειναν ένα πρότυπο βελτιστοποίησης χαράξεων στις τρεις διαστάσεις χρησιμοποιώντας μια ευρετική μέθοδο τοπικής αναζήτησης για την εύρεση της οριζοντιογραφικής χάραξης και μικτό ακέραιο προγραμματισμό για την εύρεση της κατακόρυφης χάραξης. Αρκετά στοιχεία κόστους περιλαμβάνονται στο πρότυπο, όπως το κόστος των χωματουργικών και το κόστος γεφυρών και σηράγγων. Η συνεισφορά αυτής της εργασίας είναι ότι χρησιμοποιούνται τόξα συναρμογής για τη ρεαλιστική αναπαράσταση της χάραξης και διάφορους περιορισμούς του σχεδιασμού. Εκτός της οριζοντιογραφίας και της μηκοτομής δημιουργείται και ένα διάγραμμα λειτουργικών ταχυτήτων βαρέων οχημάτων κατά την έξοδο αποτελεσμάτων. Παρά τη συνεισφορά της εργασίας, το πρότυπο αυτό παρουσιάζει ορισμένες ελλείψεις. Αρχικά, η βελτιστοποίηση γίνεται σε δύο στάδια. Η οριζοντιογραφική χάραξη βελτιστοποιείται πρώτα με μια τοπική αναζήτηση μη εξασφαλίζοντας την επαρκή εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης. Έπειτα, η κατακόρυφη χάραξη βελτιστοποιείται με βάση την δεδομένη οριζοντιογραφική χάραξη. Προφανώς και η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση στις τρεις διαστάσεις είναι προτιμότερη, αν και τα υπάρχοντα πρότυπα παρουσιάζουν επίσης ορισμένα προβλήματα, όπως θα δούμε στη συνέχεια. Επίσης, το κόστος απαλλοτριώσεων, το οποίο είναι σημαντικό στοιχείο κόστους σε ένα οδικό έργο δεν λήφθηκε υπ' όψιν στο πρότυπο. Τέλος, οι περιοχές μη διέλευσης στο πρότυπο θεωρήθηκαν κυκλικού σχήματος ενώ στην πραγματικότητα μπορεί να έχουν οποιοδήποτε σχήμα.

7.6.5 Διακριτοί αλγόριθμοι

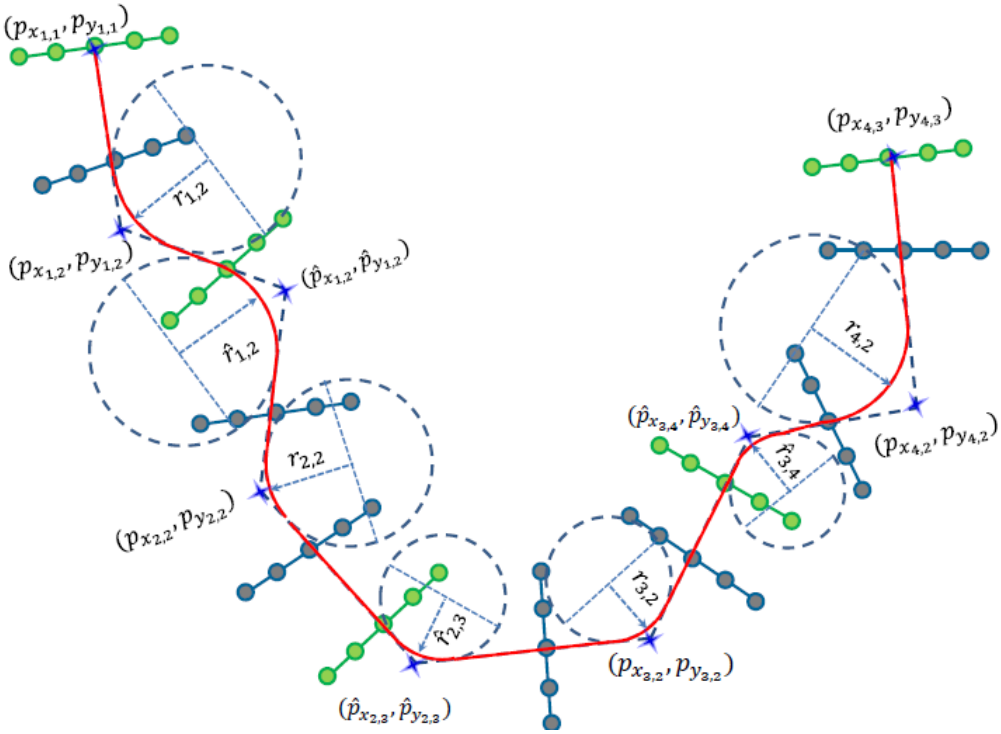
Για τη βελτιστοποίηση της χάραξης ο Mondal (2014) ανέπτυξε ένα διακριτό πρότυπο βελτιστοποίησης οριζοντιογραφικής χάραξης δύο επιπέδων, του οποίου η συνάρτηση στόχου εμπεριείχε το πρότυπο κατακόρυφης χάραξης μικτού ακέραιου προγραμματισμού των Hare, Hossain, Lucet, & Rahman (2014). Δηλαδή, η συνάρτηση στόχου περιείχε ένα εμφωλευμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Επειδή, η πρόσβαση στην εσωτερική συνάρτηση ήταν δύσκολη υιοθετήθηκε μια προσέγγιση χωρίς χρήση παραγώγων DFO. Ο οδικός διάδρομος θεωρήθηκε δεδομένος και προσεγγίστηκε με πλέγματα.

Σχήμα 7.45: Τρισδιάστατος οδικός διάδρομος
(Πηγή: Mondal, Lucet, & Hare, 2015, Ιδία επεξεργασία)



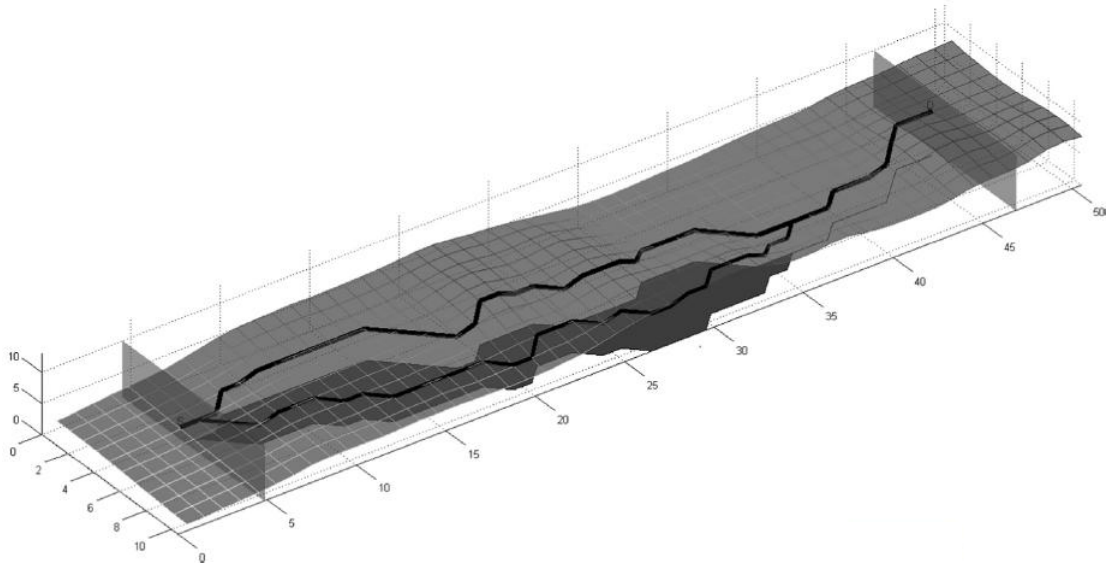
Για το εξωτερικό πρόβλημα θεωρήθηκαν τρεις μεταβλητές απόφασης για κάθε σημείο, οι οποίες αποτελούνται από την οριζόντια και κατακόρυφη μετατόπιση ως προς το κέντρο του πλέγματος του οδικού διαδρόμου και την ακτίνα καμπυλότητας, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

Σχήμα 7.46: Αναπαράσταση οριζοντιογραφικής χάραξης και μεταβλητές απόφασης
(Πηγή: Mondal, 2014)



Η αναπαράσταση της βέλτιστης χάραξης γίνεται με ευθύγραμμα τμήματα και κυκλικά τόξα στην οριζοντιογραφία, ενώ για την κατακόρυφη χάραξη χρησιμοποιούνται καμπύλες spline (Mondal, Lucet, & Hare, 2015). Χρησιμοποιήθηκαν δύο λογισμικά πακέτα για την επίλυση του προβλήματος το NOMAD και το HOPSPACK. Το πρώτο περιλαμβάνει αλγόριθμο άμεσης αναζήτησης MADS ενώ το δεύτερο περιλαμβάνει έναν μη ντετερμινιστικό υβριδικό αλγόριθμο παράλληλης αναζήτησης. Σε κάθε επανάληψη βελτιστοποιείται και η κατακόρυφη χάραξη, το οποίο αποτελεί το εσωτερικό πρόβλημα. Σε μελέτη περίπτωσης η Mondal, Lucet, & Hare (2015) υποστήριξαν πως το η εφαρμογή του προτύπου οδήγησε σε μειώσεις της τάξης του 27% στο κόστος σε σχέση με τις συμβατικές διαδικασίες. Με το πρόβλημα εύρεσης του οδικού διαδρόμου ασχολήθηκαν οι Pushak, Hare, & Lucet (2016) οι οποίοι ανέπτυξαν ένα πρότυπο ανόμοιων πολλαπλών διαδρομών με αναζήτηση δύο κατευθύνσεων. Στόχος του προτύπου είναι η παραγωγή εναλλακτικών οδικών διαδρόμων όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας μπορούσαν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν από το πρότυπο του Mondal (2014).

Σχήμα 7.47: Εναλλακτικοί οδικοί διάδρομοι
(Πηγή: Pushak, Hare, & Lucet, 2016)



7.7 Αξιολόγηση προσεγγίσεων

Στις προηγούμενες ενότητες του κεφαλαίου διερευνήθηκαν υπάρχοντα μαθηματικά πρότυπα που έχουν αναπτυχθεί για τη βελτιστοποίηση των οδικών χαράξεων. Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αφορούν γενικά μια προσέγγιση και όχι κάθε πρότυπο ξεχωριστά. Για παράδειγμα, η προσέγγιση αριθμητικής αναζήτησης στο πρότυπο του Hayman (1970) δεν παράγει μια λεία χάραξη, καθώς αυτή απεικονίζεται μόνο με ευθύγραμμα τμήματα. Αντίθετα, στο πρότυπο αριθμητικής αναζήτησης των Goh, Chew, & Fwa (1988) η χάραξης είναι λεία.

Ο δυναμικός προγραμματισμός έχει χρησιμοποιηθεί για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης χάραξης τόσο κατά την οριζοντιογραφία και τη μηκοτομή ξεχωριστά, όσο και για τη βελτιστοποίηση της τρισδιάστατης χάραξης ταυτόχρονα. Η προσέγγιση αυτή επέτρεψε την προτυποποίηση περισσότερο περίπλοκων συναρτήσεων κόστους για τον καθορισμό της βέλτιστης χάραξης. Παρ' όλα αυτά για μεγάλου μεγέθους προβλήματα υπάρχει μικρή πιθανότητα επιλογής της διαδρομής που ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος. Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των προσεγγίσεων συνοψίζονται με γενικό τρόπο στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 7.5: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα προσεγγίσεων για τη βελτιστοποίηση χάραξης

Προσέγγιση	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Λογισμός μεταβολών	-Προκύπτει λεία χάραξη -Πιθανώς εντοπίζει το ολικό βέλτιστο -Συνεχής χώρος αναζήτησης	-Μόνο διαφορίσιμη συνάρτηση στόχου -Μόνο συνεχή στοιχεία κόστους -Πολύπλοκη προτυποποίηση -Υψηλές υπολογιστικές απαιτήσεις -Πιθανή παγίδευση σε τοπικό βέλτιστο
Δικτυακή βελτιστοποίηση	-Απλή και εύκολη χρήση -Ανεπτυγμένοι αλγόριθμοι επίλυσης -Πιθανώς εντοπίζει το ολικό βέλτιστο	-Προκύπτει μη λεία χάραξη -Διακριτός χώρος αναζήτησης -Υψηλές απαιτήσεις μνήμης
Δυναμικός προγραμματισμός	-Απλή και εύκολη χρήση -Ανεπτυγμένοι αλγόριθμοι επίλυσης -Πιθανώς εντοπίζει το ολικό βέλτιστο	-Προκύπτει μη λεία χάραξη -Διακριτός χώρος αναζήτησης -Υψηλές απαιτήσεις μνήμης -Μόνο μη πεπλεγμένες συναρτήσεις -Ανεξαρτησία υποπροβλημάτων -Δυσκολία σε οπισθόδρομες χαράξεις
Πλήρης απαρίθμηση	-Μπορεί να προκύψει ρεαλιστική χάραξη -Πιθανώς εντοπίζει το ολικό βέλτιστο -Θεώρηση σημαντικότερων περιορισμών	-Μη αποδοτική μέθοδος -Διακριτός χώρος αναζήτησης
Γραμμικός προγραμματισμός	-Απλή και εύκολη χρήση -Ανεπτυγμένοι αλγόριθμοι επίλυσης -Πιθανώς εντοπίζει το ολικό βέλτιστο -Προκύπτει λεία καμπύλη -Συνεχής χώρος αναζήτησης	-Μόνο γραμμικά στοιχεία κόστους και περιορισμοί -Περιορισμοί κλίσης και καμπυλότητας για περιορισμένο αριθμό σημείων
Αριθμητική αναζήτηση	-Μπορεί να προκύψει ρεαλιστική χάραξη -Θεώρηση σημαντικότερων περιορισμών -Συνεχής χώρος αναζήτησης	-Πιθανή παγίδευση σε τοπικό βέλτιστο -Πολύπλοκη προτυποποίηση -Υψηλές υπολογιστικές απαιτήσεις -Δυσκολία προτυποποίησης ασυνεχών στοιχείων κόστους
Τοπική ευρετική αναζήτηση με μικτό ακέραιο προγραμματισμό	-Μπορεί να προκύψει ρεαλιστική χάραξη -Θεώρηση σημαντικότερων περιορισμών	-Μπορεί να παράγει τοπικά βέλτιστα

Η σημείωση ότι μια προσέγγιση πιθανώς εντοπίζει το ολικό βέλτιστο, σημαίνει πως η προσέγγιση αυτή βρίσκει τη βέλτιστη λύση υπό τις παραδοχές και υποθέσεις που γίνονται, οι οποίες δεν είναι και οπωσδήποτε ρεαλιστικές ως προς το πραγματικό πρόβλημα σχεδιασμού της χάραξης. Προφανώς καμία από τις προσεγγίσεις που περιγράφονται δεν είναι καθολικά καλύτερη από τις υπόλοιπες και υπάρχει πάντα ένα αντιστάθμισμα μεταξύ των πλεονεκτημάτων άλλων προσεγγίσεων.

7.8 Κριτήρια ικανοποιητικών προτύπων

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάστηκε μεγάλο πλήθος υπαρχόντων προτύπων βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων ενώ τα πιθανά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των προσεγγίσεων παρουσιάστηκαν στον πίνακα της προηγούμενης ενότητας με ένα γενικό τρόπο. Για το λόγο αυτό τίθενται τα παρακάτω κριτήρια για την αξιολόγηση των προτύπων:

1. Να λαμβάνονται υπ’ όψιν τα σημαντικά και ευαίσθητα στοιχεία κόστους

2. Προτυποποίηση των περιορισμών των οδικών χαράξεων
3. Να προκύπτει μια ρεαλιστική χάραξη
4. Δυνατότητα παραγωγής οπισθόδρομων χαράξεων
5. Ταυτόχρονη βελτιστοποίηση χαράξεων στις τρεις διαστάσεις
6. Εύρεση του ολικού βέλτιστου ή μιας κοντινής σε αυτό λύσης
7. Χρήση αποδοτικού αλγόριθμου επίλυσης
8. Χαμηλές αποθηκευτικές απαιτήσεις και υπολογιστικής ισχύος
9. Συνεχής χώρος αναζήτησης της λύσης
10. Αυτόματη αποφυγή μη προσβάσιμων περιοχών
11. Συμβατότητα με βάσεις δεδομένων συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών
12. Προτυποποίηση των μεταβλητών απόφασης του σχεδιασμού

Η πρώτη συνθήκη συνήθως εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα των δεδομένων, όμως ένα ικανοποιητικό πρότυπο θα πρέπει να είναι ικανό να διαχειρίζεται διάφορα στοιχεία κόστους, περιλαμβάνοντας τόσο συνεχείς, όσο και διακριτές συναρτήσεις κόστους. Οι συνθήκες δύο έως πέντε εξετάζονται με περισσότερες λεπτομέρειες στο τρίτο μέρος της εργασίας. Η έβδομη και όγδοη συνθήκη είναι λιγότερο κρίσιμες, καθώς η εξέλιξη της τεχνολογίας επιτρέπει τη γρήγορη εκτέλεση υπολογισμών και την αποθήκευση τεράστιου όγκου δεδομένων. Η προτελευταία συνθήκη επιτρέπει την εύκολη διαχείριση και ευελιξία στη μορφή χωρικών δεδομένων.

Ενώ τα παραπάνω αναφερθέντα κριτήρια είναι γνωστά από προηγούμενες έρευνες (Jha, Schonfeld, Jong, & Kim, 2006), η προτυποποίηση των μεταβλητών απόφασης του σχεδιασμού είναι ένα κριτήριο που εισάγεται στο πλαίσιο αυτής της εργασίας. Με βάση την ανάλυση των προτύπων που έγινε στο κεφάλαιο αυτό διαπιστώθηκε έλλειψη στην προτυποποίηση των μεταβλητών του σχεδιασμού μη λαμβάνοντας υπ ‘όψιν σημαντικά στοιχεία της οριζοντιογραφίας και της μηκοτομής. Είναι ελάχιστα τα πρότυπα που λαμβάνουν υπ’ όψιν τόξα συναρμογής για την αναπαράσταση της χάραξης. Ακόμη και στις περιπτώσεις όμως, που αυτά λαμβάνονται υπ’ όψιν ακολουθούνται απλές διαδικασίες προσαρμογής των ελάχιστων τιμών των κυκλικών τόξων ή και των τόξων συναρμογής στην υπάρχουσα χάραξη και όχι επιλογής των τιμών των ακτινών και των παραμέτρων που προσαρμόζονται καλύτερα στο φυσικό έδαφος, όπως κάνει ένας μελετητής κατά το στάδιο της προμελέτης. Συνεπώς, τα υπάρχοντα πρότυπα καθίστανται ακατάλληλα για χρήση στο στάδιο αυτό, καθώς δεν μοντελοποιούν τις αποφάσεις εκείνες που καλείται να πάρει ένας μελετητής κατά το συμβατικό σχεδιασμό.

Τα παραπάνω κριτήρια ορισμένες φορές είναι αντικρουόμενα καθώς εστιάζοντας σε ορισμένα στοιχεία άλλα μπορεί να μην ληφθούν υπ’ όψιν. Επίσης είναι πολύ δύσκολο να καθοριστεί η κρισιμότητα κάθε κριτηρίου. Με βάση την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας παρατηρήθηκε ότι μετά την πρόοδο που σημειώθηκε την περίοδο από τα τέλη της δεκαετία του 60’ έως τις αρχές του 70’ λόγω ης πληθώρας οδικών έργων, στη συνέχεια υπήρξε σχετική στασιμότητα ερευνητικά. Παρ’ όλα αυτά τα τελευταία χρόνια με την εξέλιξη των μεθόδων βελτιστοποίησης σημειώνεται αναζωπύρωση του ερευνητικού ενδιαφέροντος για τη βελτιστοποίηση των οδικών χαράξεων. Τα κριτήρια που αναφέρθηκαν αποτελούν όλα βαρύνουσας σημασίας και απαιτούν ιδιαίτερη ερευνητική προσπάθεια το καθένα ξεχωριστά. Η αξιολόγηση του προτύπου που αναπτύσσεται στην παρούσα εργασία με βάση αυτά τα κριτήρια γίνεται στο προτελευταίο κεφάλαιο.

7.9 Εφαρμογή προτύπων βελτιστοποίησης χαράξεων

Υπάρχουν αρκετοί λόγοι για την προφανή έλλειψη προόδου στην εφαρμογή μεθόδων βελτιστοποίησης στις οδικές χαράξεις τις προηγούμενες δεκαετίες. Κατά τη μακρά διάρκεια ανάπτυξης των προτύπων μαθηματικού προγραμματισμού, οι δυσμενείς περιβαλλοντικές επιδράσεις των αυτοκινητοδρόμων και άλλων κύριων οδών άρχισαν να λαμβάνουν όλο και μεγαλύτερη προσοχή, καθώς η κοινή γνώμη αντιδρούσε. Κατά συνέπεια, προωθήθηκε η προσέγγιση της κατάστρωσης και αξιολόγησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων διαφόρων οδεύσεων που οδηγούσε στην τελική επιλογή μέσω μεθόδων πολυκριτηριακής ανάλυσης. Όπως γίνεται αντιληπτό οι αναλυτικές διαδικασίες για τη βελτιστοποίηση χάραξης ποτέ δεν αξιοποιήθηκαν στο εύρος των δυνατοτήτων τους. Η επίπτωση της τεχνολογίας ήταν περιορισμένη όχι λόγω έλλειψης επιθυμίας από την πλευρά των ερευνητών αλλά λόγω των μεταβαλλόμενων εξωτερικών παραγόντων. Η βελτιστοποίηση εκτοπίστηκε από αναδυόμενες προτεραιότητες σε σχέση με τη βελτίωση της ανάλυσης κόστους-οφέλους και την καλύτερη εκτίμηση περιβαλλοντικών ζητημάτων, που εμπεριείχαν σημαντικά το στοιχείο κριτικής.

Οι Bridle & Porter (2002) εντοπίζουν αίτια θεσμικού χαρακτήρα στην αποτυχία εφαρμογής μεθόδων βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων. Τα προγράμματα που αναπτύχθηκαν περισσότερο διέρρευσαν παρά εκδόθηκαν επίσημα και υπήρχε ελάχιστη στήριξη από τα υψηλά κλιμάκια διοίκησης για την χρησιμοποίηση τους. Αυτό συνέβη αφ' ενός διότι η τεχνολογία αυτή ήταν άγνωστη και αφ' ετέρου διότι υπήρχαν πολλές άλλες ανταγωνιστικές πρωτοβουλίες που βρίσκονταν στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος προς απογοήτευση όσων ασχολήθηκαν με τη βελτιστοποίηση οδικών χαράξεων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ήταν η περίπτωση του συστήματος HOPS. Παρ' όλα αυτά τα τελευταία χρόνια εκτός από το έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον παρατηρείται πως η εφαρμογή των προτύπων βελτιστοποίησης βρίσκει αντίκρισμα με την έκδοση και χρήση εμπορικών λογισμικών πακέτων όπως το Quantm™ και οι λειτουργίες βελτιστοποίησης του σχεδιασμού οδών στο Infraworks®.

7.9.1 Το σύστημα HOPS

Από το 1967 ξεκίνησε η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος προγραμμάτων βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων στο βρετανικό εργαστήριο έρευνας μεταφορών και οδών TRRL. Στόχος του συστήματος ήταν η ελαχιστοποίηση του κόστους των νέων οδικών έργων και ιδιαίτερα των χωματουργικών εργασιών. Μια αρχική περιγραφή του συστήματος έχει κάνει ο Stott(1973) ενώ σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τα προγράμματα και την εξέλιξη του συστήματος δίνει ο Gallagher (2002). Η εργασία επικεντρώθηκε αρχικά στην βελτιστοποίηση της κατακόρυφης χάραξης. Ένα σύνολο προγραμμάτων, συμπεριλαμβανομένου του MINERVA, εκδόθηκαν τελικά προς χρήση από τα τεχνικά γραφεία το 1974, με εξαίρεση το THEUS, το οποίο βελτιστοποιεί τον όγκο και τη στρατηγική διανομής εκχωμάτων και εκδόθηκε το 1978. Το κύριο πρόγραμμα οριζοντιογραφικής χάραξης, δηλαδή το NOAH, είχε αναπτυχθεί με την υπόθεση ότι θα χρησιμοποιεί το σύνολο του πακέτου βελτιστοποίησης κατακόρυφης χάραξης σαν υποπρόγραμμα. Έως το 1980 ήταν ακόμη υπό ανάπτυξη και έλεγχο, ενώ δεν υπάρχουν καταγραφές ότι το πρόγραμμα εκδόθηκε επίσημα. Μια σειρά δοκιμών οργανώθηκαν από το TRRL όπως αυτές που παρουσιάζουν ο Hodges (1972) και ο Withey (1972) και οδήγησαν στον ισχυρισμό ότι η χρησιμοποίηση του HOPS για την κατακόρυφη χάραξη οδηγεί σε εξοικονόμηση 15% του κόστους χωματουργικών εργασιών σε σχέση με συμβατικές χαράξεις μελετητών. Τα προγράμματα που αποτελούν το σύστημα είναι τα εξής:

- PRELUDE. Ελέγχει τα δεδομένα του μοντέλου εδάφους για σφάλματα και υπολογίζει μια προσεγγιστική ευθεία επί της κλίσης του εδάφους μεταξύ όλων των διατομών (Chard, 1972).
- IPGEN. Δημιουργεί μια κατακόρυφη χάραξη με βάση τη γραμμή εδάφους.
- THEUS. Εξισορρόπηση όγκων χωματισμών και εύρεση στρατηγικής χαμηλότερου κόστους χωματουργικών.
- VENUS. Δημιουργεί μια αρχική κατακόρυφη χάραξη που να ικανοποιεί τους περιορισμούς και να περνά από συγκεκριμένα σημεία ελέγχου (Robinson, 1972a) (1972b) (1973) (1976)

- FEASBL. Υπορουτίνα του VENUS που μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτόνομα και ελέγχει την τήρηση περιορισμών, ενώ υποδεικνύει πιθανές παραβιάσεις (Robinson, 1971).
- IPMOD. Υπορουτίνα του VENUS που μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτόνομα και τροποποιεί μια αρχική κατακόρυφη χάραξη ώστε το τελικό κόστος χωματουργικών να ελαχιστοποιείται τηρώντας τους περιορισμούς.
- MINERVA. Κύριο πρόγραμμα βελτιστοποίησης κατακόρυφης χάραξης με τελικό αποτέλεσμα τη βέλτιστη κατακόρυφη χάραξη και το συνολικό κόστος χωματουργικών (Davies, 1972).
- JANUS. Έλεγχος και προσαρμογή για τον επιτυχή συνδυασμό οριζοντιογραφίας και μηκοτομής (Baker, 1972).
- BRUTUS. Βελτιστοποίηση προκαταρκτικής οριζοντιογραφικής χάραξης ευθυγράμμων τμημάτων (Stott, Calogero, Hickman, & Roumeliotis, 1981).
- NOAH. Κύριο πρόγραμμα βελτιστοποίησης οριζοντιογραφικής χάραξης, το οποίο χρησιμοποιεί τα υπόλοιπα ως υποπρογράμματα (Knight, 1977) (Davies & Broughton, 1979).
- COSMO. Αναλυτικός υπολογισμός κόστους (Ostler, 1978) (Ostler, Bailey, & Stott, 1979) (Bailey, 1979).

Παρακάτω κρίνεται σκόπιμη η περιγραφή ορισμένων βασικών προγραμμάτων του συστήματος με εξαίρεση τα προγράμματα VENUS, MINERVA, BRUTUS και NOAH των οποίων η περιγραφή έγινε στις προηγούμενες ενότητες.

7.9.1.1 Το πρόγραμμα THEUS

Το πρόγραμμα THEUS χρησιμοποιεί έναν τυποποιημένο αλγόριθμο μεταφοράς εκχωμάτων ώστε να υπολογιστεί η στρατηγική διανομής που να επιφέρει το μικρότερο κόστος. Η αδυναμία του προγράμματος να διαχειριστεί τα οριακά κόστη ήταν ένα σημαντικό μειονέκτημα.

7.9.1.2 Το πρόγραμμα JANUS

Το πρόγραμμα JANUS (Baker, 1972) δέχεται τα αποτελέσματα του VENUS, ελέγχει την ποιότητα του συνδυασμού των καμπυλών οριζοντιογραφίας και μηκοτομής και κάνει απαραίτητες προσαρμογές ώστε να ικανοποιούνται ορισμένοι εμπειρικοί κανόνες. Ο στόχος αυτών των κανόνων είναι να αποφευχθεί δυσάρεστη προοπτική εικόνα του δρόμου από το επίπεδο παρατήρησης του οδηγού.

Υπήρχαν δύο απόψεις για το JANUS. Για αυτούς που επιδοκίμαζαν την στρατηγική επιλογή του εργαστηρίου να επιδιωχθεί μια πλήρως αυτοματοποιημένη προσέγγιση βελτιστοποίησης, το πρόγραμμα ήταν απαραίτητο προαπαιτούμενο για την βελτιστοποίηση κατά την οριζοντιογραφία. Αντίθετα, εκείνοι που θεωρούσαν, ότι ο μηχανικός έπρεπε να συμμετέχει ενεργά στον έλεγχο όλης της διαδικασίας, υποστήριξαν ότι υπήρχαν υπερβολικές προσδοκίες από το πρόγραμμα και ότι οι προκύπτουσες χαράξεις δεν ήταν βέλτιστες όσων αφορά τον συνδυασμό των καμπυλών αλλά και το κόστος.

7.9.1.3 Συνολική αξιολόγηση του HOPS

Το σύστημα προγραμμάτων HOPS αποτέλεσε μια σημαντική επένδυση πόρων στην έρευνα και ανάπτυξη στοχεύοντας σε ένα δυνητικό αλλά άγνωστο όφελος. Ακολουθώντας διαβουλεύσεις με επαγγελματίες, λήφθηκε η απόφαση το σύστημα να παράγει αποτελέσματα χρήσιμα κατευθείαν στους μελετητές χωρίς την ανάγκη χειροκίνητης παρέμβασης.

Είναι εύκολο να ασκήσει κανείς κριτική σε ορισμένες πτυχές του HOPS. Παρ' όλα αυτά, δεν υπάρχει αμφιβολία ότι ήταν ένα πρωτοποριακό ολοκληρωμένο σύστημα. Χρησιμοποιήθηκε τόσο στον Καναδά όσο και σε χώρες της ανατολικής Ευρώπης, όπου και υπερίσχυσε έναντι διεθνούς ανταγωνισμού. Η κύρια αδυναμία του αφορούσε τον τρόπο με τον οποίο διαχειριζόταν τον συνδυασμό οριζοντιογραφίας και μηκοτομής. Η διαδικασία αυτή ήταν πολύ δύσκολο να περιγραφεί από μια απλή σειρά κανόνων. Οι

δοκιμές του συστήματος έδειξαν ότι το πρόγραμμα JANUS μπορούσε να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα.

Μια αξιολόγηση του HOPS θα πρέπει να περιλαμβάνει κάποια σύγκριση με τα εναλλακτικά συστήματα που ήταν διαθέσιμα εκείνη τη χρονική περίοδο, όπως το OPTLOC και το σύστημα βελτιστοποίησης κατακόρυφης χάραξης του Calogero (1968). Ενώ πρόθεση του συστήματος HOPS ήταν να χρησιμοποιείται για λεπτομερή γεωμετρικό σχεδιασμό, οι αναφορές των δοκιμαστικών εφαρμογών του συστήματος συνέκλιναν στο συμπέρασμα πως είναι καταλληλότερο για το στάδιο της προκαταρκτικής μελέτης. Η απλή αναπαράσταση της χάραξης με ευθύγραμμα τμήματα του OPTLOC δεν θα ήταν τόσο σημαντικό μειονέκτημα σε αυτό το στάδιο. Επίσης, το πλήρες σύστημα OPTLOC περιλαμβάνει μία τρισδιάστατη λειτουργία, η οποία μπορεί να αποδειχθεί πολύ πλεονεκτική όταν ο μελετητής συνδυάζει μηκοτομή και οριζοντιογραφία χειροκίνητα. Ο μελετητής μπορούσε να χρησιμοποιήσει μια προσέγγιση παρόμοια με αυτήν που υιοθετήθηκε στο VENUS ώστε να ορίσει τα φυσικά σημεία και στη συνέχεια να διερευνήσει έναν αριθμό πιθανών κατακόρυφων και οριζόντιων χαράξεων στο ίδιο στάδιο.

7.9.2 Λογισμικό Quantm

Το λογισμικό Quantm™ χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση χαράξεων οδών και σιδηροδρόμων. Το λογισμικό αυτό αναπτύχθηκε αρχικά υπό την ονομασία Align3D από ερευνητές της CSIRO ενώ σήμερα τα δικαιώματά του ανήκουν στην Trimble®. Πληροφορίες για το λογισμικό αυτό δίνει ο Gipps (1992) εξηγώντας ότι στόχος του λογισμικού πακέτου είναι η υποβοήθηση της διαδικασίας προκαταρκτικού σχεδιασμού και όχι η αυτοματοποίησή του.

Στο λογισμικό χρησιμοποιείται μια τεχνική στοχαστικής βελτιστοποίησης όπου επιλέγεται μια κορυφή της χάραξης η οποία μετατοπίζεται πάνω στο επίπεδο που είναι κάθετο στον άξονα της χάραξης υπό τους περιορισμούς που έχουν τεθεί. Το μέγεθος της μετατόπισης αυτής είναι αντιστρόφως ανάλογο της ακρίβειας των δεδομένων που χρησιμοποιούνται. Γίνεται σύγκριση του κόστους της χάραξης πριν και μετά από αυτήν τη μετατόπιση και επιλέγεται η καλύτερη λύση. Στη συνέχεια επιλέγεται τυχαία μία άλλη κορυφή και ακολουθείται η ίδια διαδικασία. Το λογισμικό παράγει κάθε φορά διαφορετικά αποτελέσματα δημιουργώντας ένα πλήθος εναλλακτικών επιλύσεων από τις οποίες ο μελετητής συνήθως επιλέγει την πιο οικονομική. Οι γεωμετρικοί περιορισμοί αφορούν την ελάχιστη ακτίνα καμπυλότητας των κυκλικών τόξων σε σχέση με την επίκλιση και την ταχύτητα μελέτης, το ελάχιστο μήκος των τόξων συναρμογής, την ελάχιστη ακτίνα των κατακόρυφων καμπυλών και η μέγιστη κατά μήκος κλίση. Το λογισμικό λαμβάνει υπ' όψιν εκτός των υψομετρικών δεδομένων υπό μορφή καννάβου, γεωτεχνικά στοιχεία των υποκείμενων στρωμάτων για τον καθορισμό των κλίσεων των πρανών, καθώς επίσης υπάρχει η πρόβλεψη για διασταύρωση της χάραξης με άλλα γραμμικά στοιχεία ή περιοχές που υποχρεώνουν τη μηκοτομή να περνά από συγκεκριμένα υψόμετρα. Τεχνικά έργα όπως τοίχοι αντιστήριξης, σήραγγες και οδογέφυρες σχεδιάζονται αυτόματα, όπου είναι απαραίτητο και συμπεριλαμβάνονται στην τελική κοστολόγηση. Η κοστολόγηση αυτή γίνεται σε κάθε τμήμα της οδού με βάση τα υψόμετρα στα σημεία πύκνωσης. Οι αναλυτικές σχέσεις που χρησιμοποιούνται από το λογισμικό δεν έχουν δημοσιευτεί και για το λόγο αυτό δεν μπορεί να γίνει λεπτομερής σχολιασμός του.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του λογισμικού σε μια πραγματική εφαρμογή όπου ακολουθήθηκαν οι συμβατικές μέθοδοι διαπιστώθηκε ότι θα μπορούσε να έχει επιτευχθεί μείωση κόστους κατά 25% και συντόμευση της διαδικασίας μελετών κατά ένα τουλάχιστον έτος αν είχε χρησιμοποιηθεί το λογισμικό (Gipps, Rufford, Dobbin, & Gu, 1996). Τέλος, οι Gipps, Gu, Held, & Barnett (2001) δίνουν πληροφορίες σχετικά με τις διαδικασίες που απαιτούνται από τη συλλογή δεδομένων έως την εξαγωγή αποτελεσμάτων ενώ περιγραφή της χρήσης του λογισμικού σε μελέτη περίπτωσης κάνει ο Olsson (2013).

7.9.3 Λογισμικό Infraworks

Το λογισμικό Infraworks® 360 της Autodesk® περιλαμβάνει δύο λειτουργίες βελτιστοποίησης χαράξεων. Η πρώτη αφορά τη βελτιστοποίηση της μηκοτομής και βασίζεται στις αιτήσεις ευρεσιτεχνιών των Koch (2013) και Bauschke & Koch (2014) ενώ η δεύτερη αφορά τη βελτιστοποίηση του οδικού διαδρόμου όπως περιγράφεται από τους Koch & Liu (2015). Οι παράμετροι που μπορεί να εισάγει ο χρήστης περιλαμβάνουν:

- Ταχύτητα μελέτης.
- Μέγιστη κατά μήκος κλίση.
- Ελάχιστη κατά μήκος κλίση για απορροή.
- Κλίσεις πρανών ορυγμάτων και επιχωμάτων.
- Υποδείξεις σχετικά με τη χρήση γεφυρών και σηράγγων.
- Αποστάσεις κορυφών πολυγωνικής.
- Κορυφές για την υποχρεωτική διέλευση από ένα σημείο ή υψόμετρο.
- Περιοχές μη διέλευσης.
- Θέση και χωρητικότητα χώρων απόθεσης και δανειοθαλάμων.

Οι διαδικασίες βελτιστοποίησης εκτελούνται στο διαδικτυακά και επιστρέφονται στον χρήστη τα αποτελέσματα. Οι διασταυρώσεις με άλλες οδούς εντοπίζονται αυτόματα και σχεδιάζονται κόμβοι στις θέσεις αυτές. Παρόμοιες διαδικασίες ακολουθούνται και για τις περιπτώσεις οδογεφυρών και σηράγγων.

ΜΕΡΟΣ Γ': ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΡΟΤΥΠΟΥ

8 Ορισμοί και Ιδιότητες

Οι βασικοί ορισμοί και οι ιδιότητες της βελτιστοποίησης χάραξης εξετάζονται για την καλύτερη κατανόηση του προβλήματος. Όλοι οι ορισμοί και οι ιδιότητες περιγράφονται από τους Jha, Schonfeld, Jong, & Kim (2006) σε μαθηματική μορφή που διευκολύνει την ανάπτυξη των προτύπων. Αντίθετα με τον συμβατικό γεωμετρικό σχεδιασμό των οδών όπου κάθε στοιχείο της χάραξης περιγράφεται με ξεχωριστή μαθηματική μορφή, το κεφάλαιο αυτό χρησιμοποιεί μια παραμετρική συνάρτηση για την αναπαράσταση μιας οδικής χάραξης.

Τα μαθηματικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται εδώ για την ανάπτυξη ορισμών, θεωρημάτων και αποδείξεων προέρχονται από την Αναλυτική Γεωμετρία, τη Διαφορική Γεωμετρία, τον Απειροστικό Λογισμό, τη Διανυσματική Ανάλυση και τη Γραμμική Άλγεβρα. Σε όλο το κείμενο χρησιμοποιούνται έντονα γράμματα για τον συμβολισμό διανυσμάτων στον χώρο. Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπου είναι δύσκολη η αναπαράσταση ενός πίνακα από ένα γράμμα, χρησιμοποιείται ο συμβολισμός $\overrightarrow{AB}$ για το διάνυσμα από το σημείο A στο σημείο B.

8.1 Ορισμοί

Η χάραξη θεωρείται ως μια λεία καμπύλη στον χώρο. Για την απεικόνιση μια καμπύλης στον χώρο συνήθως επιλέγεται μια παραμετρική αναπαράσταση. Υπάρχουν αρκετοί λόγοι για τη χρησιμοποίηση παραμετρικών καμπυλών. Συγκεκριμένα, δεν είναι δυνατό να εκφραστούν όλες οι καμπύλες στον χώρο με μονοσήμαντες συναρτήσεις, όπως η $y = f(x)$. Η χάραξη ως γενικό πρόβλημα οδικού σχεδιασμού είναι μια καμπύλη στον χώρο που περιορίζεται από τα σημεία αρχής και τέλους της. Έστω $\mathbf{S} = [x_S, y_S, z_S]'$ και $\mathbf{E} = [x_E, y_E, z_E]'$ τα διανύσματα θέσης του σημείου αρχής και τέλους αντίστοιχα. Επίσης, θεωρείται ότι η παράμετρος της χάραξης, η οποία συμβολίζεται με u, έχει κανονικοποιηθεί, έτσι ώστε $u \in [0,1]$. Τότε η χάραξη μπορεί να οριστεί ως εξής:

Ορισμός 8.1 *Έστω L ένα σύνολο σημείων που ορίζεται από το διάνυσμα θέσης $\mathbf{P}(u) = [x(u), y(u), z(u)]'$, όπου $u \in [0,1]$. Αν L είναι μια χάραξη που ενώνει τα σημεία $\mathbf{S} = (x_S, y_S, z_S)$ και $\mathbf{E} = (x_E, y_E, z_E)$, τότε το διάνυσμα θέσης $\mathbf{P}(u)$ πρέπει να ικανοποιεί τα παρακάτω:*

1) $\mathbf{P}(0) = \mathbf{S}$ *και* $\mathbf{P}(1) = \mathbf{E}$ (8.1)

2) $\mathbf{P}(u)$ *συνεχής στο διάστημα* $u \in [0,1]$ (8.2)

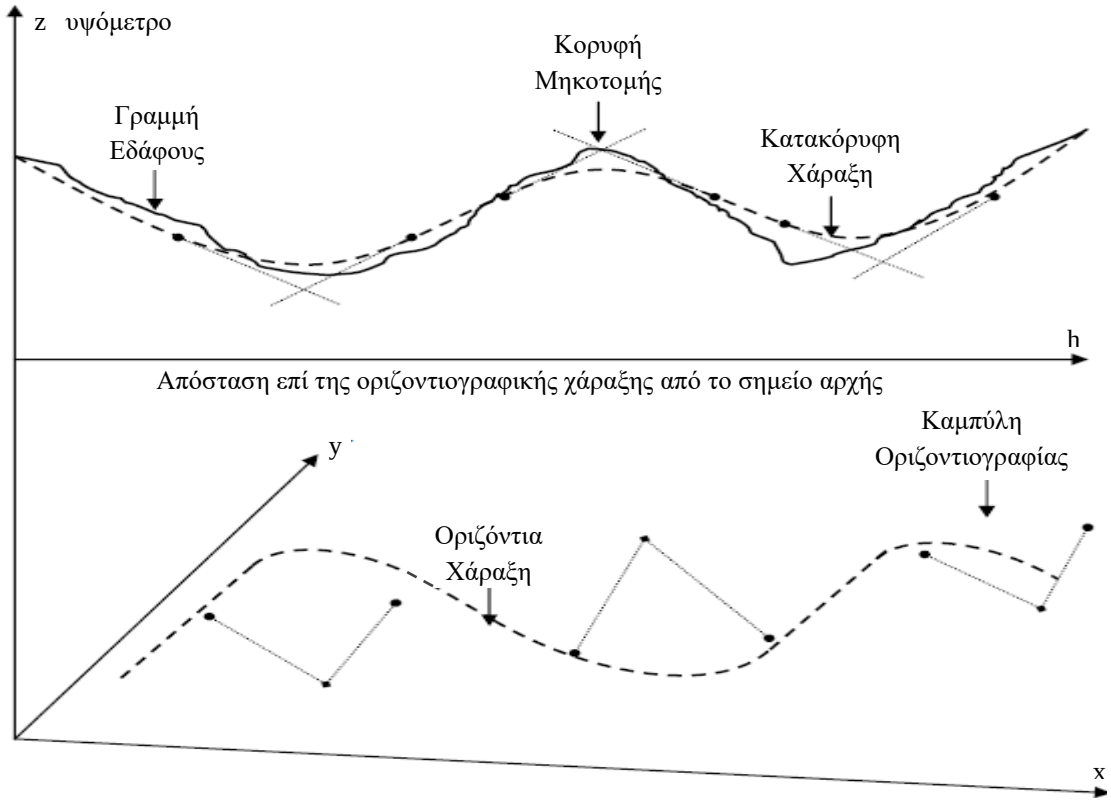
3) $\mathbf{P}'(u)$ *συνεχής στο διάστημα* $u \in [0,1]$ (8.3)

όπου $\mathbf{P}'(u) = \dfrac{\mathbf{P}(u+\Delta u) - \mathbf{P}(u)}{\Delta u} = [x'(u), y'(u), z'(u)]'$ *είναι το εφαπτόμενο διάνυσμα της* L *στο σημείο* $\mathbf{P}(u)$.

Η τρίτη συνθήκη στον παραπάνω ορισμό περιορίζει την καμπύλη της χάραξης να είναι λεία. Αυτή η προϋπόθεση είναι απαραίτητη, καθώς η οδός πρέπει να κατασκευαστεί με τέτοιον τρόπο, που τα οχήματα μπορούν να κινηθούν ομαλά με ασφάλεια και άνεση.

Ο παραπάνω ορισμός παρέχει αναγκαίες αλλά όχι επαρκείς συνθήκες για μια χάραξη. Πιο συγκεκριμένα, η προβολή της χάραξης L πάνω σο επίπεδο xy, που συμβολίζεται με L_{xy}, αποτελείται από ευθύγραμμα τμήματα και κυκλικές καμπύλες. Η L_{xy} καλείται οριζοντιογραφική χάραξη της L. Ένα άλλο γεωμετρικό χαρακτηριστικό μιας χάραξης είναι η προβολή της στην επιφάνεια που είναι ορθογώνια ως προς το επίπεδο xy κατά μήκος της οριζοντιογραφικής χάραξης. Αυτή δεν είναι άλλη από τη μηκοτομή της οδού, δηλαδή το ανάπτυγμα της τομής της οδού και του εδάφους με την κυλινδρική επιφάνεια που έχει οδηγό καμπύλη τον άξονα της οδού και γενέτειρες κατακόρυφες ευθείες(Κανελλαΐδης, Μαλέρδος, Γλαρός, Δραγομάνοβιτς, & Βαρδάκη, 2014). Το ανάπτυγμα αυτής της κατακόρυφης επιφάνειας με οδηγό καμπύλη τον άξονα της οδού ονομάζεται συμβατικά επίπεδο hz, όπου h είναι η απόσταση κατά μήκος της οριζοντιογραφικής χάραξης L_{xy}. Η προβολή της χάραξης L στο hz, που συμβολίζεται με L_{hz}, αποτελείται από ευθύγραμμα τμήματα και παραβολικές καμπύλες. Η L_{hz} καλείται κατακόρυφη χάραξη ή μηκοτομή της οδού. Η παραβολική καμπύλη χρησιμοποιείται για να εξασφαλίσει μια βαθμιαία μεταβολή των κατά μήκος κλίσεων για λόγους ασφάλειας και άνεσης. Οι οριζοντιογραφική και κατακόρυφη χάραξης απεικονίζονται στο επόμενο σχήμα.

Σχήμα 8.1: Οριζοντιογραφική και κατακόρυφη χάραξη
(Πηγή: Akay, Aruga, Bettinger, & Sessions, 2013, Ιδία επεξεργασία)



Επεκτείνοντας τον προηγούμενο ορισμό για τη χάραξη προκύπτει ο επόμενος ορισμός.

Ορισμός 8.2 *Αν η* L *είναι μια τρισδιάστατη χάραξη, τότε*

1) $L_{xy} \cap \overline{C_t \cup C_c \cup C_s} = \phi$ (8.4)

2) $L_{hz} \cap \overline{C_t \cup C_p} = \phi$ (8.5)

όπου L_{xy} και L_{hz} είναι η οριζοντιογραφική και η κατακόρυφη χάραξη της L αντίστοιχα, ενώ οι C_t , C_c , C_s και C_p συμβολίζουν το σύνολο των εφαπτόμενων τμημάτων, των κυκλικών καμπυλών, των σπειροειδών και των παραβολικών καμπυλών στον δισδιάστατο χώρο $\Re^2$ αντίστοιχα.

Πρακτικά ο παραπάνω ορισμός σημαίνει πως:

1) Η οριζοντιογραφική χάραξη L_{xy} δεν περιέχει άλλα στοιχεία διαφορετικά από εφαπτόμενα τμήματα, κυκλικά τόξα και σπειροειδή.

2) Η κατακόρυφη χάραξη L_{hz} δεν περιέχει άλλα στοιχεία διαφορετικά από εφαπτόμενα τμήματα και παραβολικές καμπύλες.

Στη συνέχεια διερευνάται μια πολύ σημαντική ιδιότητα για τη διαμόρφωση της χάραξης, η οποία είναι απαραίτητη για τη βελτιστοποίηση τόσο της οριζοντιογραφικής όσο και της τρισδιάστατης χάραξης κατ' επέκταση.

Ορισμός 8.3 *Έστω L η χάραξη που ορίζεται από το διάνυσμα θέσης $\mathbf{P}(u) = [x(u), y(u), z(u)]'$, $u \in [0,1]$, όπου $\mathbf{P}(0) = \mathbf{S}$ και $\mathbf{P}(1) = \mathbf{E}$ είναι τα διανύσματα θέσης των σημείων αρχής και τέλους της L αντίστοιχα. Τότε η L και η L_{xy} ονομάζονται οπισθόδρομες ή οπισθέλκουσες εάν υπάρχει κάποιο $u \in [0,1]$ τέτοιο ώστε το διάνυσμα θέσης $\mathbf{P}(u)$ να ικανοποιεί την επόμενη ιδιότητα στο επίπεδο xy.*

$$\cos^{-1}\left(\frac{\mathbf{P}'(u)\cdot(\mathbf{E}-\mathbf{S})}{\|\mathbf{P}'(u)\|\|\mathbf{E}-\mathbf{S}\|}\right) \geq 90^\circ \text{, ή ισοδύναμα } \mathbf{P}'(u)\cdot(\mathbf{E}-\mathbf{S}) \leq 0 \quad (8.6)$$

όπου $\| \ \|$ συμβολίζει τη νόρμα του πίνακα. Εναλλακτικά, αν δεν ισχύει η παραπάνω σχέση η L και η L_{xy} ονομάζονται μη οπισθόδρομες.

Πρακτικά ο παραπάνω ορισμός δηλώνει ότι αν σε κάποια σημεία κατά μήκος της χάραξης, η γωνία μεταξύ του $\overrightarrow{SE}$ και του εφαπτόμενου διανύσματος του $\mathrm{P}(u)$, το οποίο συμβολίζεται με $\mathrm{P}'(u)$, είναι ίση ή μεγαλύτερη από 90°, τότε η χάραξη ονομάζεται οπισθόδρομη. Διαφορετικά η χάραξη ονομάζεται μη οπισθόδρομη.

8.2 Ιδιότητες

Όπως είναι εύκολα αντιληπτό μια οπισθόδρομη χάραξη δεν είναι επιθυμητή καθώς δεν είναι άμεση και αυξάνει αισθητά το συνολικό μήκος της οδού. Παρ' όλα αυτά σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να επιβάλλεται μια χάραξη να είναι τέτοιας μορφής ώστε να μειωθεί το κόστος κατασκευής. Ειδικά σε ορεινές περιοχές όπου το ανάγλυφο είναι έντονο η χάραξη μπορεί να στρέφεται προς τα πίσω ώστε να αποφευχθεί μεγάλος όγκος εκσκαφών ή επιχωματώσεων.

Αυτή η ιδιότητα, όμως, καθιστά το πρόβλημα της βελτιστοποίησης της χάραξης αρκετά δυσκολότερο. Για την επεξήγηση αυτής της πολυπλοκότητας παρατίθεται το επόμενο θεώρημα.

Θεώρημα 8.1 *Έστω* L *μια χάραξη από το* $\mathbf{S}=(x_S, y_S, z_S)$ *στο* $\mathbf{E}=(x_E, y_E, z_E)$ *και* $N=\{(x,y,z)|y=ax+b\}$ *ένα επίπεδο ορθογώνιο στο επίπεδο* xy. *Αν* $N \cap \overline{SE} \neq \phi$, *τότε* $N \cap L \neq \phi$, *όπου* $\overline{SE}$ *είναι το ευθύγραμμο τμήμα μεταξύ των σημείων* $\mathbf{S}$ *και* $\mathbf{E}$.

Απόδειξη: Υποθέτουμε ότι μετασχηματίζουμε το σύστημα συντεταγμένων xyz, στρεφόμενο ως προς τον άξονα z, στο σύστημα $x^T y^T z$, έτσι ώστε ο νέος άξονας x^T να είναι κάθετος στο N επί του επιπέδου xy ή ισοδύναμα $x^T y^T$. Εφ' όσον η συντεταγμένη z παραμένει αμετάβλητη και το επίπεδο N είναι ορθογώνιο στο επίπεδο $x^T y^T$, συντεταγμένη z δεν λαμβάνεται υπ' όψιν στην απόδειξη.

Για την οριζοντιογραφική χάραξη $L_{x^T y^T}$, η οποία ορίζεται από το διάνυσμα θέσης $\mathbf{P}^T(u) = [x^T(u), y^T(u)]', u \in [0,1]$ στο επίπεδο $x^T y^T$, $(x^T(0), y^T(0)) = (x_S^T, y_S^T)$ και $(x^T(1), y^T(1)) = (x_E^T, y_E^T)$ είναι τα σημεία αρχής και τέλους της χάραξης αντίστοιχα. Υποθέτοντας $x_S^T \leq x_E^T$ τότε σύμφωνα με τον πρώτο ορισμό του κεφαλαίου, το διάνυσμα θέσης $\mathbf{P}^T(u)$ είναι συνεχές στο διάστημα $u \in [0,1]$, ή ισοδύναμα

$$\lim_{u \to c} \mathbf{P}^T(u) = \mathbf{P}^T(c), \forall c \in [0,1] \tag{8.7}$$

Η παραπάνω σχέση επίσης υπονοεί ότι η $\mathbf{P}^T(u)$ είναι συνεχής για κάθε $x_S^T \leq x^T \leq x_E^T$. Αν $x_E^T \leq x_S^T$, η απόδειξη γίνεται με παρόμοιο τρόπο.

Στη συνέχεια εξετάζεται η συμπεριφορά του N επί του επιπέδου $x^T y^T$. Αφού το σύστημα συντεταγμένων έχει στραφεί με τέτοιον τρόπο ώστε ο άξονας x^T να είναι κάθετος στο N, η γραμμή του N στο επίπεδο $x^T y^T$ που προκύπτει, μπορεί να γραφεί ως

$$N^T = \{(x^T, y^T) | x^T = x_c^T\} \tag{8.8}$$

Αφού $N \cap \overline{SE} \neq \phi$, υπονοείται ότι $x_S^T \leq x^T \leq x_E^T$ και υπάρχει $u_c \in [0,1]$ τέτοιο ώστε $x^T(u_c) = x_c^T$, γνωστό και ως θεώρημα ενδιάμεσης τιμής. Επίσης, λόγω της σχέσης 8.7 προκύπτει:

$$\lim_{u \to u_c} \mathbf{P}^T(u) = \mathbf{P}^T(u_c) = [x_c^T, y^T(u_c)]' \tag{8.9}$$

οπότε $N \cap L = \{x_c^T, y^T(u_c)\} \neq \phi$

Ουσιαστικά, το θεώρημα δηλώνει ότι αν το επίπεδο N τέμνει το ευθύγραμμο τμήμα $\overline{SE}$, δηλαδή $N \cap \overline{SE} \neq \phi$, τότε το N τέμνει επίσης την χάραξη L, ή $N \cap L \neq \phi$. Βέβαια, το αντίστροφο δεν ισχύει πάντα. Συνδυάζοντας τους Ορισμούς 8.1 και 8.3 καθώς και το Θεώρημα 8.1, προκύπτει το επόμενο πόρισμα:

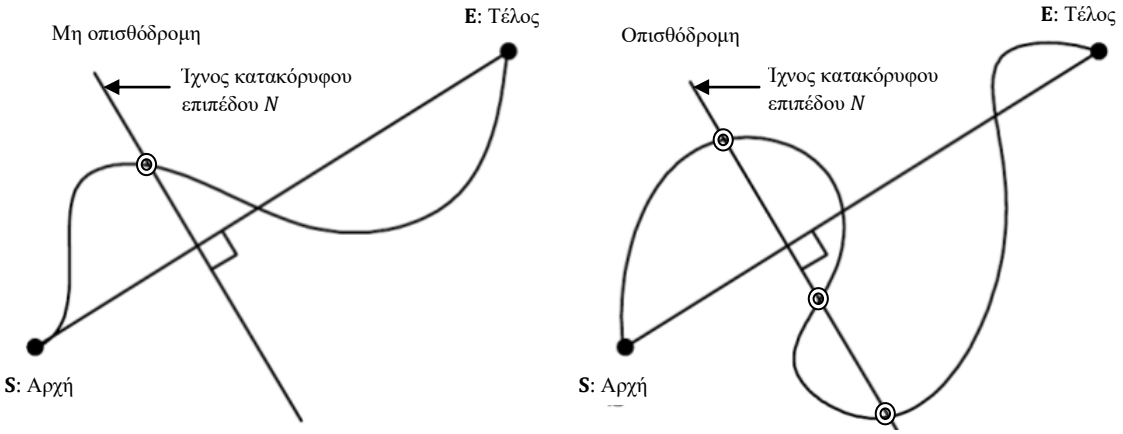
Πόρισμα 8.1 *Έστω* L *μια χάραξη από το* $\mathbf{S}=(x_S, y_S, z_S)$ *στο* $\mathbf{E}=(x_E, y_E, z_E)$ *και* $N=\{(x,y,z)|y=ax+b\}$ *ένα επίπεδο ορθογώνιο στο επίπεδο* xy. *Υποθέτουμε ότι το* N *είναι κάθετο στην προβολή του ευθύγραμμου τμήματος* $\overline{SE}$ *στο επίπεδο* xy *και* $N \cap \overline{SE} \neq \phi$. *Τότε* $N \cap L \neq \phi$, *όπου* $\overline{SE}$ *είναι το ευθύγραμμο τμήμα μεταξύ των σημείων* $\mathbf{S}$ *και* $\mathbf{E}$. *Τότε αν η* L *δεν είναι οπισθόδρομη σημαίνει ότι το* N *τέμνει την* L *μόνο σε ένα σημείο στον τρισδιάστατο χώρο* $\Re^3$.

Απόδειξη: Από το Θεώρημα 8.1, αν $N \cap \overline{SE} \neq \phi$, τότε $N \cap L \neq \phi$. Υποθέτουμε ότι το N τέμνει την L σε ξ σημεία $u_1, \ldots u_\xi$, όπου $u_i \in [0,1], \forall i = 1, \ldots \xi$. Αφού η L δεν είναι οπισθόδρομη, από τον Ορισμό 8.3 προκύπτει:

$$\cos^{-1}\left(\frac{\mathbf{P}'(u_i)\cdot(\mathbf{E}-\mathbf{S})}{\|\mathbf{P}'(u_i)\|\|\mathbf{E}-\mathbf{S}\|}\right) < 90°, \forall i = 1,\ldots\xi$$

Επίσης σημειώνεται ότι το N είναι κάθετο στο $\overline{SE}$. Για το λόγο αυτό το ξ πρέπει να είναι ίσο με ένα. Σε διαφορετική περίπτωση η $\mathbf{P}(u)$ θα ήταν ασυνεχής, γεγονός που παραβιάζει τη δεύτερη προϋπόθεση του Ορισμού 8.1. Το παραπάνω πόρισμα απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα.

Σχήμα 8.2: Μη οπισθόδρομη και οπισθόδρομη χάραξη
(Πηγή: Jha, Schonfeld, Jong, & Kim, 2006, Ιδία επεξεργασία)



Το πόρισμα είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την ανάπτυξη του προτύπου βελτιστοποίησης της χάραξης. Θεωρώντας γνωστό ότι η χάραξη δεν είναι οπισθόδρομη, τότε κάθε κατακόρυφο επίπεδο μεταξύ του **S** και του **E** θα τέμνει τη χάραξη σε ακριβώς ένα σημείο. Όλα τα πρότυπα δυναμικού προγραμματισμού για την βελτιστοποίηση της οδικής χάραξης βασίζονται σε αυτήν την υπόθεση. Δυστυχώς όμως, όταν η χάραξη είναι οπισθόδρομη, μπορεί να υπάρχουν κατακόρυφα επίπεδα που τέμνουν την χάραξη σε περισσότερα του ενός σημεία. Αυτός είναι ένας σημαντικός παράγοντας που μπορεί να περιορίσει ένα πρότυπο δυναμικού προγραμματισμού από την εύρεση της βέλτιστης λύσης.

8.3 Γενικό μαθηματικό πρότυπο βελτιστοποίησης χαράξεων

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται σε μαθηματική μορφή το πρόβλημα της βελτιστοποίησης οδικής χάραξης. Αν και η επίλυση του προβλήματος δεν γίνεται στη μορφή αυτή, η προτυποποίηση αυτή βοηθά στην αναγνώριση της φύσης και των δυσκολιών του προβλήματος, οδηγώντας στην ανάπτυξη ενός προτύπου το οποίο θα μπορεί να επιλυθεί. Οι συμβολισμοί που χρησιμοποιούνται συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 8.1: Συμβολισμός για το γενικό πρόβλημα βελτιστοποίησης χάραξης

Μεταβλητές	**Περιγραφή**
$A_c(u)$	Εμβαδόν διατομής εκσκαφής οδού στο *u*
$A_f(u)$	Εμβαδόν διατομής επιχώματος οδού στο *u*
C_A	Κόστος εξαρτώμενο από την έκταση
C_L	Κόστος εξαρτώμενο από το μήκος
C_N	Κόστος εξαρτώμενο από τη θέση

C_T	Συνολικό κόστος
C_U	Κόστος χρηστών
C_V	Κόστος εξαρτώμενο από τον όγκο
$s_{\max}$	Μέγιστη επιτρεπόμενη κατά μήκος κλίση
$c_{\max}$	Μέγιστη επιτρεπόμενη καμπυλότητα για την οριζοντιογραφική χάραξη
I	Μη προσβάσιμες περιοχές
K_A	Μοναδιαίο κόστος εξαρτώμενο από την έκταση
K_C	Μοναδιαίο κόστος εκσκαφών
K_F	Μοναδιαίο κόστος επιχωμάτων
K_L	Μοναδιαίο κόστος εξαρτώμενο από το μήκος
K_N	Μοναδιαίο κόστος εξαρτώμενο από τη θέση
$v_{\max}$	Μέγιστη επιτρεπόμενη καμπυλότητα για την κατακόρυφη χάραξη
$W(u)$	Πλάτος της οδού στο u

Όπως έχει αναφερθεί στο δεύτερο κεφάλαιο, το κόστος των οδικών έργων μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε στοιχεία κόστους εξαρτώμενα από την θέση, το μήκος, την έκταση, τον όγκο και τα οχηματοχιλιόμετρα. Υποθέτοντας ότι οι προβλέψεις ζήτησης της κυκλοφορίας για το χρόνο ζωής του έργου είναι δεδομένες και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανά οχηματοχιλιόμετρο είναι διαθέσιμες, τότε τα στοιχεία κόστους που εξαρτώνται από τα οχηματοχιλιόμετρα, μπορούν να ενσωματωθούν σε εκείνα που εξαρτώνται από το μήκος. Το κόστος χρηστών μιας εναλλακτικής της οδού εξαρτάται από διάφορα χαρακτηριστικά της χάραξης, οπότε δεν μπορεί να ενσωματωθεί σε μία μόνο κατηγορία. Για παράδειγμα το κόστος του χρόνου ταξιδίου εξαρτάται από το μήκος της χάραξης και την ταχύτητα, η οποία επηρεάζεται περαιτέρω από την καμπυλότητα, την κλίση και άλλα στοιχεία του σχεδιασμού. Για τον λόγο αυτόν, το κόστος χρηστών λαμβάνεται ως ανεξάρτητο στοιχείο κόστους. Κατά συνέπεια, το πρόβλημα βελτιστοποίησης οδικής χάραξης μπορεί να γραφτεί με την παρακάτω μαθηματική μορφή.

1) Συνάρτηση στόχου

$$\underset{\mathbf{P}(u)}{\text{Minimize}}\ C_T = C_N + C_L + C_A + C_V + C_U \tag{8.10}$$

υπόκειται στους παρακάτω περιορισμούς:

2) Περιορισμοί άκρων

$$\mathbf{P}(0) = \mathbf{S} \tag{8.11}$$

$$\mathbf{P}(1) = \mathbf{E} \tag{8.12}$$

3) Απαραίτητες συνθήκες για την χάραξη

$$L_{xy} \cap \overline{C_t \cup C_c \cup C_s} = \phi \tag{8.13}$$

$$L_{hz} \cap \overline{C_t \cup C_p} = \phi \tag{8.14}$$

4) Περιορισμός οριζοντιογραφικής καμπυλότητας

$$\frac{\left|\frac{dx(u)}{du}\frac{d^2y(u)}{du^2}-\frac{d^2x(u)}{du^2}\frac{dy(u)}{du}\right|}{\left[\left(\frac{dx(u)}{du}\right)^2+\left(\frac{dy(u)}{du}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}}\le c_{\max},\ \forall u\in[0,1] \tag{8.15}$$

5) Περιορισμός κατά μήκος κλίσης

$$\left|\frac{dz(u)}{dh}\right|\le s_{\max},\ \forall u\in[0,1] \tag{8.16}$$

6) Περιορισμός κατακόρυφης καμπυλότητας

$$\frac{\left|\frac{dh}{du}\frac{d^2z(u)}{du^2}-\frac{d^2h}{du^2}\frac{dz(u)}{du}\right|}{\left[\left(\frac{dh}{du}\right)^2+\left(\frac{dz(u)}{du}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}}\le v_{\max},\ \forall u\in[0,1] \tag{8.17}$$

7) Μη προσβάσιμες περιοχές

$$\{x(u),y(u)|u\in[0,1]\}_i\cap I=\phi \tag{8.18}$$

8) Εξισώσεις συστήματος

$$C_N=\int_0^1 K_N\left(x(u),y(u)\right)W(u)\sqrt{x'(u)^2+y'(u)^2}\,du \tag{8.19}$$

$$C_L=K_L\int_0^1\sqrt{x'(u)^2+y'(u)^2+z'(u)^2}\,du \tag{8.20}$$

$$C_A=K_A\int_0^1 W(u)\sqrt{x'(u)^2+y'(u)^2+z'(u)^2}\,du \tag{8.21}$$

$$C_V=K_C\int_0^1 A_c(u)\sqrt{x'(u)^2+y'(u)^2}\,du+K_F\int_0^1 A_f(u)\sqrt{x'(u)^2+y'(u)^2}\,du \tag{8.22}$$

$$C_U=f\left(\begin{array}{l}\int_0^1\sqrt{x'(u)^2+y'(u)^2+z'(u)^2}\,du,\ \dfrac{\left|\frac{dx(u)}{du}\frac{d^2y(u)}{du^2}-\frac{d^2x(u)}{du^2}\frac{dy(u)}{du}\right|}{\left[\left(\frac{dx(u)}{du}\right)^2+\left(\frac{dy(u)}{du}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}},\ \dfrac{dz(u)}{dh},\\ \dfrac{\left|\frac{dh}{du}\frac{d^2z(u)}{du^2}-\frac{d^2h}{du^2}\frac{dz(u)}{du}\right|}{\left[\left(\frac{dh}{du}\right)^2+\left(\frac{dz(u)}{du}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}}\end{array}\right) \tag{8.23}$$

$$dh = \sqrt{dx(u)^2 + dy(u)^2} \tag{8.24}$$

Η προτυποποίηση αυτή ορίζει το πρόβλημα πιο αυστηρά. Ο στόχος είναι να βρεθεί η διανυσματική συνάρτηση $\mathbf{P}(u)$, η οποία ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος, ενώ υπόκειται σε ορισμένους περιορισμούς. Σημειώνεται ότι είναι πολύ δύσκολο να λυθεί το πρόβλημα σε αυτήν τη μορφή καθώς ορισμένες εξισώσεις δεν έχουν λύσεις κλειστής μορφής. Παρ' όλα αυτά το πρότυπο είναι χρήσιμο στην κατανόηση των δυσκολιών του προβλήματος και υποβοηθά στην ανάπτυξη ενός περισσότερο πρακτικού προτύπου. Οι σχέσεις 8.10 έως 8.13 έχουν ήδη περιγραφεί στην προηγούμενη ενότητα. Με την οριζοντιογραφική καμπυλότητα στη σχέση 8.14 συνεπάγεται ότι η πρώτη και η δεύτερη παράγωγος των $x(u)$ και $y(u)$ ως προς u υπάρχουν. Η πρώτη παράγωγος $dx(u)/du$ καθώς και η $dy(u)/du$ είναι συνεχείς, αφού η χάραξη είναι διαφορίσιμη σε όλο το διάστημα $u \in [0,1]$ όπως αναφέρεται στον Ορισμό 8.1. Βέβαια, η αντίστοιχη δεύτερη παράγωγος $d^2x(u)/du^2$ και η $d^2y(u)/du^2$ δεν είναι απαραίτητα συνεχείς, επειδή σε ορεινές περιοχές για παράδειγμα, οι καμπύλες συναρμογής μπορούν να παραληφθούν. Συγκεκριμένα, στα εφαπτόμενα τμήματα, η δεύτερη παράγωγος του διανύσματος θέσης γίνεται μηδενική. Για το λόγο αυτό η οριζοντιογραφική καμπυλότητα μπορεί να ελεγχθεί μόνο στα σημεία που η δεύτερη παράγωγος είναι μη μηδενική, δηλαδή σε κυκλικά τόξα και καμπύλες συναρμογής. Το ίδιο ισχύει και για την καμπυλότητα ως προς την κατακόρυφη χάραξη. Ο περιορισμός της κατακόρυφης χάραξης στη σχέση 8.17 έχει παρόμοια μορφή με αυτόν της 8.15. Αφού η κατακόρυφη χάραξη είναι εξ' ορισμού μη οπισθόδρομη και σύμφωνα με την εξίσωση 8.14 αποτελείται μόνο από εφαπτόμενα τμήματα και παραβολικές καμπύλες, η συνιστώσα z, δηλαδή η $z(u)$ του διανύσματος θέσης $\mathbf{P}(u)$ μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της χιλιομετρικής θέσης h. Είναι επίσης δυνατό να μετατραπεί η h σε γραμμική εξίσωση της u και γι' αυτό η $d^2h(u)/du^2$ γίνεται μηδενική στον δεύτερο όρο του αριθμητή της 8.17 Κατά συνέπεια, η σχέση 8.17 μπορεί να γραφεί ως:

$$\left| \frac{\dfrac{d^2 z(u)}{dh^2}}{\sqrt{\left[1 + \left(\dfrac{dz(u)}{dh}\right)^2\right]^3}} \right| \le v_{\max}, \forall u \in [0,1] \tag{8.25}$$

Σε ορισμένα πρότυπα, όπως σε αυτά των Fwa (1989) Hayman (1970), ReVelle, Whitlatch, & Wright (1997), και Murchland (1973), ο περιορισμός κατακόρυφης καμπυλότητας διατυπώνεται ως αλλαγή στην κατά μήκος κλίση, το οποίο είναι μερικώς αληθές. Βέβαια, σε καμία από τις παραπάνω εργασίες δεν αναφέρεται αυτό. Η σχέση 8.25 φανερώνει ότι η κατακόρυφη καμπυλότητα είναι ισοδύναμη με την αλλαγή στην κλίση μόνο όταν αυτή γίνεται μηδενική. Επειδή συνήθως η κατά μήκος κλίση μιας χάραξης είναι σχετικά μικρή ο παρανομαστής της σχέσης 8.25 προσεγγίζει τη μονάδα. Γενικά οι περιορισμοί καμπυλότητας και κλίσης είναι πολύ δύσκολο να διατυπωθούν επειδή υπάρχει απειρία σημείων κατά μήκος της χάραξης. Οπότε, η διατύπωση των σχέσεων για κάθε σημείο ξεχωριστά είναι μη αποδοτική. Αντίστοιχα, σε ορισμένα άλλα πρότυπα, οι περιορισμοί τίθενται μόνο σε έναν περιορισμένο αριθμό σημείων πύκνωσης, όπως για παράδειγμα στους Parker (1977) και ReVelle, Whitlatch, & Wright (1997). Το μόνο πρότυπο που λαμβάνει αυτήν τη διαφοροποίηση υπ' όψιν είναι αυτό των Goh, Chew, & Fwa (1988) και Chew, Goh, & Fwa (1989). Στο πρότυπο αυτό επιστρατεύτηκαν ορισμένες μαθηματικές τεχνικές της θεωρίας βέλτιστου ελέγχου για την μετατροπή των περιορισμών σε μία διάσταση. Παρ' όλα αυτά το γεγονός ότι η δεύτερη παράγωγος στις εξισώσεις 8.15 και 8.17 δεν είναι απαραίτητα συνεχής κατά μήκος της χάραξης δε λήφθηκε υπ' όψιν σε αυτό το πρότυπο. Στην πραγματικότητα δεν γνωρίζουμε που είναι συνεχής η δεύτερη παράγωγος μέχρις ότου βρεθεί η χάραξη. Χωρίς να συνυπολογίζουν αυτό το γεγονός, οι συγγραφείς προσέγγισαν τη χάραξη με ένα σύνολο κυβικών συναρτήσεων spline, το οποίο υπονοεί ότι η χάραξη είναι δύο φορές συνεχώς διαφορίσιμη. Όπως γνωρίζουμε όμως, αυτό δεν είναι αληθές, καθώς παραβιάζονται οι απαραίτητες

συνθήκες των εξισώσεων 8.13 και 8.14, αν και οι κυβικές συναρτήσεις spline αποτελούν μια πολύ καλή προσέγγιση για πολλές καμπύλες.

Εκτός του κόστους χρηστών, οι υπολογισμοί των άλλων στοιχείων κόστους γίνεται με πολύ άμεσο τρόπο. Αποτελούν συνδυασμούς του μήκους, του πλάτους και του εμβαδού της διατομής. Σημειώνεται ότι είναι πολύ δύσκολος ο υπολογισμός του εξαρτώμενου από τη θέση κόστους της εξίσωσης 8.19. Το μοναδιαίο κόστος K_N είναι μια συνάρτηση των συντεταγμένων x και y της χάραξης, δηλαδή της θέσης. Το εξαρτώμενο από τη θέση κόστος δεν είναι συνεχές μεταξύ διαφορετικών ζωνών, οπότε είναι αδύνατο να χρησιμοποιηθεί μια απλή συνάρτηση του u για την αναπαράσταση του K_N. Μάλιστα, δεν έχει βρεθεί κανένα πρότυπο στη βιβλιογραφία που να λαμβάνει υπ' όψιν ρητώς υπ' όψιν εκτός από αυτό των Athanassoulis & Calogero (1973), όπου χρησιμοποιείται ένα πρότυπο δικτυακής βελτιστοποίησης για την οριζοντιογραφική χάραξη. Όμως σε αυτήν την περίπτωση το πρόβλημα μεταφόρτωσης όπως διαμορφώθηκε αποφέρει μια μη λεία χάραξη, η οποία παραβιάζει την τρίτη συνθήκη του Ορισμού 8.1 και το πεδίο αναζήτησης σε αυτό το πρότυπο είναι διακριτό και όχι συνεχές.

Ο υπολογισμός του κόστους χρηστών είναι αρκετά πολύπλοκος, καθώς είναι πολύ δύσκολο να περιγραφεί από μια κλειστή μορφή. Η εξίσωση 8.23 περιγράφει απλά μια γενική σχέση μεταξύ του κόστους και ορισμένων στοιχείων του σχεδιασμού, η οποία δεν είναι επαρκής για τους υπολογισμούς. Αντίθετα με άλλες κατηγορίες κόστους, τα κόστη χρηστών δεν μπορούν να υπολογιστούν πριν καθοριστεί πλήρως η χάραξη. Αυτό εξηγεί και το γιατί τα περισσότερα πρότυπα που έχουν αναπτυχθεί δεν έχουν συμπεριλάβει αυτήν την κατηγορία. Η δυσκολία αυτή παρουσιάζεται πιο έντονα στην προσέγγιση της αρχής βέλτιστης καμπυλότητας OCP, καθώς επίσης στα πρότυπα των Goh, Chew, & Fwa (1988) και Chew, Goh, & Fwa (1989) και σε όλα τα πρότυπα δικτυακής βελτιστοποίησης και δυναμικού προγραμματισμού. Επισημαίνεται ότι το πρότυπο βελτιστοποίησης που αναπτύσσεται στα επόμενα κεφάλαια της παρούσας εργασίας, σε αντίθεση με άλλα πρότυπα που έχουν αναπτυχθεί στο παρελθόν, αποβλέπει στην βελτιστοποίηση της χάραξης στο στάδιο της προμελέτης. Για τον λόγο η συνάρτηση στόχου που θα χρησιμοποιηθεί αφορά κατά κύριο λόγο το εξαρτώμενο από τον όγκο κόστος χωματισμών της σχέσης 8.22. Αυτή η επιλογή γίνεται καθώς το κόστος χωματισμών είναι το πλέον ευαίσθητο κόστος του οποίου ο περιορισμός αποτελεί στόχο του σταδίου της προμελέτης. Οι υπόλοιπες κατηγορίες κόστους θα συμπεριληφθούν στη συνάρτηση στόχου σε επόμενες εργασίες.

8.4 Αναπαράσταση χάραξης

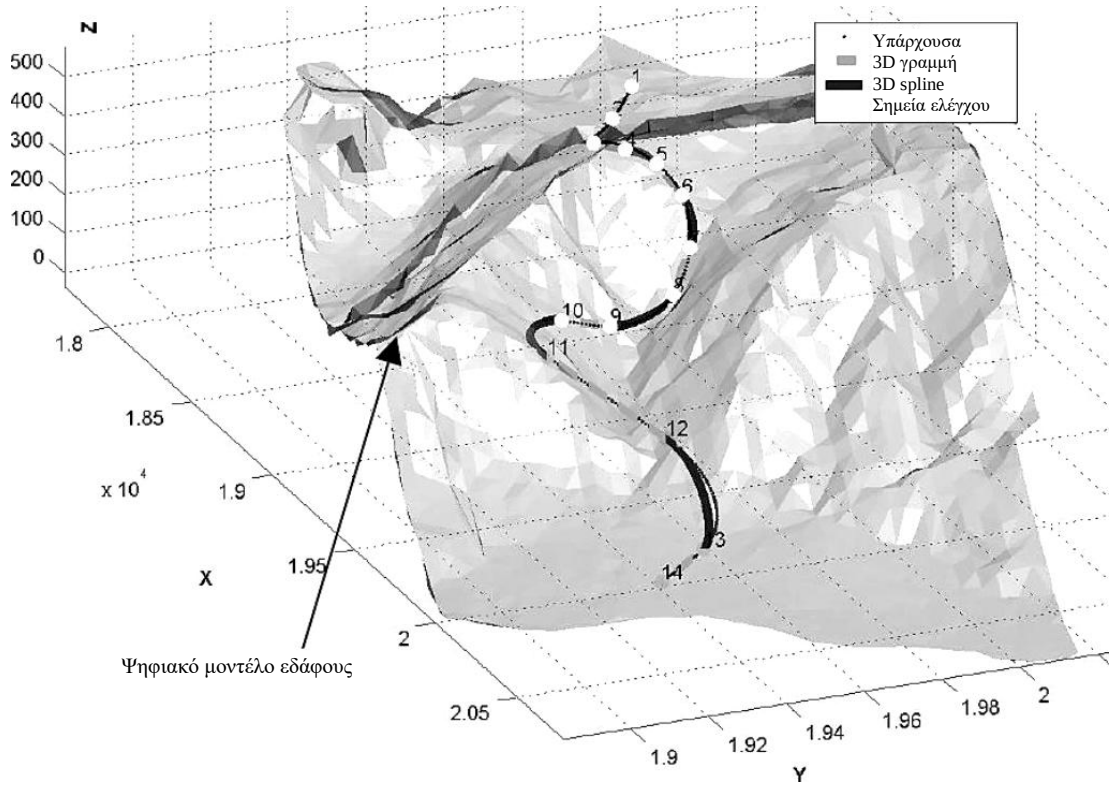
Στα υπάρχοντα πρότυπα βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων συναντώνται πέντε μορφές αναπαράστασης της χάραξης στα πρότυπα βελτιστοποίησης οι οποίες περιλαμβάνουν:

1. Ευθύγραμμα τμήματα, δηλαδή γραμμική συνάρτηση spline
2. Τετραγωνικές συναρτήσεις spline
3. Κυβική συνάρτηση spline
4. Πολυωνυμικές συναρτήσεις
5. Πραγματική χάραξη με διακριτά γεωμετρικά στοιχεία

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό οι πρώτες προσεγγίσεις δεν ικανοποιούν πλήρως τις σχέσεις 8.14 έως 8.17. Αντίθετα ένα πρότυπο, το οποίο μπορεί να μιμηθεί τη συμβατική διαδικασία σχεδιασμού, δηλαδή ξεκινώντας από μια πρωτεύουσα πολυγωνική να προσαρμόζονται στη συνέχεια καμπύλες σε κάθε σημείο τομής, θα ικανοποιούσε τις παραπάνω συνθήκες. Οι περιορισμοί καμπυλότητας και κατά μήκος κλίσης θα ικανοποιούνταν σε όλο το μήκος της χάραξης, αρκεί το πρότυπο να προσαρμόζει προσεκτικά τα κυκλικά τόξα και τις παραβολικές καμπύλες. Το πρόβλημα επίσης απαιτεί την

ανάπτυξη ενός αλγορίθμου βελτιστοποίησης γνωρίζοντας τις αδυναμίες της συμπεριφοράς της συνάρτησης στόχου. Όπως διαπιστώθηκε στο έβδομο κεφάλαιο κανένα υπάρχον πρότυπο βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων δεν διαθέτει όλα τα απαραίτητα χαρακτηριστικά μιας ρεαλιστικής χάραξης για το επίπεδο της προμελέτης. Το πρότυπο που αναπτύσσεται στην παρούσα εργασία επιλύει αυτό το πρόβλημα κάνοντας μια πρωτότυπη θεώρηση ασύμμετρων οριζοντιογραφικών καμπυλών και λαμβάνοντας υπ' όψιν όλες εκείνες τις μεταβλητές απόφασης για τη ρεαλιστική αναπαράσταση της χάραξης κατά την οριζοντιογραφία και τη μηκοτομή, όπως θα τη σχεδίαζε και ένας μελετητής οδοποιίας.

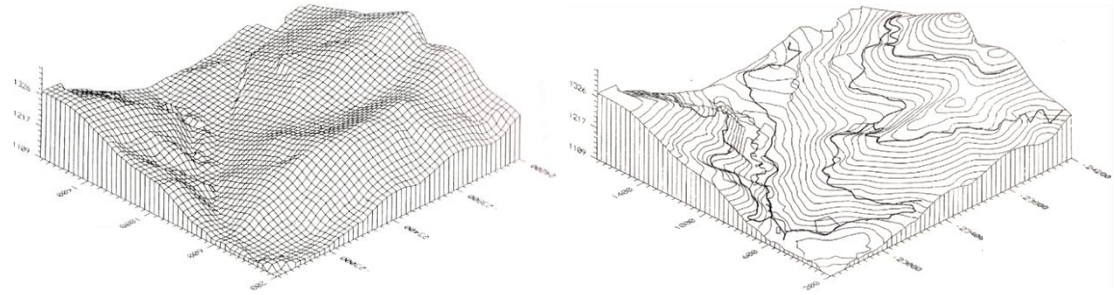
Σχήμα 8.3: Αναπαράσταση χάραξης με τρισδιάστατη spline
(Πηγή: Karri & Jha, 2007)



8.5 Μορφή χωρικών δεδομένων

Όσον αφορά τη μορφή των χωρικών δεδομένων είναι σίγουρα πολύ δύσκολη έως και αδύνατη η αποθήκευση της πληροφορίας για κάθε σημείο μιας περιοχής μελέτης με συνεχές πεδίο αναζήτησης. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται ορισμένες απλοποιημένες μορφές για την αποθήκευση των χωρικών δεδομένων και των περαιτέρω υπολογισμό του κόστους μιας εναλλακτικής χάραξης.

Σχήμα 8.4: Χωρικά δεδομένα με μορφή πλέγματος και ισοϋψών καμπυλών



Οι υπάρχουσες προσεγγίσεις αφορούν αποθήκευση δεδομένων κόστους σε σημεία ή τόξα για τη δικτυακή βελτιστοποίηση και τον δυναμικό προγραμματισμό, επιφάνειες κόστους για το λογισμό μεταβολών και άμεσο υπολογισμό για την απαρίθμηση, τον γραμμικό προγραμματισμό και την αριθμητική αναζήτηση. Από αυτές τις προσεγγίσεις, ο άμεσος υπολογισμός από ένα πλέγμα φαίνεται πως παρουσιάζει τις μικρότερες αποθηκευτικές ανάγκες δεδομένου ενός επιπέδου ακριβείας.

9 Υπολογισμοί

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται όλα εκείνα τα στοιχεία του μαθηματικού προτύπου που χρησιμοποιεί η εφαρμογή RoadEvolver. Επίσης, δίνονται οι σχέσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της χάραξης και γίνονται όλοι οι απαραίτητοι υπολογισμοί που απαιτούνται για τον υπολογισμό του όγκου χωματισμών στη συνάρτηση στόχου.

9.1 Τύπος υψομετρικών δεδομένων περιοχής μελέτης

Όπως είναι γνωστό είναι αδύνατη η αποθήκευση της πληροφορίας για την πλήρη αναπαράσταση της περιοχής ενδιαφέροντος. Αυτό συμβαίνει όχι μόνον λόγω της απειρίας των σημείων, αλλά και εξαιτίας της έλλειψης διαθέσιμης υψομετρικής πληροφορίας στα σημεία αυτά. Για τον λόγο αυτόν, χρειάζεται μια μορφή δεδομένων για την αναπαράσταση της περιοχής μελέτης με στόχο την ελαχιστοποίηση όσο το δυνατόν των απαιτήσεων μνήμης, αλλά και την διατήρηση πληροφορίας για ολόκληρη την περιοχή. Ένας πίνακας δεδομένων χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη εργασία.

Οι βασικές υποθέσεις που γίνονται είναι:

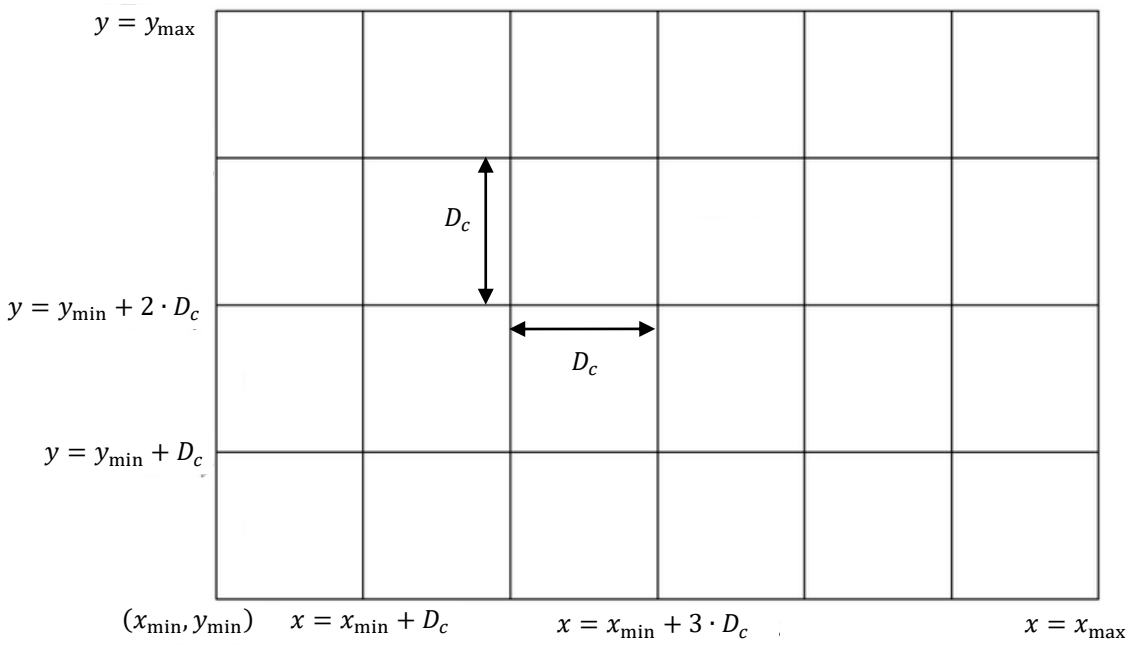
1) Η περιοχή μελέτης είναι σχήματος ορθογωνίου

2) Η περιοχή μελέτης μπορεί να διαχωριστεί σε φατνία ίσων διαστάσεων, ενώ εντός κάθε φατνίου θεωρείται ενιαίο κόστος απαλλοτρίωσης, είδος χρήσης γης και εδαφικό υλικό. Η μεταβλητότητα των υψομέτρων εντός ενός φατνίου θεωρείται αμελητέα σε σχέση με άλλα φατνία.

Η προτεινόμενη μορφή έχει ορισμένα πλεονεκτήματα. Όπως αναφέρθηκε, είναι συμβατή με πραγματικά συστήματα συντεταγμένων. Επίσης, διευκολύνεται ο προγραμματισμός, καθώς οι πίνακες είναι συνήθης δομή δεδομένων στα υπολογιστικά συστήματα και γενικότερα απαιτούν χαμηλότερη υπολογιστική ισχύ. Τέλος, δεδομένα συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών μετατρέπονται εύκολα σε αυτήν τη μορφή, γεγονός που είναι χαρακτηριστικό ενός ικανοποιητικού προτύπου.

Το επόμενο σχήμα απεικονίζει τη μορφή υψομετρικών δεδομένων της περιοχής μελέτης. Είναι επιθυμητό το αυθαίρετο σύστημα της περιοχής μελέτης να είναι συμβατό με το σύστημα αναφοράς που χρησιμοποιείται ώστε να είναι εύκολος ο εντοπισμός του σημείου αρχής και τέλους. Ένα άλλο πλεονέκτημα χρησιμοποίησης ενός πραγματικού συστήματος αναφοράς είναι ότι η βέλτιστη λύση μπορεί να εκφραστεί κατευθείαν σε αυτό.

Σχήμα 9.1: Αναπαράσταση περιοχής μελέτης με κάνναβο



Στον επόμενο πίνακα επεξηγούνται οι μεταβλητές του παραπάνω σχήματος.

Πίνακας 9.1: Μεταβλητές για την περιγραφή της περιοχής μελέτης

Μεταβλητές	Περιγραφή
D_c	Μήκος τετραγωνικού φατνίου (m)
$x_{\max}$	Μέγιστη τιμή τετμημένης περιοχής μελέτης (m)
$y_{\max}$	Μέγιστη τιμή τεταγμένης περιοχής μελέτης (m)
$x_{\min}$	Ελάχιστη τιμή τετμημένης περιοχής μελέτης (m)
$y_{\min}$	Ελάχιστη τιμή τεταγμένης περιοχής μελέτης (m)

Η βέλτιστη χάραξη μπορεί να περάσει από οποιαδήποτε σημεία εντός της περιοχής ενδιαφέροντος αντί να είναι περιορισμένη σε ένα πεπερασμένο σύνολο σημείων, όπως συμβαίνει για παράδειγμα σε πρότυπα δυναμικού προγραμματισμού. Από την άλλη πλευρά όμως η κανονικοποιημένη μορφή δεδομένων μπορεί να μην αποτυπώνει σημαντικά χαρακτηριστικά του αναγλύφου ενώ στις απαιτήσεις μνήμης συμπεριλαμβάνονται και μη χρήσιμα δεδομένα σε περιοχές ήπιου αναγλύφου. Για τους λόγους αυτούς στόχο επόμενης εργασίας θα αποτελέσει η συμπερίληψη δεδομένων πολυεδρικών κατανομών όπως τα ακανόνιστα δίκτυα τριγώνων για τα οποία δίνουν τη δυνατότητα καλύτερης προσαρμογής στο ανάγλυφο του εδάφους μέσω της διαφοροποίησης του μεγέθους των τριγώνων και της πυκνότητας των σημείων.

9.2 Μεταβλητές απόφασης

Οι μεταβλητές απόφασης του προβλήματος βελτιστοποίησης προκύπτουν από την ανάλυση της διαδικασίας σχεδιασμού κατά τη συμβατική μέθοδο με γνωστές μόνον τις θέσεις των σημείων αρχής και τέλους. Για πρώτη φορά σε πρότυπο βελτιστοποίησης της χάραξης χρησιμοποιείται το πλήθος των μεταβλητών που παρουσιάζονται στα επόμενα εδάφια. Επειδή, ο χρόνος επίλυσης αυξάνεται σημαντικά με την ενσωμάτωση όλων των μεταβλητών σε ένα ενιαίο μαθηματικό πρότυπο, η

διαδικασία βελτιστοποίησης διαχωρίζεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο γίνεται βελτιστοποίηση της οριζοντιογραφικής χάραξης και στη συνέχεια με σταθερή την οριζοντιογραφική χάραξη γίνεται βελτιστοποίηση της κατακόρυφης χάραξης.

Ο αριθμός των κορυφών πολυγωνικής που χρησιμοποιούνται εκτός από μεταβλητή απόφασης αποτελεί και γενετική παράμετρο, καθώς καθορίζει τον αριθμό των μεταβλητών απόφασης, δηλαδή των αριθμών των στοιχείων του χρωμοσώματος. Για την ένταξη των μεταβλητών αυτών απευθείας στο πρότυπο βελτιστοποίησης το διάστημα αναζήτησης τιμών αυξάνεται υπερβολικά με συνέπεια την αύξηση του χρόνου επίλυσης. Επομένως, επιλέχθηκε οι μεταβλητές που αφορούν αριθμό κορυφών πολυγωνικής είτε κατά την οριζοντιογραφία ή κατά τη μηκοτομή να προκύπτουν βάση μιας επαναληπτικής διαδικασίας που ακολουθείται από τον χρήστη, κατά την οποία εκτελούνται διαδοχικές βελτιστοποίησης με διαφορετικές τιμές των ακέραιων αυτών μεταβλητών. Στα επόμενα εδάφια περιγράφονται οι μεταβλητές απόφασης των προτύπων οριζοντιογραφικής και κατακόρυφης χάραξης.

9.2.1 Μεταβλητές απόφασης για την οριζοντιογραφική χάραξη

Κατά τη σχεδίαση της οριζοντιογραφικής χάραξης ο σχεδιαστής καλείται να αποφασίσει για τον αριθμό των κορυφών κύριας πολυγωνικής που θα χρησιμοποιήσει, τις θέσεις των κορυφών αυτών κατά την οριζοντιογραφία, την ακτίνα του κυκλικού τόξου που θα χρησιμοποιήσει για κάθε καμπύλη και τις παραμέτρους των τόξων συναρμογής εισόδου και εξόδου.

Πίνακας 9.2: Μεταβλητές απόφασης βελτιστοποίησης οριζοντιογραφικής χάραξης

Μεταβλητές	Περιγραφή
n	Αριθμός κορυφών κύριας πολυγωνικής εκτός αρχής κα τέλους
$x_1, \ldots, x_n$	Τετμημένες κορυφών πολυγωνικής (m)
$y_1, \ldots, y_n$	Τεταγμένες κορυφών πολυγωνικής (m)
$R_1, \ldots, R_n$	Ακτίνες κυκλικών τόξων οριζοντιογραφικής καμπύλης (m)
$A_{1_1}, \ldots, A_{1_n}$	Παράμετροι τόξων συναρμογής εισόδου οριζοντιογραφικής καμπύλης (m)
$A_{2_1}, \ldots, A_{2_n}$	Παράμετροι τόξων συναρμογής εισόδου οριζοντιογραφικής καμπύλης (m)

9.2.2 Μεταβλητές απόφασης για την κατακόρυφη χάραξη

Όσον αφορά την κατακόρυφη χάραξη ο σχεδιαστής επιλέγει το πλήθος των κορυφών της πολυγωνικής της κατακόρυφης χάραξης, τη χιλιομετρική θέση και το υψόμετρό τους, και τέλος την ακτίνα του παραβολικού τόξου στρογγύλευσης. Ο συμβολισμός των μεταβλητών αυτών παρουσιάζεται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 9.3: Μεταβλητές απόφασης βελτιστοποίησης κατακόρυφης χάραξης

Μεταβλητές	Περιγραφή
m	Αριθμός κορυφών πολυγωνικής κατά τη μηκοτομή εκτός αρχής και τέλους
$h_1, \ldots, h_m$	Χιλιομετρική θέση κορυφής πολυγωνικής κατά τη μηκοτομή (m)
$z_1, \ldots, z_m$	Υψόμετρο κορυφής πολυγωνικής κατά τη μηκοτομή (m)
$H_1, \ldots, H_m$	Ακτίνα παραβολικού τόξου στρογγύλευσης κατακόρυφης καμπύλης (m)

9.3 Παράμετροι εισαγωγής

Στον παρακάτω πίνακα περιγράφονται οι παράμετροι που μπορεί να εισάγει ή να τροποποιήσει ο χρήστης. Κατή τη διαδικασία βελτιστοποίησης ενδεχομένως να μην ληφθεί το σύνολο των παραμέτρων αυτών υπ' όψιν καθώς ο χρήστης μπορεί να ορίσει τα κριτήρια και τους περιορισμούς βάσει των οποίων γίνεται η βελτιστοποίηση. Για τον καθορισμό των τιμών ορισμένων παραμέτρων ο χρήστης μπορεί να ανατρέξει στις εκάστοτε προδιαγραφές γεωμετρικού σχεδιασμού που χρησιμοποιούνται και να τις καθορίσει σύμφωνα με τη λειτουργική κατηγοριοποίηση της οδού, ενώ για άλλες παραμέτρους δίνονται προεπιλεγμένες τιμές.

Πίνακας 9.4: Ορισμός παραμέτρων για το γενικό πρόβλημα βελτιστοποίησης χάραξης

Μεταβλητές	**Περιγραφή**
$\mathbf{S}(x_S, y_S, z_S)$	Σημείο αρχής χάραξης (m, m, m)
$\mathbf{E}(x_E, y_E, z_E)$	Σημείο τέλους χάραξης (m, m, m)
V_e	Ταχύτητα μελέτης (km/h)
t_R	Χρόνος αντίληψης-αντίδρασης (s)
h_d	Ύψος οφθαλμών οδηγού πάνω από την επιφάνεια της οδού (m)
h_o	Ύψος αντικειμένου πάνω από την επιφάνεια της οδού (m)
$f_{T,\max}$	Μέγιστος επιτρεπόμενος συντελεστής εφαπτομενικής τριβής
$f_{R,\max}$	Μέγιστος επιτρεπόμενος συντελεστής εγκάρσιας συνιστώσας της τριβής
$s_{\max}$	Μέγιστη κατά μήκος κλίση οδού (m/m)
$e_{\max}$	Μέγιστη εγκάρσια κλίση οδού (m/m)
$p_{\max}$	Μέγιστη εγκάρσια μετατόπιση μεταξύ ευθυγραμμίας και κυκλικού τόξου (m)
$p_{\min}$	Ελάχιστη εγκάρσια μετατόπιση μεταξύ ευθυγραμμίας και κυκλικού τόξου (m)
C	Μέγιστη τιμή εγκάρσιου τινάγματος (m/s^3)
$\Delta z_{f,\max}$	Μέγιστο ύψος επιχώματος (m)
$\Delta z_{f,\min}$	Ελάχιστο ύψος επιχώματος (m)
$\Delta z_{c,\max}$	Μέγιστο βάθος εκσκαφής (m)
$\Delta z_{c,\min}$	Ελάχιστο βάθος εκσκαφής (m)
e_f	Κλίση πρανούς επιχώματος (m: m)
e_c	Κλίση πρανούς εκσκαφής (m: m)
W	Πλάτος καταστρώματος οδού (m)
L_P	Απόσταση μεταξύ διαδοχικών σημείων πύκνωσης (m)
K_F	Τιμή μονάδας όγκου επιχωμάτων (€/m^3)
K_C	Τιμή μονάδας όγκου εκσκαφών (€/m^3)

Εκτός από τις παραπάνω παραμέτρους ο χρήστης μπορεί κατά την ίδια λογική να εισάγει και τις παραμέτρους αυτές που αφορούν το διάστημα αναζήτησης των μεταβλητών απόφασης. Όπως και προηγούμενα οι τιμές ορισμένων από τις παραμέτρους αυτές μπορούν να προκύψουν με βάση τις προδιαγραφές γεωμετρικού σχεδιασμού που χρησιμοποιούνται. Οι παράμετροι που καθορίζουν το διάστημα αναζήτησης των μεταβλητών απόφασης παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 9.5: Παράμετροι καθορισμού διαστήματος αναζήτησης μεταβλητών απόφασης

Μεταβλητές	**Περιγραφή**
$x_{\max}$	Μέγιστη τιμή αναζήτησης τετμημένης κορυφής κύριας πολυγωνικής (m)
$x_{\min}$	Ελάχιστη τιμή αναζήτησης τετμημένης κορυφής κύριας πολυγωνικής (m)
$y_{\max}$	Μέγιστη τιμή αναζήτησης τεταγμένης κορυφής κύριας πολυγωνικής (m)
$y_{\min}$	Ελάχιστη τιμή αναζήτησης τεταγμένης κορυφής κύριας πολυγωνικής (m)
$R_{\max}$	Μέγιστη τιμή διαστήματος αναζήτησης ακτίνας κυκλικού τόξου (m)
$R_{\min}$	Ελάχιστη τιμή διαστήματος αναζήτησης ακτίνας κυκλικού τόξου (m)
$A_{\max}$	Μέγιστη τιμή διαστήματος αναζήτησης παραμέτρου κλωθοειδούς (m)
$A_{\min}$	Ελάχιστη τιμή διαστήματος αναζήτησης παραμέτρου κλωθοειδούς (m)
$h_{\max}$	Μέγιστη τιμή αναζήτησης χιλιομετρικής θέσης κορυφής μηκοτομής (m)
$h_{\min}$	Ελάχιστη τιμή αναζήτησης χιλιομετρικής θέσης κορυφής μηκοτομής (m)
$z_{\max}$	Μέγιστη τιμή διαστήματος αναζήτησης υψομέτρου κορυφής μηκοτομής (m)
$z_{\min}$	Ελάχιστη τιμή διαστήματος αναζήτησης υψομέτρου κορυφής μηκοτομής (m)
$H_{\max}$	Μέγιστη τιμή διαστήματος αναζήτησης παραμέτρου παραβολικής καμπύλης (m)
$H_{\min}$	Ελάχιστη τιμή διαστήματος αναζήτησης παραμέτρου παραβολικής καμπύλης (m)

9.4 Υπολογισμοί οριζοντιογραφικής χάραξης

Μια οδός από γεωμετρική άποψη ορίζεται ως αλληλουχία σαφώς καθορισμένων γεωμετρικών τόξων στην οριζοντιογραφία και στη μηκοτομή. Ως υπολογισμός χαράξεως μιας οδού νοείται αφ' ενός ο ποσοτικός προσδιορισμός εκείνων των κύριων ή βοηθητικών γεωμετρικών στοιχείων, που απαιτούνται για τη γεωμετρική κατασκευή κάθε ενός τόξου ξεχωριστά, από τα οποία αποτελείται ο άξονας της συγκεκριμένης οδού και αφ' ετέρου ο προσδιορισμός των συντεταγμένων της αρχής, του τέλους καθώς και ενδιάμεσων σημείων κάθε ενός τόξου ως προς κάποιο σύστημα συντεταγμένων.

Αποτέλεσμα του υπολογισμού της χαράξεως μιας οδού είναι η δυνατότητα ακριβούς γεωμετρικής κατασκευής της οδού στα κατασκευαστικά σχέδια της οριστικής μελέτης και της μεταφοράς της στο έδαφος, μέσω της εφαρμογής-πασσάλωσης και τελικά της κατασκευής της. Στην ενότητα αυτοί γίνονται οι απαραίτητοι υπολογισμοί που αφορούν τη διαμόρφωση της οδού ως προς την οριζοντιογραφία.

9.4.1 Κύρια πολυγωνική

Το σύνολο των κορυφών της κύριας πολυγωνικής περιγράφει γενικά το ίχνος της χάραξης. Ενώνοντας κάθε ζεύγος διαδοχικών σημείων με ευθύγραμμα τμήματα δημιουργείται η πρωτεύουσα πολυγωνική.

Στη συνέχεια πρέπει να προσαρμοστούν κυκλικά τόξα στα εφαπτόμενα τμήματα της κύριας πολυγωνικής, εκτός και αν η γωνία θλάσης είναι μηδενική. Οι μεταβλητές που περιγράφουν τα στοιχεία της κύριας πολυγωνικής παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα, ενώ στα επόμενα εδάφια δίνονται οι σχέσεις υπολογισμού των μηκών και των γωνιών θλάσεων των κλάδων της κύριας πολυγωνικής γραμμής.

Πίνακας 9.6: Μεταβλητές κύριας πολυγωνικής

Μεταβλητές	**Περιγραφή**
$\mathbf{K}_i\left(x_{\mathrm{K}_i}, y_{\mathrm{K}_i}\right)$	Κορυφή κύριας πολυγωνικής (m, m)
x_{K_i}	Τετμημένη κορυφής κύριας πολυγωνικής κατά την οριζοντιογραφία (m)
y_{K_i}	Τεταγμένη κορυφής κύριας πολυγωνικής κατά την οριζοντιογραφία (m)
$T_{\mathrm{K}_i\mathrm{K}_{i+1}}$	Μήκος κλάδου κύριας πολυγωνικής (m)
γ_i	Γωνία θλάσης του άξονα της κύριας πολυγωνικής στην κορυφή $\mathbf{K}_i$ (rad)

Αν $\mathbf{S}$ και $\mathbf{E}$ τα σημεία αρχής και τέλους της χάραξης αντίστοιχα και $\mathbf{K}_i$ οι κορυφές της πρωτεύουσας πολυγωνικής, τότε οι κορυφές $\mathbf{K}_0$ και $\mathbf{K}_{n+1}$ αντιστοιχούν στα σημεία αρχής και τέλους αντίστοιχα, δηλαδή $\mathbf{S} = \mathbf{K}_0$ και $\mathbf{E} = \mathbf{K}_{n+1}$. δηλαδή $\left(x_{K_0}, y_{K_0}\right) = (x_S, y_S)$ και $\left(x_{P_{n+1}}, y_{P_{n+1}}\right) = (x_E, y_E)$.

9.4.1.1 Υπολογισμός μηκών κλάδων κύριας πολυγωνικής

Το μήκος κάθε κλάδου της κύριας πολυγωνικής γραμμής υπολογίζεται κατά τα γνωστά με βάση τις συντεταγμένες των κορυφών της πολυγωνικής στα άκρα του. Ο υπολογισμός γίνεται με βάση την παρακάτω σχέση:

$$T_{\mathrm{K}_i\mathrm{K}_{i+1}} = \left\|\mathbf{K}_{i+1} - \mathbf{K}_i\right\| = \sqrt{\left(x_{\mathrm{K}_{i+1}} - x_{\mathrm{K}_i}\right)^2 + \left(y_{\mathrm{K}_{i+1}} - y_{\mathrm{K}_i}\right)^2}, \quad \forall i = 0, \ldots, n \tag{9.1}$$

9.4.1.2 Υπολογισμός γωνιών θλάσης κύριας πολυγωνικής

Για τον καθορισμό της ακτίνας σε κάθε κορυφή της πολυγωνικής, πρέπει να υπολογιστεί αρχικά η γωνία θλάσης της πολυγωνικής. Με εφαρμογή διανυσματικής ανάλυσης και τριγωνομετρίας προκύπτει η παρακάτω σχέση για τον υπολογισμό των γωνιών θλάσης σε κάθε κορυφή της πολυγωνικής:

$$\begin{aligned}\gamma_i &= \cos^{-1}\left(\frac{\left(\mathbf{K}_i - \mathbf{K}_{i-1}\right)\cdot\left(\mathbf{K}_{i+1} - \mathbf{K}_i\right)}{\left\|\mathbf{K}_i - \mathbf{K}_{i-1}\right\|\left\|\mathbf{K}_{i+1} - \mathbf{K}_i\right\|}\right) \\ &= \cos^{-1}\left(\frac{\left(x_{\mathrm{K}_i} - x_{\mathrm{K}_{i-1}}\right)\left(x_{\mathrm{K}_{i+1}} - x_{\mathrm{K}_i}\right) + \left(y_{\mathrm{K}_i} - y_{\mathrm{K}_{i-1}}\right)\left(y_{\mathrm{K}_{i+1}} - y_{\mathrm{K}_i}\right)}{\sqrt{\left(x_{\mathrm{K}_i} - x_{\mathrm{K}_{i-1}}\right)^2 + \left(y_{\mathrm{K}_i} - y_{\mathrm{K}_{i-1}}\right)^2}\sqrt{\left(x_{\mathrm{K}_{i+1}} - x_{\mathrm{K}_i}\right)^2 + \left(y_{\mathrm{K}_{i+1}} - y_{\mathrm{K}_i}\right)^2}}\right)\end{aligned} \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{9.2}$$

9.4.2 Χαρακτηριστικά σημεία του άξονα της οδού

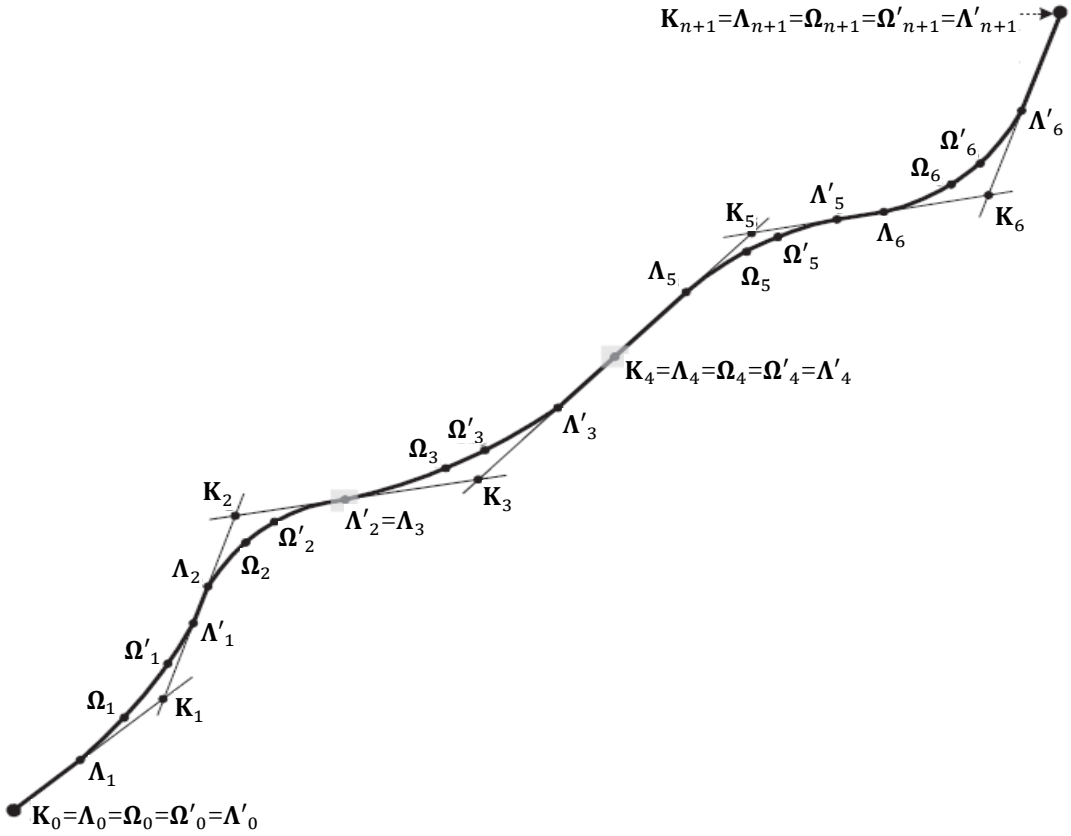
Τα σημεία επαφής των τόξων ονομάζονται χαρακτηριστικά ή κύρια ή πρωτεύοντα σημεία του άξονα. Για τα χαρακτηριστικά σημεία του άξονα της οδού ακολουθείται ο συμβολισμός του παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 9.7: Χαρακτηριστικά σημεία του άξονα της οδού

Μεταβλητές	**Περιγραφή**
$\mathbf{\Lambda}_i\left(x_{\Lambda_i}, y_{\Lambda_i}\right)$	Σημείο επαφής ευθυγραμμίας με τόξο συναρμογής εισόδου (m, m)
$\mathbf{\Omega}_i\left(x_{\Omega_i}, y_{\Omega_i}\right)$	Σημείο επαφής τόξου συναρμογής εισόδου με κυκλικό τόξο (m, m)
$\mathbf{\Omega}'_i\left(x_{\Omega'_i}, y_{\Omega'_i}\right)$	Σημείο επαφής κυκλικού τόξου με τόξο συναρμογής εξόδου (m, m)
$\mathbf{\Lambda}'_i\left(x_{\Lambda'_i}, y_{\Lambda'_i}\right)$	Σημείο επαφής τόξου συναρμογής εξόδου με ευθυγραμμία (m, m)

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται τα βασικά τμήματα μιας τυπικής οριζοντιογραφικής χάραξης με τις κορυφές της πρωτεύουσας πολυγωνικής αλλά και ορισμένα χαρακτηριστικά σημεία του άξονα.

Σχήμα 9.2: Κύρια πολυγωνική, άξονας οδού και χαρακτηριστικά σημεία οριζοντιογραφίας



Όπως φαίνεται στο σχήμα τα σημεία $\mathbf{\Lambda}'_i$ και $\mathbf{\Lambda}_{i+1}$ ενώνονται μέσω του ευθύγραμμου τμήματος που συνδέει της κορυφές $\mathbf{K}_i$ και $\mathbf{K}_{i+1}$ για κάθε $i = 1, \dots, n$, ενώ τα $\mathbf{\Lambda}_i$ και $\mathbf{\Omega}_i$ καθώς και τα $\mathbf{\Omega}'_i$ και $\mathbf{\Lambda}'_i$ ενώνονται με ένα σπειροειδές τόξο συναρμογής. Επίσης, τα $\mathbf{\Omega}_i$ και $\mathbf{\Omega}'_i$ ενώνονται μέσω ενός κυκλικού τόξου για κάθε $i = 1, \dots, n$. Σημειώνεται ότι στις περιπτώσεις όπου το ευθύγραμμο τμήμα μιας χάραξης εξαλείφεται μεταξύ δύο τόξων συναρμογής, όπως για παράδειγμα συμβαίνει μεταξύ των κορυφών $\mathbf{K}_2$ και $\mathbf{K}_3$ του παρακάτω σχήματος, το σημείο εναλλαγής από τόξο συναρμογής εξόδου σε ευθυγραμμία $\mathbf{\Lambda}'_2$ και το σημείο εναλλαγής από ευθυγραμμία σε τόξο συναρμογής εισόδου $\mathbf{\Lambda}_3$ ταυτίζονται. Επίσης, εάν η γωνία θλάσης γ_i σε μια κορυφή της πολυγωνικής $\mathbf{K}_i$ γίνεται μηδενική, τότε ταυτίζονται όλα τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά σημεία που σχετίζονται με την κορυφή αυτή, όπως για παράδειγμα συμβαίνει στην κορυφή $\mathbf{K}_4$ του σχήματος. Γνωρίζοντας τις συντεταγμένες των σημείων αρχής και τέλους $\mathbf{K}_0$ και $\mathbf{K}_{n+1}$ καθώς και των ενδιάμεσων κορυφών της πρωτεύουσας πολυγωνικής, οι συντεταγμένες των χαρακτηριστικών σημείων $\mathbf{\Lambda}_i$, $\mathbf{\Omega}_i$, $\mathbf{\Omega}'_i$ και $\mathbf{\Lambda}'_i$ υπολογίζονται με διανυσματικές πράξεις που περιγράφονται στη συνέχεια.

9.4.3 Δευτερεύουσα πολυγωνική

Η δευτερεύουσα πολυγωνική προκύπτει από τις εφαπτόμενες στα σημεία επαφής των τόξων μεταξύ τους. Ο συμβολισμός των κορυφών της δευτερεύουσας πολυγωνικής περιγράφεται στον επόμενο πίνακα. Οι κορυφές αυτές απεικονίζονται στο σχήμα της επόμενης ενότητας.

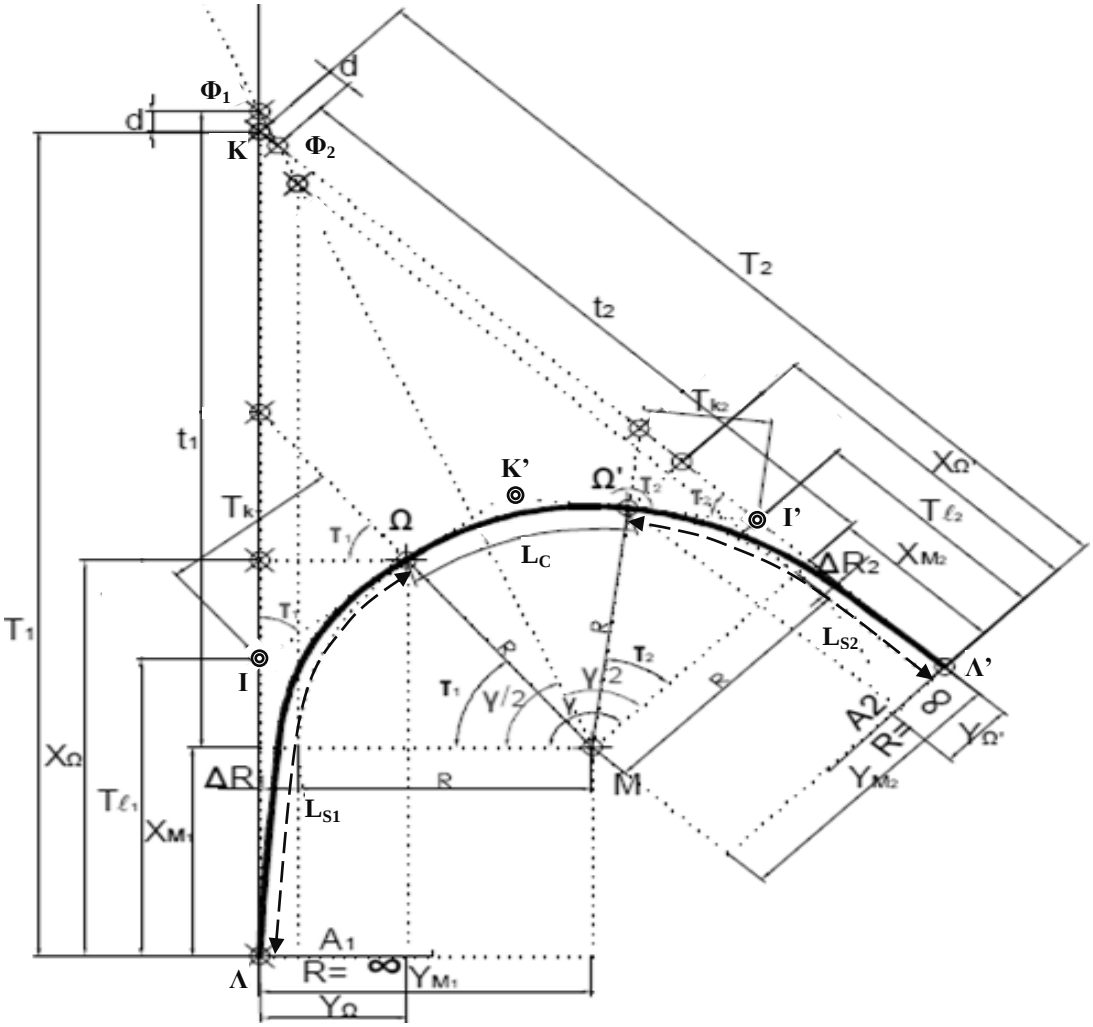
Πίνακας 9.8: Κορυφές δευτερεύουσας πολυγωνικής

Μεταβλητές	Περιγραφή
$\mathbf{I}_i\left(x_{\mathrm{I}_i}, y_{\mathrm{I}_i}\right)$	Σημείο τομής εφαπτομένων ευθυγραμμίας και αρχής κυκλικού τόξου (m, m)
$\mathbf{I}'_i\left(x_{\mathrm{I}'_i}, y_{\mathrm{I}'_i}\right)$	Σημείο τομής εφαπτομένων τέλους κυκλικού τόξου και ευθυγραμμίας (m, m)
$\mathbf{K}'_i\left(x_{\mathrm{K}'_i}, y_{\mathrm{K}'_i}\right)$	Σημείο τομής εφαπτομένων αρχής και τέλους κυκλικού τόξου (m, m)

9.4.4 Γεωμετρικά στοιχεία οριζοντιογραφικών καμπυλών

Σε αντίθεση με άλλες εργασίες βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων, στην παρούσα εργασία λαμβάνεται υπ' όψιν η γενική περίπτωση ασύμμετρων οριζοντιογραφικών καμπυλών.

Σχήμα 9.3: Γεωμετρικά μεγέθη οριζοντιογραφικής καμπύλης
(Πηγή: Ψαριανός & Καλαμπόκης, 2011, Ιδία Επεξεργασία)



Στο επόμενο σχήμα η καμπύλη $\Lambda\Omega$ αποτελεί ένα τόξο συναρμογής εισόδου που συνδέει το τμήμα $\overline{\mathbf{K_{\iota-1}K_\iota}}$ της πολυγωνικής με το σημείο $\mathbf{\Omega_\iota}$, δηλαδή την αρχή του κυκλικού τόξου. Αντίστοιχα το τόξο συναρμογής εξόδου $\Lambda'\Omega'$ συνδέει το κυκλικό τόξο με τον κλάδο $\overline{\mathbf{K_\iota K_{\iota+1}}}$ στο σημείο $\mathbf{\Omega'_\iota}$.

Η αναλυτική περιγραφή των γεωμετρικών στοιχείων των οριζοντιογραφικών καμπυλών και των υπολογισμών τους γίνεται στα επόμενα εδάφια. Ταυτόχρονα γίνεται και η επεξήγηση των γεωμετρικών στοιχείων που απεικονίζονται στο επόμενο σχήμα.

9.4.4.1 Υπολογισμός μήκους τόξου συναρμογής

Τα μήκη των τόξων συναρμογής υπολογίζονται μέσω της φυσικής εξίσωσης της κλωθοειδούς. Συνεπώς, το μήκος τόξου συναρμογής εισόδου είναι:

$$L_{S1_i} = \frac{A_{1_i}^{\ 2}}{R_i}, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{9.3}$$

Το μήκος του τόξου συναρμογής εξόδου υπολογίζεται αντίστοιχα από τη σχέση:

$$L_{S2_i} = \frac{A_{2_i}^{\ 2}}{R_i}, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{9.4}$$

Η επεξήγηση των μεταβλητών που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του μήκους των τόξων συναρμογής γίνεται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 9.9: Μεταβλητές για τον υπολογισμό μήκους τόξου συναρμογής

Μεταβλητές	**Περιγραφή**
R_i	Ακτίνα κυκλικού τόξου (m)
A_{1_i}	Παράμετρος κλωθοειδούς εισόδου (m)
A_{2_i}	Παράμετρος κλωθοειδούς εξόδου (m)
L_{S1_i}	Μήκος τόξου συναρμογής εισόδου (m)
L_{S2_i}	Μήκος τόξου συναρμογής εξόδου (m)

9.4.4.2 Εφαπτομενικές γωνίες

Η γωνία της εφαπτομένης στο σημείο επαφής της ευθυγραμμίας με την κλωθοειδή εισόδου δίνεται από τη σχέση:

$$\tau_{1_i} = \frac{L_{S1_i}}{2R_i}, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{9.5}$$

Αντίστοιχα, η γωνία εφαπτομένης στο σημείο επαφής της κλωθοειδούς εξόδου με την επερχόμενη ευθυγραμμία είναι:

$$\tau_{2_i} = \frac{L_{S2_i}}{2 \cdot R_i}, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{9.6}$$

Πίνακας 9.10: Μεταβλητές για τον υπολογισμό γωνίας εφαπτομένης

Μεταβλητές	Περιγραφή
R_i	Ακτίνα κυκλικού τόξου (m)
τ_{1_i}	Γωνία εφαπτομένης τόξου συναρμογής εισόδου στο $\mathbf{\Lambda}_i$ (rad)
τ_{2_i}	Γωνία εφαπτομένης τόξου συναρμογής εξόδου στο $\mathbf{\Lambda}'_i$ (rad)
L_{S1_i}	Μήκος τόξου συναρμογής εισόδου (m)
L_{S2_i}	Μήκος τόξου συναρμογής εξόδου (m)

9.4.4.3 Σχετικές συντεταγμένες των σημείων έναρξης και λήξης κυκλικού τόξου

Για κάθε οριζοντιογραφική καμπύλη i ορίζονται δύο τοπικά συστήματα αναφοράς για τον υπολογισμό των σχετικών θέσεων των σημείων των κλωθοειδών εισόδου και εξόδου.

Για την κλωθοειδή εισόδου, θεωρώντας ως αρχή το σημείο επαφής ευθυγραμμίας και κλωθοειδούς εισόδου $\mathbf{\Lambda}_i(0,0)$ ορίζεται τοπικό σύστημα συντεταγμένων με τον άξονα X παράλληλο στην εφαπτομένη από αρχής της κλωθοειδούς εισόδου. Τότε οι τοπικές ή σχετικές συντεταγμένες του σημείου έναρξης κυκλικού τόξου δίνονται από τις σχέσεις:

$$X_{\Omega_i} = a_0 L_{S1_i} + a_1 \frac{L_{S1_i}^{\ 5}}{A_{1_i}^{\ 4}} + a_2 \frac{L_{S1_i}^{\ 9}}{A_{1_i}^{\ 8}} + a_3 \frac{L_{S1_i}^{\ 13}}{A_{1_i}^{\ 12}} + a_4 \frac{L_{S1_i}^{\ 17}}{A_{1_i}^{\ 16}} + a_5 \frac{L_{S1_i}^{\ 21}}{A_{1_i}^{\ 20}}, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{9.7}$$

$$Y_{\Omega_i} = \beta_0 \frac{L_{S1_i}^{\ 3}}{A_{1_i}^{\ 2}} + \beta_1 \frac{L_{S1_i}^{\ 7}}{A_{1_i}^{\ 6}} + \beta_2 \frac{L_{S1_i}^{\ 11}}{A_{1_i}^{\ 10}} + \beta_3 \frac{L_{S1_i}^{\ 15}}{A_{1_i}^{\ 14}} + \beta_4 \frac{L_{S1_i}^{\ 19}}{A_{1_i}^{\ 18}}, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{9.8}$$

Για την κλωθοειδή εξόδου, θεωρώντας ως αρχή το σημείο $\mathbf{\Lambda}'_i(0,0)$ ορίζεται τοπικό σύστημα συντεταγμένων με τον άξονα X παράλληλο στην εφαπτομένη από αρχής της κλωθοειδούς εξόδου. Τότε οι τοπικές ή σχετικές συντεταγμένες του σημείου έναρξης κυκλικού τόξου δίνονται από τις σχέσεις:

$$X_{\Omega'_i} = a_0 L_{S2_i} + a_1 \frac{L_{S2_i}^{\ 5}}{A_{2_i}^{\ 4}} + a_2 \frac{L_{S2_i}^{\ 9}}{A_{2_i}^{\ 8}} + a_3 \frac{L_{S2_i}^{\ 13}}{A_{2_i}^{\ 12}} + a_4 \frac{L_{S2_i}^{\ 17}}{A_{2_i}^{\ 16}} + a_5 \frac{L_{S2_i}^{\ 21}}{A_{2_i}^{\ 20}}, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{9.9}$$

$$Y_{\Omega'_i} = \beta_0 \frac{L_{S2_i}^{\ 3}}{A_{2_i}^{\ 2}} + \beta_1 \frac{L_{S2_i}^{\ 7}}{A_{2_i}^{\ 6}} + \beta_2 \frac{L_{S2_i}^{\ 11}}{A_{2_i}^{\ 10}} + \beta_3 \frac{L_{S2_i}^{\ 15}}{A_{2_i}^{\ 14}} + \beta_4 \frac{L_{S2_i}^{\ 19}}{A_{2_i}^{\ 18}}, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{9.10}$$

Οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στις παραπάνω σχέσεις περιγράφονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 9.11: Μεταβλητές υπολογισμού σχετικών συντεταγμένων

Μεταβλητές	Περιγραφή
X_{Ω_i}	Σχετική τετμημένη σημείου αρχής κυκλικού τόξου $\mathbf{\Omega}_i$ ως προς $\mathbf{\Lambda}_i$ (m)
Y_{Ω_i}	Σχετική τεταγμένη σημείου αρχής κυκλικού τόξου $\mathbf{\Omega}_i$ ως προς $\mathbf{\Lambda}_i$ (m)
$X_{\Omega'_i}$	Σχετική τετμημένη σημείου τέλους κυκλικού τόξου $\mathbf{\Omega}'_i$ ως προς $\mathbf{\Lambda}'_i$ (m)

$Y_{\Omega'_i}$	Σχετική τεταγμένη σημείου τέλους κυκλικού τόξου $\mathbf{\Omega}'_i$ ως προς $\mathbf{\Lambda}'_i$ (m)
L_{S1_i}	Μήκος τόξου συναρμογής εισόδου (m)
L_{S2_i}	Μήκος τόξου συναρμογής εξόδου (m)
A_{1_i}	Παράμετρος κλωθοειδούς εισόδου (m)
A_{2_i}	Παράμετρος κλωθοειδούς εξόδου (m)

Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται στις παραπάνω σχέσεις έχουν προκύψει από ανάπτυξη σε σειρές Taylor. Οι προσεγγιστικές τιμές των παραμέτρων δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 9.12: Τιμές παραμέτρων για υπολογισμό τοπικών συντεταγμένων (Πηγή: ΥΠΕΧΩΔΕ, 2001)

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
a_0	1,00000 00000	β_0	0,16666 66667
a_1	-0,24999 99668 · 10^{-1}	β_1	-0,29761 71940 · 10^{-2}
a_2	0,28934 94937 · 10^{-3}	β_2	0,23668 17123 · 10^{-4}
a_3	-0,16689 02491 · 10^{-5}	β_3	-0,10266 50462 · 10^{-6}
a_4	0,56630 02773 · 10^{-8}	β_4	0,25203 17142 · 10^{-9}
a_5	-0,11442 20675 · 10^{-10}		

9.4.4.4 Σχετικές συντεταγμένες κέντρου κύκλου καμπυλότητας

Οι σχετικές συντεταγμένες μπορούν να υπολογιστούν είτε ως προς το τοπικό σύστημα συντεταγμένων της κλωθοειδούς εισόδου, ή ως προς αυτό της κλωθοειδούς εξόδου, όπως περιγράφονται στο προηγούμενο εδάφιο. Οι σχετικές συντεταγμένες του κύκλου καμπυλότητας κάθε οριζοντιογραφικής καμπύλης υπολογίζονται και στα δύο τοπικά συστήματα αναφοράς κάθε καμπύλης ώστε να μπορέσει να γίνει ο υπολογισμός των υπόλοιπων γεωμετρικών στοιχείων στη συνέχεια. Οι τοπικές συντεταγμένες στα δύο συστήματα χρησιμοποιούνται επίσης για επαλήθευση των γεωδαιτικών συντεταγμένων στη συνέχεια. Οι σχετικές συντεταγμένες ως προς την κλωθοειδή εισόδου υπολογίζονται ως εξής:

$$X_{\mathrm{M}_{1i}} = X_{\Omega_i} - R_i \sin \tau_{1_i}, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{9.11}$$

$$Y_{\mathrm{M}_{1i}} = Y_{\Omega_i} + R_i \cos \tau_{1_i}, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{9.12}$$

Αντίστοιχα, ως προς την κλωθοειδή εξόδου οι τοπικές συντεταγμένες του κέντρου κύκλου καμπυλότητας της οριζοντιογραφικής καμπύλης είναι:

$$X_{\mathrm{M}_{2i}} = X_{\Omega'_i} - R_i \sin \tau_{2_i}, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{9.13}$$

$$Y_{\mathrm{M}_{2i}} = Y_{\Omega'_i} + R_i \cos \tau_{2_i}, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{9.14}$$

Οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στις παραπάνω σχέσεις περιγράφονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 9.13: Μεταβλητές υπολογισμού τοπικών συντεταγμένων κέντρου κύκλου καμπυλότητας

Μεταβλητές	Περιγραφή
$X_{\mathrm{M}_{1i}}$	Σχετική τετμημένη κέντρου κύκλου καμπυλότητας $\mathbf{M}_i$ ως προς $\mathbf{\Lambda}_i$ (m)
$Y_{\mathrm{M}_{1i}}$	Σχετική τεταγμένη κέντρου κύκλου καμπυλότητας $\mathbf{M}_i$ ως προς $\mathbf{\Lambda}_i$ (m)
$X_{\mathrm{M}_{2i}}$	Σχετική τετμημένη κέντρου κύκλου καμπυλότητας $\mathbf{M}_i$ ως προς $\mathbf{\Lambda}'_i$ (m)
$Y_{\mathrm{M}_{2i}}$	Σχετική τεταγμένη κέντρου κύκλου καμπυλότητας $\mathbf{M}_i$ ως προς $\mathbf{\Lambda}'_i$ (m)
X_{Ω_i}	Σχετική τετμημένη σημείου τέλους κυκλικού τόξου $\mathbf{\Omega}_i$ ως προς $\mathbf{\Lambda}_i$ (m)
Y_{Ω_i}	Σχετική τεταγμένη σημείου αρχής κυκλικού τόξου $\mathbf{\Omega}_i$ ως προς $\mathbf{\Lambda}_i$ (m)
$X_{\Omega'_i}$	Σχετική τετμημένη σημείου τέλους κυκλικού τόξου $\mathbf{\Omega}'_i$ ως προς $\mathbf{\Lambda}'_i$ (m)
$Y_{\Omega'_i}$	Σχετική τεταγμένη σημείου τέλους κυκλικού τόξου $\mathbf{\Omega}'_i$ ως προς $\mathbf{\Lambda}'_i$ (m)
τ_{1_i}	Γωνία εφαπτομένης τόξου συναρμογής εισόδου στο $\mathbf{\Lambda}_i$ (rad)
τ_{2_i}	Γωνία εφαπτομένης τόξου συναρμογής εξόδου στο $\mathbf{\Lambda}'_i$ (rad)
R_i	Ακτίνα κυκλικού τόξου (m)

9.4.4.5 Εκτροπή

Το μέγεθος της εκτροπής των τόξων συναρμογής υπολογίζεται με τις επόμενες σχέσεις:

$$\Delta R_{1_i} = Y_{\mathrm{M}_{1i}} - R_i, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{9.15}$$

$$\Delta R_{2_i} = Y_{\mathrm{M}_{2i}} - R_i, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{9.16}$$

Οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στις παραπάνω σχέσεις περιγράφονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 9.14: Μεταβλητές υπολογισμού εκτροπής

Μεταβλητές	Περιγραφή
ΔR_{1_i}	Εκτροπή κλωθοειδούς εισόδου (m)
ΔR_{2_i}	Εκτροπή κλωθοειδούς εξόδου (m)
$Y_{\mathrm{M}_{1i}}$	Σχετική τεταγμένη κέντρου κύκλου καμπυλότητας $\mathbf{M}_i$ ως προς $\mathbf{\Lambda}_i$ (m)
$Y_{\mathrm{M}_{2i}}$	Σχετική τεταγμένη κέντρου κύκλου καμπυλότητας $\mathbf{M}_i$ ως προς $\mathbf{\Lambda}'_i$ (m)
R_i	Ακτίνα κυκλικού τόξου (m)

9.4.4.6 Μεγάλη εφαπτομένη

Το μήκος των μεγάλων εφαπτομένων υπολογίζεται ως προς τις σχετικές συντεταγμένες συντεταγμένες των άκρων των κυκλικών τόξων και τις αντίστοιχες εφαπτομενικές γωνίες ως εξής:

$$T_{\ell 1_i} = X_{\Omega_i} - Y_{\Omega_i} \cdot \cot \tau_{1_i}, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{9.17}$$

$$T_{\ell 2_i} = X_{\Omega'_i} - Y_{\Omega'_i} \cdot \cot \tau_{2_i}, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{9.18}$$

Οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στις παραπάνω σχέσεις περιγράφονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 9.15: Μεταβλητές υπολογισμού μεγάλων εφαπτομένων των τόξων συναρμογής

Μεταβλητές	Περιγραφή
$T_{\ell 1_i}$	Μήκος μεγάλης εφαπτομένης τόξου συναρμογής εισόδου (m)
$T_{\ell 2_i}$	Μήκος μεγάλης εφαπτομένης τόξου συναρμογής εξόδου (m)
X_{Ω_i}	Σχετική τετμημένη σημείου αρχής κυκλικού τόξου $\mathbf{\Omega}_i$ ως προς $\mathbf{\Lambda}_i$ (m)
Y_{Ω_i}	Σχετική τεταγμένη σημείου αρχής κυκλικού τόξου $\mathbf{\Omega}_i$ ως προς $\mathbf{\Lambda}_i$ (m)
$X_{\Omega'_i}$	Σχετική τετμημένη σημείου τέλους κυκλικού τόξου $\mathbf{\Omega}'_i$ ως προς $\mathbf{\Lambda}'_i$ (m)
$Y_{\Omega'_i}$	Σχετική τεταγμένη σημείου τέλους κυκλικού τόξου $\mathbf{\Omega}'_i$ ως προς $\mathbf{\Lambda}'_i$ (m)
τ_{1_i}	Γωνία εφαπτομένης τόξου συναρμογής εισόδου στο $\mathbf{\Lambda}_i$ (rad)
τ_{2_i}	Γωνία εφαπτομένης τόξου συναρμογής εξόδου στο $\mathbf{\Lambda}'_i$ (rad)

9.4.4.7 Μικρή εφαπτομένη

Τα μήκη των μικρών εφαπτομένων προκύπτουν ως προς την τεταγμένη των χαρακτηριστικών σημείων στα άκρα των κυκλικών τόξων και τις εφαπτομενικές γωνίες:

$$T_{k1_i} = \frac{Y_{\Omega_i}}{\sin \tau_{1_i}}, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{9.19}$$

$$T_{k2_i} = \frac{Y_{\Omega'_i}}{\sin \tau_{2_i}}, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{9.20}$$

Οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στις παραπάνω σχέσεις περιγράφονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 9.16: Μεταβλητές υπολογισμού μικρών εφαπτομένων των τόξων συναρμογής

Μεταβλητές	Περιγραφή
T_{k1_i}	Μήκος μικρής εφαπτομένης τόξου συναρμογής εισόδου (m)
T_{k2_i}	Μήκος μικρής εφαπτομένης τόξου συναρμογής εξόδου (m)
Y_{Ω_i}	Σχετική τεταγμένη σημείου αρχής κυκλικού τόξου $\mathbf{\Omega}_i$ ως προς $\mathbf{\Lambda}_i$ (m)
$Y_{\Omega'_i}$	Σχετική τεταγμένη σημείου τέλους κυκλικού τόξου $\mathbf{\Omega}'_i$ ως προς $\mathbf{\Lambda}'_i$ (m)
τ_{1_i}	Γωνία εφαπτομένης τόξου συναρμογής εισόδου στο $\mathbf{\Lambda}_i$ (rad)
τ_{2_i}	Γωνία εφαπτομένης τόξου συναρμογής εξόδου στο $\mathbf{\Lambda}'_i$ (rad)

9.4.4.8 Απόσταση ίχνους κέντρου τόξου από τομή διχοτόμου και εφαπτομένης

Η απόσταση της ορθής προβολής του κέντρου καμπυλότητας του κυκλικού τόξου της οριζοντιογραφικής καμπύλης, επί της εφαπτομένης από αρχής της κλωθοειδούς, με το σημείο τομής της διχοτόμου της επίκεντρης γωνίας που σχηματίζεται από τις δύο κάθετες στις εφαπτομένες εισόδου

και εξόδου με την εκάστοτε εφαπτομένη από αρχής της κλωθοειδούς δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$t_{1_i} = \left(R_i + \Delta R_{1_i}\right) \cdot \tan\frac{\gamma_i}{2}, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{9.21}$$

$$t_{2_i} = \left(R_i + \Delta R_{2_i}\right) \cdot \tan\frac{\gamma_i}{2}, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{9.22}$$

Πίνακας 9.17: Μεταβλητές αποστάσεων ίχνους κέντρου από τομή διχοτόμου και εφαπτομένων

Μεταβλητές	Περιγραφή
$\mathbf{\Phi}_{1_i}$	Σημείο τομής διχοτόμου επίκεντρης γωνίας γ_i με εφαπτομένη του $\mathbf{\Lambda}_i$
$\mathbf{\Phi}_{2_i}$	Σημείο τομής διχοτόμου επίκεντρης γωνίας γ_i με εφαπτομένη του $\mathbf{\Lambda}'_i$
t_{1_i}	Απόσταση ίχνους του $\mathbf{M}_i$ με τομή διχοτόμου και εφαπτομένης τόξου εισόδου (m)
t_{2_i}	Απόσταση ίχνους του $\mathbf{M}_i$ με τομή διχοτόμου και εφαπτομένης τόξου εξόδου (m)
ΔR_{1_i}	Εκτροπή κλωθοειδούς εισόδου (m)
ΔR_{2_i}	Εκτροπή κλωθοειδούς εξόδου (m)
R_i	Ακτίνα κυκλικού τόξου (m)
γ_i	Γωνία θλάσης του άξονα της κύριας πολυγωνικής στην κορυφή $\mathbf{K}_i$ (rad)

9.4.4.9 Βοηθητικό μέγεθος

Το βοηθητικό μέγεθος υπολογίζεται με βάση τις εκτροπές των κλωθοειδών και της εξωτερικής γωνίας της κορυφής της κύριας πολυγωνικής, ως εξής:

$$d_i = \frac{\Delta R_{2_i} - \Delta R_{1_i}}{\sin\gamma_i}, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{9.23}$$

Σημειώνεται, ότι το πρόσημο που προκύπτει μετά τον παραπάνω υπολογισμό χρησιμοποιείται κανονικά στις σχέσεις όπου συμμετέχει το βοηθητικό αυτό μέγεθος. Ο συμβολισμός των μεταβλητών παρατίθεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 9.18: Μεταβλητές υπολογισμού βοηθητικού μεγέθους

Μεταβλητές	Περιγραφή
d_i	Βοηθητικό μέγεθος (m)
ΔR_{1_i}	Εκτροπή κλωθοειδούς εισόδου (m)
ΔR_{2_i}	Εκτροπή κλωθοειδούς εξόδου (m)
γ_i	Γωνία θλάσης του άξονα της κύριας πολυγωνικής στην κορυφή $\mathbf{K}_i$ (rad)

9.4.4.10 Εφαπτομενικό μήκος καμπύλης κύριας πολυγωνικής

Το εφαπτομενικό μήκος καμπύλης κύριας πολυγωνικής, δηλαδή η απόσταση της αρχής της κλωθοειδούς εισόδου ή του τέλους της κλωθοειδούς εξόδου αντίστοιχα από την κορυφή της κύριας πολυγωνικής υπολογίζεται ως εξής:

$$T_{1_i} = X_{\mathrm{M}_{1i}} + t_{1_i} + d_i, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{9.24}$$

$$T_{2_i} = X_{\mathrm{M}_{2i}} + t_{2_i} - d_i, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{9.25}$$

Οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στις σχέσεις αυτές περιγράφονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 9.19: Μεταβλητές υπολογισμού εφαπτομενικού μήκους καμπύλης κύριας πολυγωνικής

Μεταβλητές	Περιγραφή
T_{1_i}	Εφαπτομενικό μήκος καμπύλης κύριας πολυγωνικής στον κλάδο εισόδου (m)
T_{2_i}	Εφαπτομενικό μήκος καμπύλης κύριας πολυγωνικής στον κλάδο εξόδου (m)
$X_{\mathrm{M}_{1i}}$	Σχετική τετμημένη κέντρου κύκλου καμπυλότητας $\mathbf{M}_i$ ως προς $\mathbf{\Lambda}_i$ (m)
$X_{\mathrm{M}_{2i}}$	Σχετική τετμημένη κέντρου κύκλου καμπυλότητας $\mathbf{M}_i$ ως προς $\mathbf{\Lambda}'_i$ (m)
t_{1_i}	Απόσταση ίχνους του $\mathbf{M}_i$ με τομή διχοτόμου και εφαπτομένης τόξου εισόδου (m)
t_{2_i}	Απόσταση ίχνους του $\mathbf{M}_i$ με τομή διχοτόμου και εφαπτομένης τόξου εξόδου (m)
d	Βοηθητικό μέγεθος (m)

9.4.4.11 Μήκος ευθυγραμμίας

Το μήκος της οριζοντιογραφικής ευθυγραμμίας προκύπτει από την αφαίρεση του εφαπτομενικού μήκους καμπύλης εξόδου της προηγούμενης οριζοντιογραφικής καμπύλης και του αντίστοιχου μήκους εισόδου της επερχόμενης καμπύλης από το μήκος του κλάδου της κύριας πολυγωνικής. Δηλαδή, ισχύει:

$$L_{T_i} = T_{\mathrm{K}_i\mathrm{K}_{i+1}} - T_{2_i} - T_{1_{i+1}}, \quad \forall i = 0, \ldots, n \tag{9.26}$$

Οι μεταβλητές αυτής της σχέσης περιγράφονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 9.20: Μεταβλητές υπολογισμού μήκους ευθυγραμμίας κατά την οριζοντιογραφία

Μεταβλητές	Περιγραφή
L_{T_i}	Μήκος ευθυγραμμίας κατά την οριζοντιογραφία (m)
$T_{\mathrm{K}_i\mathrm{K}_{i+1}}$	Μήκος κλάδου κύριας πολυγωνικής (m)
T_{2_i}	Εφαπτομενικό μήκος καμπύλης κύριας πολυγωνικής στον κλάδο εξόδου (m)
T_{1_i}	Εφαπτομενικό μήκος καμπύλης κύριας πολυγωνικής στον κλάδο εισόδου (m)

9.4.4.12 Επίκεντρη γωνία κυκλικού τόξου

Η επίκεντρη γωνία του κυκλικού τόξου προκύπτει με εφαρμογή των κανόνων ισότητας γωνιών, ως η αφαίρεση των εφαπτομενικών γωνιών των τόξων συναρμογής εισόδου και εξόδου από τη γωνία θλάσης της πολυγωνικής. Δηλαδή:

$$\tau_{C_i} = \gamma_i - \tau_{1_i} - \tau_{2_i}, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{9.27}$$

Οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στην παραπάνω σχέση περιγράφονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 9.21: Μεταβλητές για τον υπολογισμό των μικρών εφαπτομένων των τόξων συναρμογής

Μεταβλητές	Περιγραφή
τ_{C_i}	Επίκεντρη γωνία κυκλικού τόξου (rad)
γ_i	Γωνία θλάσης του άξονα της κύριας πολυγωνικής στην κορυφή $\mathbf{K}_i$ (rad)
τ_{1_i}	Γωνία εφαπτομένης τόξου συναρμογής εισόδου στο $\mathbf{\Lambda}_i$ (rad)
τ_{2_i}	Γωνία εφαπτομένης τόξου συναρμογής εξόδου στο $\mathbf{\Lambda}'_i$ (rad)

9.4.4.13 Μήκος κυκλικού τόξου

Το μήκος κάθε κυκλικού τόξου προκύπτει από το γινόμενο της ακτίνας του κυκλικού τόξου με την επίκεντρη γωνία ως εξής:

$$L_{C_i} = \tau_{C_i} \cdot R_i, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{9.28}$$

Οι μεταβλητές που για τον υπολογισμός του μήκους του κυκλικού τόξου περιγράφονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 9.22: Μεταβλητές για τον υπολογισμό του μήκους κυκλικού τόξου

Μεταβλητές	Περιγραφή
L_{C_i}	Μήκος κυκλικού τόξου (m)
τ_{C_i}	Επίκεντρη γωνία κυκλικού τόξου (rad)
R_i	Ακτίνα κυκλικού τόξου (m)

9.4.4.14 Μήκος οριζοντιογραφικής καμπύλης

Το συνολικό μήκος μιας οριζοντιογραφικής καμπύλης προκύπτει από το άθροισμα του μήκους του κυκλικού τόξου με τα αντίστοιχα μήκη των αντίστοιχων τόξων συναρμογής εισόδου και εξόδου. Επομένως ισχύει:

$$L_{CS_i} = L_{C_i} + L_{S1_i} + L_{S2_i}, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{9.29}$$

Ακολουθεί η επεξήγηση των μεταβλητών στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 9.23: Μεταβλητές για τον υπολογισμό της οριζοντιογραφικής καμπύλης

Μεταβλητές	Περιγραφή
L_{CS_i}	Μήκος οριζοντιογραφικής καμπύλης (m)
L_{C_i}	Μήκος κυκλικού τόξου (m)
L_{S1_i}	Μήκος τόξου συναρμογής εισόδου (m)
L_{S2_i}	Μήκος τόξου συναρμογής εξόδου (m)

9.4.5 Συνολικό μήκος της χάραξης

Το συνολικό μήκος της χάραξης κατά την οριζοντιογραφία αποτελείται από το άθροισμα των μηκών των ευθυγραμμιών των κυκλικών τόξων και των τόξων συναρμογής που της αποτελούν. Δηλαδή ισχύει:

$$L_n = \sum_{i=0}^{n} \left(L_{T_i} + L_{CS_i} \right) \tag{9.30}$$

Οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στη σχέση αυτή περιγράφονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 9.24: Μεταβλητές για τον υπολογισμό του μήκους της οριζοντιογραφικής χάραξης

Μεταβλητές	Περιγραφή
L_n	Συνολικό μήκος οριζοντιογραφικής χάραξης (m)
L_{T_i}	Μήκος ευθυγραμμίας κατά την οριζοντιογραφία (m)
L_{CS_i}	Μήκος οριζοντιογραφικής καμπύλης (m)

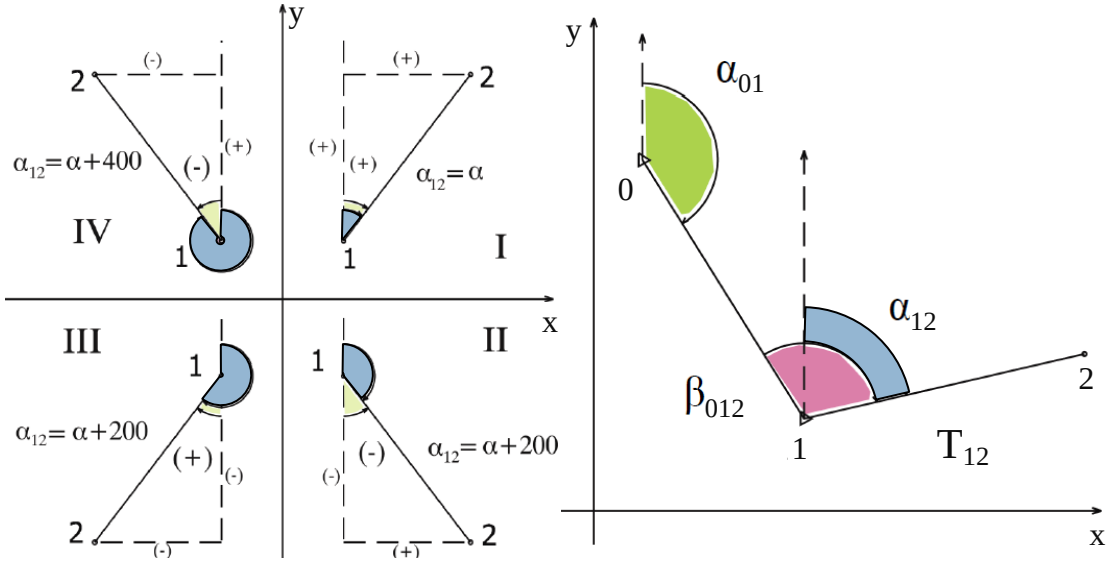
9.4.6 Γωνίες διεύθυνσης

Γωνία διεύθυνσης είναι η γωνία που σχηματίζεται όταν στραφεί η παράλληλη ευθεία στον θετικό ημιάξονα των τεταγμένων, η οποία περνά από το πρώτο σημείο, σύμφωνα με την κίνηση των δεικτών του ρολογιού, ώστε να συναντήσει τη διεύθυνση του τμήματος, το οποίο συνδέει το πρώτο με το δεύτερο σημείο.

Στο υπόλοιπο μέρος της εργασίας, όπου χρησιμοποιούνται γωνίες διεύθυνσης, αυτές υπολογίζονται με βάση το δεύτερο και το τρίτο θεμελιώδες γεωδαιτικό πρόβλημα. Τα δύο αυτά προβλήματα έχουν περιγράψει μεταξύ άλλων οι Λάμπρου & Πανταζής (2010) , ενώ πρακτικές εφαρμογές πάνω στα δύο προβλήματα έχει κάνει ο Μήλας,(2005). Στο επόμενο σχήμα γίνεται μια οπτική απεικόνιση των δύο αυτών προβλημάτων όπου με μπλε χρώμα παριστάνεται η ζητούμενη γωνία.

Σημειώνεται ότι στους υπολογισμούς γωνιών διεύθυνσης που γίνονται στην παρούσα εργασία τη θέση του πρώτου και του δεύτερου σημείου του τμήματος καταλαμβάνουν οι κορυφές ή γενικότερα τα σημεία γνωστών συντεταγμένων της χάραξης. Προσοχή πρέπει να δίδεται στους δείκτες της μεταβλητής της γωνίας διεύθυνσης καθώς ορισμένα μεγέθη υπολογίζονται κατά την αντίθετη φορά από αυτήν που έχει συμβατικά οριστεί με την επιλογή του σημείου αρχής και τέλους της χάραξης.

Σχήμα 9.4: Δεύτερο και τρίτο θεμελιώδες πρόβλημα γεωδαισίας
(Πηγή: Μήλας, 2005, Ιδία επεξεργασία)



Οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στα παραπάνω σχήματα περιγράφονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 9.25: Μεταβλητές για τον υπολογισμό γωνίας διεύθυνσης

Μεταβλητές	Περιγραφή
a_{12}	Γωνία διεύθυνσης από το πρώτο προς το δεύτερο σημείο (rad)
a	Γωνία που προκύπτει από την αντίστροφη εφαπτομένη των σημείων (rad)
x_1	Τετμημένη πρώτου σημείου (m)
x_2	Τετμημένη δεύτερου σημείου (m)
y_1	Τεταγμένη πρώτου σημείου (m)
y_2	Τεταγμένη δεύτερου σημείου (m)
a_{01}	Γωνία διεύθυνσης που προηγείται της ζητούμενης (rad)
β_{012}	Δεξιόστροφη γωνία θλάσης των δύο τμημάτων (rad)
T_{12}	Μήκος τμήματος που συνδέει το πρώτο με το δεύτερο σημείο (m)
κ	Ακέραιος αριθμός

9.4.6.1 Υπολογισμός γωνίας διεύθυνσης με βάση το 2° θεμελιώδες πρόβλημα

Ο υπολογισμός της γωνίας διεύθυνσης με χρήση του δεύτερου θεμελιώδους προβλήματος της γεωδαισίας γίνεται όταν είναι γνωστές οι συντεταγμένες των άκρων του τμήματος ανάλογα με το τεταρτημόριο στο οποίο ορίζεται η διεύθυνση του τμήματος που ενώνει το πρώτο με το δεύτερο άκρο. Για αποφυγή παρανοήσεων σημειώνεται ότι η χρήση των τεταρτημορίων αφορούν μόνο τις διαφορές των συντεταγμένων των δύο σημείων και όχι τις απόλυτες θέσεις τους. Δηλαδή το σημείο τομής των αξόνων στο παραπάνω σχήμα δεν αποτελεί και αρχή της προβολής του συστήματος αναφοράς. Για τον υπολογισμό των γωνιών διεύθυνσης με βάση το δεύτερο θεμελιώδες γεωδαιτικό πρόβλημα ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία.

Διαδικασία 9.1: Υπολογισμός γωνίας διεύθυνσης με βάση το δεύτερο θεμελιώδες πρόβλημα

Όρισε $i = 0$
(1) Αν $i \leq n$, τότε συνέχισε; Αλλιώς τέλος
Όρισε $\Delta x = x_2 - x_1$; Όρισε $\Delta y = y_2 - y_1$
(2) Αν $\Delta x = 0$, τότε συνέχισε; Αλλιώς πήγαινε στο Βήμα (3)
(2-1) Αν $\Delta y \geq 0$, τότε συνέχισε; Αλλιώς πήγαινε στο Βήμα (2-2)
Όρισε $a_{12} = 0$; Πήγαινε στο Βήμα (6)
(2-2) Αν $\Delta y < 0$, τότε
Όρισε $a_{12} = \pi$; Πήγαινε στο Βήμα (6)
(3) Αν $\Delta y = 0$, τότε συνέχισε; Αλλιώς πήγαινε στο Βήμα (4)
(3-1) Αν $\Delta x > 0$, τότε συνέχισε; Αλλιώς πήγαινε στο Βήμα (3-2)
Όρισε $a_{12} = \pi/2$; Πήγαινε στο Βήμα (6)
(3-2) Αν $\Delta y < 0$, τότε
Όρισε $a_{12} = 3 \cdot \pi/2$; Πήγαινε στο Βήμα (6)
(4) Όρισε $\alpha = \tan^{-1}(\Delta x/\Delta y)$
Αν $\Delta y < 0$, τότε συνέχισε; Αλλιώς πήγαινε στο Βήμα (5)
Όρισε $a_{12} = \alpha + \pi$; Πήγαινε στο Βήμα (6)
(5) Αν $\Delta y > 0$, τότε
(5-1) Αν $\Delta x > 0$, τότε συνέχισε; Αλλιώς πήγαινε στο Βήμα (5-2)
Όρισε $a_{12} = \alpha$; Πήγαινε στο Βήμα (6)
(5-2) Αν $\Delta x < 0$, τότε
Όρισε $a_{12} = a + 2 \cdot \pi$
(6) Όρισε $i = i + 1$; Πήγαινε στο Βήμα 2-1

9.4.6.2 Υπολογισμός γωνίας διεύθυνσης με βάση το 3° θεμελιώδες πρόβλημα

Το τρίτο θεμελιώδες γεωδαιτικό πρόβλημα χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της γωνίας διεύθυνσης ενός ευθύγραμμου τμήματος μιας τεθλασμένης γραμμής όταν είναι γνωστή η αρχική γωνία διεύθυνσης της τεθλασμένης γραμμής και οι ενδιάμεσες δεξιόστροφες γωνίες θλάσης. Επειδή στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται έως μία ενδιάμεση γωνία θλάσης η μορφή που λαμβάνει το τρίτο θεμελιώδες γεωδαιτικό πρόβλημα έχει ως εξής:

$$\alpha_{12} = \alpha_{01} + \beta_{012} + \pi - 2 \cdot \kappa \cdot \pi, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{9.31}$$

Στην παραπάνω σχέση ο ακέραιος αριθμός κ λαμβάνει τη μέγιστη δυνατή τιμή ώστε να εξασφαλίζεται ότι η τιμή της γωνίας διεύθυνσης παραμένει θετική. Σημειώνεται ότι η ενδιάμεση δεξιόστροφη γωνία θλάσης υπολογίζεται κάθε φορά με βάση τα γνωστά γεωμετρικά μεγέθη των οριζοντιογραφικών καμπυλών.

9.4.7 Θέσεις κορυφών και χαρακτηριστικών σημείων κατά την οριζοντιογραφία

Στα επόμενα εδάφια δίνονται οι σχέσεις υπολογισμού των οριζοντιογραφικών συντεταγμένων των κορυφών της δευτερεύουσας πολυγωνικής και των χαρακτηριστικών σημείων του άξονα της οδού.

9.4.7.1 Σημεία επαφής ευθυγραμμιών και τόξων συναρμογής

Οι συντεταγμένες των σημείων επαφής των ευθυγραμμιών που προηγούνται των καμπυλών με τα τόξα συναρμογής εισόδου υπολογίζονται με βάση την παρακάτω σχέση:

$$\mathbf{\Lambda}_i = \mathbf{K}_i + \frac{T_{1_i}}{T_{\mathrm{K}_{i-1}\mathrm{K}_i}} \cdot \left(\mathbf{K}_{i-1} - \mathbf{K}_i\right), \text{ ή } \begin{bmatrix} x_{\Lambda_i} \\ y_{\Lambda_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{\mathrm{K}_i} \\ y_{\mathrm{K}_i} \end{bmatrix} + \frac{T_{1_i}}{T_{\mathrm{K}_{i-1}\mathrm{K}_i}} \cdot \begin{bmatrix} x_{\mathrm{K}_{i-1}} - x_{\mathrm{K}_i} \\ y_{\mathrm{K}_{i-1}} - y_{\mathrm{K}_i} \end{bmatrix}, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{9.32}$$

Αντίστοιχα, η σχέση υπολογισμού των συντεταγμένων των σημείων επαφής των τόξων συναρμογής εξόδου των καμπυλών με τις ευθυγραμμίες που έπονται έχουν ως εξής:

$$\mathbf{\Lambda}'_i = \mathbf{K}_i + \frac{T_{2_i}}{T_{\mathrm{K}_i\mathrm{K}_{i+1}}} \cdot \left(\mathbf{K}_{i+1} - \mathbf{K}_i\right), \text{ ή } \begin{bmatrix} x_{\Lambda'_i} \\ y_{\Lambda'_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{\mathrm{K}_i} \\ y_{\mathrm{K}_i} \end{bmatrix} + \frac{T_{2_i}}{T_{\mathrm{K}_i\mathrm{K}_{i+1}}} \cdot \begin{bmatrix} x_{\mathrm{K}_{i+1}} - x_{\mathrm{K}_i} \\ y_{\mathrm{K}_{i+1}} - y_{\mathrm{K}_i} \end{bmatrix}, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{9.33}$$

Οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στις παραπάνω σχέσεις περιγράφονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 9.26: Μεταβλητές υπολογισμού σημείων επαφής ευθυγραμμιών και τόξων συναρμογής

Μεταβλητές	Περιγραφή
$\mathbf{\Lambda}_i\left(x_{\Lambda_i}, y_{\Lambda_i}\right)$	Σημείο επαφής ευθυγραμμίας με τόξο συναρμογής εισόδου (m, m)
$\mathbf{\Lambda}'_i\left(x_{\Lambda'_i}, y_{\Lambda'_i}\right)$	Σημείο επαφής τόξου συναρμογής εξόδου με ευθυγραμμία (m, m)
$\mathbf{K}_i\left(x_{\mathrm{K}_i}, y_{\mathrm{K}_i}\right)$	Κορυφή κύριας πολυγωνικής (m, m)
T_{1_i}	Εφαπτομενικό μήκος καμπύλης κύριας πολυγωνικής στον κλάδο εισόδου (m)
T_{2_i}	Εφαπτομενικό μήκος καμπύλης κύριας πολυγωνικής στον κλάδο εξόδου (m)
$T_{\mathrm{K}_i\mathrm{K}_{i+1}}$	Μήκος κλάδου κύριας πολυγωνικής (m)

9.4.7.2 Σημεία τομής εφαπτομένων ευθυγραμμιών και κυκλικού τόξου

Οι συντεταγμένες του σημείων αρχής και τέλους των κυκλικών τόξων προκύπτουν με βάση το πρώτο θεμελιώδες γεωδαιτικό πρόβλημα ως εξής:

$$\mathbf{I}_i = \begin{bmatrix} x_{\mathrm{I}_i} \\ y_{\mathrm{I}_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{\Lambda_i} \\ y_{\Lambda_i} \end{bmatrix} + T_{\ell 1_i} \cdot \begin{bmatrix} \sin a_{\mathrm{K}_i\mathrm{K}_{i+1}} \\ \cos a_{\mathrm{K}_i\mathrm{K}_{i+1}} \end{bmatrix}, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{9.34}$$

$$\mathbf{I}'_i = \begin{bmatrix} x_{\mathrm{I}'_i} \\ y_{\mathrm{I}'_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{\Lambda'_i} \\ y_{\Lambda'_i} \end{bmatrix} + T_{\ell 2_i} \cdot \begin{bmatrix} \sin a_{\mathrm{K}_{i+1}\mathrm{K}_i} \\ \cos a_{\mathrm{K}_{i+1}\mathrm{K}_i} \end{bmatrix}, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{9.35}$$

Οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στις παραπάνω σχέσεις περιγράφονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 9.27: Μεταβλητές για τον υπολογισμό σημείων τομής εφαπτομένων

Μεταβλητές	Περιγραφή
$\mathbf{I}_i\left(x_{\mathrm{I}_i}, y_{\mathrm{I}_i}\right)$	Σημείο τομής εφαπτομένων ευθυγραμμίας και αρχής κυκλικού τόξου (m, m)
$\mathbf{I}'_i\left(x_{\mathrm{I}'_i}, y_{\mathrm{I}'_i}\right)$	Σημείο τομής εφαπτομένων τέλους κυκλικού τόξου και ευθυγραμμίας (m, m)
$\mathbf{\Lambda}_i\left(x_{\Lambda_i}, y_{\Lambda_i}\right)$	Σημείο επαφής ευθυγραμμίας με τόξο συναρμογής εισόδου (m, m)
$\mathbf{\Lambda}'_i\left(x_{\Lambda'_i}, y_{\Lambda'_i}\right)$	Σημείο επαφής τόξου συναρμογής εξόδου με ευθυγραμμία (m, m)
$T_{\ell 1_i}$	Μήκος μεγάλης εφαπτομένης τόξου συναρμογής εισόδου (m)
$T_{\ell 2_i}$	Μήκος μεγάλης εφαπτομένης τόξου συναρμογής εξόδου (m)

$a_{\mathrm{K}_i\mathrm{K}_{i+1}}$	Γωνία διεύθυνσης από την κορυφή $\mathbf{K}_i$ προς την κορυφή $\mathbf{K}_{i+1}$ (rad)
$a_{\mathrm{K}_{i+1}\mathrm{K}_i}$	Γωνία διεύθυνσης από την κορυφή $\mathbf{K}_{i+1}$ προς την κορυφή $\mathbf{K}_i$ (rad)

9.4.7.3 Σημεία αρχής και τέλους κυκλικού τόξου

Οι συντεταγμένες των σημείων αρχής και τέλους των κυκλικών τόξων προκύπτουν με βάση το πρώτο θεμελιώδες γεωδαιτικό πρόβλημα ως εξής:

$$\mathbf{\Omega}_i = \begin{bmatrix} x_{\Omega_i} \\ y_{\Omega_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{\mathrm{I}_i} \\ y_{\mathrm{I}_i} \end{bmatrix} + T_{k1_i} \cdot \begin{bmatrix} \sin a_{\mathrm{I}_i\Omega_i} \\ \cos a_{\mathrm{I}_i\Omega_i} \end{bmatrix}, \quad \forall i = 1,\ldots,n \tag{9.36}$$

$$\mathbf{\Omega}'_i = \begin{bmatrix} x_{\Omega'_i} \\ y_{\Omega'_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{\mathrm{I}'_i} \\ y_{\mathrm{I}'_i} \end{bmatrix} + T_{k2_i} \cdot \begin{bmatrix} \sin a_{\mathrm{I}'_i\Omega'_i} \\ \cos a_{\mathrm{I}'_i\Omega'_i} \end{bmatrix}, \quad \forall i = 1,\ldots,n \tag{9.37}$$

Οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στις παραπάνω σχέσεις περιγράφονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 9.28: Μεταβλητές υπολογισμού θέσεων σημείων αρχής και τέλους κυκλικών τόξων

Μεταβλητές	Περιγραφή
$\mathbf{\Omega}_i\left(x_{\Omega_i}, y_{\Omega_i}\right)$	Σημείο επαφής τόξου συναρμογής εισόδου με κυκλικό τόξο (m, m)
$\mathbf{\Omega}'_i\left(x_{\Omega'_i}, y_{\Omega'_i}\right)$	Σημείο επαφής κυκλικού τόξου με τόξο συναρμογής εξόδου (m, m)
$\mathbf{I}_i\left(x_{\mathrm{I}_i}, y_{\mathrm{I}_i}\right)$	Σημείο τομής εφαπτομένων ευθυγραμμίας και αρχής κυκλικού τόξου (m, m)
$\mathbf{I}'_i\left(x_{\mathrm{I}'_i}, y_{\mathrm{I}'_i}\right)$	Σημείο τομής εφαπτομένων τέλους κυκλικού τόξου και ευθυγραμμίας (m, m)
T_{k1_i}	Μήκος μικρής εφαπτομένης τόξου συναρμογής εισόδου (m)
T_{k2_i}	Μήκος μικρής εφαπτομένης τόξου συναρμογής εξόδου (m)
$a_{\mathrm{I}_i\Omega_i}$	Γωνία διεύθυνσης από το σημείο $\mathbf{I}_i$ προς το σημείο $\mathbf{\Omega}_i$ (rad)
$a_{\mathrm{I}'_i\Omega'_i}$	Γωνία διεύθυνσης από το σημείο $\mathbf{I}'_i$ προς το σημείο $\mathbf{\Omega}'_i$ (rad)

9.4.7.4 Κέντρο κύκλου καμπυλότητας

Οι οριζοντιογραφικές συντεταγμένες του κέντρου κύκλου καμπυλότητας μπορούν να υπολογιστούν με μετασχηματισμό συντεταγμένων από το ένα εκ των δύο τοπικών συστημάτων κάθε οριζοντιογραφικής καμπύλης στο σύστημα συντεταγμένων της χάραξης. Ο μετασχηματισμός περιλαμβάνει μία στροφή των αξόνων και δύο μεταθέσεις, ενώ εκφράζεται ως εξής:

$$\mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} x_{\mathrm{M}_i} \\ y_{\mathrm{M}_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{\Lambda_i} \\ y_{\Lambda_i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos\theta_{1_i} & -\sin\theta_{1_i} \\ \sin\theta_{1_i} & \cos\theta_{1_i} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_{\mathrm{M}_{1i}} \\ Y_{\mathrm{M}_{1i}} \end{bmatrix}, \quad \forall i = 1,\ldots,n \tag{9.38}$$

Εναλλακτικά, οι συντεταγμένες του κέντρου κύκλου καμπυλότητα μπορούν να υπολογιστούν από το σύστημα τοπικών συντεταγμένων του τόξου συναρμογής εξόδου:

$$\mathbf{M}_i = \begin{bmatrix} x_{\mathrm{M}_i} \\ y_{\mathrm{M}_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{\Lambda'_i} \\ y_{\Lambda'_i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos\theta_{2_i} & -\sin\theta_{2_i} \\ \sin\theta_{2_i} & \cos\theta_{2_i} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_{\mathrm{M}_{2i}} \\ Y_{\mathrm{M}_{2i}} \end{bmatrix}, \quad \forall i = 1,\ldots,n \tag{9.39}$$

Οι δεξιόστροφες γωνίες στροφής προκύπτουν με λογικές σχέσεις μεταξύ των αντίστοιχων γωνιών των εφαπτομένων των τόξων συναρμογής εισόδου και εξόδου. Οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται επεξηγούνται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 9.29: Μεταβλητές για τον υπολογισμό σημείων τομής εφαπτομένων

Μεταβλητές	**Περιγραφή**
$\mathbf{M}_i\left(x_{\mathrm{M}_i}, y_{\mathrm{M}_i}\right)$	Κέντρο κύκλου καμπυλότητας οριζοντιογραφικής καμπύλης (m, m)
$\mathbf{\Lambda}_i\left(x_{\Lambda_i}, y_{\Lambda_i}\right)$	Σημείο επαφής ευθυγραμμίας με τόξο συναρμογής εισόδου (m, m)
$\mathbf{\Lambda}'_i\left(x_{\Lambda'_i}, y_{\Lambda'_i}\right)$	Σημείο επαφής τόξου συναρμογής εξόδου με ευθυγραμμία (m, m)
$X_{\mathrm{M}_{1i}}$	Σχετική τετμημένη κέντρου κύκλου καμπυλότητας $\mathbf{M}_i$ ως προς $\mathbf{\Lambda}_i$ (m)
$Y_{\mathrm{M}_{1i}}$	Σχετική τεταγμένη κέντρου κύκλου καμπυλότητας $\mathbf{M}_i$ ως προς $\mathbf{\Lambda}_i$ (m)
$X_{\mathrm{M}_{2i}}$	Σχετική τετμημένη κέντρου κύκλου καμπυλότητας $\mathbf{M}_i$ ως προς $\mathbf{\Lambda}'_i$ (m)
$Y_{\mathrm{M}_{2i}}$	Σχετική τεταγμένη κέντρου κύκλου καμπυλότητας $\mathbf{M}_i$ ως προς $\mathbf{\Lambda}'_i$ (m)
θ_{1_i}	Γωνία στροφής συστήματος οριζοντιογραφίας προς τοπικό σύστημα εισόδου (rad)
θ_{2_i}	Γωνία στροφής συστήματος οριζοντιογραφίας προς τοπικό σύστημα εξόδου (rad)

9.5 Υπολογισμοί κατακόρυφης χάραξης

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, μια οδός από γεωμετρική άποψη ορίζεται ως αλληλουχία σαφώς καθορισμένων γεωμετρικών τόξων στην οριζοντιογραφία και στη μηκοτομή. Στην ενότητα αυτή γίνονται οι απαραίτητοι υπολογισμοί που αφορούν τη διαμόρφωση της οδού ως προς την μηκοτομή με δεδομένα τα στοιχεία της οριζοντιογραφικής χάραξης.

Σε αντίθεση με άλλα πρότυπα βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων στο πρότυπο που αναπτύσσεται στην παρούσα εργασία, η κατακόρυφη χάραξη εξετάζεται ανεξάρτητα από την οριζοντιογραφική, καθώς η πολυγωνική της μηκοτομής έχει διαφορετικές κορυφές από αυτές της οριζοντιογραφίας. Ο επιτυχής συνδυασμός των δύο χαράξεων επιτυγχάνεται μέσω περιορισμών που τίθενται στο επόμενο κεφάλαιο.

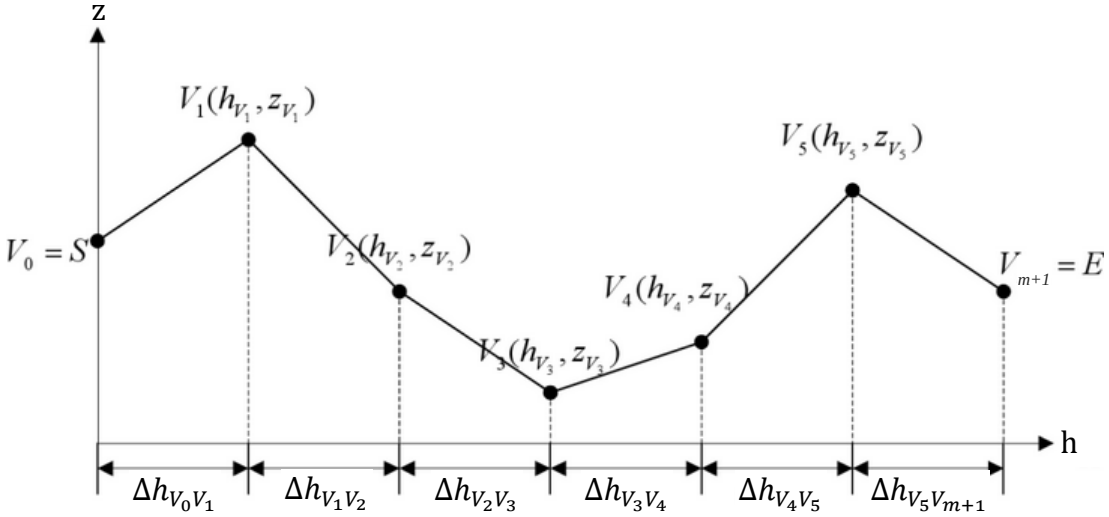
9.5.1 Πολυγωνική μηκοτομής

Θεωρώντας μια επιφάνεια ορθογώνια στο επίπεδο xy με οδηγό καμπύλη τον άξονα της οριζοντιογραφικής χάραξης και λαμβάνοντας στη συνέχεια το ανάπτυγμά της, που ονομάζεται συμβατικά επίπεδο hz, όπου h είναι η απόσταση από το σημείο αρχής S επί της οριζοντιογραφικής χάραξης, τότε το σύνολο σημείων $S, V_1, \dots V_m, E$ αποτελούν τα σημεία ελέγχου ή κορυφές της αντίστοιχης πολυγωνικής γραμμής της κατακόρυφης χάραξης.

Κάθε τέτοιο ζεύγος διαδοχικών τέτοιων σημείων συνδέεται με ένα εφαπτόμενο τμήμα. Η πολυγωνική που σχηματίζεται από αυτό το σύνολο ευθυγράμμων τμημάτων αποτελεί μια χονδροειδή απεικόνιση της κατακόρυφης χάραξης.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η πολυγωνική γραμμή της μηκοτομής με τις αντίστοιχες κορυφές. Για κάθε κορυφή της μηκοτομής εκτός από το υψόμετρο και τη χιλιομετρική θέση ορίζεται και η παράμετρος της παραβολικής καμπύλης που σχετίζεται με τη συγκεκριμένη κορυφή.

Σχήμα 9.5: Πολυγωνική γραμμή κατακόρυφης χάραξης



Για την περιγραφή της πολυγωνικής γραμμής της μηκοτομής χρησιμοποιούνται τα μεγέθη του επόμενου πίνακα.

Πίνακας 9.30: Μεταβλητές πολυγωνικής γραμμής της μηκοτομής

Μεταβλητές	Περιγραφή
$\mathbf{V}_j\left(h_{V_j}, z_{V_j}\right)$	Κορυφή πολυγωνικής γραμμής μηκοτομής (m, m)
h_{V_j}	Χιλιομετρική θέση κορυφής πολυγωνικής γραμμής μηκοτομής (m)
z_{V_j}	Υψόμετρο κορυφής πολυγωνικής γραμμής μηκοτομής (m)
$\Delta h_{V_jV_{j+1}}$	Χιλιομετρική απόσταση κορυφών $\mathbf{V}_j$ και $\mathbf{V}_{j+1}$ πολυγωνικής μηκοτομής (m)
s_j	Κατά μήκος κλίση κλάδου μεταξύ των κορυφών $\mathbf{V}_j$ και $\mathbf{V}_{j+1}$ (m/m)

9.5.1.1 Χιλιομετρικές αποστάσεις κορυφών πολυγωνικής μηκοτομής

Για την προσαρμογή της κατακόρυφης χάραξης στο σύνολο των κορυφών $S, V_1, \ldots V_n, E$ καθορίζονται οι συντεταγμένες τους στο επίπεδο hz καθώς αυτές αποτελούν μεταβλητές απόφασης. Η οριζόντια απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών V_j και V_{j+1} στο επίπεδο hz υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Delta h_{V_jV_{j+1}} = h_{V_{j+1}} - h_{V_j}, \quad \forall j = 0, \ldots, m \tag{9.40}$$

9.5.1.2 Κατά μήκος κλίση κλάδων πολυγωνικής μηκοτομής

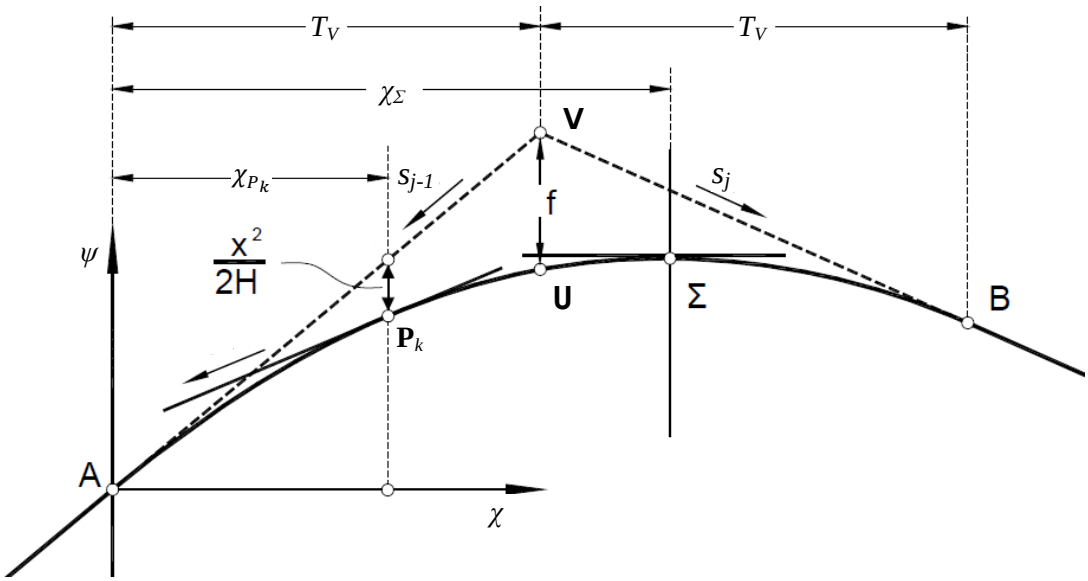
Η κατά μήκος κλίση ενός κλάδου της πολυγωνικής προκύπτει από το λόγο της διαφοράς των υψομέτρων με τη διαφορά των χιλιομετρικών θέσεων των δύο άκρων του κλάδου. Συνήθως, επιλέγεται η κλίση να εκφράζεται επί τοις εκατό αλλά σε αυτήν την εργασία οι υπολογισμοί γίνονται βάσει του καθαρού αριθμού που προκύπτει από τον λόγο. Δηλαδή:

$$s_j = \frac{z_{V_{j+1}} - z_{V_j}}{\Delta h_{V_iV_{i+1}}}, \quad \forall j = 0, \ldots, m \tag{9.41}$$

9.5.2 Γεωμετρικά στοιχεία κατακόρυφων καμπυλών

Όπως έχει αναφερθεί, τα τόξα συναρμογής που διατάσσονται στα κυρτώματα και τα κοιλώματα είναι τετραγωνικές παραβολές ως προσέγγιση κυκλικών τόξων, δεδομένου ότι για τις κατά κανόνα εφαρμοζόμενες μεγάλες ακτίνες και την επιδιωκόμενη ακρίβεια το κυκλικό τόξο και η τετραγωνική παραβολή συμπίπτουν. Καθοριστικό γεωμετρικό μέγεθος της κατακόρυφης καμπύλης είναι η ακτίνα καμπυλότητας στη θέση αλλαγής προσήμου της κατά μήκος κλίσης. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται τα γεωμετρικά στοιχεία μιας κατακόρυφης καμπύλης.

Σχήμα 9.6: Στοιχεία της τετραγωνικής παραβολής ως τόξο στρογγύλευσης της μηκοτομής (Πηγή: FGSV, 2011, Ιδία επεξεργασία)



Οι τοπικές τετμημένες μετρούνται οριζόντια και οι τοπικές τεταγμένες κατακόρυφα στο ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων κάθε κατακόρυφης καμπύλης. Επισημαίνεται ότι οι διαφορές των οριζόντιων αποστάσεων από τις αντίστοιχες επί της εφαπτομένης και των κατακόρυφων αποστάσεων από τις αντίστοιχες επί της καθέτου στην εφαπτομένη είναι αμελητέες για τις κατά μήκος κλίσεις που εφαρμόζονται στις χαράξεις. Οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς των στοιχείων των κατακόρυφων καμπυλών περιγράφονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 9.31: Μεταβλητές για την περιγραφή κατακόρυφων καμπυλών

Μεταβλητές	Περιγραφή
$\mathbf{V}_j\left(h_{V_j}, z_{V_j}\right)$	Κορυφή πολυγωνικής μηκοτομής (m, m)
$\mathbf{A}_j\left(h_{A_j}, z_{A_j}\right)$	Αρχή κατακόρυφης καμπύλης (m, m)
$\mathbf{B}_j\left(h_{B_j}, z_{B_j}\right)$	Τέλος κατακόρυφης καμπύλης (m, m)
$\mathbf{\Sigma}_j\left(h_{\Sigma_j}, z_{\Sigma_j}\right)$	Σημείο αλλαγής προσήμου κλίσης κατακόρυφης καμπύλης (m, m) (αν υπάρχει)
$\mathbf{U}_j\left(h_{U_j}, z_{U_j}\right)$	Μέσο κατακόρυφης καμπύλης (m, m)
$\mathbf{P}_k$	Σημείο πύκνωσης
s_j	Κατά μήκος κλίση εφαπτομένης στο τέλος της κατακόρυφης καμπύλης (m)
T_{V_j}	Μήκος εφαπτομένης κατακόρυφης καμπύλης (m)

f_j	Βέλος κατακόρυφης καμπύλης (m)
H_j	Παράμετρος παραβολικής καμπύλης (m)
χ	Σχετική τετμημένη στο τοπικό σύστημα της κατακόρυφης καμπύλης (m)
ψ	Σχετική τεταγμένη στο τοπικό σύστημα της κατακόρυφης καμπύλης (m)

Οι βασικές σχέσεις υπολογισμού μίας κατακόρυφης καμπύλης δίδονται στο στα επόμενα εδάφια. Σημειώνεται ότι η παράμετρος της τετραγωνικής παραβολής που αποτελεί την ακτίνα καμπυλότητας στο σημείο αλλαγής προσήμου κλίσης, λαμβάνεται θετική για κοίλες και αρνητική για κυρτές καμπύλες. Επίσης, η κατά μήκος κλίση λαμβάνεται θετική στις ανωφέρειες και αρνητική στις κατωφέρειες.

9.5.2.1 Εφαπτομένη κατακόρυφης καμπύλης

Το μήκος εφαπτομένης κατακόρυφης καμπύλης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$T_{V_j} = \frac{H_j}{2} \cdot \left(s_j - s_{j-1}\right), \quad \forall j = 1, \ldots, m \tag{9.42}$$

9.5.2.2 Μήκος κατακόρυφης καμπύλης

Αφού η παραβολικές καμπύλες είναι συμμετρικές το συνολικό μήκος της κατακόρυφης καμπύλης θα είναι διπλάσιο της εφαπτομένης, δηλαδή:

$$L_{V_j} = 2 \cdot T_j = H_j \cdot \left(s_j - s_{j-1}\right), \quad \forall j = 1, \ldots, m \tag{9.43}$$

9.5.2.3 Βέλος κατακόρυφης καμπύλης

Το βέλος της κατακόρυφης καμπύλης μπορεί να υπολογιστεί με βάση την παρακάτω σχέση:

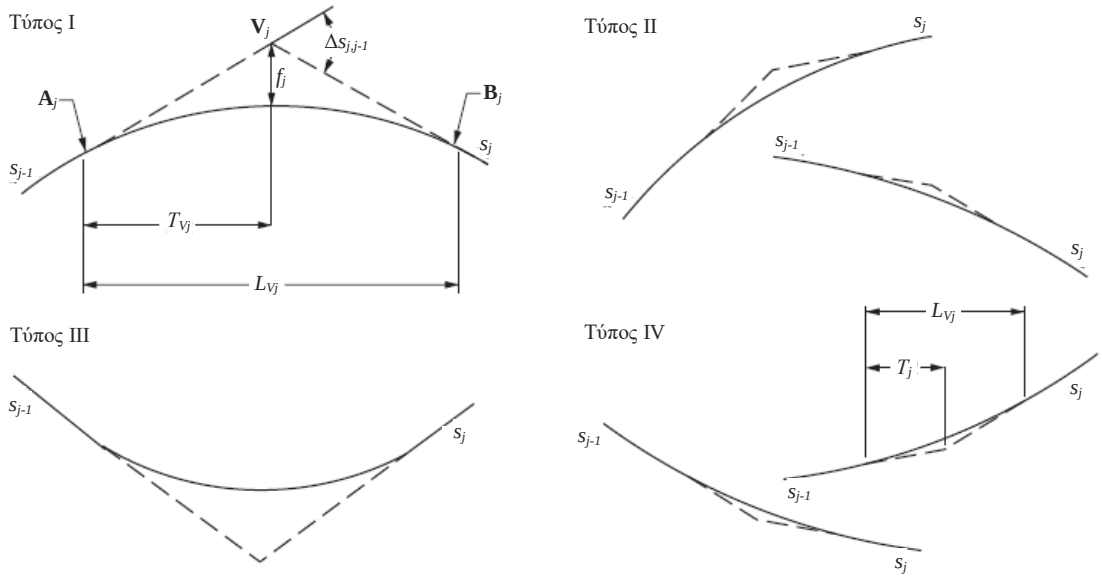
$$f_j = \frac{{T_{V_j}}^2}{2 \cdot H_j} = \frac{T_{V_j}}{4}\left(s_j - s_{j-1}\right) = \frac{H_j}{8}\left(s_j - s_{j-1}\right)^2, \quad \forall j = 1, \ldots, m \tag{9.44}$$

9.5.2.4 Τοπικές συντεταγμένες σημείου αλλαγής προσήμου κατά μήκος κλίσης

Το σημείο αλλαγής προσήμου της κατά μήκος κλίσης ορίζεται μόνο στις περιπτώσεις όπου το πρόσημο της κλίσης αλλάζει. Αυτό σημαίνει πως δεν ορίζεται σε όλες τις κατακόρυφες καμπύλες αλλά μόνο στις καμπύλες της πρώτης και τρίτης κατηγορίας του επόμενου σχήματος, καθώς στις κυρτές καμπύλες της δεύτερης κατηγορίας και τις κοίλες καμπύλες της τέταρτης δεν αλλάζει το πρόσημο της κλίσης.

Η γωνία θλάσης της πολυγωνικής της μηκοτομής προσεγγιστικά ισούται με την εφαπτομένη της εξωτερικής γωνίας που σχηματίζεται από τις εφαπτόμενες στο τόξο στρογγύλευσης της μηκοτομής στις τέσσερις περιπτώσεις εναλλαγής των κατά μήκος κλίσεων, όπως εμφανίζονται στην οδοποιία, δηλαδή μετάβαση από ανωφέρεια σε κατωφέρεια ή αντίστροφα και αύξηση ή ελάττωση της ηπιότητας της κλίσης.

Σχήμα 9.7: Τύποι κατακόρυφων καμπυλών
(Πηγή: AASHTO, 2011, Ιδία επεξεργασία)



Για τον προσδιορισμό του σημείου αλλαγής προσήμου σε κάθε κατακόρυφη καμπύλη χρησιμοποιείται αρχικά ένα τοπικό σύστημα συντεταγμένων κάθε τόξου παράλληλο με το σύστημα που χρησιμοποιεί η κατακόρυφη χάραξη και με αρχή το σημείο αρχής της κατακόρυφης καμπύλης. Οι τοπικές συντεταγμένες δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\chi_{\Sigma_j} = -s_{j-1} \cdot H_j, \quad \forall j = 1, \ldots, m \tag{9.45}$$

$$\psi_{\Sigma_j} = s_{j-1} \cdot \chi_{\Sigma_j} + \frac{\chi_{\Sigma_j}^{\ 2}}{2 \cdot H_j}, \quad \forall j = 1, \ldots, m \tag{9.46}$$

9.5.3 Θέσεις κορυφών και χαρακτηριστικών σημείων κατά τη μηκοτομή

Στα επόμενα εδάφια δίνονται οι σχέσεις υπολογισμού των συντεταγμένων κατά τη μηκοτομή των χαρακτηριστικών σημείων του άξονα της οδού τόσο της μηκοτομής, όσο και της οριζοντιογραφίας.

9.5.3.1 Σημεία αρχής και τέλους κατακόρυφης καμπύλης

Οι συντεταγμένες κατά τη μηκοτομή των σημείων αρχής και τέλους των κατακόρυφων καμπυλών προκύπτουν με βάση τις θέσεις των κορυφών της πολυγωνικής της μηκοτομής και τα υπολογισμένα γεωμετρικά στοιχεία της προηγούμενης υποενότητας ως εξής:

$$\mathbf{A}_j = \begin{bmatrix} h_{A_j} \\ z_{A_j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{V_j} \\ z_{V_j} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} T_{V_j} \\ s_{j-1} \cdot T_{V_j} \end{bmatrix}, \quad \forall j = 1, \ldots, m \tag{9.47}$$

$$\mathbf{B}_j = \begin{bmatrix} h_{B_j} \\ z_{B_j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{V_j} \\ z_{V_j} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_{V_j} \\ s_j \cdot T_{V_j} \end{bmatrix}, \quad \forall j = 1, \ldots, m \tag{9.48}$$

9.5.3.2 Μέσο κατακόρυφης καμπύλης

Το μέσο της κατακόρυφης καμπύλης έχει ίδια χιλιομετρική θέση με την αντίστοιχη κορυφή της μηκοτομής, ενώ το υψόμετρό του προκύπτει από την αφαίρεση του βέλους της κατακόρυφης καμπύλης από το αντίστοιχο υψόμετρο της κορυφής της πολυγωνικής.

$$\mathbf{U}_j = \begin{bmatrix} h_{U_j} \\ z_{U_j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{V_j} \\ z_{V_j} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ f_j \end{bmatrix}, \quad \forall j = 1, \ldots, m \tag{9.49}$$

9.5.3.3 Σημείο αλλαγής προσήμου κατακόρυφης καμπύλης

Έχοντας υπολογίσει τις τοπικές συντεταγμένες του σημείου αλλαγής προσήμου ως προς το σημείο αρχής της κατακόρυφης καμπύλης, η θέση του σημείου στη μηκοτομή υπολογίζεται με δύο απλές μεταθέσεις:

$$\mathbf{\Sigma}_j = \begin{bmatrix} h_{\Sigma_j} \\ z_{\Sigma_j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{A_j} \\ z_{A_j} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \chi_{\Sigma_j} \\ \psi_{\Sigma_j} \end{bmatrix}, \quad \forall j = 1, \ldots, m \tag{9.50}$$

9.5.3.4 Χιλιομετρικές θέσεις χαρακτηριστικών σημείων οριζοντιογραφίας

Οι χιλιομετρικές θέσεις των χαρακτηριστικών σημείων της οριζοντιογραφίας είναι απαραίτητο να υπολογιστούν καθώς με βάση αυτές καθορίζεται στη συνέχεια σε ποιο γεωμετρικό στοιχείο της χάραξης βρίσκεται κάθε σημείο πύκνωσης. Στον επόμενο πίνακα περιγράφονται οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στις σχέσεις υπολογισμού των χιλιομετρικών θέσεων των σημείων αυτών της οριζοντιογραφίας.

Πίνακας 9.32: Μεταβλητές χιλιομετρικών θέσεων χαρακτηριστικών σημείων οριζοντιογραφίας

Μεταβλητές	**Περιγραφή**
h_{Λ_i}	Χιλιομετρική θέση σημείου αρχής $\mathbf{\Lambda}_i$ τόξου συναρμογής εισόδου (m)
$h_{\Lambda'_i}$	Χιλιομετρική θέση σημείου $\mathbf{\Lambda}'_i$ τόξου συναρμογής εξόδου (m)
h_{Ω_i}	Χιλιομετρική θέση σημείου αρχής $\mathbf{\Omega}_i$ κυκλικού τόξου (m)
$h_{\Omega'_i}$	Χιλιομετρική θέση σημείου τέλους $\mathbf{\Omega}'_i$ κυκλικού τόξου (m)
h_{Ψ_i}	Χιλιομετρική θέση μέσου $\mathbf{\Psi}_i$ κυκλικού τόξου (m)
L_{T_i}	Μήκος ευθυγραμμίας κατά την οριζοντιογραφία (m)
L_{CS_i}	Μήκος οριζοντιογραφικής καμπύλης (m)
L_{S1_i}	Μήκος τόξου συναρμογής εισόδου (m)
L_{S2_i}	Μήκος τόξου συναρμογής εξόδου (m)

Οι σχέσεις υπολογισμού των χιλιομετρικών θέσεων των χαρακτηριστικών σημείων της οριζοντιογραφίας δηλαδή αυτών που αφορούν τα σημεία επαφής τόξων συναρμογής με ευθυγραμμίες και κυκλικά τόξα καθώς και το μέσο του κυκλικού τόξου παρατίθενται στη συνέχεια.

$$h_{\Lambda_i} = \sum_{i=1}^{i} \left(L_{T_{i-1}} + L_{CS_{i-1}} \right), \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{9.51}$$

$$h_{\Lambda_i'} = \sum_{i=1}^{i}\left(L_{T_{i-1}} + L_{CS_i}\right), \quad \forall i = 1,\ldots,n \tag{9.52}$$

$$h_{\Omega_i} = L_{S1_i} + \sum_{i=1}^{i}\left(L_{T_{i-1}} + L_{CS_{i-1}}\right), \quad \forall i = 1,\ldots,n \tag{9.53}$$

$$h_{\Omega_i'} = -L_{S2_i} + \sum_{i=1}^{i}\left(L_{T_{i-1}} + L_{CS_i}\right), \quad \forall i = 1,\ldots,n \tag{9.54}$$

$$h_{\Psi_i} = \left(h_{\Omega_i} + h_{\Omega_i'}\right)/2, \quad \forall i = 1,\ldots,n \tag{9.55}$$

9.6 Υπολογισμοί σημείων πύκνωσης

Όπως έχει αναφερθεί σημεία πύκνωσης ή δευτερεύοντα σημεία αποτελούν εκείνα τα οποία βρίσκονται μεταξύ των χαρακτηριστικών σημείων και ανήκουν σε ένα τόξο. Η ακρίβεια του υπολογισμού του όγκου χωματισμών εξαρτάται από την πυκνότητά τους, καθώς όσο περισσότερα τα σημεία πύκνωσης, τόσο πιο ακριβείς θα είναι οι εκτιμήσεις των ποσοτήτων χωματισμών.

9.6.1 Αριθμός σημείων πύκνωσης

Αν υποθέσουμε ότι κάθε σημείο πύκνωσης συμβολίζεται με $\mathbf{P}_k$, όπου $k = 0, \ldots, p+1$ και $\mathbf{P}_0 = \mathbf{S}$, $\mathbf{P}_{p+1} = \mathbf{E}$ αναπαριστούν τα σημεία αρχής και τέλους της χάραξης αντίστοιχα, τότε η απόσταση μεταξύ των σημείων πύκνωσης $\mathbf{P}_p$ και $\mathbf{P}_{p+1}$ μπορεί να είναι μικρότερη από την απόσταση που εισάγει ο χρήστης, καθώς το συνολικό μήκος της οριζοντιογραφικής χάραξης δεν είναι απαραίτητα πολλαπλάσιο της απόστασης αυτής. Επίσης, ο αριθμός των σημείων πύκνωσης δεν μένει σταθερός κατά την επίλυση, αλλά εξαρτάται από το συνολικό μήκος της χάραξης, το οποίο είναι διαφορετικό σε κάθε επίλυση. Συνεπώς, θεωρώντας ότι τα σημεία πύκνωσης κατανέμονται σε ίσα διαστήματα κατά μήκος της οριζοντιογραφικής χάραξης ο συνολικός αριθμός τους εκτός των σημείων αρχής και τέλους είναι:

$$p = \begin{cases} \left\lceil \dfrac{L_n}{L_P} \right\rceil^{-} - 1 & \text{, αν το υπόλοιπο του } L_n/L_P \text{ είναι 0 αλλιώς} \\ \left\lceil \dfrac{L_n}{L_P} \right\rceil^{-} \end{cases} \tag{9.56}$$

το $\lceil\,\rceil^{-}$ συμβολίζει την στρογγυλοποιημένη προς τα κάτω τιμή στον χαμηλότερο ακέραιο. Οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται περιγράφονται στον παρακάτω πίνακα

Πίνακας 9.33: Μεταβλητές υπολογισμού του αριθμού των σημείων πύκνωσης

Μεταβλητές	Περιγραφή
$\mathbf{P}_k$	Σημείο πύκνωσης
p	Αριθμός σημείων πύκνωσης
L_n	Συνολικό μήκος οριζοντιογραφικής χάραξης (m)
L_P	Απόσταση μεταξύ διαδοχικών σημείων πύκνωσης (m)

9.6.2 Χιλιομετρικές θέσεις σημείων πύκνωσης

Οι χιλιομετρικές θέσεις των σημείων πύκνωσης προκύπτουν εύκολα προσθέτοντας την καθορισμένη από το χρήστη απόσταση μεταξύ διαδοχικών σημείων πύκνωσης στην χιλιομετρική θέση του σημείου πύκνωσης που προηγείται. Δηλαδή, ισχύει:

$$h_{P_k} = h_{P_{k-1}} + L_P, \quad \forall k = 1, \ldots, p \tag{9.57}$$

$$h_{P_k} = 0 \text{, αν } k = 0 \tag{9.58}$$

$$h_{P_k} = L_n \text{, αν } k = p+1 \tag{9.59}$$

Οι μεταβλητές περιγράφονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 9.34: Μεταβλητές υπολογισμού του αριθμού των σημείων πύκνωσης

Μεταβλητές	Περιγραφή
h_{P_k}	Χιλιομετρική θέση σημείου πύκνωσης $\mathbf{P}_k$ (m)
L_P	Απόσταση μεταξύ διαδοχικών σημείων πύκνωσης (m)

9.6.3 Υψόμετρα ερυθράς οδού στα σημεία πύκνωσης

Οι σχέσεις για τον καθορισμό του υψομέτρου της οδού στα σημεία πύκνωσης εξαρτώνται από το αν αυτή βρίσκεται σε παραβολική καμπύλη ή σε εφαπτόμενο τμήμα της κατακόρυφης χάραξης. Το υψόμετρο της οδού στο σημείο πύκνωσης για τις δύο περιπτώσεις υπολογίζεται στα δύο επόμενα εδάφια.

9.6.3.1 Σημείο πύκνωσης σε εφαπτόμενο τμήμα

Αν το σημείο πύκνωσης βρίσκεται σε εφαπτόμενο τμήμα, τότε το υψόμετρο της οδού μπορεί να βρεθεί από απλές τριγωνομετρικές σχέσεις. Το υψόμετρο της οδού μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$z_{r_k} = z_{B_j} + s_j \cdot \left(h_{P_k} - h_{B_j}\right), \quad \forall k = 0, \ldots, p+1 \text{, αν } h_{B_j} \le h_{P_k} \le h_{A_{j+1}} \tag{9.60}$$

Σημειώνεται ότι το σημείο αρχής της χάραξης ταυτίζεται τόσο με την αρχική κορυφή της πολυγωνικής γραμμής όσο και με τα σημεία αρχής και τέλους της κατακόρυφης καμπύλης. Οι μεταβλητές της παραπάνω σχέσης περιγράφονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 9.35: Μεταβλητές υπολογισμού υψομέτρου οδού σε σημείο πύκνωσης εφαπτομένης

Μεταβλητές	Περιγραφή
z_{r_k}	Υψόμετρο ερυθράς οδού στο σημείο πύκνωσης $\mathbf{P}_k$ (m)
z_{B_j}	Υψόμετρο ερυθράς οδού στο τέλος $\mathbf{B}_j$ της κατακόρυφης καμπύλης (m)
s_j	Κατά μήκος κλίση εφαπτομένης στο τέλος της κατακόρυφης καμπύλης (m)
h_{P_k}	Χιλιομετρική θέση σημείου πύκνωσης $\mathbf{P}_k$ (m)
h_{B_j}	Χιλιομετρική θέση τέλους $\mathbf{B}_j$ της κατακόρυφης καμπύλης (m)
L_P	Απόσταση μεταξύ διαδοχικών σημείων πύκνωσης (m)

9.6.3.2 Σημείο πύκνωσης σε παραβολική καμπύλη

Αν υποθέσουμε ότι η στάση βρίσκεται επί παραβολικής καμπύλης, τότε η χιλιομετρική του θέση θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση από τη χιλιομετρική θέση αρχής της παραβολικής καμπύλης και μικρότερη ή ίση από την αντίστοιχη χιλιομετρική θέση του τέλους της. Χρησιμοποιώντας το τοπικό σύστημα συντεταγμένων υπολογίζονται οι τοπικές συντεταγμένες κάθε σημείου πύκνωσης ως εξής:

$$\chi_{P_k} = h_{P_k} - h_{A_j}, \quad \forall k = 0, \ldots, p+1, \text{ αν } h_{A_j} \le h_{P_k} \le h_{B_j} \tag{9.61}$$

$$\psi_{P_k} = s_{j-1} \cdot \chi_{P_k} + \frac{\chi_{P_k}^{\ 2}}{2 \cdot H_j}, \quad \forall k = 0, \ldots, p+1, \text{ αν } h_{A_j} \le h_{P_k} \le h_{B_j} \tag{9.62}$$

Το υψόμετρο της οδού στο σύστημα συντεταγμένων της μηκοτομής σε ένα σημείο πύκνωσης προκύπτει από την πρόσθεση της τοπικής τεταγμένης του σημείου πύκνωσης και του υψομέτρου της αρχής της παραβολικής καμπύλης:

$$z_{r_k} = z_{A_j} + \psi_{P_k}, \quad \forall k = 0, \ldots, p+1, \text{ αν } h_{A_j} \le h_{P_k} \le h_{B_j} \tag{9.63}$$

Πίνακας 9.36: Μεταβλητές υπολογισμού υψομέτρου οδού σε σημείο πύκνωσης παραβολής

Μεταβλητές	Περιγραφή
χ_{P_k}	Σχετική τετμημένη του $\mathbf{P}_k$ στο τοπικό σύστημα της κατακόρυφης καμπύλης (m)
ψ_{P_k}	Σχετική τεταγμένη του $\mathbf{P}_k$ στο τοπικό σύστημα της κατακόρυφης καμπύλης (m)
h_{P_k}	Χιλιομετρική θέση σημείου πύκνωσης $\mathbf{P}_k$ (m)
h_{A_j}	Χιλιομετρική θέση αρχής $\mathbf{A}_j$ της κατακόρυφης καμπύλης (m)
s_j	Κατά μήκος κλίση εφαπτομένης στο τέλος της κατακόρυφης καμπύλης (m)
H_j	Παράμετρος τετραγωνικής παραβολικής καμπύλης (m)
z_{r_k}	Υψόμετρο ερυθράς οδού στο σημείο πύκνωσης $\mathbf{P}_k$ (m)
z_{A_j}	Υψόμετρο ερυθράς οδού στην αρχή $\mathbf{A}_j$ της κατακόρυφης καμπύλης (m)
s_j	Κατά μήκος κλίση εφαπτομένης στο τέλος της κατακόρυφης καμπύλης (m)

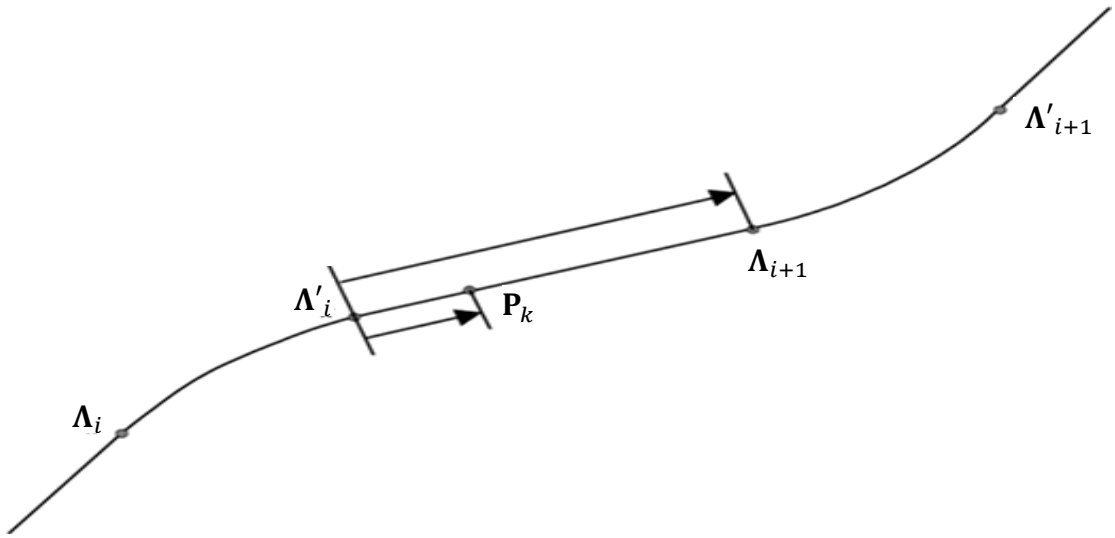
9.6.4 Συντεταγμένες σημείων πύκνωσης κατά την οριζοντιογραφία

Έχοντας υπολογίσει το υψόμετρο της ερυθράς της οδού απαραίτητο στοιχείο για τον υπολογισμό των όγκων εκχωμάτων αποτελεί η εύρεση των υψομέτρων του εδάφους στις θέσεις αυτές. Ο υπολογισμός των οριζοντιογραφικών συντεταγμένων των σημείων πύκνωσης είναι απαραίτητος προκειμένου στη συνέχεια να αντληθεί το υψόμετρο του εδάφους από το διαθέσιμο ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Οι σχέσεις για τον υπολογισμό των συντεταγμένων κατά την οριζοντιογραφία ενός σημείου πύκνωσης, εξαρτώνται από το αν αυτό βρίσκεται σε κυκλικό τόξο, ευθυγραμμία ή τόξο συναρμογής της οριζοντιογραφικής χάραξης. Στα επόμενα εδάφια δίνεται ο καθορισμός των συνταγμένων κατά την οριζοντιογραφία των σημείων πύκνωσης για τις περιπτώσεις αυτές. Όπως έχει αναφερθεί, για κάθε οριζοντιογραφική καμπύλη ορίζονται δύο τοπικά συστήματα αναφοράς για τον υπολογισμό των σχετικών θέσεων των σημείων πύκνωσης των κλωθοειδών εισόδου και εξόδου.

9.6.4.1 Σημείο πύκνωσης σε ευθυγραμμία

Ο καθορισμός των οριζοντιογραφικών συνταγμένων ενός σημείου πύκνωσης είναι σχετικά εύκολος αν αυτό βρίσκεται σε ευθυγραμμία. Συγκεκριμένα, ένα σημείο πύκνωσης βρίσκεται σε ευθυγραμμία αν η χιλιομετρική του θέση είναι μεγαλύτερη από το σημείο τέλους μιας οριζοντιογραφικής καμπύλης και μικρότερη από τη χιλιομετρική θέση του σημείου αρχής της επόμενης διαδοχικής καμπύλης, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

Σχήμα 9.8: Σημείο πύκνωσης σε ευθυγραμμία της οριζοντιογραφικής χάραξης



Η σχέση που ισχύει για τον υπολογισμό των οριζοντιογραφικών συντεταγμένων των σημείων πύκνωσης που ανήκουν σε ευθυγραμμίες είναι:

$$\begin{bmatrix} x_{P_k} \\ y_{P_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{\Lambda'_i} \\ y_{\Lambda'_i} \end{bmatrix} + \frac{h_{P_k} - h_{\Lambda'_i}}{L_{T_i}} \cdot \begin{bmatrix} x_{\Lambda_{i+1}} - x_{\Lambda'_i} \\ y_{\Lambda_{i+1}} - y_{\Lambda'_i} \end{bmatrix}, \quad \forall k = 0, \ldots, p+1, \text{ αν } h_{\Lambda'_i} \le h_{P_k} \le h_{\Lambda_{i+1}} \tag{9.64}$$

Οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στη σχέση αυτή περιγράφονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 9.37: Μεταβλητές υπολογισμού συντεταγμένων σημείων πύκνωσης σε ευθυγραμμίες

Μεταβλητές	Περιγραφή
x_{P_k}	Τετμημένη σημείου πύκνωσης $\mathbf{P}_k$ κατά την οριζοντιογραφία (m)
y_{P_k}	Τεταγμένη σημείου πύκνωσης $\mathbf{P}_k$ κατά την οριζοντιογραφία (m)
$\mathbf{\Lambda}_i\left(x_{\Lambda_i}, y_{\Lambda_i}\right)$	Σημείο επαφής ευθυγραμμίας με τόξο συναρμογής εισόδου (m, m)
$\mathbf{\Lambda}'_i\left(x_{\Lambda'_i}, y_{\Lambda'_i}\right)$	Σημείο επαφής τόξου συναρμογής εξόδου με ευθυγραμμία (m, m)
h_{P_k}	Χιλιομετρική θέση σημείου πύκνωσης $\mathbf{P}_k$ (m)
$h_{\Lambda'_i}$	Χιλιομετρική θέση σημείου τέλους $\mathbf{\Lambda}'_i$ τόξου συναρμογής εξόδου (m)
L_{T_i}	Μήκος ευθυγραμμίας κατά την οριζοντιογραφία (m)

9.6.4.2 Σημείο πύκνωσης σε τόξο συναρμογής

Για την κλωθοειδή εισόδου, θεωρώντας ως αρχή το σημείο επαφής ευθυγραμμίας και κλωθοειδούς εισόδου $\mathbf{\Lambda}_i(0,0)$ ορίζεται τοπικό σύστημα συντεταγμένων με άξονα X παράλληλο στην εφαπτομένη

από αρχής της κλωθοειδούς εισόδου. Τότε οι τοπικές ή σχετικές συντεταγμένες κάθε σημείου πύκνωσης του τόξου συναρμογής εισόδου γίνονται οι παρακάτω υπολογισμοί.

Για κάθε $k = 0, \ldots, p+1$ αν $h_{\Lambda_i} \le h_{P_k} \le h_{\Omega_i}$, τότε

1. Υπολογίζεται το μήκος του τόξου συναρμογής έως το σημείο πύκνωσης

$$\Delta h_{\Lambda_i P_k} = h_{P_k} - h_{\Lambda_i} \tag{9.65}$$

2. Υπολογίζονται οι σχετικές συντεταγμένες του σημείου πύκνωσης

$$X_{P_k} = a_0 \Delta h_{\Lambda_i P_k} + a_1 \frac{\Delta h_{\Lambda_i P_k}{}^5}{A_{1_i}{}^4} + a_2 \frac{\Delta h_{\Lambda_i P_k}{}^9}{A_{1_i}{}^8} + a_3 \frac{\Delta h_{\Lambda_i P_k}{}^{13}}{A_{1_i}{}^{12}} + a_4 \frac{\Delta h_{\Lambda_i P_k}{}^{17}}{A_{1_i}{}^{16}} + a_5 \frac{\Delta h_{\Lambda_i P_k}{}^{21}}{A_{1_i}{}^{20}} \tag{9.66}$$

$$Y_{P_k} = \beta_0 \frac{\Delta h_{\Lambda_i P_k}{}^3}{A_{1_i}{}^2} + \beta_1 \frac{\Delta h_{\Lambda_i P_k}{}^7}{A_{1_i}{}^6} + \beta_2 \frac{\Delta h_{\Lambda_i P_k}{}^{11}}{A_{1_i}{}^{10}} + \beta_3 \frac{\Delta h_{\Lambda_i P_k}{}^{15}}{A_{1_i}{}^{14}} + \beta_4 \frac{\Delta h_{\Lambda_i P_k}{}^{19}}{A_{1_i}{}^{18}} \tag{9.67}$$

3. Γίνεται μετατροπή σε πολικές συντεταγμένες

$$d = \sqrt{X_{P_k}{}^2 + Y_{P_k}{}^2} \tag{9.68}$$

$$\sigma = \tan^{-1} \frac{Y_{P_k}}{X_{P_k}} \tag{9.69}$$

4. Υπολογίζονται οι οριζοντιογραφικές συντεταγμένες

$$\begin{bmatrix} x_{P_k} \\ y_{P_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{\Lambda_i} \\ y_{\Lambda_i} \end{bmatrix} + d \cdot \begin{bmatrix} \sin a_{\Lambda_i P_k} \\ \cos a_{\Lambda_i P_k} \end{bmatrix} \tag{9.70}$$

Για την κλωθοειδή εξόδου, θεωρώντας ως αρχή το σημείο $\boldsymbol{\Lambda'}_i(0,0)$ ορίζεται τοπικό σύστημα συντεταγμένων με τον άξονα X παράλληλο στην εφαπτομένη από αρχής της κλωθοειδούς εξόδου. Τότε οι τοπικές ή σχετικές συντεταγμένες κάθε σημείου πύκνωσης του τόξου συναρμογής εξόδου δίνονται ως εξής:

Για κάθε $k = 0, \ldots, p+1$ αν $h_{\Omega'_i} \le h_{P_k} \le h_{\Lambda'_i}$, τότε

1. Υπολογίζεται το μήκος του τόξου συναρμογής έως το σημείο πύκνωσης

$$\Delta h_{P_k \Lambda'_i} = h_{\Lambda'_i} - h_{P_k} \tag{9.71}$$

2. Υπολογίζονται οι σχετικές συντεταγμένες του σημείου πύκνωσης

$$X_{P_k} = a_0 \Delta h_{P_k \Lambda'_i} + a_1 \frac{\Delta h_{P_k \Lambda'_i}{}^5}{A_{2_i}{}^4} + a_2 \frac{\Delta h_{P_k \Lambda'_i}{}^9}{A_{2_i}{}^8} + a_3 \frac{\Delta h_{P_k \Lambda'_i}{}^{13}}{A_{2_i}{}^{12}} + a_4 \frac{\Delta h_{P_k \Lambda'_i}{}^{17}}{A_{2_i}{}^{16}} + a_5 \frac{\Delta h_{P_k \Lambda'_i}{}^{21}}{A_{2_i}{}^{20}} \tag{9.72}$$

$$Y_{P_k} = \beta_0 \frac{\Delta h_{P_k \Lambda'_i}{}^3}{A_{2_i}{}^2} + \beta_1 \frac{\Delta h_{P_k \Lambda'_i}{}^7}{A_{2_i}{}^6} + \beta_2 \frac{\Delta h_{P_k \Lambda'_i}{}^{11}}{A_{2_i}{}^{10}} + \beta_3 \frac{\Delta h_{P_k \Lambda'_i}{}^{15}}{A_{2_i}{}^{14}} + \beta_4 \frac{\Delta h_{P_k \Lambda'_i}{}^{19}}{A_{2_i}{}^{18}} \tag{9.73}$$

3. Γίνεται μετατροπή σε πολικές συντεταγμένες

$$d = \sqrt{X_{P_k}{}^2 + Y_{P_k}{}^2} \tag{9.74}$$

$$\sigma = \tan^{-1} \frac{Y_{P_k}}{X_{P_k}} \tag{9.75}$$

4. Υπολογίζονται οι οριζοντιογραφικές συντεταγμένες

$$\begin{bmatrix} x_{P_k} \\ y_{P_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{\Lambda'_i} \\ y_{\Lambda'_i} \end{bmatrix} + d \cdot \begin{bmatrix} \sin a_{\Lambda'_i P_k} \\ \cos a_{\Lambda'_i P_k} \end{bmatrix} \tag{9.76}$$

Σημειώνεται ότι η γωνία διεύθυνσης της παραπάνω σχέσης υπολογίζεται από το τρίτο θεμελιώδες γεωδαιτικό πρόβλημα με βάση την πολική γωνιά. Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στις παραπάνω σχέσεις δίνονται στον Πίνακα 9.12 ενώ οι μεταβλητές των σχέσεων περιγράφονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 9.38: Μεταβλητές υπολογισμού συντεταγμένων σημείων πύκνωσης σε τόξα συναρμογής

Μεταβλητές	**Περιγραφή**
h_{P_k}	Χιλιομετρική θέση σημείου πύκνωσης $\mathbf{P}_k$ (m)
h_{Λ_i}	Χιλιομετρική θέση σημείου αρχής $\mathbf{\Lambda}_i$ τόξου συναρμογής εισόδου (m)
$h_{\Lambda'_i}$	Χιλιομετρική θέση σημείου τέλους $\mathbf{\Lambda}'_i$ τόξου συναρμογής εξόδου (m)
$\Delta h_{\Lambda_i P_k}$	Χιλιομετρική απόσταση σημείου πύκνωσης $\mathbf{P}_k$ από σημείο $\mathbf{\Lambda}_i$ (m)
$\Delta h_{P_k \Lambda'_i}$	Χιλιομετρική απόσταση σημείου πύκνωσης $\mathbf{P}_k$ από σημείο $\mathbf{\Lambda}'_i$ (m)
X_{P_k}	Σχετική τετμημένη σημείου πύκνωσης $\mathbf{P}_k$ ως προς $\mathbf{\Lambda}_i$ ή $\mathbf{\Lambda}'_i$ (m)
Y_P	Σχετική τεταγμένη σημείου πύκνωσης $\mathbf{P}_k$ ως προς $\mathbf{\Lambda}_i$ ή $\mathbf{\Lambda}'_i$ (m)
A_{1_i}	Παράμετρος κλωθοειδούς εισόδου (m)
A_{2_i}	Παράμετρος κλωθοειδούς εξόδου (m)
d	Ακτινική συντεταγμένη (m)
σ	Γωνιακή συντεταγμένη (rad)
x_{P_k}	Τετμημένη σημείου πύκνωσης $\mathbf{P}_k$ κατά την οριζοντιογραφία (m)
y_{P_k}	Τεταγμένη σημείου πύκνωσης $\mathbf{P}_k$ κατά την οριζοντιογραφία (m)
$\mathbf{\Lambda}_i\left(x_{\Lambda_i}, y_{\Lambda_i}\right)$	Σημείο επαφής ευθυγραμμίας με τόξο συναρμογής εισόδου (m, m)
$\mathbf{\Lambda}'_i\left(x_{\Lambda'_i}, y_{\Lambda'_i}\right)$	Σημείο επαφής τόξου συναρμογής εξόδου με ευθυγραμμία (m, m)

9.6.4.3 Σημείο πύκνωσης σε κυκλικό τόξο

Ένα σημείο πύκνωσης ανήκει σε κυκλικό τόξο αν η χιλιομετρική θέση του είναι μεγαλύτερη από τη χιλιομετρική θέση της αρχής του κυκλικού τόξου και μικρότερη από τη χιλιομετρική θέση του τέλους του κυκλικού τόξου. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους μπορούν να υπολογιστούν οι

οριζοντιογραφική θέση ενός σημείου πύκνωσης ενός κυκλικού τόξου. Η σχέση υπολογισμού με βάση το πρώτο θεμελιώδες γεωδαιτικό πρόβλημα ως προς το κέντρο καμπυλότητας του κυκλικού τόξου:

$$\begin{bmatrix} x_{P_k} \\ y_{P_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{\mathrm{M}_i} \\ y_{\mathrm{M}_i} \end{bmatrix} + R_i \cdot \begin{bmatrix} \sin a_{\mathrm{M}_i P_k} \\ \cos a_{\mathrm{M}_i P_k} \end{bmatrix}, \quad \forall k = 0,\ldots,p+1, \text{ αν } h_{\Omega_i} \le h_{P_k} \le h_{\Omega_i'} \tag{9.77}$$

Οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στη σχέση αυτή περιγράφονται στον επόμενο πίνακα.

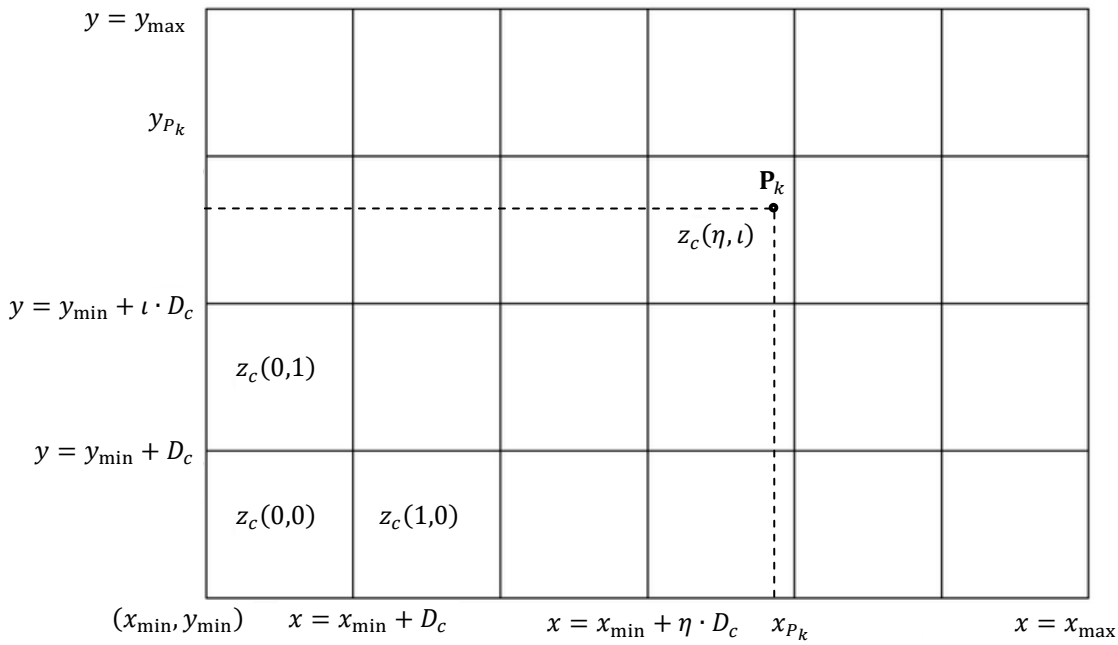
Πίνακας 9.39: Μεταβλητές υπολογισμού συντεταγμένων σημείων πύκνωσης σε κυκλικό τόξο

Μεταβλητές	Περιγραφή
x_{P_k}	Τετμημένη σημείου πύκνωσης $\mathbf{P}_k$ κατά την οριζοντιογραφία (m)
y_{P_k}	Τεταγμένη σημείου πύκνωσης $\mathbf{P}_k$ κατά την οριζοντιογραφία (m)
$\mathbf{M}_i\left(x_{\mathrm{M}_i}, y_{\mathrm{M}_i}\right)$	Κέντρο κύκλου καμπυλότητας οριζοντιογραφικής καμπύλης (m, m)
R_i	Ακτίνα κυκλικού τόξου (m)
$a_{\mathrm{M}_i P_k}$	Γωνία διεύθυνσης από το σημείο $\mathbf{M}_i$ προς το σημείο πύκνωσης $\mathbf{P}_k$ (rad)
h_{Ω_i}	Χιλιομετρική θέση σημείου αρχής κυκλικού τόξου (m)
$h_{\Omega_i'}$	Χιλιομετρική θέση σημείου τέλους κυκλικού τόξου (m)
h_{P_k}	Χιλιομετρική θέση σημείου πύκνωσης (m)

9.6.5 Εύρεση υψομέτρου εδάφους στο σημείο πύκνωσης

Με τις σχέσεις της προηγούμενης υποενότητας, υπολογίζονται οι οριζοντιογραφικές συντεταγμένες οποιουδήποτε σημείου πύκνωσης. Στη συνέχεια με δεδομένες αυτές, το υψόμετρο του εδάφους λαμβάνεται από το υψόμετρο του φατνίου εντός του οποίου βρίσκεται το σημείο πύκνωσης όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

Σχήμα 9.9: Εύρεση υψομέτρου σε σημείο πύκνωσης με βάση το ψηφιακό μοντέλο εδάφους



Το υψόμετρο του εδάφους σε κάθε σημείο πύκνωσης προκύπτει από τη σχέση:

$$z_{g_k} = z_c(\eta, \iota), \quad \forall k = 0, \ldots, p+1 \tag{9.78}$$

Οι δείκτες του φατνίου καθορίζονται με βάση τις σχέσεις:

$$\eta = \left\lceil \frac{x_{P_k} - x_{\min}}{D_c} \right\rceil^{-}, \quad \forall k = 0, \ldots, p+1 \tag{9.79}$$

$$\iota = \left\lceil \frac{y_{P_k} - y_{\min}}{D_c} \right\rceil^{-}, \quad \forall k = 0, \ldots, p+1 \tag{9.80}$$

όπου $\lceil\ \rceil^{-}$ συμβολίζει την στρογγυλοποιημένη προς τα κάτω τιμή στον χαμηλότερο ακέραιο.

Οι μεταβλητές των παραπάνω σχέσεων περιγράφονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 9.40: Μεταβλητές για την εύρεση του υψομέτρου εδάφους σε σημείο πύκνωσης

Μεταβλητές	**Περιγραφή**
z_{g_k}	Υψόμετρο εδάφους στο σημείο πύκνωσης $\mathbf{P}_k$ (m)
$z_c(\eta, \iota)$	Υψόμετρο εδάφους φατνίου με δείκτες η και ι (m)
D_c	Μήκος τετραγωνικού φατνίου (m)
x_{P_k}	Τετμημένη σημείου πύκνωσης $\mathbf{P}_k$ κατά την οριζοντιογραφία (m)
y_{P_k}	Τεταγμένη σημείου πύκνωσης $\mathbf{P}_k$ κατά την οριζοντιογραφία (m)
$x_{\max}$	Μέγιστη τιμή τετμημένης περιοχής μελέτης (m)
$y_{\max}$	Μέγιστη τιμή τεταγμένης περιοχής μελέτης (m)
$x_{\min}$	Ελάχιστη τιμή τετμημένης περιοχής μελέτης (m)
$y_{\min}$	Ελάχιστη τιμή τεταγμένης περιοχής μελέτης (m)

9.7 Υπολογισμοί χωματισμών

Στα περισσότερα πρότυπα βελτιστοποίησης της οριζοντιογραφικής χάραξης, τα χωματουργικά κόστη εντάσσονται στα κόστη εξαρτώμενα από τη θέση, λόγω της έλλειψης πληροφορίας σε σχέση με τη μηκοτομή. Για τη βελτιστοποίηση τρισδιάστατων χαράξεων, όμως, τα χωματουργικά κόστη μπορούν να υπολογιστούν άμεσα. Η ακρίβεια του υπολογισμού του όγκου χωματισμών εξαρτάται από την πυκνότητα των στάσεων, καθώς όσο περισσότερες οι στάσεις, τόσο πιο ακριβείς θα είναι οι εκτιμήσεις των ποσοτήτων χωματισμών. Τα υψόμετρα της οδού και του εδάφους σε κάθε σημείο πύκνωσης είναι γνωστά από τους υπολογισμούς της προηγούμενης ενότητας. Η μέθοδος που υιοθετείται σε αυτήν την εργασία για τον υπολογισμό του όγκου των χωματισμών είναι η μέθοδος μέσων επιφανειών η οποία έχει ευρεία εφαρμογή. Οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή των σχέσεων αυτή της ενότητας περιγράφονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 9.41: Μεταβλητές υπολογισμού όγκου εκσκαφών

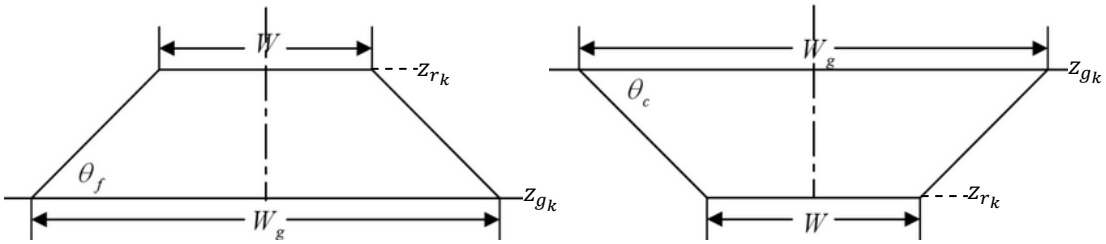
Μεταβλητές	Περιγραφή
z_{g_k}	Υψόμετρο εδάφους στο σημείο πύκνωσης $\mathbf{P}_k$ (m)
z_{r_k}	Υψόμετρο ερυθράς οδού στο σημείο πύκνωσης $\mathbf{P}_k$ (m)
W	Πλάτος καταστρώματος οδού (m)
W_{g_k}	Κατασκευαστικό πλάτος της διατομής στο σημείο πύκνωσης $\mathbf{P}_k$ (m)
θ_f	Γωνία κλίσης πρανούς επιχώματος (rad)
θ_c	Γωνία κλίσης πρανούς εκσκαφής (rad)
e_f	Κλίση πρανούς επιχώματος (m: m)
e_c	Κλίση πρανούς εκσκαφής (m: m)
A_k	Εμβαδόν διατομής χωματισμών στο σημείο πύκνωσης $\mathbf{P}_k$ (m^2)
E_{c_k}	Όγκος εκσκαφών στο τμήμα μεταξύ των σημείων πύκνωσης $\mathbf{P}_k$ και $\mathbf{P}_{k+1}$ (m^3)
E_{f_k}	Όγκος επιχωμάτων στο τμήμα μεταξύ των σημείων πύκνωσης $\mathbf{P}_k$ και $\mathbf{P}_{k+1}$ (m^3)
E_C	Συνολικός όγκος εκσκαφών οδού (m^3)
E_F	Συνολικός όγκος επιχωμάτων οδού (m^3)

9.7.1 Εμβαδόν εκσκαφών και επιχωμάτων

Για τον υπολογισμό των χωματισμών ενός οδικού έργου, καθορίζεται το εμβαδόν εκσκαφών και επιχωμάτων στις διατομές σε ορισμένες στάσεις κατά μήκος της οριζοντιογραφικής χάραξης. Με αυτόν τον τρόπο, υπολογίζεται ο όγκος χωματισμών μεταξύ δύο διαδοχικών στάσεων. Αθροίζοντας τις ποσότητες όλων των ζευγαριών διαδοχικών στάσεων, δίνονται εκτιμήσεις των συνολικών ποσοτήτων εκσκαφών και επιχωμάτων της προτεινόμενης χάραξης.

Σημειώνεται ότι στην παρούσα εργασία ο υπολογισμός των χωματισμών γίνεται με ένα αρκετά απλοποιημένο τρόπο καθώς ο υπολογισμός των διατομών γίνεται με βάση μόνο την υψομετρική διαφορά ενός σημείου πύκνωσης και τις γωνίες κλίσεις των πρανών. Ο ακριβής προσδιορισμός των διατομών με λήψη χαρακτηριστικών σημείων θα γίνει σε επόμενη εργασία. Συνεπώς, οι διατομές της οδού σε κάθε σημείο πύκνωσης, μπορεί να περιλαμβάνουν εκσκαφή, επίχωμα, ή τίποτα από τα δύο, ανάλογα με την υψομετρική διαφορά εδάφους και οδού. Το επόμενο σχήμα δείχνει μια τυπική διατομή επιχώματος και εκσκαφής.

Σχήμα 9.10: Διατομές επιχώματος και εκσκαφής
(Πηγή: Jha, Schonfeld, Jong, & Kim, 2006, Ιδία επεξεργασία)



9.7.1.1 Γωνίες κλίσης πρανών

Οι γωνίες κλίσης των πρανών επιχωμάτων και εκσκαφών υπολογίζονται με βάση την κλίση που εισάγει ο χρήστης ως εξής:

$$\theta_f = \tan^{-1} e_f \tag{9.81}$$

$$\theta_c = \tan^{-1} e_c \tag{9.82}$$

9.7.1.2 Κατασκευαστικό πλάτος

Το κατασκευαστικό πλάτος μπορεί να υπολογιστεί από τις επόμενες σχέσεις για εκσκαφή και επίχωμα:

$$W_{g_k} = W + 2 \cdot \left(z_{r_k} - z_{g_k}\right) \cdot \cot\theta_c, \quad \forall k = 0, \ldots, p+1 \text{ , αν } z_{g_k} > z_{r_k} \text{ (εκσκαφή)} \tag{9.83}$$

$$W_{g_k} = W + 2 \cdot \left(z_{r_k} - z_{g_k}\right) \cdot \cot\theta_f, \quad \forall k = 0, \ldots, p+1 \text{ , αν } z_{r_k} > z_{g_k} \text{ (επίχωμα)} \tag{9.84}$$

9.7.1.3 Εμβαδόν διατομής

Το εμβαδόν της διατομής χωματισμών δίνεται από τη σχέση:

$$A_k = \frac{1}{2} \cdot \left(W + W_{g_k}\right) \cdot \left|z_{g_k} - z_{r_k}\right|, \quad \forall k = 0, \ldots, p+1$$

Αντικαθιστώντας στην προηγούμενη σχέση προκύπτει:

$$A_k = \left[W + \left(z_{g_k} - z_{r_k}\right) \cdot \cot\theta_c\right] \cdot \left(z_{g_k} - z_{r_k}\right), \quad \forall k = 0, \ldots, p+1, \text{ αν } z_{g_k} > z_{r_k} \text{ (εκσκαφή)} \tag{9.85}$$

$$A_k = \left[W + \left(z_{r_k} - z_{g_k}\right) \cdot \cot\theta_f\right] \cdot \left(z_{r_k} - z_{g_k}\right), \quad \forall k = 0, \ldots p+1, \text{ αν } z_{r_k} > z_{g_k} \text{ (επίχωμα)} \tag{9.86}$$

9.7.2 Όγκοι χωματισμών

Αν υποθέσουμε ότι η μηκοτομή του εδάφους είναι γραμμική μεταξύ δύο διαδοχικών στάσεων, τότε ο όγκος χωματουργικών μπορεί να υπολογιστεί με βάση τις τέσσερις περιπτώσεις των παρακάτω εδαφίων με σχέσεις ομοιότητας τριγώνων.

9.7.2.1 Μόνο εκσκαφή

Στην περίπτωση αυτή το υψόμετρο εδάφους στα δύο διαδοχικά σημεία πύκνωσης είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο υψόμετρο της ερυθράς της οδού. Ισχύει:

Για κάθε $k = 0, \ldots, p$, αν $z_{g_k} \geq z_{r_k}$ και $z_{g_{k+1}} \geq z_{r_{k+1}}$, τότε

$$E_{c_k} = \frac{1}{2} \cdot \left(A_k + A_{k+1}\right) \cdot \left(h_{P_{k+1}} - h_{P_k}\right) \tag{9.87}$$

$$E_{f_k} = 0 \tag{9.88}$$

9.7.2.2 Μόνο επίχωμα

Στην περίπτωση αυτή το υψόμετρο εδάφους στα δύο διαδοχικά σημεία πύκνωσης είναι μικρότερο από το αντίστοιχο υψόμετρο της ερυθράς της οδού. Ισχύει:

Για κάθε $k = 0,\ldots,p$, αν $z_{g_k} \leq z_{r_k}$ και $z_{g_{k+1}} \leq z_{r_{k+1}}$, τότε

$$E_{c_k} = 0 \tag{9.89}$$

$$E_{f_k} = \frac{1}{2} \cdot \left(A_k + A_{k+1}\right) \cdot \left(h_{P_{k+1}} - h_{P_k}\right) \tag{9.90}$$

9.7.2.3 Εκσκαφή και στη συνέχεια επίχωμα

Στην περίπτωση αυτή το υψόμετρο εδάφους στο πρώτο σημείο πύκνωσης είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο υψόμετρο της ερυθράς της οδού, ενώ στο δεύτερο ισχύει το αντίθετο. Προκύπτει:

Για κάθε $k = 0,\ldots,p$, αν $z_{g_k} > z_{r_k}$ και $z_{g_{k+1}} < z_{r_{k+1}}$, τότε

$$E_{c_k} = \frac{1}{2} \cdot \frac{z_{g_k} - z_{r_k}}{z_{g_k} - z_{r_k} + z_{r_{k+1}} - z_{g_{k+1}}} A_k \cdot \left(h_{P_{k+1}} - h_{P_k}\right) \tag{9.91}$$

$$E_{f_k} = \frac{1}{2} \cdot \frac{z_{r_{k+1}} - z_{g_{k+1}}}{z_{g_k} - z_{r_k} + z_{r_{k+1}} - z_{g_{k+1}}} \cdot A_{k+1} \cdot \left(h_{P_{k+1}} - h_{P_k}\right) \tag{9.92}$$

9.7.2.4 Επίχωμα και στη συνέχεια εκσκαφή

Στην περίπτωση αυτή το υψόμετρο εδάφους στο πρώτο σημείο πύκνωσης είναι μικρότερο από το αντίστοιχο υψόμετρο της ερυθράς της οδού, ενώ στο δεύτερο ισχύει το αντίθετο. Προκύπτει:

Για κάθε $k = 0,\ldots,p$, αν $z_{g_k} < z_{r_k}$ και $z_{g_{k+1}} > z_{r_{k+1}}$, τότε

$$E_{c_k} = \frac{1}{2} \cdot \frac{z_{r_k} - z_{g_k}}{z_{r_k} - z_{g_k} + z_{g_{k+1}} - z_{r_{k+1}}} \cdot A_k \cdot \left(h_{P_{k+1}} - h_{P_k}\right) \tag{9.93}$$

$$E_{f_k} = \frac{1}{2} \cdot \frac{z_{g_{k+1}} - z_{r_{k+1}}}{z_{r_k} - z_{g_k} + z_{g_{k+1}} - z_{r_{k+1}}} \cdot A_{k+1} \cdot \left(h_{P_{k+1}} - h_{P_k}\right) \tag{9.94}$$

9.7.2.5 Συνολικοί όγκοι χωματισμών

Οι συνολικές ποσότητες εκσκαφών και επιχωμάτων αποτελούν το άθροισμα των επί μέρους τμημάτων:

$$E_C = \sum_{k=0}^{p} E_{c_k} \tag{9.95}$$

$$E_F = \sum_{k=0}^{p} E_{f_k} \tag{9.96}$$

9.8 Συνάρτηση στόχου

Με την εισαγωγή του μοναδιαίου κόστους επιχωμάτων και εκσκαφών διαμορφώνεται τελικώς η συνάρτηση στόχου που χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση της χάραξης της παρούσας εργασίας. Η συνάρτηση αφορά το κόστος του όγκου εκσκαφών και επιχωμάτων και εκφράζεται ως εξής:

$$\text{Minimize } C = K_F \cdot E_F + K_C \cdot E_C + C_{pen} \tag{9.97}$$

Πίνακας 9.42: Μεταβλητές υπολογισμού όγκου εκσκαφών

Μεταβλητές	**Περιγραφή**
C	Τιμή συνάρτησης στόχου (€)
K_F	Τιμή μονάδας όγκου επιχωμάτων (€/m^3)
K_C	Τιμή μονάδας όγκου εκσκαφών (€/m^3)
E_F	Συνολικός όγκος επιχωμάτων οδού (m^3)
E_C	Συνολικός όγκος εκσκαφών οδού (m^3)
C_{pen}	Κόστος ποινών παραβίασης περιορισμών (€)

Το κόστος παραβίασης ποινών περιγράφεται στο ενδέκατο κεφάλαιο.

10 Περιορισμοί

Υπάρχει μεγάλος αριθμός περιορισμών και λειτουργικών απαιτήσεων που πρέπει να ακολουθούνται κατά το σχεδιασμό οδών. Αυτοί οι περιορισμοί έχουν αναπτυχθεί με την πάροδο του χρόνου και αντλούνται από την έρευνα και τις οδηγίες γεωμετρικού σχεδιασμού οδών που χρησιμοποιούνται παγκοσμίως. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι μαθηματικές σχέσεις συγκεκριμένων περιορισμών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην εφαρμογή RoadEvolver. Οι περιορισμοί έχουν χωριστεί σε κατηγορίες ανάλογα με το αν αφορούν στοιχεία της οριζοντιογραφίας, της μηκοτομής ή του συνδυασμού τους.

10.1 Οριζοντιογραφική χάραξη

Στην ενότητα αυτή αναφέρονται οι βασικοί περιορισμοί που αναφέρονται στα στοιχεία μελέτης κατά την οριζοντιογραφία. Επίσης, παρατίθενται οι βασικοί υπολογισμοί που για τις οριακές τιμές των μεγεθών που σχετίζονται με την οριζοντιογραφία της χάραξης.

10.1.1 Κύρια πολυγωνική γραμμή

Οι κορυφές της κύριας πολυγωνικής μιας χάραξης απαιτούν δύο μεταβλητές, δηλαδή τις συνταγμένες για τον εντοπισμό της θέσης τους. Εφ' όσον δεν υπάρχει κάποιο στοιχείο για τη θέση των κορυφών, αυτές μπορεί να βρίσκονται οπουδήποτε εντός της περιοχής μελέτης.

10.1.1.1 Περιορισμοί διαστήματος αναζήτησης θέσεων κορυφών οριζοντιογραφίας

Γενικά, Οι συντεταγμένες των κορυφών της πολυγωνικής περιορίζονται από τιμές που εισάγει ο χρήστης ώστε το διάστημα αναζήτησης να περιλαμβάνει την περιοχή μελέτης. Ο περιορισμός αυτός του διαστήματος αναζήτησης των θέσεων των κορυφών της πολυγωνικής γίνεται ώστε να επιτευχθεί ελαχιστοποίηση του χρόνου επίλυσης. Κατά συνέπεια, διαμορφώνονται οι παρακάτω περιορισμοί:

$$x_{\min} \le x_{K_i} \le x_{\max}, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{10.1}$$

$$y_{\min} \le y_{K_i} \le y_{\max}, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{10.2}$$

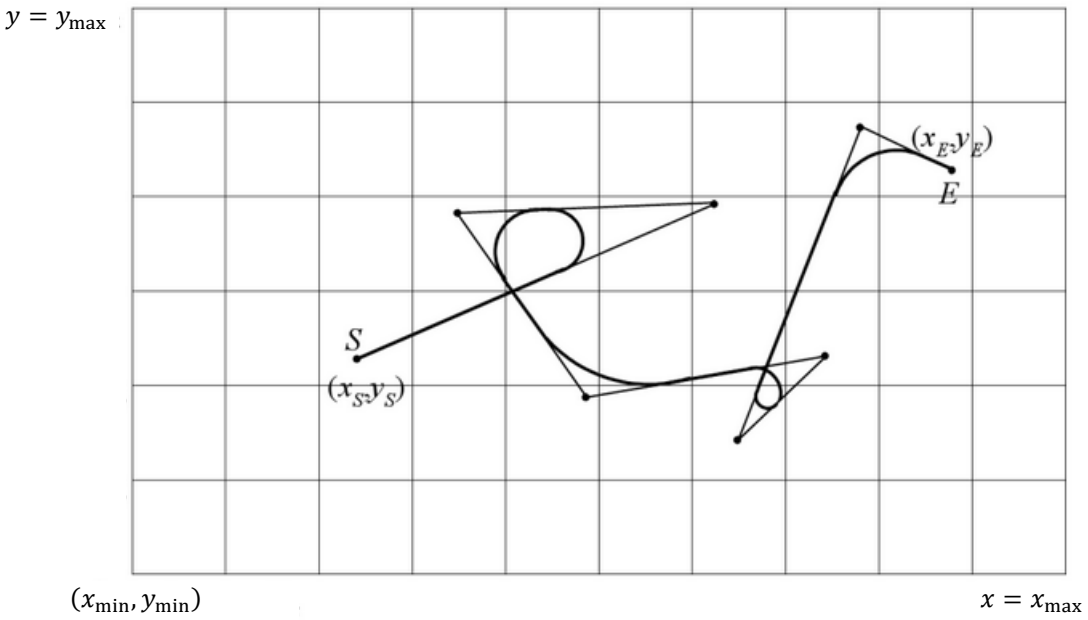
Η περιγραφή των μεταβλητών των δύο περιορισμών γίνεται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 10.1: Μεταβλητές περιορισμών συντεταγμένων κορυφών πολυγωνικής

Μεταβλητές	Περιγραφή
x_{K_i}	Τετμημένη κορυφής $\mathbf{K}_i$ κύριας πολυγωνικής γραμμής (m)
y_{K_i}	Τεταγμένη κορυφής $\mathbf{K}_i$ κύριας πολυγωνικής γραμμής (m)
$x_{\max}$	Μέγιστη τιμή αναζήτησης τετμημένης κορυφής κύριας πολυγωνικής (m)
$y_{\max}$	Μέγιστη τιμή αναζήτησης τεταγμένης κορυφής κύριας πολυγωνικής (m)
$x_{\min}$	Ελάχιστη τιμή αναζήτησης τετμημένης κορυφής κύριας πολυγωνικής (m)
$y_{\min}$	Ελάχιστη τιμή αναζήτησης τεταγμένης κορυφής κύριας πολυγωνικής (m)

Αυτή η προσέγγιση προτυποποίησης επιτρέπει τη διατύπωση τόσο οπισθόδρομων όσο και μη οπισθόδρομων οριζοντιογραφικών χαράξεων. Βέβαια, όπως γίνεται αντιληπτό ο έλεγχος που μπορεί να γίνει στη διαμόρφωση της χάραξης είναι περισσότερο περιορισμένος. Για τη διασφάλιση ενός λογικού σχήματος της τελικής χάραξης χωρίς δημιουργία κλειστών βρόγχων, ο αλγόριθμος επίλυσης πρέπει να αποδίδει με τρόπο τέτοιο ώστε να αποφεύγονται τέτοιες μη ικανοποιητικές μορφές όπως αυτή του παρακάτω σχήματος.

Σχήμα 10.1: Ανεπιθύμητη μορφή οριζοντιογραφικής χάραξης με κλειστούς βρόγχους (Πηγή: Jha, Schonfeld, Jong, & Kim, 2006)

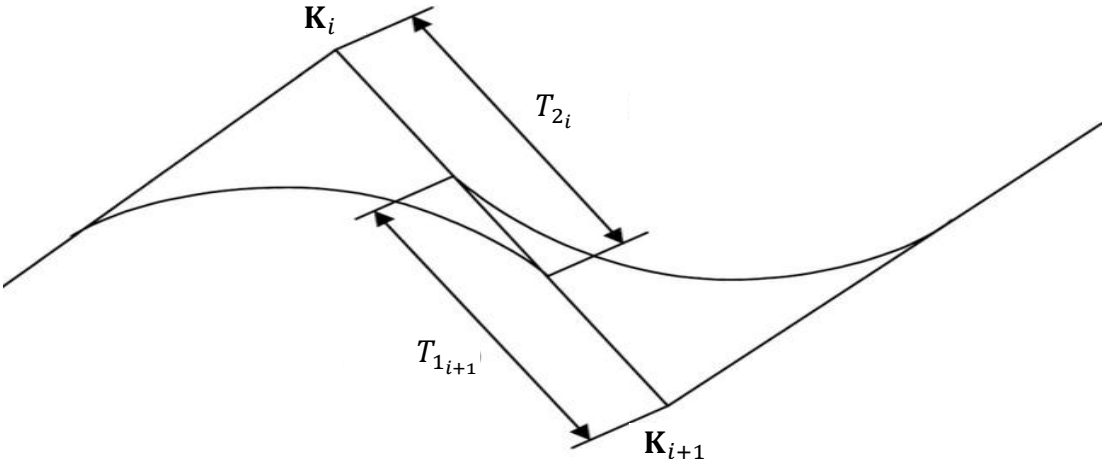


Η εξασφάλιση ενός ικανοποιητικού σχήματος της χάραξης βασίζεται στους γενετικούς τελεστές μέσα από τους οποίους πρέπει να αναμένεται ότι η χάραξη θα εξελιχθεί με λογική διαμόρφωση. Σε επόμενη εργασία με κατάλληλες τροποποιήσεις του αλγορίθμου επίλυσης, ώστε να αυξηθεί η υπολογιστική απόδοση, θα συμπεριληφθεί και η δυνατότητα πιο ευρείας αναζήτησης των θέσεων των κορυφών της πολυγωνικής της οριζοντιογραφίας, καθώς η αναζήτηση των θέσεων των κορυφών της πολυγωνικής της οριζοντιογραφίας δεν πρέπει να περιορίζεται μόνο εντός των ορίων του ψηφιακού μοντέλου εδάφους.

10.1.1.2 Περιορισμός συνέχειας οριζοντιογραφικής χάραξης

Ο σημαντικότερος, ίσως περιορισμός της οριζοντιογραφικής χάραξης είναι αυτός της συνέχειας. Αυτό ισχύει καθώς αν αυτός παραβιαστεί προκύπτουν μη λογικά σχήματα οριζοντιογραφικών χαράξεων όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

Σχήμα 10.2: Ασυνέχεια στην οριζοντιογραφική χάραξη
(Πηγή: Jha, Schonfeld, Jong, & Kim, 2006, Ιδία επεξεργασία)



Αντίθετα, αν οποιοσδήποτε από τους περιορισμούς της οριζοντιογραφικής χάραξης παραβιαστεί τότε η χάραξη θα εξακολουθεί να έχει λογικό σχήμα και απλά δεν θα υπόκειται στις προδιαγραφές που έχουν τεθεί. Για να ισχύει ο περιορισμός συνέχειας της οριζοντιογραφικής χάραξης πρέπει το μήκος του κλάδου πολυγωνικής να είναι μεγαλύτερο από το άθροισμα της μεγάλης εφαπτομένης εξόδου της οριζοντιογραφικής καμπύλης που προηγείται και της μεγάλης εφαπτομένης εισόδου της οριζοντιογραφικής καμπύλης που έπεται. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι:

$$T_{K_iK_{i+1}} - T_{2_i} - T_{1_{i+1}} \geq 0, \quad \forall i = 0, \ldots, n \tag{10.3}$$

Οι μεταβλητές της προηγούμενης σχέσης επεξηγούνται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 10.2: Μεταβλητές περιορισμού συνέχειας οριζοντιογραφικής χάραξης

Μεταβλητές	Περιγραφή
$T_{K_iK_{i+1}}$	Μήκος κλάδου πολυγωνικής μεταξύ κορυφών $\mathbf{K}_i$ και $\mathbf{K}_{i+1}$ (m)
T_{1_i}	Μήκος μεγάλης εφαπτομένης εισόδου (m)
T_{2_i}	Μήκος μεγάλης εφαπτομένης εξόδου (m)

Σημειώνεται ότι οι περιορισμοί ελάχιστης ακτίνας δεν είναι οι πιο ισχυροί στον σχεδιασμό της χάραξης, καθώς η συνθήκη συνέχειας, δηλαδή η δεύτερη συνθήκη στον Ορισμό 8.1, αποτελεί πολύ σημαντικότερο περιορισμό, αφού αν προκύψει ασυνέχεια τότε η καμπύλη δεν αποτελεί χάραξη. Αν αντιθέτως η συνθήκη συνέχειας διατηρείται ενώ παραβιάζεται ο περιορισμός ελάχιστης ακτίνας, τότε η καμπύλη αποτελεί χάραξη, η οποία βέβαια δεν χαρακτηρίζεται από την απαιτούμενη ποιότητα.

10.1.1.3 Θλάση πολυγωνικής χωρίς εφαρμογή οριζοντιογραφικής καμπύλης

Σύμφωνα με τις οδηγίες οδικών χαράξεων του ΥΠΕΧΩΔΕ (2001), επιτρέπεται η θλάση του άξονα της χάραξης χωρίς εφαρμογή οριζόντιας καμπύλης για πολύ μικρές γωνίες θλάσης. Η μέγιστη

επιτρεπόμενη γωνία θλάσης του άξονα της κύριας πολυγωνικής γραμμής υπολογίζεται ανάλογα με την ταχύτητα μελέτης από τη σχέση:

$$\gamma_C = \tan^{-1}\left(1{,}6/V_e\right), \text{ αν } V_e < 70 \text{ km/h, ή} \tag{10.4}$$

$$\gamma_C = \tan^{-1}\left(1{,}55/V_e^{\,2}\right), \text{ αν } V_e \geq 70 \text{ km/h} \tag{10.5}$$

Η περιγραφή των μεταβλητών των δύο σχέσεων γίνεται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 10.3: Μεταβλητές υπολογισμού επιτρεπόμενης θλάσης άξονα χωρίς εφαρμογή καμπύλης

Μεταβλητές	Περιγραφή
γ_C	Μέγιστη επιτρεπόμενη γωνία θλάσης κύριας πολυγωνικής χωρίς καμπύλη (rad)
V_e	Ταχύτητα μελέτης (km/h)

10.1.2 Ακτίνα κυκλικού τόξου

Η ακτίνα του κυκλικού τόξου της οριζοντιογραφικής καμπύλης αποτελεί μεταβλητή απόφασης στο πρότυπο που έχει αναπτυχθεί. Σε πρώτη φάση ο χρήστης καθορίζει την ελάχιστη και μέγιστη τιμή τους διαστήματος αναζήτησης της ακτίνας του κυκλικού τόξου, η οποία στη συνέχεια υπάγεται και στους υπόλοιπους περιορισμούς που περιγράφονται παρακάτω.

10.1.2.1 Περιορισμοί διαστήματος αναζήτησης ακτίνας κυκλικού τόξου

Το διάστημα αναζήτησης της μεταβλητής απόφασης της ακτίνας του κυκλικού τόξου περιορίζεται, ώστε να βελτιώνεται ο χρόνος υπολογισμού. Ο χρήστης μπορεί να αποφασίσει για το διάστημα αναζήτησης έχοντας υπ' όψιν και του περιορισμούς, που περιγράφονται στα επόμενα εδάφια. Σε κάθε περίπτωση ισχύει:

$$R_{\min} \leq R_i \leq R_{\max}, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{10.6}$$

Οι μεταβλητές της προηγούμενης σχέσης περιγράφονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 10.4: Μεταβλητές διαστήματος αναζήτησης τιμής ακτίνας κυκλικού τόξου

Μεταβλητές	Περιγραφή
R_i	Ακτίνα κυκλικού τόξου οριζοντιογραφικής καμπύλης (m)
$R_{\max}$	Μέγιστη τιμή διαστήματος αναζήτησης ακτίνας κυκλικού τόξου (m)
$R_{\min}$	Ελάχιστη τιμή διαστήματος αναζήτησης ακτίνας κυκλικού τόξου (m)

Σημειώνεται ότι για την θεώρηση όλων των πιθανών περιπτώσεων, δηλαδή ακόμη και αυτών όπου η θλάση του άξονα της πολυγωνικής γίνεται χωρίς εφαρμογή κυκλικού τόξου, ο χρήστης πρέπει να εισάγει μηδενική ελάχιστη τιμή αναζήτησης ακτίνας. Παρ' όλα αυτά για επιτάχυνση της διαδικασίας αναζήτησης ο χρήστης μπορεί να εισάγει κάποια μεγαλύτερη τιμή ώστε να περιορίσει το μέγεθος του χώρου αναζήτησης και κατά συνέπεια τον χρόνο σύγκλισης. Οι τιμές για την ελάχιστη και μέγιστη τιμή ακτίνας αναζήτησης μπορεί να προέρχονται από τις προδιαγραφές γεωμετρικού σχεδιασμού όπως αυτές τις FGSV (2012), στις οποίες εκτός της ελάχιστης ορίζεται και η μέγιστη τιμή ακτίνας ανά κατηγορία οδού.

10.1.2.2 Ελάχιστη ακτίνα κυκλικού τόξου σε σχέση με εγκάρσια κλίση και τριβή

Χωρίς να παραβιάζονται οι απαιτήσεις σχεδιασμού, γίνεται η υπόθεση ότι χρησιμοποιείται η ελάχιστη ακτίνα για την προσαρμογή των οριζοντιογραφικών καμπυλών για ορισμένη ταχύτητα μελέτης. Όπως γίνεται εύκολα κατανοητό η ελάχιστη ακτίνα σε ένα τόξο έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της υπερύψωσης και μικρότερη άνεση οδήγησης σε σχέση με μία καμπύλη μεγαλύτερου μήκους. Σύμφωνα με τις οδηγίες γεωμετρικού σχεδιασμού οδών της AASHTO (2011), η ελάχιστη ακτίνα μπορεί να υπολογιστεί για δεδομένη ταχύτητα μελέτης από τη σχέση:

$$R_{\min_i} = \frac{V_e^{\,2}}{3{,}6^2 \cdot g \cdot \left(e_{\max} + f_{R,\max}\right)} = \frac{V_e^{\,2}}{127 \cdot \left(e_{\max} + f_{R,\max}\right)}, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{10.7}$$

Στον επόμενο πίνακα γίνεται η περιγραφή των μεταβλητών της παραπάνω σχέσης.

Πίνακας 10.5: Μεταβλητές υπολογισμού ελάχιστης ακτίνας ως προς εγκάρσια κλίση και τριβή

Μεταβλητές	Περιγραφή
R_i	Ακτίνα κυκλικού τόξου οριζοντιογραφικής καμπύλης (m)
$R_{\min_i}$	Ελάχιστη ακτίνα κυκλικού τόξου (m)
V_e	Ταχύτητα μελέτης (km/h)
$e_{\max}$	Μέγιστη εγκάρσια κλίση (m/m)
$f_{R,\max}$	Μέγιστος επιτρεπόμενος συντελεστής εγκάρσιας συνιστώσας της τριβής
g	Επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s^2)

Όπως φαίνεται από την προηγούμενη σχέση, για τον υπολογισμό των ελάχιστων τιμών των ακτινών των κυκλικών τόξων, πρέπει αρχικά να προσδιοριστεί η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του συντελεστή εγκάρσιας συνιστώσας της τριβής. Επειδή, οι υπολογισμοί και οι μετρήσεις για τον προσδιορισμό των συντελεστών τριβής γίνονται διαφορετικά σε κάθε χώρα, επιλέχθηκε η τιμή του συντελεστή εγκάρσιας τριβής να εισάγεται κατευθείαν από τον χρήστη.

10.1.2.3 Ελάχιστο μήκος ακτίνας κυκλικού τόξου κατά τη σύνδεση με ευθυγραμμία

Στις οδηγίες οδικών χαράξεων του ΥΠΕΧΩΔΕ (2001) προβλέπεται ότι στην αλληλουχία ευθυγραμμία-τόξο συναρμογής-κυκλικό τόξο πρέπει να χρησιμοποιούνται για λόγους ασφάλειας της κυκλοφορίας συγκεκριμένες τιμές ακτινών ανάλογα με το μήκος της ευθυγραμμίας που προηγείται της οριζοντιογραφικής καμπύλης. Για οδούς με ενιαία επιφάνεια κυκλοφορίας ισχύει:

$$R_{\min_i} = 400\,\text{m},\ \forall i = 1, \ldots, n\text{, αν } L_{T_i} \geq 300\,\text{m ή } L_{T_{i+1}} \geq 300\,\text{m} \tag{10.8}$$

$$R_{\min_i} = \max\left(L_{T_i}, L_{T_{i+1}}\right), \quad \forall i = 1, \ldots, n\text{, αν } L_{T_i} < 300\,\text{m και } L_{T_{i+1}} < 300\,\text{m} \tag{10.9}$$

Όσον αφορά κατηγορίες αυτοκινητοδρόμων χωρίς όριο ταχύτητας σύμφωνα με την FGSV (2011) προτείνεται η ελάχιστη τιμή ακτίνας της παρακάτω σχέσης για σύνδεση με ευθείες μεγαλύτερες των πεντακοσίων μέτρων:

$$R_{\min_i} = 1300\,\text{m},\ \forall i = 1, \ldots, n\text{, αν } L_{T_i} \geq 500\,\text{m ή } L_{T_{i+1}} \geq 500\,\text{m} \tag{10.10}$$

Η περιγραφή των μεταβλητών των τριών σχέσεων γίνεται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 10.6: Μεταβλητές υπολογισμού ελάχιστης ακτίνας κατά τη σύνδεση με ευθυγραμμία

Μεταβλητές	Περιγραφή
$R_{\min_i}$	Ελάχιστο μήκος ακτίνας κυκλικού τόξου(m)
L_{T_i}	Μήκος ευθυγραμμίας που προηγείται του κυκλικού τόξου (m)
$L_{T_{i+1}}$	Μήκος ευθυγραμμίας που έπεται του κυκλικού τόξου (m)

10.1.2.4 Περιορισμοί ελάχιστης ακτίνας κυκλικού τόξου

Έχοντας υπολογίσει τις ελάχιστες τιμές της ακτίνας του κυκλικού τόξου για κάθε οριζοντιογραφική καμπύλη, οι περιορισμοί που μπορούν να χρησιμοποιηθούν εκφράζονται με τη σχέση:

$$R_i - R_{\min_i} \geq 0, \quad \forall i = 1, \ldots, n \text{ αν } \gamma_i \geq \gamma_C \tag{10.11}$$

Η περιγραφή των μεταβλητών του περιορισμού γίνεται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 10.7: Μεταβλητές περιορισμού ελάχιστης ακτίνας

Μεταβλητές	Περιγραφή
R_i	Μήκος ακτίνας κυκλικού τόξου οριζοντιογραφικής καμπύλης (m)
$R_{\min_i}$	Ελάχιστο μήκος ακτίνας κυκλικού τόξου(m)
γ_i	Γωνία θλάσης του άξονα της κύριας πολυγωνικής στην κορυφή $\mathbf{K}_i$ (rad)
γ_C	Μέγιστη επιτρεπόμενη γωνία θλάσης κύριας πολυγωνικής χωρίς καμπύλη (rad)

10.1.2.5 Περιορισμοί ακτινών διαδοχικών κυκλικών τόξων για αρμονία χάραξης

Σύμφωνα με τις οδηγίες της FGSV (2011) ο συντονισμός των ακτινών διαδοχικών κυκλικών τόξων συμβάλλει στην αρμονία των ταχυτήτων και κατά συνέπεια στην ασφαλή οδική συμπεριφορά. Για το λόγο αυτό προτείνεται η εφαρμογή της παρακάτω συνθήκης για διαδοχικά κυκλικά τόξα σε αυτοκινητοδρόμους:

$$\frac{R_i}{R_{i+1}} \leq 1{,}5 \text{ και } \frac{R_{i+1}}{R_i} \leq 1{,}5, \forall i = 1, \ldots, n-1 \text{, αν } R_i \leq 1500 \text{ m ή } R_{i+1} \leq 1500 \text{ m} \tag{10.12}$$

Στις υπόλοιπες κατηγορίες υπεραστικών οδών οι περιορισμοί αυτοί βασίζονται σε διαγράμματα επιτρεπτών αλληλουχιών ακτινών που έχουν προκύψει με βάση τα μοντέλα υπολογισμού των λειτουργικών ταχυτήτων που ισχύουν σε κάθε χώρα. Παράδειγμα τέτοιου διαγράμματος βρίσκεται στο Σχήμα 5.3.

10.1.3 Μήκος κυκλικού τόξου

Το μήκος κάθε κυκλικού τόξου πρέπει να εξασφαλίζει τις απαιτήσεις των προδιαγραφών ανάλογα με το αν χρησιμοποιούνται τόξα συναρμογής ή όχι. Οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή των σχέσεων αυτής της ενότητας περιγράφονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 10.8: Μεταβλητές υπολογισμού ελάχιστου μήκους κυκλικού τόξου χωρίς κλωθοειδείς

Μεταβλητές	Περιγραφή
L_{C_i}	Μήκος κυκλικού τόξου (m)
$L_{C,\min_i}$	Ελάχιστο μήκος κυκλικού τόξου (m)
V_e	Ταχύτητα μελέτης (km/h)
R_i	Μήκος ακτίνας κυκλικού τόξου οριζοντιογραφικής καμπύλης (m)
γ_i	Γωνία θλάσης του άξονα της κύριας πολυγωνικής στην κορυφή $\mathbf{K}_i$ (rad)
γ_C	Μέγιστη επιτρεπόμενη γωνία θλάσης κύριας πολυγωνικής χωρίς καμπύλη (rad)

10.1.3.1 Ελάχιστο μήκος κυκλικού τόξου χωρίς εφαρμογή τόξων συναρμογής

Στις περιπτώσεις όπου οι ευθυγραμμίες συνδέονται απευθείας με κυκλικά τόξα χωρίς την παρεμβολή τόξων συναρμογής αυτές το ελάχιστο μήκος του τόξου πρέπει να είναι τουλάχιστο ίσο με το διπλάσιο της ταχύτητας μελέτης.

$$L_{C,\min_i} = 2 \cdot V_e \text{, αν } R_i \geq 1000 \text{ m, ή } \gamma_i \leq \pi/40 \tag{10.13}$$

Αντίστοιχα, οι οδηγίες χαράξεων αυτοκινητοδρόμων της FGSV (2011) προτείνουν την παρακάτω τιμή:

$$L_{C,\min_i} = 300 \text{ m, αν } \gamma_i \leq \pi/40 \tag{10.14}$$

10.1.3.2 Ελάχιστο μήκος κυκλικού τόξου ως προς χρόνο διέλευσης

Οι οδηγίες χαράξεων του ΥΠΕΧΩΔΕ (2001) επισημαίνουν ότι τα κυκλικά τόξα πρέπει να έχουν μήκος τουλάχιστον ίσο με εκείνο που διανύεται σε δύο δευτερόλεπτα από όχημα κινούμενο με την ταχύτητα μελέτης. Δηλαδή, ισχύει:

$$L_{C,\min_i} = \frac{2}{3600} V_e, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{10.15}$$

Στις οδηγίες χαράξεων της FGSV (2012) το ελάχιστο μήκος λαμβάνεται κατευθείαν με βάση την κατηγορία της οδού. Για τον λόγο αυτό δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να εισάγει απευθείας την τιμή του ελάχιστου μήκους κυκλικού τόξου σε περίπτωση που δεν θέλει να χρησιμοποιήσει την σχέση αυτού του εδαφίου.

10.1.3.3 Περιορισμοί ελάχιστου μήκους κυκλικού τόξου

Όλοι οι περιορισμοί ελάχιστου μήκους κυκλικού τόξου μπορούν να εκφραστούν τελικά ως εξής:

$$L_{C_i} - L_{C,\min_i} \geq 0, \quad \forall i = 1, \ldots, n \text{, αν } \gamma_i \geq \gamma_C \tag{10.16}$$

10.1.4 Παράμετροι τόξων συναρμογής

Οι τιμές των παραμέτρων των τόξων συναρμογής εισόδου και εξόδου αποτελούν μεταβλητές απόφασης του μαθηματικού προτύπου βελτιστοποίησης που έχει αναπτυχθεί στην εφαρμογή RoadEvolver. Τόσο οι περιορισμοί που επιβάλλονται απευθείας στις παραμέτρους, όσο και οι περιορισμοί ελάχιστου και μέγιστου μήκους τόξου συναρμογής έχουν σαν συνέπεια την οριοθέτηση αυτών των τιμών. Στον παρακάτω πίνακα γίνεται περιγραφή των μεταβλητών που χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς των περιορισμών των παραμέτρων των τόξων συναρμογής.

Πίνακας 10.9: Μεταβλητές περιορισμών παραμέτρων κλωθοειδών

Μεταβλητές	Περιγραφή
A_{1_i}	Παράμετρος κλωθοειδούς εισόδου οριζοντιογραφικής καμπύλης (m)
A_{2_i}	Παράμετρος κλωθοειδούς εξόδου οριζοντιογραφικής καμπύλης (m)
$A_{\max}$	Μέγιστη τιμή διαστήματος αναζήτησης παραμέτρου κλωθοειδούς (m)
$A_{\min}$	Ελάχιστη τιμή διαστήματος αναζήτησης παραμέτρου κλωθοειδούς (m)
R_i	Μήκος ακτίνας κυκλικού τόξου οριζοντιογραφικής καμπύλης (m)
γ_i	Γωνία θλάσης του άξονα της κύριας πολυγωνικής στην κορυφή $\mathbf{K}_i$ (rad)
L_{T_i}	Μήκος ευθυγραμμίας (m)

10.1.4.1 Περιορισμοί διαστήματος αναζήτησης παραμέτρων κλωθοειδών

Το διάστημα αναζήτησης των μεταβλητών απόφασης των παραμέτρων κλωθοειδών αν και θεωρητικά δεν πρέπει να περιορίζεται, εντούτοις δεν θα πρέπει να είναι πολύ μεγάλο, ώστε να βελτιώνεται ο χρόνος υπολογισμού. Ο χρήστης μπορεί να αποφασίσει για το διάστημα αναζήτησης έχοντας υπ' όψιν και του περιορισμούς, που περιγράφονται στα επόμενα εδάφια. Σε κάθε περίπτωση ισχύουν:

$$A_{\min} \le A_{1_i} \le A_{\max}, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{10.17}$$

$$A_{\min} \le A_{2_i} \le A_{\max}, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{10.18}$$

Σημειώνεται ότι για την θεώρηση όλων των πιθανών περιπτώσεων, δηλαδή ακόμη και αυτών όπου η θλάση του άξονα της πολυγωνικής γίνεται χωρίς εφαρμογή κυκλικού τόξου ή όταν γίνεται απευθείας σύνδεση της ευθυγραμμίας με κυκλικό τόξο χωρίς παρεμβολή τόξου συναρμογής, ο χρήστης πρέπει να εισάγει μηδενική ελάχιστη τιμή αναζήτησης ακτίνας. Παρ' όλα αυτά για επιτάχυνση της διαδικασίας αναζήτησης ο χρήστης μπορεί να εισάγει κάποια μεγαλύτερη τιμή ώστε να περιορίσει το μέγεθος του χώρου αναζήτησης και κατά συνέπεια τον χρόνο σύγκλισης.

10.1.4.2 Οριζοντιογραφική καμπύλη χωρίς εφαρμογή τόξων συναρμογής

Οι οδηγίες οδικών χαράξεων του ΥΠΕΧΩΔΕ (2001) αναφέρουν ότι για όλες τις κατηγορίες οδών και τις ταχύτητες μελέτης, με βάση τα δεδομένα της ασφαλείας και της άνεσης της κίνησης των οχημάτων, την αισθητική της οδού και την απορροή των ομβρίων επιτρέπεται η άμεση σύνδεση ευθυγραμμιών με κυκλικά τόξα χωρίς την παρεμβολή τόξων συναρμογής όταν η ακτίνα του κυκλικού τόξου είναι μεγαλύτερη ή ίση από χίλια μέτρα ή η μεταβολή της γωνίας διεύθυνσης της καμπύλης είναι μικρότερη ή ίση από δέκα βαθμούς. Οι συνθήκες αυτές εκφράζοντα με τις σχέσεις:

$$A_{1_i} = 0 \text{ και } A_{2_i} = 0, \quad \forall i = 1, \ldots, n \text{, αν } R_i \ge 1000 \text{ m ή } \gamma_i \le \pi/40 \tag{10.19}$$

10.1.4.3 Περιορισμοί ελάχιστης τιμής παραμέτρου κλωθοειδούς

Η διάταξη του τόξου συναρμογής γίνεται οπτικά αντιληπτή όταν η μεταβολή κατεύθυνσης ίση τουλάχιστον με 3,5 βαθμούς.

$$A_{1_i} - \frac{R_i}{3} \ge 0 \text{ και } A_{2_i} - \frac{R_i}{3} \ge 0, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{10.20}$$

Σε μεγάλες ακτίνες επιτρέπεται η επιλογή παραμέτρου κλωθοειδούς μικρότερη από αυτές του παραπάνω περιορισμού αν η τιμή της εκτροπής είναι μικρότερη από 0,25 m.

10.1.4.4 Περιορισμοί μέγιστης τιμής παραμέτρου κλωθοειδούς

Οι οδηγίες μελετών του ΥΠΕΧΩΔΕ(2001) αναφέρουν ότι για λόγους ασφαλείας της κυκλοφορίας η μέγιστη τιμή της παραμέτρου της κλωθοειδούς δεν πρέπει να υπερβαίνει την τιμή της ακτίνας του κυκλικού τόξου. Κατά συνέπεια, προκύπτουν οι παρακάτω περιορισμοί για τις παραμέτρους των τόξων συναρμογής εισόδου και εξόδου:

$$R_i - A_{1_i} \geq 0 \text{ και } R_i - A_{2_i} \geq 0, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{10.21}$$

10.1.4.5 Περιορισμοί παραμέτρων κλωθοειδών εισόδου και εξόδου για αρμονία

Κατά κανόνα πρέπει να προτιμάται η συμμετρική λύση με ίσες παραμέτρους για τις κλωθοειδείς εισόδου και εξόδου σε μια οριζοντιογραφική καμπύλη. Όπως διαπιστώθηκε, σε αντίθεση με άλλα πρότυπα βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων όπου δε δίνεται η δυνατότητα επιλογής μη συμμετρικών τόξων συναρμογής στην παρούσα εργασία έχει συμπεριληφθεί αυτή η δυνατότητα. Βέβαια, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ο παρόν περιορισμός επικουρικά όχι με αυστηρή μορφή, αλλά ως ποινή κόστους στη συνάρτηση στόχου:

$$A_{1_i} - A_{2_i} = 0, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{10.22}$$

Σε κάθε περίπτωση, σύμφωνα με την FGSV (2012), ο λόγος μεταξύ των παραμέτρων των κλωθοειδών εισόδου και εξόδου μιας οριζοντιογραφικής καμπύλης δεν θα πρέπει να υπερβαίνει την παρακάτω τιμή:

$$\frac{A_{1_i}}{A_{2_i}} \leq 1{,}5 \text{ και } \frac{A_{2_i}}{A_{1_i}} \leq 1{,}5, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{10.23}$$

10.1.4.6 Περιορισμοί παραμέτρων κλωθοειδών διαδοχικών καμπυλών για αρμονία

Για λόγους αρμονίας στη χάραξη των καμπύλων και ομοιόμορφης μεταβολής των επικλίσεων πρέπει οι κλωθοειδείς μιας σιγμοειδούς καμπύλης να έχουν περίπου ίσες παραμέτρους. Βέβαια, για την διατήρηση της οπτικής εντύπωσης της S-καμπύλης πρέπει η τιμή του μήκους της ενδιάμεσης ευθυγραμμίας να μην υπερβαίνει μια ορισμένη τιμή (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2001). Έτσι, όταν οι παράμετροι των διαδοχικών κλωθοειδών μιας σιγμοειδούς καμπύλης πρέπει να ισχύει η παρακάτω σχέση δεν μπορεί να είναι ίσες, τότε σύμφωνα με την FGSV (2011) πρέπει να ισχύει:

$$\frac{A_{2_i}}{A_{1_{i+1}}} \leq 1{,}5, \quad \forall i = 1, \ldots, n, \text{ αν } L_{T_i} \leq 0{,}08\left(A_{1_{i+1}} + A_{2_i}\right) \text{ και } A_{1_{i+1}} \leq 300\,\text{m} \tag{10.24}$$

$$\frac{A_{1_{i+1}}}{A_{2_i}} \leq 1{,}5, \quad \forall i = 1, \ldots, n, \text{ αν } L_{T_i} \leq 0{,}08\left(A_{1_{i+1}} + A_{2_i}\right) \text{ και } A_{2_i} \leq 300\,\text{m} \tag{10.25}$$

10.1.5 Μήκος τόξου συναρμογής

Έχοντας ήδη περιορίσει το μήκος των τόξων συναρμογής μέσω των περιορισμών των παραμέτρων των κλωθοειδών ο χρήστης του RoadEvolver μπορεί προαιρετικά να λάβει υπ ‘όψιν περισσότερους περιορισμούς για το μήκος του τόξου συναρμογής ανάλογα με τις ισχύουσες προδιαγραφές. Σύμφωνα με τις οδηγίες γεωμετρικού σχεδιασμού των οδών της AASHTO (2011), ορισμένες υπηρεσίες

καθορίζουν μια οριακές τιμές του μήκους του τόξου συναρμογής με βάση την άνεση των οδηγών και τις εγκάρσιες μετατοπίσεις των οχημάτων.

Όσον αφορά την άνεση των οδηγών στόχος είναι το μήκος της κλωθοειδούς να επιτρέπει την ομαλή αύξηση της εγκάρσιας επιτάχυνσης καθώς ένα όχημα εισέρχεται στην καμπύλη. Τα κριτήρια που αφορούν την εγκάρσια μετατόπιση έχουν στόχο την παροχή μήκους κλωθοειδούς ικανού να εξυπηρετήσει τη μεταβολή στην εγκάρσια θέση του οχήματος εντός της λωρίδας κυκλοφορίας του με τρόπο που να ταιριάζει με τη φυσική σπειροειδή πορεία του οχήματος.

10.1.5.1 Ελάχιστο μήκος τόξου συναρμογής για ομαλή μεταβολή της κεντρομόλου επιτάχυνσης

Η πρώτη σχέση που αναπτύχθηκε από τον Shortt (1909) για βαθμιαία μεταβολή της εγκάρσιας επιτάχυνσης σε καμπύλες σιδηροδρομικών γραμμών, χρησιμοποιείται από αρκετούς οργανισμούς για τον υπολογισμό του ελάχιστου μήκους του τόξου συναρμογής:

$$L_{S,\min_i} = \frac{0{,}0214 \cdot V_e^{\,3}}{R_i \cdot C}, \quad \forall i = 1,\ldots,n \tag{10.26}$$

Η περιγραφή των μεταβλητών της παραπάνω σχέση γίνεται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 10.10: Μεταβλητές υπολογισμού μήκους για ομαλή μεταβολή εγκάρσιας επιτάχυνσης

Μεταβλητές	Περιγραφή
$L_{S,\min_i}$	Ελάχιστο μήκος τόξου συναρμογής (m)
V_e	Ταχύτητα μελέτης (km/h)
R_i	Ακτίνα κυκλικού τόξου οριζοντιογραφικής καμπύλης (m)
C	Μέγιστη τιμή εγκάρσιου τινάγματος ($\mathrm{m/s^3}$)

Η τιμή που λαμβάνει ο παράγοντας C στην παραπάνω σχέση είναι μια εμπειρική τιμή που αναπαριστά την άνεση και το επίπεδο ασφάλειας που παρέχεται από το τόξο συναρμογής. Για τον σχεδιασμό οδών έχουν χρησιμοποιηθεί τιμές του C από 0,3 έως 0,9 $\mathrm{m/s^3}$.

Σύμφωνα με την AASHTO (2011) η τιμή που προτείνεται ως μέγιστη είναι 1,2 $\mathrm{m/s^3}$ καθώς τιμές μικρότερες από αυτή μπορεί μεν να οδηγήσουν σε πιο επιμήκη τόξα συναρμογής αλλά αυτό δεν συνεπάγεται απαραίτητα με ορθή προσαρμογή ως προς την συμπεριφορά και άνεση των οδηγών. Αυτή η σχέση μπορεί επίσης να τροποποιηθεί, ώστε να συμπεριλάβει και την επίδραση της επίκλισης, καταλήγοντας σε μικρότερα μήκη κλωθοειδών.

10.1.5.2 Ελάχιστο μήκος τόξου συναρμογής για εγκάρσια μετατόπιση

Για την εγκάρσια μετατόπιση η παροχή μήκους κλωθοειδούς ικανού να εξυπηρετήσει τη μεταβολή στην εγκάρσια θέση του οχήματος εντός της λωρίδας κυκλοφορίας του εκφράζεται ως:

$$L_{S,\min_i} = \sqrt{24 \cdot p_{\min} \cdot R_i}, \quad \forall i = 1,\ldots,n \tag{10.27}$$

Η περιγραφή των μεταβλητών της παραπάνω σχέση γίνεται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 10.11: Μεταβλητές υπολογισμού μήκους για ελάχιστη εγκάρσια μετατόπιση

Μεταβλητές	Περιγραφή
$L_{S,\min_i}$	Ελάχιστο μήκος τόξου συναρμογής για άνεση των οδηγών (m)
R_i	Ακτίνα κυκλικού τόξου οριζοντιογραφικής καμπύλης (m)
$p_{\min}$	Ελάχιστη εγκάρσια μετατόπιση μεταξύ ευθυγραμμίας και κυκλικού τόξου (m)

Η προτεινόμενη τιμή για την ελάχιστη εγκάρσια μετατόπιση είναι 0,2 m. Αυτή η τιμή δεν έρχεται σε αντίθεση με την ελάχιστη εγκάρσια μετατόπιση που προκύπτει από τη φυσική συμπεριφορά οδήγησης των περισσότερων οδηγών.

10.1.5.3 Περιορισμοί ελάχιστου μήκους κλωθοειδούς

Τα δύο παραπάνω κριτήρια συνιστάται να χρησιμοποιούνται μαζί για τον καθορισμό του ελάχιστου μήκους της κλωθοειδούς. Βέβαια, αυτό κρίνεται από τον κάθε μελετητή ξεχωριστά ανάλογα με τις προδιαγραφές και τις ειδικές απαιτήσεις της οδού. Σε κάθε περίπτωση οι περιορισμοί για τα τόξα συναρμογής εισόδου και εξόδου διαμορφώνονται ως εξής:

$$L_{S1_i} - L_{S,\min_i} \geq 0 \text{ και } L_{S2_i} - L_{S,\min_i} \geq 0, \quad \forall i = 1,\ldots,n \text{ αν } R_i < 1000\,\text{m} \text{ και } \gamma_i > \pi/40 \qquad (10.28)$$

Η περιγραφή των μεταβλητών του περιορισμού γίνεται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 10.12: Μεταβλητές περιορισμού ελάχιστου μήκους τόξου συναρμογής

Μεταβλητές	Περιγραφή
$L_{S,\min_i}$	Ελάχιστο μήκος τόξου συναρμογής(m)
L_{S1_i}	Μήκος τόξου συναρμογής εισόδου (m)
L_{S2_i}	Μήκος τόξου συναρμογής εξόδου (m)

Βέβαια, ο υπολογισμός του ελάχιστου μήκους δεν φαίνεται να χρειάζεται τόσο μεγάλη ακρίβεια ώστε να χρησιμοποιούνται η παραπάνω σχέσεις. Ένας πιο πρακτικός έλεγχος του ελάχιστου μήκους των τόξων συναρμογής αφορά την συναρμογή των επικλίσεων, δηλαδή το απαραίτητο μήκος για την ομαλή μετάβαση από την τιμή της επίκλισης στην ευθυγραμμία στην αντίστοιχη τιμή του κυκλικού τόξου. Οι σχέσεις και ο καθορισμός του ελάχιστου μήκους κλωθοειδούς για την εξυπηρέτηση της συναρμογής των επικλίσεων, θα αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής εργασίας, όπου θα εξεταστούν τα στοιχεία των διατομών συνολικά.

10.1.5.4 Μέγιστο μήκος τόξου συναρμογής

Σύμφωνα με την AASHTO (2011), η διεθνή πρακτική υποδεικνύει ότι υπάρχει ανάγκη περιορισμού του μήκους της κλωθοειδούς, καθώς μεγάλο μήκος του τόξου συναρμογής σε σχέση με το μήκος του κυκλικού μπορεί να παραπλανήσει τους οδηγούς όσον αφορά την καμπυλότητα της επερχόμενης στροφής. Ένα σχετικά συντηρητικό μέγιστο μήκος που ελαχιστοποιεί την πιθανότητα εμφάνισης μιας τέτοιας επικίνδυνης κατάστασης μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$L_{S,\max_i} = \sqrt{24 \cdot p_{\max} \cdot R_i}, \quad \forall i = 1,\ldots,n \qquad (10.29)$$

Η περιγραφή των μεταβλητών της παραπάνω σχέση γίνεται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 10.13: Περιγραφή μεταβλητών υπολογισμού μέγιστου μήκους τόξου συναρμογής

Μεταβλητές	Περιγραφή
$L_{S,\max_i}$	Μέγιστο μήκος τόξου συναρμογής (m)
$p_{\max}$	Μέγιστη εγκάρσια μετατόπιση μεταξύ ευθυγραμμίας και κυκλικού τόξου (m)
R_i	Ακτίνα κυκλικού τόξου οριζοντιογραφικής καμπύλης (m)

Για τη μέγιστη εγκάρσια μετατόπιση η τιμή που προτείνεται είναι 1,0 m. Αυτή η τιμή είναι συμβατή με τη μέγιστη εγκάρσια μετατόπιση που προκύπτει από τη φυσική συμπεριφορά οδήγησης των περισσότερων οδηγών. Επίσης, παρέχει ισορροπία μεταξύ τόξου συναρμογής και κυκλικού τόξου.

10.1.5.5 Περιορισμοί μέγιστου μήκους τόξου συναρμογής

Ο περιορισμός του μέγιστου μήκους που μπορούν να λάβουν τα τόξα συναρμογής εισόδου και εξόδου με εφαρμογή της προηγούμενης σχέσης διαμορφώνεται ως εξής:

$$L_{S,\max_i} - L_{S1_i} \geq 0 \text{ και } L_{S,\max_i} - L_{S2_i} \geq 0, \quad \forall i = 1,\ldots,n \tag{10.30}$$

Η περιγραφή των μεταβλητών των σχέσεων γίνεται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 10.14: Μεταβλητές περιορισμού μέγιστου μήκους τόξου συναρμογής

Μεταβλητές	Περιγραφή
$L_{S,\max_i}$	Ελάχιστο μήκος τόξου συναρμογής(m)
L_{S1_i}	Μήκος τόξου συναρμογής εισόδου (m)
L_{S2_i}	Μήκος τόξου συναρμογής εξόδου (m)

Σημειώνεται ότι από τον περιορισμό της μέγιστης τιμής της παραμέτρου της κλωθοειδούς σε σχέση με την ακτίνα του κυκλικού τόξου, προκύπτει ότι το μέγιστο μήκος κλωθοειδούς μπορεί να μικρότερο ή ίσο από την τιμή της ακτίνας του κυκλικού τόξου. Κατά συνέπεια, ο περιορισμός αυτού του εδαφίου είναι προαιρετικός και εφαρμόζεται κατά την κρίση του μελετητή.

10.1.6 Μήκος οριζοντιογραφικής καμπύλης

Σύμφωνα με έναν εμπειρικό κανόνα της AASHTO(2011) το συνολικό μήκος της οριζοντιογραφικής καμπύλης πρέπει να είναι τουλάχιστον τριπλάσιο της ταχύτητας μελέτης.

$$L_{C_i} + L_{S1_i} + L_{S2_i} \geq 3 \cdot V_e, \quad \forall i = 1,\ldots,n \tag{10.31}$$

Ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιεί τον περιορισμό αυτό προαιρετικά ή να τον λαμβάνει υπ' όψιν σαν μη αυστηρό περιορισμός με μια ήπια συνάρτηση ποινής παραβίασής του.

10.1.7 Ελάχιστο μήκος ευθυγραμμίας μεταξύ ομόρροπων καμπυλών

Για οδούς υπεραστικών συνδέσεων, η παρεμβολή ευθυγράμμων τμημάτων μεταξύ ομόρροπων καμπύλων πρέπει να αποφεύγεται για να εξασφαλίζεται η οπτική σταθερότητα της χάραξης. Όταν αυτό δεν είναι δυνατόν τότε το ελάχιστο μήκος της ευθυγραμμίας μεταξύ ομόρροπων καμπύλων δίνεται από τη σχέση (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2001):

$$L_{T,\min_i} = 6 \cdot V_e, \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{10.32}$$

Η προηγούμενη σχέση τροποποιήθηκε στις πιο πρόσφατες οδηγίες σχεδιασμού υπεραστικών οδών της FGSV (2012), καθώς ορίστηκε ότι το ελάχιστο μήκος ευθυγραμμίας μεταξύ ομόρροπων οριζοντιογραφικών καμπυλών υπολογίζεται ως προς τη μικρότερη από τις δύο ακτίνες των εκατέρωθεν κυκλικών τόξων ως εξής:

$$L_{T,\min_i} = 1{,}5 \cdot \min\left(R_{i-1}, R_i\right), \quad \forall i = 1, \ldots, n \tag{10.33}$$

Για τις διάφορες κατηγορίες αυτοκινητοδρόμων έχει οριστεί συγκεκριμένη τιμή του ελάχιστου μήκους ευθυγραμμίας μεταξύ ομόρροπων καμπυλών ανεξάρτητα από την ταχύτητα μελέτης και τις ακτίνες των εκατέρωθεν τόξων, η οποία αντιστοιχεί σε(FGSV, 2011):

$$L_{T,\min_i} = 400\,\mathrm{m}, \ \forall i = 1, \ldots, n \tag{10.34}$$

10.1.7.1 Περιορισμοί ελάχιστου μήκους ευθυγραμμίας μεταξύ ομόρροπων καμπυλών

Από τα παραπάνω εξάγεται ότι για το σύνολο των υπεραστικών συνδέσεων ο περιορισμός ελάχιστου μήκους ευθυγραμμίας μεταξύ ομόρροπων καμπυλών μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$L_{T_i} - L_{T,\min_i} \geq 0, \quad \forall i = 1, \ldots, n \text{, αν οι καμπύλες } i \text{ και } i+1 \text{ είναι ομόρροπες} \tag{10.35}$$

10.2 Κατακόρυφη χάραξη

Στην ενότητα αυτή αναφέρονται οι βασικοί περιορισμοί που αναφέρονται στα στοιχεία μελέτης κατά τη μηκοτομή. Επίσης, παρατίθενται οι βασικοί υπολογισμοί που για τις οριακές τιμές των μεγεθών που σχετίζονται με τη μηκοτομή της χάραξης.

10.2.1 Πολυγωνική γραμμή μηκοτομής

Οι κορυφές της πολυγωνικής της κατακόρυφης χάραξης απαιτούν δύο μεταβλητές για τον καθορισμό τους. Αυτές αφορούν τη χιλιομετρική θέση, δηλαδή την οριζόντια απόσταση και το υψόμετρο.

10.2.1.1 Περιορισμοί διαστήματος αναζήτησης θέσεων κορυφών μηκοτομής

Οι θέσεις των κορυφών της πολυγωνικής της μηκοτομής περιορίζονται από τιμές που εισάγει ο χρήστης ώστε το διάστημα αναζήτησης να μην είναι πολύ μεγάλο. Κατά συνέπεια, διαμορφώνονται οι παρακάτω περιορισμοί:

$$h_{\min} \leq h_{V_j} \leq h_{\max}, \quad \forall j = 1, \ldots, m \tag{10.36}$$

$$z_{\min} \leq z_{V_j} \leq z_{\max}, \quad \forall j = 1, \ldots, m \tag{10.37}$$

Η περιγραφή των μεταβλητών των δύο περιορισμών γίνεται στον επόμενο πίνακα. Μια πρακτική που μπορεί να ακολουθήσει ο χρήστης για την εισαγωγή τιμών ελάχιστου και μέγιστου υψομέτρου είναι να εντοπίσει το ελάχιστο και μέγιστο υψόμετρο της περιοχής μελέτης και από αυτό να αφαιρέσει ή να προσθέσει αντίστοιχα το μέγιστο βάθος εκσκαφής ή το μέγιστο ύψος επιχώματος. Η ελάχιστη τιμή αναζήτησης χιλιομετρικής θέσης είναι σίγουρα μεγαλύτερη του μηδενός.

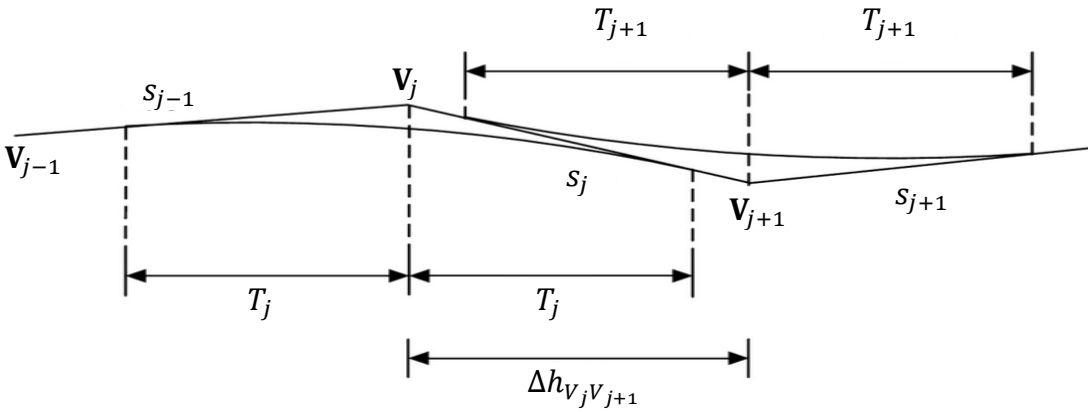
Πίνακας 10.15: Μεταβλητές περιορισμών θέσεων κορυφών πολυγωνικής μηκοτομής

Μεταβλητές	Περιγραφή
h_{V_j}	Χιλιομετρική θέση κορυφής $\mathbf{V}_j$ πολυγωνικής γραμμής μηκοτομής (m)
z_{V_j}	Υψόμετρο κορυφής $\mathbf{V}_j$ πολυγωνικής γραμμής μηκοτομής (m)
$h_{\max}$	Μέγιστη τιμή αναζήτησης χιλιομετρικής θέσης κορυφής μηκοτομής (m)
$z_{\max}$	Μέγιστη τιμή διαστήματος αναζήτησης υψομέτρου κορυφής μηκοτομής (m)
$h_{\min}$	Ελάχιστη τιμή αναζήτησης χιλιομετρικής θέσης κορυφής μηκοτομής (m)
$z_{\min}$	Ελάχιστη τιμή διαστήματος αναζήτησης υψομέτρου κορυφής μηκοτομής (m)

10.2.1.2 Περιορισμός συνέχειας κατακόρυφης χάραξης

Ο σημαντικότερος, ίσως περιορισμός της κατακόρυφης χάραξης είναι αυτός της συνέχειας. Αυτό ισχύει καθώς αν αυτός παραβιαστεί προκύπτουν μη λογικά σχήματα χαράξεων κατά τη μηκοτομή. Αντίθετα, αν οποιοσδήποτε από τους περιορισμούς της κατακόρυφης χάραξης παραβιαστεί τότε η χάραξη θα εξακολουθεί να έχει λογικό σχήμα και απλά δεν θα υπόκειται στις προδιαγραφές που έχουν τεθεί.

Σχήμα 10.3: Ασυνέχεια στην κατακόρυφη χάραξη
(Πηγή: Jha, Schonfeld, Jong, & Kim, 2006, Ιδία επεξεργασία)



Για να ισχύει ο περιορισμός συνέχειας της κατακόρυφης χάραξης πρέπει το μήκος του κλάδου πολυγωνικής να είναι μεγαλύτερο από το άθροισμα των εφαπτομένων των κατακόρυφων καμπυλών. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι:

$$\Delta h_{V_j V_{j+1}} - T_j - T_{j+1} \geq 0, \quad \forall j = 0, \ldots, m \tag{10.38}$$

Πίνακας 10.16: Μεταβλητές περιορισμού συνέχειας κατακόρυφης χάραξης

Μεταβλητές	Περιγραφή
$\Delta h_{V_j V_{j+1}}$	Οριζόντιο μήκος κλάδου πολυγωνικής μεταξύ κορυφών $\mathbf{V}_j$ και $\mathbf{V}_{j+1}$ (m)
T_j	Μήκος εφαπτομένης προηγούμενης κατακόρυφης καμπύλης (m)
T_{j+1}	Μήκος εφαπτομένης επερχόμενης κατακόρυφης καμπύλης (m)

10.2.1.3 Θλάση πολυγωνικής μηκοτομής χωρίς εφαρμογή κατακόρυφης καμπύλης

Σύμφωνα με το ΥΠΕΧΩΔΕ (2001) σε περιοχές με μικρές μεταβολές της κατά μήκος κλίσης επιτρέπεται η παράλειψη καμπύλης συναρμογής όταν η μέγιστη διαφορά των διαδοχικών κατά μήκος κλίσεων είναι:

$$\Delta s_{\max} = 0{,}3/V_e^{\ 2} \tag{10.39}$$

Όταν η αλλαγή της κλίσης γίνεται χωρίς καμπύλη συναρμογής στην πραγματικότητα στο σημείο θλάσης γίνεται στρογγύλευση από τον κατασκευαστή.

10.2.1.4 Ελάχιστη απόσταση θλάσεων χωρίς καμπύλη

Η ελάχιστη επιτρεπόμενη απόσταση μεταξύ διαδοχικών θλάσεων της χάραξης της μηκοτομής χωρίς καμπύλη συναρμογής είναι (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2001):

$$\Delta h_{\min} = 30 \text{ m, αν } V_e > 70 \text{ km/h, ή} \tag{10.40}$$

$$\Delta h_{\min} = 15 \text{ m, αν } V_e \leq 70 \text{ km/h} \tag{10.41}$$

10.2.1.5 Περιορισμοί ελάχιστης απόστασης θλάσεων χωρίς καμπύλη

Οι περιορισμοί ελάχιστων επιτρεπόμενων απόσταση μεταξύ διαδοχικών θλάσεων της χάραξης της μηκοτομής χωρίς καμπύλη συναρμογής διαμορφώνονται ως εξής:

$$h_{V_{j+1}} - h_{V_j} \geq \Delta h_{\min} \quad \forall j = 0, \ldots, m \text{ , αν } s_{j+1} - s_j \leq \Delta s_{\max} \tag{10.42}$$

10.2.2 Κατά μήκος κλίση

Για τους περιορισμούς μέγιστης και ελάχιστης κατά μήκος κλίσης δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη του RoadEvolver να εισάγει απευθείας τις οριακές τιμές. Οι περιορισμοί που προκύπτουν ισχύουν καθολικά για όλο το μήκος της οδού. Στα επόμενα εδάφια περιγράφονται ορισμένα ειδικότερα στοιχεία για τους περιορισμούς κλίσεων. Τα στοιχεία αυτά θα εξεταστούν αναλυτικά σε επόμενη εργασία.

10.2.2.1 Περιορισμοί μέγιστης κατά μήκος κλίσης

Για λόγους ασφάλειας της κυκλοφορίας προβλέπονται οι μέγιστες τιμές των κατά μήκος κλίσεων που, ανάλογα με την ταχύτητα μελέτης και την κατηγορία της οδού. Σε κάθε περίπτωση οι περιορισμοί μέγιστης κλίσης μπορούν να εκφραστούν ως:

$$s_{\max} - s_j \geq 0, \quad \forall j = 0, \ldots, m \tag{10.43}$$

Σε περιοχές ισόπεδων κόμβων πρέπει να αποφεύγονται όπου είναι δυνατόν τιμές των κατά μήκος κλίσεων μεγαλύτερες από 4% για τεχνικούς και κυκλοφοριακούς λόγους. Εντός σηράγγων σε οδούς οι κατά μήκος κλίσεις δεν πρέπει να υπερβαίνουν τη τιμή 4%. Ιδιαίτερα σε σήραγγες μεγάλου μήκους, πρέπει να επιδιώκεται η τιμή της μέγιστης κατά μήκος κλίσης να είναι 2,5%. Τα στοιχεία αυτά θα συμπεριληφθούν στο πρότυπο σε επόμενη εργασία.

10.2.2.2 Περιορισμοί ελάχιστης κατά μήκος κλίσης

Για τις ελάχιστες τιμές των κατά μήκος κλίσεων ισχύει η γενική αρχή ότι πρέπει να εξασφαλίζεται η ομαλή απορροή των ομβρίων. Σε οδούς που δε διαθέτουν κράσπεδα, στις περιοχές συναρμογής των αντίρροπων επικλίσεων, πρέπει να επιλέγεται ελάχιστη κατά μήκος κλίση 0,7%, ή καλύτερα 1,0%,

ώστε να αποφεύγονται ζώνες κακής απορροής των ομβρίων. Σε κάθε περίπτωση η κατά μήκος κλίση της οδού δεν πρέπει να είναι μικρότερη από την πρόσθετη κλίση των οριογραμμών, δηλαδή τη διαφορά των κατά μήκος κλίσεων οριογραμμών και άξονα περιστροφή.

Για την πλήρη εξασφάλιση της απορροής των ομβρίων της οδού η διαφορά μεταξύ της κατά μήκος κλίσης και της πρόσθετης κλίσης των οριογραμμών πρέπει να είναι 0,2% ή καλύτερα 0,5%. Εφόσον πληρούνται οι προηγούμενοι περιορισμοί, εξασφαλίζεται ότι καμία από τις δύο οριογραμμές του οδοστρώματος δεν εμφανίζει αντίθετη κλίση από αυτή του άξονα περιστροφής της οδού. Η τιμή 0,5% είναι επιθυμητή εξαιτίας των κατασκευαστικών ανοχών του οδοστρώματος.

Σε οδούς με κράσπεδα η κατά μήκος κλίση πρέπει να είναι τουλάχιστον 0,5% στις περιοχές όπου υπάρχουν κρασπεδόρειθρα. Για αυτόν τον λόγο η κατά μήκος κλίση του άξονα της οδού στην περιοχή της προσαρμογής της επίκλισης πρέπει να είναι μεγαλύτερη κατά 0,5% από την πρόσθετη κλίση των οριογραμμών, εφόσον η απαγωγή των επιφανειακών υδάτων δεν είναι δυνατόν να εξασφαλισθεί με ιδιαίτερα αποχετευτικά μέτρα, όπως για παράδειγμα με την κατασκευή ρείθρων τριγωνικής διατομής. Σε κάθε περίπτωση ο περιορισμός ελάχιστης κλίσης διαμορφώνεται ως εξής:

$$s_j - s_{\min} \geq 0, \quad \forall j = 0, \ldots, m \tag{10.44}$$

10.2.3 Μήκος ορατότητας για στάση

Σημειώνεται ότι δεν γίνεται θεώρηση του μήκους ορατότητας για προσπέραση στην παρούσα εργασία. Οι υπολογισμοί και περιορισμοί για την εξασφάλιση του απαραίτητου μήκους ορατότητας για προσπέραση θα ακολουθήσουν σε άλλη εργασία. Οι μεταβλητές που εμφανίζονται στις σχέσεις των επόμενων εδαφίων για τον υπολογισμό του απαιτούμενου μήκους ορατότητας περιγράφονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 10.17: Ορισμός μεταβλητών για τον υπολογισμό του μήκους ορατότητας για στάση

Μεταβλητές	Περιγραφή
S_h	Απαιτούμενο μήκος ορατότητας για στάση (m)
S_δ	Μήκος που διανύεται κατά το χρόνο αντίδρασης (m)
S_τ	Μήκος που διανύεται κατά την τροχοπέδηση (m)
V_e	Ταχύτητα μελέτης (km/h)
V_{85}	Λειτουργική ταχύτητα (km/h)
t_R	Χρόνος αντίληψης-αντίδρασης (s)
s	Κατά μήκος κλίση οδού (m/m)
g	Επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s^2)
a	Επιβράδυνση πέδησης οχήματος (m/s^2)
$f_{T,\max}$	Μέγιστος επιτρεπόμενος συντελεστής εφαπτομενικής τριβής
f_R	Συντελεστής εγκάρσιας τριβής
f'	Διαθέσιμος συντελεστής εφαπτομενικής τριβής

10.2.3.1 Απαιτούμενο μήκος ορατότητας για στάση

Το ελάχιστο μήκος μιας παραβολικής καμπύλης καθορίζεται από το μήκος ορατότητας για στάση σε σχέση με την ταχύτητα μελέτης και την αλλαγή στην κατά μήκος κλίση. Οι κατακόρυφες καμπύλες πρέπει να σχεδιάζονται με τρόπο τέτοιο ώστε να εξασφαλίζεται το ελάχιστο μήκος ορατότητας.

Το μήκος ορατότητας για στάση απαρτίζεται από δύο στοιχεία. Τα στοιχεία αυτά είναι αφ' ενός το μήκος που διανύεται από τη στιγμή που γίνεται αντιληπτό ένα αντικείμενο έως τη στιγμή που ξεκινά η πέδηση, δηλαδή την απόσταση που διανύεται στον χρόνο αντίληψης-αντίδραση και αφ' ετέρου το μήκος πέδησης, δηλαδή η απόσταση που διανύεται από τη στιγμή εφαρμογής πέδησης έως ότου ακινητοποιηθεί το όχημα. Το συνολικό απαιτούμενο μήκος ορατότητας για στάση εκφράζεται σύμφωνα με την (AASHTO, 2011) ως:

$$S_h = S_\delta + S_\tau = \frac{V_e \cdot t_R}{3{,}6} + \frac{\left(V_e/3{,}6\right)^2}{2 \cdot \left(a + g \cdot s\right)} \tag{10.45}$$

Για τον υπολογισμό του απαραίτητου μήκους ορατότητας για στάση χρησιμοποιείται η λειτουργική ταχύτητα αντί της ταχύτητας μελέτης σύμφωνα με οδηγίες μελετών του ΥΠΕΧΩΔΕ (2001).

$$S_h = S_\delta + S_\tau = \frac{V_{85} \cdot t_R}{3{,}6} + \frac{\left(V_{85}/3{,}6\right)^2}{2 \cdot g \cdot \left(f_{T,\max} + s\right)} \tag{10.46}$$

Επίσης, για τον υπολογισμό του μήκους ορατότητας για στάση σε καμπύλη, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ο διαθέσιμος συντελεστής εφαπτομενικής τριβής που προκύπτει από τη σχέση:

$$f' = \sqrt{{f_T}^2 - {f_R}^2} \tag{10.47}$$

10.2.3.2 Απαιτούμενο μήκος ορατότητας για στάση σε κατακόρυφη καμπύλη

Στη σχέση υπολογισμού του μήκους ορατότητας της AASHTO (2011), η προτεινόμενη τιμή από την για τον χρόνο αντίληψης-αντίδρασης είναι 2,5 s. Αντίθετα με βάση τις οδηγίες του ΥΠΕΧΩΔΕ (2001) ο αντίστοιχος χρόνος λαμβάνεται 2,0 s με τη διαφορά ότι στον υπολογισμό χρησιμοποιείται η λειτουργική ταχύτητα αντί της ταχύτητας μελέτης.

Ο συντελεστής τριβής εξαρτάται από την ταχύτητα του οχήματος, το είδος της επιφάνειας του οδοστρώματος και την κατάστασή της, στεγνή ή βρεγμένη. Η προτεινόμενη τιμή για τον συντελεστή δίνεται επίσης από την AASHTO (2011) για διάφορες ταχύτητες σχεδιασμού. Εφ' όσον η κατά μήκος κλίση της οδού μεταβάλλεται διαρκώς κατά μήκος της κατακόρυφης παραβολικής καμπύλης, πρέπει να καθοριστεί μια κατάλληλη τιμή της κατά μήκος κλίσης για τον υπολογισμό του μήκους ορατότητας. Για την εύρεση του μήκους ορατότητας στην κατακόρυφη καμπύλη της κορυφής V_j χρησιμοποιείται η σχέση:

$$S_{h_j} = 0{,}695 \cdot V_e + \frac{V_e^2}{254 \cdot \left[f_T + \left(s_{j-1} + s_j\right)/2\right]} \quad \forall j = 1, \ldots, m \tag{10.48}$$

Το μήκος ορατότητας για στάση πρέπει να υπάρχει για λόγους ασφαλείας σε όλο το μήκος της οδού και σε όλες τις κατηγορίες των οδών.

10.2.4 Μήκος κατακόρυφης καμπύλης

Οι σχέσεις μεταξύ του ελάχιστου μήκους παραβολικής καμπύλης, του μήκους ορατότητας και της αλλαγής των κατά μήκος κλίσεων εξαρτώνται από τη διαμόρφωση της κατακόρυφης καμπύλης,

δηλαδή αν είναι κυρτή ή κοίλη και από το μήκος της καμπύλης σε σχέση με το απαιτούμενο μήκος ορατότητας. Για το μήκος κοίλων καμπυλών λαμβάνονται υπ' όψιν δύο επιπλέον περιορισμοί για άνεση επιβατών και την αισθητική της οδού. Οι σχέσεις αυτές παρουσιάζονται αναλυτικά από την AASHTO (2011). Η επεξήγηση των μεταβλητών των σχέσεων της υποενότητας αυτής γίνεται στον επόμενο πίνακα.

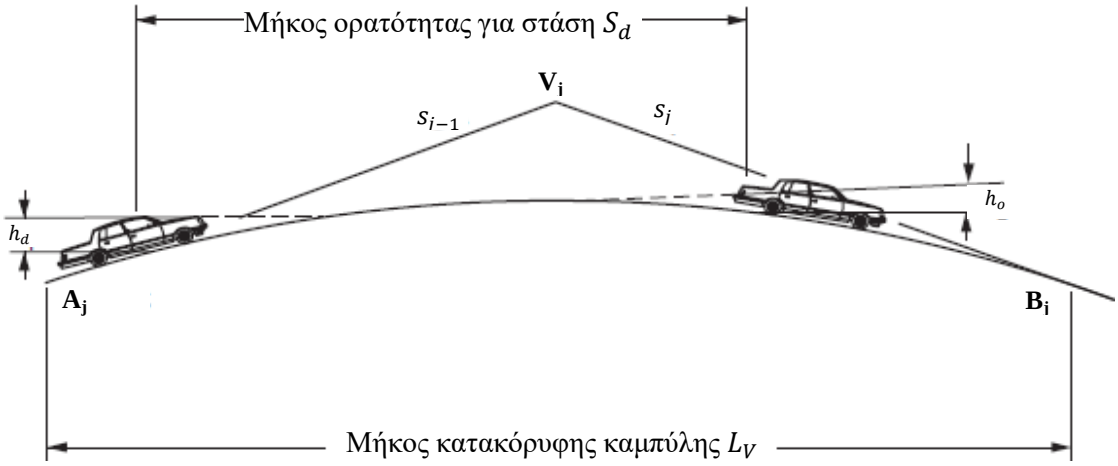
Πίνακας 10.18: Ορισμός μεταβλητών για τον υπολογισμό του μήκους ορατότητας για στάση

Μεταβλητές	Περιγραφή
S_{h_j}	Απαιτούμενο μήκος ορατότητας για στάση στην κατακόρυφη καμπύλη (m)
$L_{V,\min_j}$	Ελάχιστο μήκος κατακόρυφης καμπύλης (m)
$\Delta s_{j-1,j}$	Αλγεβρική διαφορά των κατά μήκος κλίσεων (%)
h_d	Ύψος οφθαλμών οδηγού πάνω από την επιφάνεια της οδού (m)
h_o	Ύψος αντικειμένου πάνω από την επιφάνεια της οδού (m)
V_e	Ταχύτητα μελέτης (km/h)
$T_{V,\min_j}$	Ελάχιστο μήκος εφαπτομένης κατακόρυφης καμπύλης (m)
h_{V_j}	Χιλιομετρική θέση κορυφής πολυγωνικής γραμμής μηκοτομής (m)

10.2.4.1 Ελάχιστο μήκος κυρτής καμπύλης ως προς μήκος ορατότητας για στάση

Σε κάθε θέση του οδηγού προ ή επί κυρτής καμπύλης μηκοτομής πρέπει το υπάρχον μήκος ορατότητας για στάση είναι μεγαλύτερο ή τουλάχιστον ίσο προς το απαιτούμενο μήκος ορατότητας για στάση. Διαφορετικά θα υπάρχει τμήμα της οδού με περιορισμένη ορατότητα.

Σχήμα 10.4: Μήκος ορατότητας για στάση σε κυρτή καμπύλη
(Πηγή: AASHTO, 2011, Ιδία επεξεργασία)



Για τον υπολογισμό της ελάχιστης τιμής του μήκους καμπύλης, όταν το μήκος της κυρτής καμπύλης είναι μεγαλύτερο από την ελάχιστη τιμή του μήκους ορατότητας για στάση, τότε:

$$L_{V,\min_j} = \frac{\Delta s_{j-1,j} S_{h_j}{}^2}{100\left(\sqrt{2h_d} + \sqrt{2h_o}\right)^2}, \quad \forall j = 1,\ldots,m, \text{ αν } L_{V_j} > S_{h_j} \tag{10.49}$$

$$L_{V,\min_j} = 2 \cdot S_{h_j} - \frac{200 \cdot \left(\sqrt{h_d} + \sqrt{h_o}\right)^2}{\Delta s_{j-1,j}}, \quad \forall j = 1,\ldots,m \text{, αν } L_{V_j} < S_{h_j} \tag{10.50}$$

Οι τιμές που προτείνονται από την AASHTO είναι 1,08 m για το ύψος οφθαλμών και 0,6 m για το ύψος εμποδίου. Για τις τιμές αυτές η τελική μορφή των προηγούμενων σχέσεων προκύπτει:

$$L_{V,\min_j} = \frac{\Delta s_{j-1,j} \cdot S_{h_j}{}^2}{658}, \quad \forall j = 1,\ldots,m \text{, αν } L_{V_j} > S_{h_j} \tag{10.51}$$

$$L_{V,\min_j} = 2S_{h_j} - \frac{658}{\Delta s_{j-1,j}}, \quad \forall j = 1,\ldots,m \text{, αν } L_{V_j} < S_{h_j} \tag{10.52}$$

10.2.4.2 Ελάχιστο μήκος κοίλης καμπύλης ως προς μήκος ορατότητας για στάση

Για κοίλες καμπύλες το αντίστοιχο ελάχιστο μήκος κατακόρυφης καμπύλης υπολογίζεται από τις σχέσεις:

$$L_{V,\min_j} = \frac{\Delta s_{j-1,j} \cdot S_{h_j}{}^2}{120 + 3{,}5 S_{h_j}}, \quad \forall j = 1,\ldots,m \text{, αν } L_{V_j} > S_{h_j} \text{ ή } \Delta s_{j-1,j} > \frac{120 + 3{,}5 \cdot S_{h_j}}{S_{h_j}} \tag{10.53}$$

$$L_{V,\min_j} = 2 \cdot S_{h_j} - \frac{120 + 3{,}5 \cdot S_{h_j}}{\Delta s_{j-1,j}}, \quad \forall j = 1,\ldots,m \text{, αν } L_{V_j} < S_{h_j} \text{ ή } \Delta s_{j-1,j} < \frac{120 + 3{,}5 \cdot S_{h_j}}{S_{h_j}} \tag{10.54}$$

10.2.4.3 Ελάχιστο μήκος κοίλης καμπύλης για άνεση επιβατών

Η επίδραση της αλλαγής της κατακόρυφης κατεύθυνσης στην άνεση των επιβατών είναι μεγαλύτερη στις κοίλες καμπύλες από αυτή των κυρτών καμπυλών. Αυτό συμβαίνει καθώς στην περίπτωση των κοίλων καμπυλών, τόσο η κεντρομόλος όσο και η δύναμη της βαρύτητας έχουν την ίδια φορά. Γενικά, η άνεση των επιβατών είναι ένα μέγεθος το οποίο δύσκολα μπορεί να μετρηθεί, καθώς καθοριστικό ρόλο παίζουν τα τεχνικά χαρακτηριστικά του οχήματος, όπως οι αναρτήσεις, το βάρος, τα ελαστικά και άλλοι παράγοντες. Σύμφωνα με την AASHTO (2011) ορισμένες έρευνες που έχουν γίνει για τον σκοπό αυτό έχουν οδηγήσει στο γενικό συμπέρασμα ότι εξασφαλίζεται άνεση των επιβατών σε κοίλες καμπύλες όταν η κεντρομόλος επιτάχυνση δεν ξεπερνά τα 0,3 $\mathrm{m/s^2}$. Αυτή η απαίτηση οδηγεί στην παρακάτω σχέση για το ελάχιστο μήκος κοίλης καμπύλης:

$$L_{V,\min_j} = \frac{\Delta s_{j-1,j} \cdot V_e{}^2}{395}, \quad \forall j = 1,\ldots,m \tag{10.55}$$

Κάτω από τις συνήθεις παραδοχές του σχεδιασμού η τιμή που προκύπτει από την σχέση αυτή είναι περίπου το ήμισυ της ελάχιστης τιμής μήκους καμπύλης που προκύπτει από τις απαιτήσεις ορατότητας.

10.2.4.4 Ελάχιστο μήκος κοίλης καμπύλης για οπτικά ικανοποιητική χάραξη

Για οπτικά βελτιωμένη εμφάνιση των κοίλων κατακόρυφων καμπυλών, έχει χρησιμοποιηθεί η απλοϊκή σχέση για ελάχιστο μήκος ίσο με:

$$L_{V,\min_j} = 30 \cdot \Delta s_{j-1,j}, \quad \forall j = 1,\ldots,m \tag{10.56}$$

Σε σχέση με τις απαιτήσεις ορατότητας αυτή η σχέση αντιστοιχεί στον υπολογισμό ελάχιστου μήκους καμπύλης για ταχύτητα μελέτης 80 km/h. Είναι προφανές ότι οι απαιτήσεις σχεδιασμού είναι διαφορετικές για κυρτές και κοίλες κατακόρυφες καμπύλες. Οι απαιτήσεις για το απαιτούμενο μήκος ορατότητας αποτελούν το πιο λογικό κριτήριο για τον καθορισμό του ελάχιστου μήκους κοίλης καμπύλης. Τουλάχιστον τέσσερα διαφορετικά κριτήρια για τον καθορισμό του ελάχιστου μήκους κοίλης καμπύλης έχουν χρησιμοποιηθεί. Αυτά αφορούν το μήκος ορατότητας, την άνεση των επιβατών, την απορροή υδάτων από την επιφάνεια της οδού και την οπτική εμφάνιση της χάραξης.

10.2.4.5 Ελάχιστο μήκος κατακόρυφης καμπύλης με βάση την πρακτική

Σύμφωνα με τις οδηγίες γεωμετρικού σχεδιασμού της AASHTO (2011), αρκετές υπηρεσίες κάνουν διάκριση του ελάχιστου μήκους των κατακόρυφων καμπυλών. Έτσι, με βάση την εφαρμοζόμενη πρακτική προτείνονται οι τιμές:

$$L_{V,\min_j} = 0{,}6 \cdot V_e, \quad \forall j = 1, \ldots, m \tag{10.57}$$

Ο περιορισμός αυτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί προαιρετικά σε περίπτωση που δεν έχει επιλεγεί η χρησιμοποίηση άλλων περιορισμών.

10.2.4.6 Ελάχιστο μήκος κατακόρυφης καμπύλης για αποφυγή οπτικών θλάσεων

Σύμφωνα με τις οδηγίες χαράξεων του ΥΠΕΧΩΔΕ (2001) προκειμένου να αποφευχθεί τα φαινόμενο θλάσεων στη χάραξη, στις περιπτώσεις ύπαρξης πολύ μικρών κλίσεων σε περιοχές κυρτών και κοίλων καμπύλων, θα πρέπει το μήκος της εφαπτόμενης της κατακόρυφης καμπύλης να λαμβάνει τιμές τουλάχιστον ίσες προς την ταχύτητα μελέτης.

$$T_{V,\min_j} = V_e, \quad \forall j = 1, \ldots, m \tag{10.58}$$

Λόγω συμμετρίας των παραβολικών καμπυλών επομένως θα ισχύει:

$$L_{V,\min_j} = 2 \cdot V_e, \quad \forall j = 1, \ldots, m \tag{10.59}$$

Βέβαια, το μέγεθος των πολύ μικρών κλίσεων δεν έχει προσδιοριστεί ποσοτικά και για το λόγο αυτό δεν λαμβάνεται υπ' όψιν ο περιορισμός αυτός στο υπό ανάπτυξη πρότυπο. Ο περιορισμός θα συμπεριληφθεί σε επόμενη εργασία.

10.2.4.7 Περιορισμοί ελάχιστου μήκους κατακόρυφης καμπύλης

Το ελάχιστο απαιτούμενο μήκος της κατακόρυφης καμπύλης μπορεί να υπολογιστεί με βάση τις προηγούμενες σχέσεις. Οι τιμές των μηκών αντιμετωπίζονται ως περιορισμοί στην προσαρμογή παραβολικών καμπυλών στο σύνολο των σημείων ελέγχου. Οι περιορισμοί ελάχιστου μήκους κατακόρυφης καμπύλης διαμορφώνονται ως εξής:

$$L_{V_j} - L_{V,\min_j} \geq 0, \forall j = 1, \ldots, m \tag{10.60}$$

Η σχέση αυτή περιορίζει το μήκος της κατακόρυφης καμπύλης σε κάθε σημείο ελέγχου να είναι μεγαλύτερο ή ίσο από το ελάχιστο απαιτούμενο. Βέβαια, αυτό δεν αποτελεί τον πιο κρίσιμο περιορισμό. Ο σημαντικότερος περιορισμός παραμένει αυτός της συνέχειας.

10.2.5 Παράμετρος κατακόρυφης καμπύλης

Η παράμετρος κάθε παραβολικής καμπύλης, δηλαδή η ακτίνα καμπυλότητας στο σημείο αλλαγής προσήμου κατά μήκος κλίσης αποτελεί μεταβλητή απόφασης του προτύπου βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων.

10.2.5.1 Περιορισμοί διαστήματος αναζήτησης παραμέτρων κατακόρυφης καμπύλης

Οι τιμές των παραμέτρων περιορίζονται από τιμές που εισάγει ο χρήστης ώστε το διάστημα αναζήτησης να μην είναι πολύ μεγάλο. Κατά συνέπεια, διαμορφώνονται οι παρακάτω περιορισμοί:

$$H_{\min} \le \left|H_j\right| \le H_{\max}, \quad \forall j = 1,\ldots,m \tag{10.61}$$

Η περιγραφή των μεταβλητών των δύο περιορισμών γίνεται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 10.19: Μεταβλητές περιορισμών διαστήματος αναζήτησης παραμέτρων παραβολών

Μεταβλητές	Περιγραφή
H_j	Παράμετρος παραβολικής καμπύλης (m)
$H_{\max}$	Μέγιστη τιμή διαστήματος αναζήτησης παραμέτρου παραβολικής καμπύλης (m)
$H_{\min}$	Ελάχιστη τιμή διαστήματος αναζήτησης παραμέτρου παραβολικής καμπύλης (m)

Η ελάχιστη τιμή του διαστήματος αναζήτησης που θα εισάγει ο χρήστης μπορεί να είναι μεγαλύτερη ή ίση του μηδενός αν και ως γνωστόν το πρόσημο της παραμέτρου είναι αρνητικό για κυρτές καμπύλες. Αυτό γίνεται στη συνέχεια μέσω άλλων υπολογισμών, όπου η παράμετρος των παραβολικών καμπυλών λαμβάνει αρνητικό πρόσημο για κυρτές καμπύλες.

10.2.5.2 Περιορισμοί ακτινών διαδοχικών κατακόρυφων καμπυλών για αρμονία

Σύμφωνα με την FGSV (2011) για λόγους αρμονίας της κατακόρυφης χάραξης σε αυτοκινητοδρόμους η ελάχιστη τιμή της ακτίνας καμπυλότητας κοίλων καμπυλών πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το ήμισυ της ακτίνας των εκατέρωθεν κυρτών καμπυλών. Δηλαδή:

$$\frac{\left|H_{j+1}\right|}{H_j} \le 2 \text{ και } \frac{\left|H_{j-1}\right|}{H_j} \le 2, \quad \forall j = 1,\ldots,m, \text{ αν } H_j > 0, H_{j-1} < 0, H_{j+1} < 0 \tag{10.62}$$

Ο περιορισμός αυτός είναι αρκετά απλουστευτικός και μπορεί να προκύπτει από άλλα κριτήρια. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί αναλόγως σε κάθε περίπτωση.

10.2.5.3 Ελάχιστη ακτίνα καμπυλότητας κατακόρυφης καμπύλης

Οι τιμές των ελάχιστων ακτινών καμπυλότητας με βάση το απαιτούμενο μήκος ορατότητας εξασφαλίζονται μέσω των περιορισμών του μήκους των κατακόρυφων καμπυλών που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Σε κάθε περίπτωση, θα μπορεί να γίνεται έλεγχος της ελάχιστης τιμής ακτίνας του τόξου στρογγύλευσης που προκύπτει με βάση το μήκος ορατότητας για στάση, με τις ελάχιστες τιμές ακτινών καμπύλων μηκοτομής που δίνονται από τους πίνακες των προδιαγραφών. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να ισχύει:

$$\left|H_j\right| - \left|H_{\min_j}\right| \ge 0, \quad \forall j = 1,\ldots,m \tag{10.63}$$

10.2.6 Κατασκευαστικοί περιορισμοί

Οι περιορισμοί αυτοί αναφέρονται στο μέγιστο και ελάχιστο ύψος πρανούς που μπορεί να επιτευχθεί κατασκευαστικά και λαμβάνεται ως δεδομένο εισόδου από τον χρήστη. Οι υπολογισμοί γίνονται σε κάθε σημείο πύκνωσης ξεχωριστά.

Πίνακας 10.20: Μεταβλητές για την περιγραφή των κατασκευαστικών περιορισμών

Μεταβλητές	Περιγραφή
z_{r_k}	Υψόμετρο ερυθράς οδού στο σημείο πύκνωσης $\mathbf{P}_k$ (m)
z_{g_k}	Υψόμετρο εδάφους στο σημείο πύκνωσης $\mathbf{P}_k$ (m)
$\Delta z_{f,\max}$	Μέγιστο ύψος επιχώματος (m)
$\Delta z_{f,\min}$	Ελάχιστο ύψος επιχώματος (m)
$\Delta z_{c,\max}$	Μέγιστο βάθος εκσκαφής (m)
$\Delta z_{c,\min}$	Ελάχιστο βάθος εκσκαφής (m)

10.2.6.1 Μέγιστο ύψος επιχώματος

Το μέγιστο ύψος που μπορεί να έχει ένα επίχωμα εξαρτάται τόσο από τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των υλικών κατασκευής του όσο και από οικονομικά και περιβαλλοντικά δεδομένα, καθώς σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να κριθεί ασύμφορη η κατασκευή τους και να προτιμηθεί η κατασκευή γεφυρών. Η ενσωμάτωση της δυνατότητας συμπερίληψης γεφυρών και άλλων τεχνικών έργων στο πρότυπο βελτιστοποίησης χάραξης θα γίνει σε επόμενη εργασία. Ο περιορισμός μέγιστου ύψους επιχώματος παρουσιάζεται στην επόμενη σχέση:

$$z_{r_k} - z_{g_k} \le \Delta z_{f,\max}, \quad \forall k = 1,\ldots,p, \text{ αν } z_{r_k} > z_{g_k} \tag{10.64}$$

10.2.6.2 Ελάχιστο ύψος επιχώματος

Η τιμή του ελάχιστου εφικτού κατασκευαστικά ύψους επιχώματος εισάγεται από τον χρήστη. Το μέγεθος αυτό είναι συνήθως τάξης μερικών δεκάδων εκατοστών. Ο περιορισμός διαμορφώνεται ως εξής:

$$z_{r_k} - z_{g_k} \ge \Delta z_{f,\min}, \quad \forall k = 1,\ldots,p, \text{ αν } z_{r_k} > z_{g_k} \tag{10.65}$$

10.2.6.3 Μέγιστο βάθος εκσκαφής

Το μέγιστο βάθος εκσκαφής εξαρτάται τόσο από τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του εδάφους της περιοχής μελέτης του όσο και από οικονομικά και περιβαλλοντικά δεδομένα, καθώς σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να κριθεί ασύμφορη η εκσκαφή σε μεγάλα βάθη τους και να προτιμηθεί η κατασκευή σηράγγων. Η ενσωμάτωση της δυνατότητας συμπερίληψης σηράγγων και άλλων τεχνικών έργων στο πρότυπο βελτιστοποίησης χάραξης θα γίνει σε επόμενη εργασία. Ο περιορισμός μέγιστου βάθους εκσκαφής δίνεται στην παρακάτω σχέση:

$$z_{g_k} - z_{r_k} \le \Delta z_{c,\max}, \quad \forall k = 1,\ldots,p, \text{ αν } z_{g_k} > z_{r_k} \tag{10.66}$$

10.2.6.4 Ελάχιστο βάθος εκσκαφής

Η τιμή του ελάχιστου εφικτού κατασκευαστικά βάθους εκσκαφής εισάγεται από τον χρήστη. Το μέγεθος αυτό είναι συνήθως τάξης μερικών δεκάδων εκατοστών. Ο περιορισμός διαμορφώνεται ως εξής:

$$z_{g_k} - z_{r_k} \ge \Delta z_{c,\min}, \quad \forall k = 1,\ldots,p, \text{ αν } z_{g_k} > z_{r_k} \tag{10.67}$$

10.3 Συνδυασμός οριζοντιογραφίας και μηκοτομής

Πρέπει να δίδεται προσοχή στον κατάλληλο συνδυασμό των στοιχείων μελέτης της μηκοτομής με εκείνα της οριζοντιογραφίας, έτσι ώστε να πληρούνται οι κανόνες χάραξης της οδού στο χώρο. Στην ενότητα αυτή περιγράφονται ορισμένοι περιορισμοί που προκύπτουν από τις απαιτήσεις σχεδιασμού. Οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στους περιορισμούς αυτούς περιγράφονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 10.21: Μεταβλητές χιλιομετρικών θέσεων χαρακτηριστικών σημείων οριζοντιογραφίας

Μεταβλητές	Περιγραφή
$L_{\max}$	Μέγιστο μήκος ευθυγραμμίας σταθερής κλίσης (m)
V_e	Ταχύτητα μελέτης (km/h)
h_{Λ_i}	Χιλιομετρική θέση σημείου αρχής $\mathbf{\Lambda}_i$ τόξου συναρμογής εισόδου (m)
$h_{\Lambda'_i}$	Χιλιομετρική θέση σημείου $\mathbf{\Lambda}'_i$ τόξου συναρμογής εξόδου (m)
h_{Ψ_i}	Χιλιομετρική θέση μέσου $\mathbf{\Psi}_i$ κυκλικού τόξου (m)
h_{A_j}	Χιλιομετρική θέση αρχής $\mathbf{A}_j$ της κατακόρυφης καμπύλης (m)
h_{B_j}	Χιλιομετρική θέση τέλους $\mathbf{B}_j$ της κατακόρυφης καμπύλης (m)
h_{Σ_j}	Χιλιομετρική θέση σημείου αλλαγής κλίσης $\mathbf{\Sigma}_j$ της κατακόρυφης καμπύλης (m)
h_{U_j}	Χιλιομετρική θέση μέσου $\mathbf{U}_j$ της κατακόρυφης καμπύλης (m)
H_j	Παράμετρος παραβολικής καμπύλης (m)
R_i	Ακτίνα κυκλικού τόξου οριζοντιογραφικής καμπύλης (m)

10.3.1 Μέγιστο μήκος ευθυγραμμίας σταθερής κλίσης

Στις οδηγίες οδικών χαράξεων του ΥΠΕΧΩΔΕ (2001) καθορίζεται ότι το μήκος των ευθυγραμμιών με σταθερή κατά μήκος κλίση, σε υπεραστικές οδούς, δεν πρέπει να υπερβαίνει το μήκος που προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$L_{\max} = 20 \cdot V_e \tag{10.68}$$

Αυτή η σχέση τροποποιήθηκε από τις πιο πρόσφατες γερμανικές οδηγίες σχεδιασμού υπεραστικών οδών της FGSV(2012) και τέθηκε γενικά το παρακάτω όριο:

$$L_{\max} = 1500\,\mathrm{m} \tag{10.69}$$

Επίσης, για κατηγορίες αυτοκινητοδρόμων το μέγιστο μήκος ευθυγραμμίας σταθερής κλίσης είναι σύμφωνα με την FGSV (2011):

$$L_{\max} = 2000\ \mathrm{m} \tag{10.70}$$

10.3.2 Θέση κατακόρυφων και οριζοντιογραφικών καμπυλών

Σύμφωνα με τις αρχές τις χάραξης της οδού στον χώρο, οι καμπύλες της μηκοτομής πρέπει να περιέχονται στις καμπύλες της οριζοντιογραφίας. Με τον τρόπο αυτό βελτιώνεται η τρισδιάστατη εικόνα στα κοιλώματα, γιατί μειώνεται ο βαθμός αλλαγής κατεύθυνσης στον χώρο και επίσης

βελτιώνεται η ασφάλεια στα κυρτώματα, με τη βελτίωση της αντίληψης της κατεύθυνσης της οριζοντιογραφικής καμπύλης πριν χαθεί η εικόνα της οδού εξαιτίας του κυρτώματος.

$$h_{\Lambda_i'} - h_{B_j} \geq 0, \quad \forall j = 1,\ldots,m \text{, αν } h_{A_j} \geq h_{\Lambda_i} \text{ και } h_{A_j} < h_{\Lambda_i'} \text{ ή} \tag{10.71}$$

$$h_{\Lambda_{i+1}} - h_{B_j} \geq 0, \quad \forall j = 1,\ldots,m \text{, αν } h_{A_j} \geq h_{\Lambda_i'} \text{ και } h_{A_j} < h_{\Lambda_{i+1}} \tag{10.72}$$

10.3.3 Σύμπτωση σημείων καμπής

Με τη σύμπτωση των σημείων καμπής στην οριζοντιογραφία και τη μηκοτομή προκύπτει μια επιτυχημένη τρισδιάστατη χάραξη της οδού στον χώρο που αντιστοιχεί με αρμονικές μορφές που υπάρχουν στο φυσικό εδαφικό ανάγλυφο. Για ίδιο αριθμό οριζοντιογραφικών και κατακόρυφων καμπυλών, η σχέση μπορεί να εκφραστεί ως:

$$h_{A_j} = h_{\Lambda_i} \text{ και } h_{B_j} = h_{\Lambda_i'}, \quad \forall j = 1,\ldots,m \text{, αν } n = m \text{ και } i = j \text{ ή} \tag{10.73}$$

10.3.4 Σύμπτωση σημείων τομής εφαπτομένων

Για την πιο συνηθισμένη περίπτωση όμως όπου ο αριθμός των κατακόρυφων καμπυλών είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των οριζοντιογραφικών καμπυλών και μπορεί να παραληφθεί μια φάση, τότε αναφέρεται ότι η χάραξη θεωρείται και πάλι επιτυχημένη όταν τα σημεία τομής των εφαπτομένων στις καμπύλες της οριζοντιογραφίας και της μηκοτομής βρίσκονται κατά το δυνατόν κοντά το ένα στο άλλο, και τα υπεράριθμα είναι ανάμεσά τους. Επισημαίνεται ότι για να θεωρηθεί ότι συμπίπτουν επαρκώς οι κορυφές στην οριζοντιογραφία και τη μηκοτομή μιας χάραξης, αρκεί να απέχουν λιγότερο από το ένα τέταρτο του μήκους της φάσης. Ως μήκος φάσης λαμβάνεται το μήκος της κατακόρυφης καμπύλης. Για μεγαλύτερη ακρίβεια στον παραπάνω περιορισμό γίνεται θεώρηση του ακρότατου σημείου κάθε οριζοντιογραφικής καμπύλης, δηλαδή του μέσου του κυκλικού τόξου καθώς και του σημείου αλλαγής κλίσης της κατακόρυφης καμπύλης αν υπάρχει:

$$\left|h_{\Psi_i} - h_{\Sigma_j}\right| \leq \frac{1}{4} \cdot L_{V_j}, \quad \forall j = 1,\ldots,m \text{, αν } h_{A_j} \geq h_{\Lambda_i},\ h_{B_j} \leq h_{\Lambda_i'} \text{ και } s_{j-1}/s_j < 0 \text{ ή} \tag{10.74}$$

$$\left|h_{\Psi_i} - h_{U_j}\right| \leq \frac{1}{4} \cdot L_{V_j}, \quad \forall j = 1,\ldots,m \text{, αν } h_{A_j} \geq h_{\Lambda_i},\ h_{B_j} \leq h_{\Lambda_i'} \text{ και } s_{j-1}/s_j > 0 \tag{10.75}$$

10.3.5 Προοπτική παραμόρφωση

Κατά την επαλληλία οριζοντιογραφικών και κατακόρυφων καμπυλών, για την αποφυγή των φαινομένων προοπτικής παραμόρφωσης που παραπλανούν τους οδηγούς προτείνεται από έναν εμπειρικό κανόνα η παράμετρος της παραβολικής καμπύλης να υπερβαίνει το δεκαπλάσιο της ακτίνας της οριζοντιογραφικής καμπύλης. Δηλαδή:

$$\frac{\left|H_j\right|}{R_i} \geq 10, \quad \forall j = 1,\ldots,m \text{, αν } h_{A_j} \geq h_{\Lambda_i} \text{ και } h_{B_j} \leq h_{\Lambda_i'} \tag{10.76}$$

ΜΕΡΟΣ Δ’: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

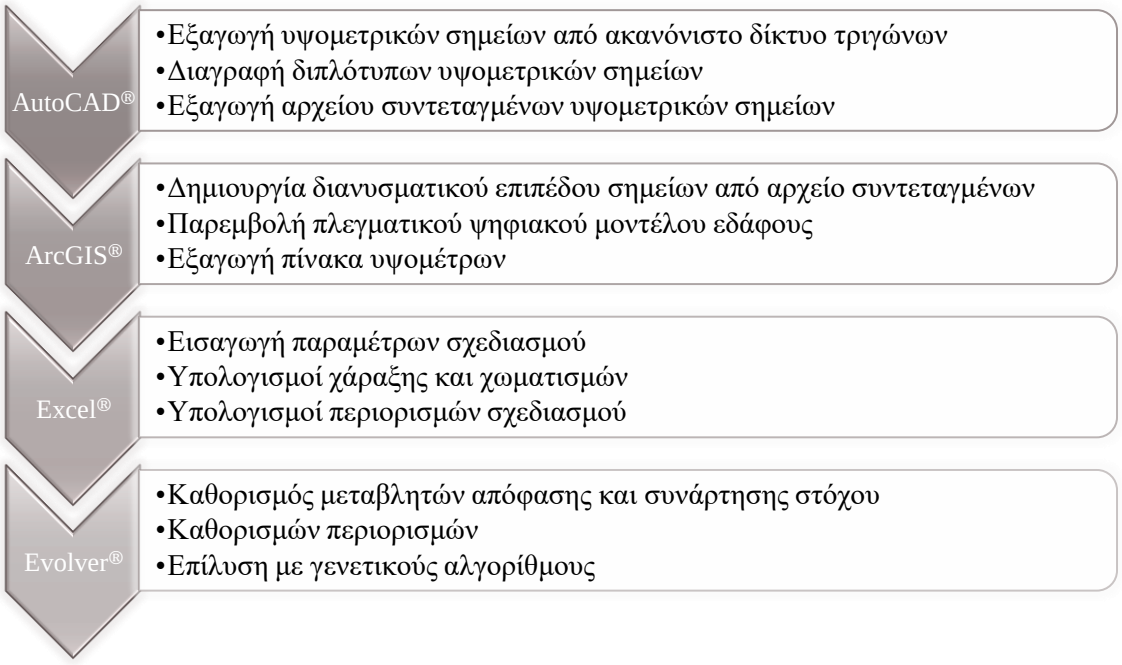
11 Δεδομένα και Λογισμικό

Στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι να επιτρέψει στον αναγνώστη να σχηματίσει μία πλήρη εικόνα τόσο για τα στοιχεία, στα οποία στηρίχθηκε η εφαρμογή, όσο και για την ποιότητά τους. Το κεφάλαιο επίσης περιλαμβάνει την παρουσίαση των διαδικασιών επεξεργασίας των στοιχείων. Τέλος, δίνονται ορισμένες τεχνικές λεπτομέρειες και στοιχεία των διαφόρων λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν.

11.1 Γενικά

Οι βασικές λειτουργίες των διαφόρων πακέτων λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν συνοψίζονται στο επόμενο σχήμα. Οι διαδικασίες που εκτελέστηκαν για την μετατροπή του ψηφιακού μοντέλου εδάφους από διανυσματική σε πλεγματική μορφή έγιναν χρησιμοποιώντας ειδικά εργαλεία του AutoCAD και του ArcGIS, ενώ η διαμόρφωση του προτύπου βελτιστοποίησης και η επίλυση έγιναν με τη βοήθεια των Excel και Evolver.

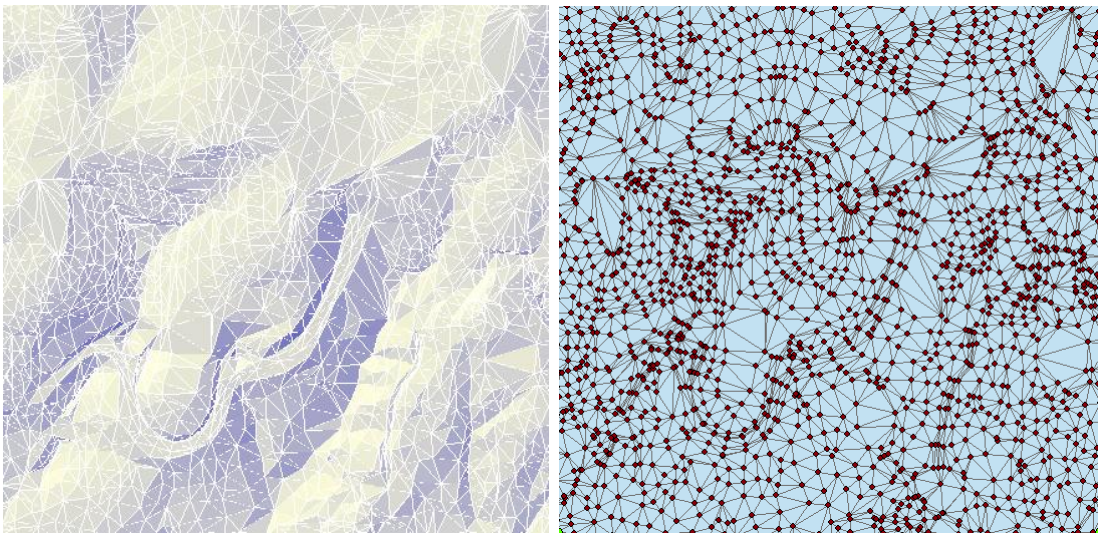
Σχήμα 11.1: Διαδικασίες που εκτελέστηκαν ανά λογισμικό πακέτο



11.2 Επεξεργασία στο AutoCAD

Για τη μετατροπή του ψηφιακού μοντέλου εδάφους χρησιμοποιήθηκε αρχικά το λογισμικό AutoCAD® Civil 3D 2015, καθώς το αρχείο του διαθέσιμο μοντέλο εδάφους ήταν μορφής .dwg. Με την ειδική εξωτερική ρουτίνα «3DF_to_3DPoints» τύπου «LISP» μετατράπηκαν οι κορυφές των ακανόνιστων τρίγωνων «3D Faces» σε τρισδιάστατα σημεία «3D Points». Στη συνέχεια με την εντολή «Kill» και τον καθορισμό μιας πολύ μικρής ακτίνας της τάξης μερικών εκατοστών αφαιρέθηκαν όλα τα διπλότυπα σημεία. Τελικώς, τα σημεία εξήχθησαν σε μορφή αρχείου κειμένου .csv μέσω της επιλογής «Data Extraction».

Σχήμα 11.2: Εξαγωγή κορυφών δικτύου ακανόνιστων τριγώνων



11.3 Επεξεργασία στο ArcGIS

Το αρχείο .csv που περιείχε τα σημεία στη συνέχεια εισήχθη στο ArcMap® 10.1 αφού δημιουργήθηκε η γεωβάση στην οποία θα αποθηκεύονταν όλα τα αρχεία. Εκεί αρχικά δημιουργήθηκε το επίπεδο σημείων και στη συνέχεια με την πρόσθετη εργαλειοθήκη «3D Analyst Tools», επιλέχθηκε το εργαλείο παρεμβολής κανονικοποιημένων επιφανειών «Raster Interpolation» με τη μέθοδο «Spline». Για την εφαρμογή της μεθόδου αρχικά εισήχθη το επίπεδο που περιείχε τα σημεία και επιλέχθηκε η στήλη που περιείχε τα υψομετρικά δεδομένα. Χρησιμοποιήθηκαν οι προεπιλογές για ομαλοποιημένη «Regularized» επιφάνεια παρεμβολής 12 σημείων, ενώ επιλέχθηκε μέγεθος τετραγωνικού φατνίου 2m. Αφού δημιουργήθηκε η επιφάνεια παρεμβολής χρησιμοποιήθηκε η εργαλειοθήκη μετατροπής δεδομένων «Conversion Tools» από την κανονικοποιημένη επιφάνεια «From Raster» σε αρχείο κειμένου «Raster to ASCII».

11.3.1 Χωρική παρεμβολή

Δεν υφίσταται ο αλγόριθμος παρεμβολής που να υπερέχει σαφώς από όλους τους υπόλοιπους για όλες τις εφαρμογές. Τα πιο σημαντικά κριτήρια για την επιλογή μιας μεθόδου παρεμβολής βασίζονται στο βαθμό κατά τον οποίο μπορούν να ληφθούν υπόψη δομικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας του ανάγλυφου και η δυνατότητα της συνάρτησης παρεμβολής να ενσωματώνει επιφάνειες με διάφορα χαρακτηριστικά. Η ποιότητα της επιφάνειας παρεμβολής καθορίζεται από την κατανομή και την ακρίβεια των αρχικών δεδομένων και την καταλληλότητα της χρησιμοποιούμενης μεθόδου παρεμβολής σε σχέση με τη συμπεριφορά του φαινομένου που μελετάται. Το λογισμικό ArcGIS δίνει τη δυνατότητα παρεμβολής επιφανειών με τις παρακάτω μεθόδους

- «Inverse Distance Weight». Κατά τη μέθοδο αυτή η τιμή ενός φατνίου προέρχεται από το σταθμισμένο μέσο των σημείων εντός μιας καθορισμένη ακτίνας ή ενός μέγιστου αριθμού σημείων της τοπικής γειτονιάς του φατνίου. Οι τιμές των σημείων σταθμίζονται βάσει ενός βάρους αντιστρόφως ανάλογου της απόστασης κάθε σημείου από το φατνίο. Το σύνολο των σημείων πρέπει να είναι αρκετά πυκνό ώστε να περιλαμβάνει το εύρος της μεταβλητότητας που χρειάζεται για την αναπαράσταση. Η παρεμβολή αυτή μπορεί να δώσει μη αναμενόμενα αποτελέσματα σε περιοχές με κορυφές και κοιλότητες (Longley, Goodchild, Maguire, & Rhind, 2010).

- «Natural Neighbor». Η μέθοδος αυτή είναι παρόμοια με τη μέθοδο IDW με τη διαφορά ότι τα βάρη με τα οποία συμμετέχουν τα γειτονικά σημεία καθορίζονται με βάση την έκταση των πολυγώνων που δημιουργούνται από το διάγραμμα Voronoi. Εμφανίζει παρόμοια προβλήματα με τη μέθοδο IDW ως προς το εύρος του δείγματος και τα ακρότατα. Βέβαια, η επιφάνεια παρεμβολής που δημιουργείται διέρχεται από τα σημεία του δείγματος και είναι λεία σε όλη την έκτασή της εκτός από τις περιοχές όπου βρίσκονται τα σημεία.

- «Spline». Με τη μέθοδο αυτή παρεμβάλλεται μια μαθηματική συνάρτηση αυτής της μορφής η οποία ελαχιστοποιεί τη συνολική καμπυλότητα της επιφάνειας. Έτσι δημιουργείται μια ομαλοποιημένη επιφάνεια η οποία διέρχεται από τα σημεία του δείγματος. Σε αντίθεση με τις δύο προηγούμενες μεθόδους, με τη μέθοδο Spline αυτή γίνεται πρόβλεψη για ακρότατα σε κορυφογραμμές και κοιλάδες.

- «Kriging». Αποτελεί προχωρημένη διαδικασία γεωστατιστικής με την οποία παράγεται μια επιφάνεια με βάση ένα σύνολο διασκορπισμένων υψομετρικών σημείων. Με τη μέθοδο αυτή γίνεται η υπόθεση ότι η απόσταση ή η κατεύθυνση μεταξύ των σημείων του δείγματος εμπεριέχουν μια χωρική συσχέτιση η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επεξήγηση της μεταβλητότητας της επιφάνειας. Προσαρμόζει μια συνάρτηση σε ένα συγκεκριμένο αριθμό σημείων ή στο σύνολο των σημείων εντός μιας καθορισμένης ή κυμαινόμενης ακτίνας για τον καθορισμό της τιμής εξόδου κάθε φατνίου. Οι τιμές μπορεί να υπερβαίνουν το εύρος τιμών του δείγματος και η επιφάνεια που παράγεται δεν περνά από τα σημεία του δείγματος. Είναι κυρίως κατάλληλο όταν είναι γνωστή μια χωρική συσχέτιση ή μεροληψία του δείγματος και βρίσκει εφαρμογές σε διάφορες επιστήμες όπως η γεωλογία.

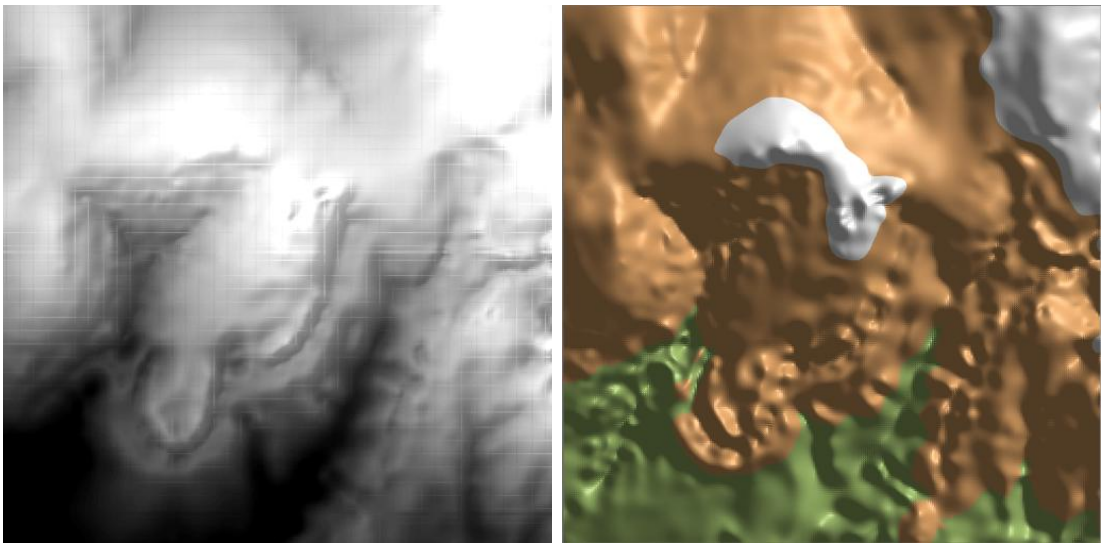
- «Topo to Raster». Η μέθοδος αυτή επιβάλλει περιορισμούς κατά την παρεμβολή που εξασφαλίζουν την παραγωγή ενός υδρολογικά ορθού πλεγματικού μοντέλου εδάφους που εμπεριέχει συνδεδεμένο υδρολογικό δίκτυο και προβλέπει κορυφογραμμές και κοιλώματα. Χρησιμοποιεί μια επαναληπτική τεχνική παρεμβολής πεπερασμένων διαφορών, η οποία βελτιστοποιεί την απόδοση της τοπικής παρεμβολής χωρίς δημιουργούνται ασυνέχειες στο σύνολο της επιφάνειας. Σχεδιάστηκε ώστε να δέχεται ως δεδομένα εισόδου ισοϋψείς γραμμές.

- «Trend». Είναι μια στατιστική μέθοδος που βρίσκει την επιφάνεια που προσαρμόζεται καλύτερα στα σημεία με βάση τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Για την παρεμβολή χρησιμοποιεί μόνο μία πολυωνυμική εξίσωση για ολόκληρη την επιφάνεια, ώστε οι διαφορές μεταξύ των πραγματικών και των υπολογιζόμενων υψομέτρων να είναι κατά το δυνατόν μικρότερες. Δεν αποτελεί ακριβή μέθοδο καθώς η προκύπτουσα επιφάνεια σπανίως περνά από τα αρχικά σημεία.

Όπως φαίνεται με βάση την παραπάνω ανάλυση αλλά και με βάση την πρακτική για την παρεμβολή επιφανειών υψομέτρου εδάφους χρησιμοποιούνται ευρέως όλες οι παραπάνω μέθοδοι ανάλογα με τις ανάγκες των προβλημάτων εκτός της μεθόδου Trend η οποία χρησιμοποιείται για την ανάλυση άλλων φαινομένων. Σημειώνεται, ότι οι μέθοδοι IDW και Kriging επιτρέπουν και τη χρήση οριογραμμών απότομων αλλαγών κλίσης. Σε συγκριτική ανάλυση των μεθόδων παρεμβολής, ο Arun (2013) διαπίστωσε την υπεροχή της μεθόδου Kriging ως προς την ακρίβεια της τελικής επιφάνειας σε σχέση

με τις υπόλοιπες, εξετάζοντας δείγματα τόσο σε περιοχές με ήπιες κλίσεις, όσο και σε περιοχές με εντονότερο ανάγλυφο. Παρ' όλα αυτά, λόγω του μεγάλου χρόνου υπολογισμού που απαιτεί η μέθοδος, καθώς επίσης και του γεγονότος ότι στην παρούσα φάση ο όγκος χωματισμών υπολογίζεται με απλοποιημένο τρόπο, επιλέχθηκε τελικώς να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος παρεμβολής Spline.

Σχήμα 11.3: Απεικονίσεις πλεγματικών δεδομένων παρεμβολής



11.4 Επεξεργασία στο Excel

Το αρχείο κειμένου το οποίο προέκυψε από την προηγούμενη επεξεργασία ενσωματώθηκε στο βιβλίο εργασίας του Excel που δημιουργήθηκε για την ανάπτυξη της εφαρμογής. Στο βιβλίο εργασίας που δημιουργήθηκε εκτός του υπολογιστικού φύλλου που περιέχει τον πίνακα υψομέτρων δημιουργήθηκαν άλλα δύο υπολογιστικά φύλλα. Στο πρώτο ο χρήστης έχει την δυνατότητα να εισάγει όλες τις παραμέτρους σχεδιασμού, ενώ στο δεύτερο έχουν καθοριστεί όλες οι σχέσεις για τον υπολογισμό της χάραξης σε οριζοντιογραφία και μηκοτομή καθώς και τον υπολογισμό των όγκων χωματισμών και της συνάρτησης στόχου. Οι παράμετροι και οι σχέσεις που χρησιμοποιούνται περιγράφονται στα δύο προηγούμενα κεφάλαια.

11.5 Τεχνικά στοιχεία ψηφιακού μοντέλου εδάφους

Το αρχικό ψηφιακό μοντέλο εδάφους, του οποίου η επεξεργασία έγινε στην παρούσα εργασία ήταν διανυσματικής μορφής. Συγκεκριμένα αποτελείτο από ένα δίκτυο ακανόνιστων τριγώνων και το μόνο γνωστό στοιχείο ήταν ότι χρησιμοποιήθηκε στο στάδιο προμελέτης μιας οδού, χωρίς να δίνονται στοιχεία της κλίμακας και της ακρίβειάς του.

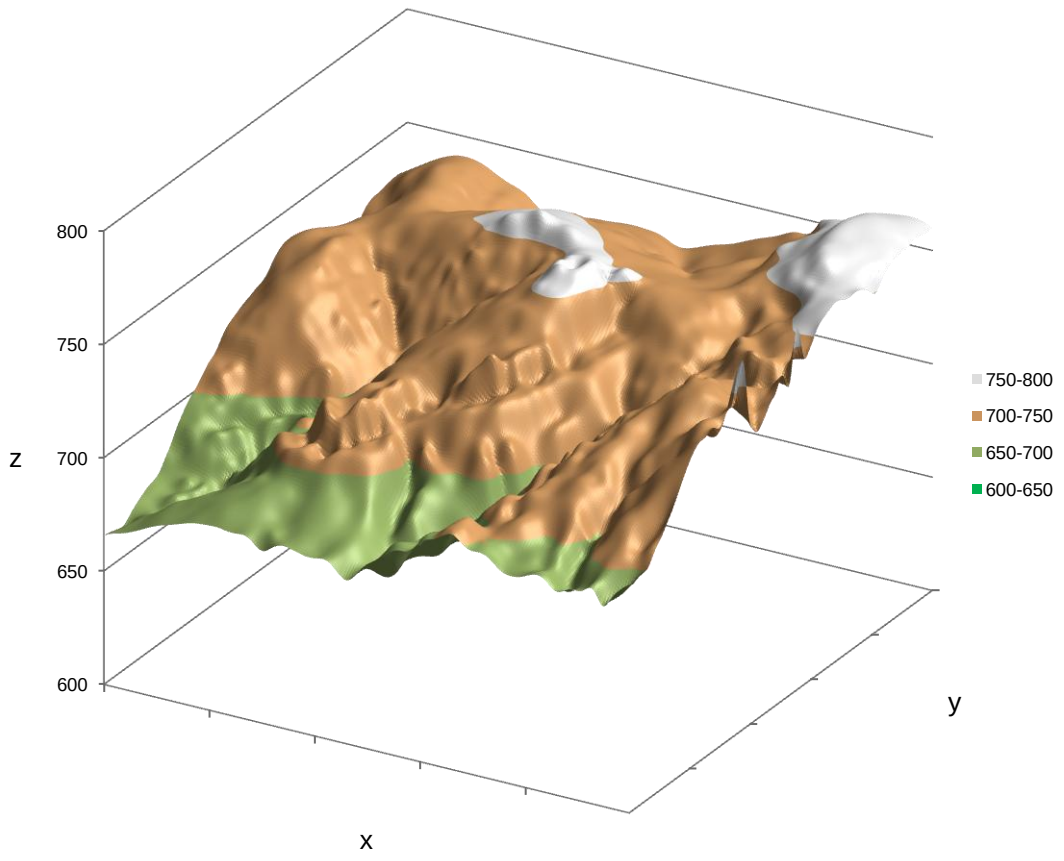
Με βάση την ισοδιάσταση 4m του αρχικού ψηφιακού μοντέλου εδάφους θεωρήθηκε ότι αυτό αναφέρεται σε κλίμακα εκτύπωσης 1:5000 καθώς πρόκειται για περιοχή με έντονο ανάγλυφο. Κατά συνέπεια, η αβεβαιότητα εντός της οποίας ορίζονται οι κορυφές των τριγώνων είναι της τάξης των 1,25m κατά την οριζοντιογραφία. Οι υποθέσεις αυτές έγιναν με βάση τις απαιτήσεις ακρίβειας που αναφέρονται στους Λάμπρου & Πανταζής (2010). Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται τα τεχνικά στοιχεία του τελικού μοντέλου εδάφους πλεγματικής μορφής που δημιουργήθηκε με παρεμβολή επί του αρχικού.

Πίνακας 11.1: Στοιχεία πλεγματικού ψηφιακού μοντέλου εδάφους

Συμβολισμός	Περιγραφή	Τιμή
$1:K_X$	Κλίμακα εκτύπωσης	1:8000
ι_{max}	Αριθμός γραμμών πλεγματικού μοντέλου εδάφους	250
η_{max}	Αριθμός στηλών πλεγματικού μοντέλου εδάφους	250
D_c	Μήκος τετραγωνικού φατνίου στο έδαφος	2 m
x_{max}	Μέγιστη τιμή τετμημένης περιοχής μελέτης	1000 m
y_{max}	Μέγιστη τιμή τεταγμένης περιοχής μελέτης	1000 m
x_{min}	Ελάχιστη τιμή τετμημένης περιοχής μελέτης	500 m
y_{min}	Ελάχιστη τιμή τεταγμένης περιοχής μελέτης	500 m

Όπως φαίνεται στον προηγούμενο πίνακα η κλίμακα εκτύπωσης της πλεγματικής επιφάνειας που προέκυψε μετά την παρεμβολή είναι 1:8000. Η κλίμακα αυτή υπερβαίνει τις απαιτήσεις ακρίβειας του σταδίου της προμελέτης, αλλά η χρησιμοποίηση της έγινε καθώς η σχέση υπολογισμού του όγκου χωματισμών είναι αρκετά απλοποιημένη οπότε η χρήση μεγάλου επιπέδου ακρίβειας με την παρούσα διαμόρφωση δεν έχει ιδιαίτερη αξία ενώ επιβραδύνει τη διαδικασία σύγκλισης. Σε επόμενη εργασία θα ενσωματωθεί η δυνατότητα υπολογισμού όγκου χωματισμών μεγαλύτερης ακρίβειας με λήψη χαρακτηριστικών σημείων στις διατομές.

Σχήμα 11.4: Τρισδιάστατη απεικόνιση πλεγματικού ψηφιακού μοντέλου εδάφους



11.6 Λογισμικό Evolver

Για την επίλυση του γενετικού αλγορίθμου που διαμορφώνεται στο πρόβλημα βελτιστοποίησης που μελετάται, χρησιμοποιείται το λογισμικό Evolver® 5.5. Το λογισμικό κυκλοφόρησε αρχικά το 1990 και αποτέλεσε το πρώτο εμπορικά διαθέσιμο λογισμικό πακέτο γενετικών αλγορίθμων για προσωπικούς υπολογιστές. Αναπτύχθηκε από την εταιρεία Axcelis® Inc. ενώ σήμερα τα δικαιώματά του ανήκουν στην Palisade® Co. Αποτελεί πρόγραμμα του πακέτου DecisionTools Suite, το οποίο είναι μια ολοκληρωμένη πλατφόρμα προγραμμάτων για ανάλυση κινδύνων και λήψη αποφάσεων υπό αβεβαιότητα, η οποία εγκαθίσταται στο Microsoft® Excel®. Το λογισμικό χρησιμοποιεί γενετικούς αλγορίθμους για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης σε μεγάλο εύρος προβλημάτων, που δεν μπορούν να επιλυθούν με κλασσικούς αλγορίθμους επίλυσης γραμμικής και μη γραμμικής βελτιστοποίησης (Palisade, 2010). Τα προβλήματα αυτά, αρχικά διαμορφώνονται στο Excel, και στη συνέχεια επιλύονται από το Evolver, το οποίο δίνει τη δυνατότητα εύρεσης της βέλτιστης λύσης. Έτσι συμβαίνει και στην περίπτωση του προβλήματος της παρούσας εργασίας. Το βασικότερο στάδιο της επίλυσης του μαθηματικού μοντέλου, αποτελεί η διαμόρφωσή του μέσω του Excel, ενώ στη συνέχεια, ο προσδιορισμός της βέλτιστης λύσης μέσω του Evolver, είναι μία απλή σχετικά διαδικασία η οποία αναλύεται στη συνέχεια. Το Evolver, εμφανίζεται ως μία επιπλέον γραμμή εργαλείων, στην ήδη υπάρχουσα δομή του Excel ενώ οι βασικές καρτέλες με τις επιλογές είναι οι παρακάτω:

1. Ορισμός προτύπου «Model Definition»: δίνει τη δυνατότητα καθορισμού του μαθηματικού προτύπου, μέσω του οποίου ο χρήστης έχει τη δυνατότητα περιγραφής του μοντέλου με απλό και άμεσο τρόπο.

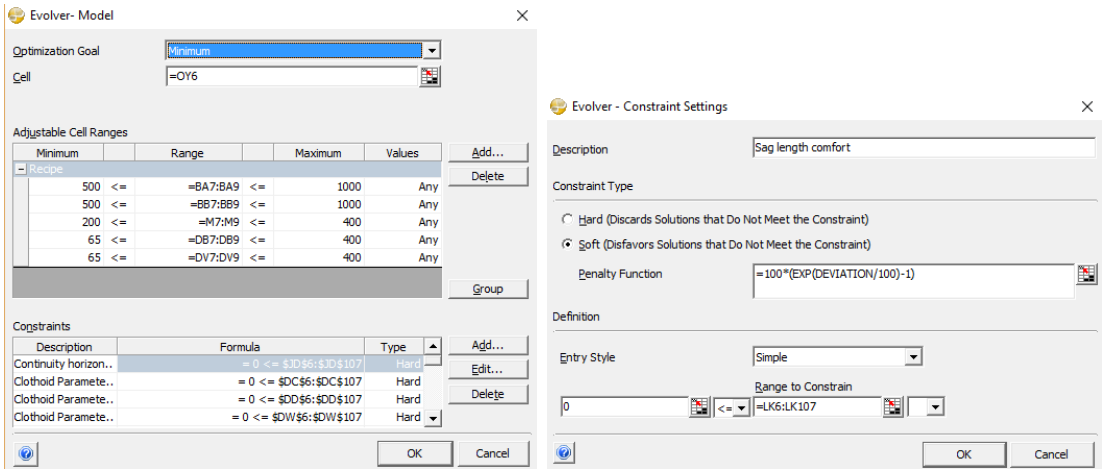
2. Βελτιστοποίηση «Optimization»: περιλαμβάνει τις ρυθμίσεις του λογισμικού «Settings» και την επιλογή εκκίνησης της διαδικασίας επίλυσης «Start».

3. Εργαλεία «Tools»: περιλαμβάνει άλλες επιλογές, στις οποίες περιλαμβάνονται αναφορές «Reports», άλλες τεχνικές χρήσης «Utilities», αλλά και βοηθητικές οδηγίες «Help».

11.6.1 Ορισμός συνάρτησης στόχου μεταβλητών απόφασης και περιορισμών

Η πρώτη καρτέλα που εμφανίζεται όταν ανοίξει ο χρήστης το λογισμικό, αφορά τον ορισμό του προτύπου βελτιστοποίησης «Model Definition», το οποίο αποτελείται από πέντε βασικές επιλογές, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 11.5 που παρουσιάζεται παρακάτω.

Σχήμα 11.5: Παράθυρα διαμόρφωσης προτύπου και περιορισμών



Όπως φαίνεται στο παράθυρο καθορισμού του προτύπου οι επιλογές αναλύονται ως εξής:

4. Στόχος βελτιστοποίησης «Optimization Goal»: το παράθυρο αυτό αποτελεί το στόχο της βελτιστοποίησης, τον οποίο το λογισμικό πρέπει να αναζητήσει και στη συνέχεια να επιτύχει. Ο στόχος αυτός, μπορεί να αφορά την εύρεση είτε της μέγιστης «Maximum», είτε της ελάχιστης «Minimum», ή τέλος μιας συγκεκριμένης τιμής «Target Value». Στο πρόβλημα που μελετάται στην παρούσα εργασία, βασικός σκοπός αποτελεί η ελαχιστοποίηση (minimize) του συνολικού κόστους εγκατάστασης και μετακίνησης.

1. Φατνίο «Cell»: το φατνίο, ή αλλιώς κελί προσδιορισμού περιέχει το αποτέλεσμα των υπολογισμών της συνάρτησης στόχου. Για κάθε λύση που παράγει το λογισμικό, δημιουργείται μια τιμή για αυτό το κελί, η οποία χρησιμοποιείται ως εκτίμηση από το λογισμικό, έτσι ώστε να αξιολογήσει κάθε πιθανό σενάριο. Με αυτόν τον τρόπο, και καθώς το Evolver αναζητά μία μοναδική λύση, καθορίζεται ποιες τιμές των μεταβλητών θα απορριφθούν και ποιες θα συνεχίσουν να συμμετέχουν στις επόμενες δοκιμές.

2. Εύρος μεταβαλλόμενων φατνίων «Adjustable Cell Ranges»: το παράθυρο αυτό του λογισμικού καθορίζει τις ομάδες των φατνίων που αποτελούν τις μεταβλητές απόφασης. Η προσθήκη των φατνίων γίνεται μέσω της επιλογής «Add», όπως φαίνεται στο Σχήμα 11.5, ενώ αφού οριστεί η θέση των φατνίων, μέσω των επιλογών «Minimum» και «Maximum», ορίζεται το εύρος των αποδεκτών τιμών κάθε φατνίου. Οι τιμές που λαμβάνουν οι μεταβλητές απόφασης μπορεί να είναι είτε πραγματικές ή ακέραιες. Αυτή η επιλογή γίνεται στο πεδίο «Values». Τέλος, το εύρος «Range» είναι αυτό που ορίζει την θέση του φατνίου της μεταβλητής απόφασης μέσα στο βιβλίο εργασίας.

3. Ομάδα «Group»: στο πεδίο αυτό, γίνονται κάποιες βασικές ρυθμίσεις για τα φατνία του προηγούμενου πεδίου «Adjustable Cell Ranges». Αμέσως μετά τον καθορισμό των ρυθμιζόμενων κελιών, επιλέγεται η κατάλληλη μέθοδος επίλυσης «Solving Method» η οποία θα χρησιμοποιηθεί. Στο επόμενο εδάφιο δίνονται περισσότερες πληροφορίες.

4. Περιορισμοί «Constraints»: το Evolver δίνει τη δυνατότητα να εισαχθούν περιορισμοί, οι οποίοι ουσιαστικά αποτελούν τις συνθήκες που πρέπει να πληρούνται, έτσι ώστε μία λύση να θεωρείται έγκυρη. Στο πεδίο αυτό, δε συμπεριλαμβάνονται οι συνθήκες του προβλήματος, καθώς αυτές έχουν ήδη συμπεριληφθεί. Οι περιορισμοί αυτοί, ρυθμίζονται από το παράθυρο «Constraint Settings», όπως φαίνεται στο Σχήμα 11.5. Η μορφή των περιορισμών μπορεί να είναι αυστηρή «Hard» ή μη αυστηρή «Soft». Βασική διαφορά των δύο μορφών είναι ότι στην πρώτη περίπτωση μια λύση που παραβιάζει τον περιορισμό απορρίπτεται κατευθείαν, ενώ στη δεύτερη η λύση δεν απορρίπτεται αλλά εισάγει μια ποινή στη συνάρτηση στόχου η οποία εκφράζεται με μια συνάρτηση «Penalty Function» και για το πρόβλημα αυτής της εργασίας αφορά επιπλέον κόστος της χάραξης.

Για πληροφορίες σχετικά με τη διαχείριση των περιορισμών ο αναγνώστης παραπέμπεται στον Kang (2008). Η προκαθορισμένη συνάρτηση ποινής είναι εκθετική και αυξάνεται με βάση το μέγεθος της απόκλισης *d* από την οριακή τιμή του περιορισμού. Η συνάρτηση αυτή εκφράζεται ως εξής:

$$C_P = 100 \cdot \left(e^{d/100} - 1\right) \tag{11.1}$$

11.6.2 Ρυθμίσεις μεθόδων επίλυσης και ομαδοποίησης μεταβλητών

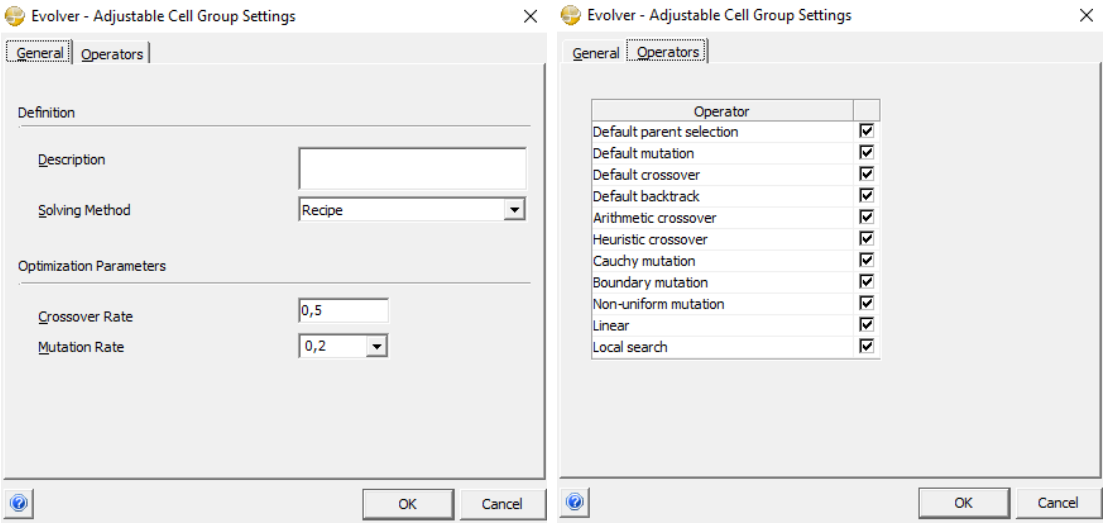
Οι διαφορετικοί τύποι των ρυθμιζόμενων κελιών χειρίζονται από διαφορετικές μεθόδους επίλυσης. Κάθε μέθοδος επίλυσης, ουσιαστικά αποτελεί ένα διαφορετικό γενετικό αλγόριθμο με τους δικούς του τρόπους επιλογής, διασταύρωσης και μετάλλαξης. Οι μέθοδοι επίλυσης είναι:

- «Recipe»: χρησιμοποιείται όταν οι μεταβλητές απόφασης μεταβάλλονται ανεξάρτητα η μία από την άλλη.

- «Order»: χρησιμοποιείται για την εύρεση της βέλτιστης μετάθεσης τιμών.
- «Group»: χρησιμοποιείται όταν το πρόβλημα περιέχει πολλαπλές μεταβλητές που πρέπει να ομαδοποιηθούν σε σύνολα.
- «Budget»: χρησιμοποιείται όταν όλες οι τιμές των μεταβλητές πρέπει να είναι ίσες με ένα σύνολο.
- «Project»: χρησιμοποιείται όταν ορισμένες διαδικασίες πρέπει να προηγούνται από άλλες.
- «Schedule»: αφορά την ανάθεση διαδικασιών σε συγκεκριμένο χρόνο.

Για το γενετικό αλγόριθμο που επιλύεται στην παρούσα εργασία, επιλέγεται η μέθοδος επίλυσης «Recipe» χωρίς ομαδοποίηση μεταβλητών. Έπειτα από την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου επίλυσης, ακολουθεί η επιλογή του βαθμού διασταύρωσης «Crossover Rate», αλλά και του βαθμού μετάλλαξης «Mutation Rate», όπως φαίνεται στην καρτέλα «General» στο Σχήμα 11.6. Ο πρώτος κυμαίνεται μεταξύ 0.01 και 1.00, και δείχνει το ποσοστό που καταλαμβάνει στη σύνθεση των απογόνων κάθε ένας από τους δύο γονείς, ενώ ο δεύτερος κυμαίνεται μεταξύ 0.00 και 1.00 και δείχνει την πιθανότητα που έχουν τα χρωμοσώματα απόγονοι να περιέχουν κάποιες τυχαίες τιμές. Στην καρτέλα «Operators» επιλέγεται η χρήση η μη των διαθέσιμων γενετικών τελεστών ανάλογα με την φύση των μεταβλητών της ομάδας. Τόσο η ομαδοποίηση μεταβλητών όσο και η τροποποίηση των γενετικών τελεστών είναι στοιχεία που θα εξεταστούν σε επόμενη εργασία.

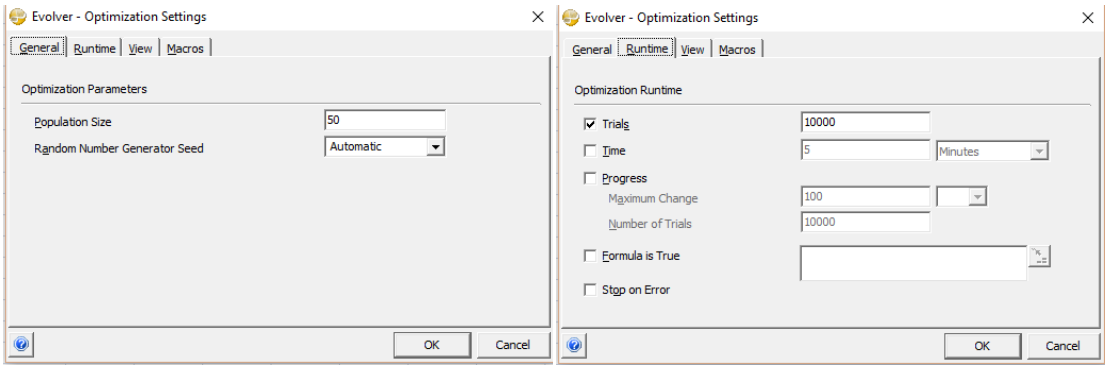
Σχήμα 11.6: Ρυθμίσεις ομαδοποιημένων φατνίων



11.6.3 Γενικές ρυθμίσεις

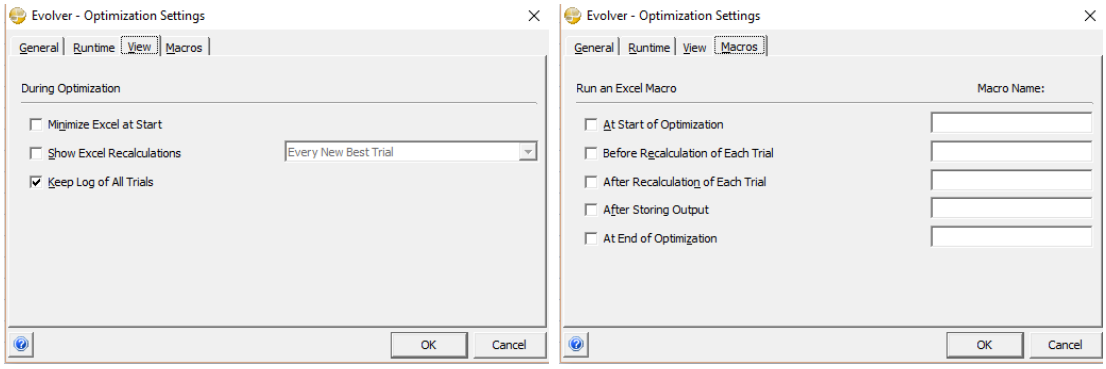
Στη γραμμή εργαλείων του λογισμικού και συγκεκριμένα στην ενότητα «Optimization» υπάρχει η επιλογή των ρυθμίσεων «Settings», οι οποίες αποτελούν μια επιπλέον δυνατότητα του Evolver. Στην καρτέλα «General» των ρυθμίσεων αυτών, δίνεται η δυνατότητα εισαγωγής του αριθμού του πληθυσμού χρωμοσωμάτων που χρησιμοποιούνται κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης, ενώ δίνεται και δυνατότητα να οριστεί η αρχική τιμή για τη γεννήτρια τυχαίων αριθμών που χρησιμοποιείται στο Evolver, κάτι το οποίο γίνεται είτε αυτόματα είτε χειροκίνητα, όπως φαίνεται παρακάτω στο Σχήμα 11.7. Η καρτέλα «Runtime» δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει μία ή περισσότερες συνθήκες τερματισμού. Οι επιλογές που δίνονται περιλαμβάνουν μέγιστο αριθμό δοκιμών, μέγιστο χρόνο επίλυσης, σύγκλιση σε μία τιμή για ένα αριθμό συνεχόμενων δοκιμών, ικανοποίηση μιας σχέση ή τερματισμό σε περίπτωση σφάλματος.

Σχήμα 11.7: Γενικές ρυθμίσεις βελτιστοποίησης και συνθηκών τερματισμού



Στην καρτέλα «View» εμφανίζονται οι ρυθμίσεις των ιδιοτήτων των εμφανιζόμενων υπολογισμών κάθε επανάληψης, ενώ τέλος η καρτέλα «Macros» αφορά τη χρονική στιγμή που επιλέγεται να εκτελεστούν οι μακροεντολές του προβλήματος αν έχουν οριστεί τέτοιες.

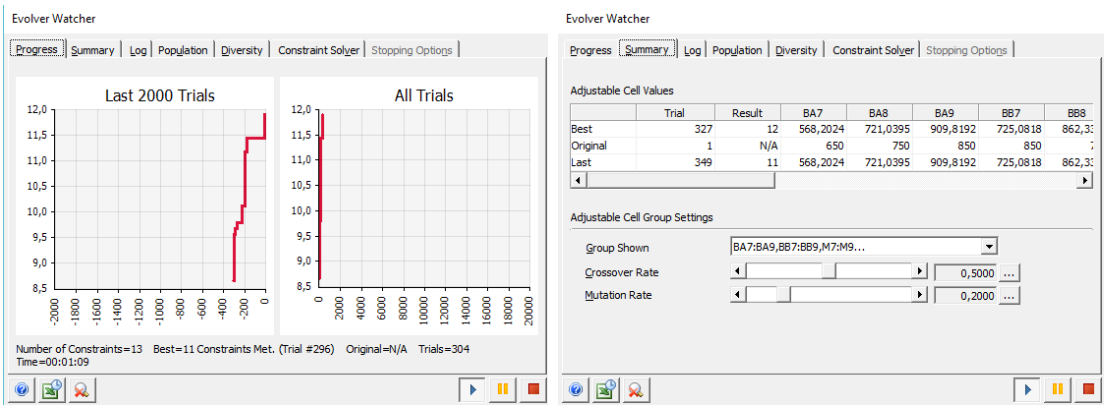
Σχήμα 11.8: Ρυθμίσεις υπολογισμών και μακροεντολών



11.6.4 Επίβλεψη διαδικασίας επίλυσης

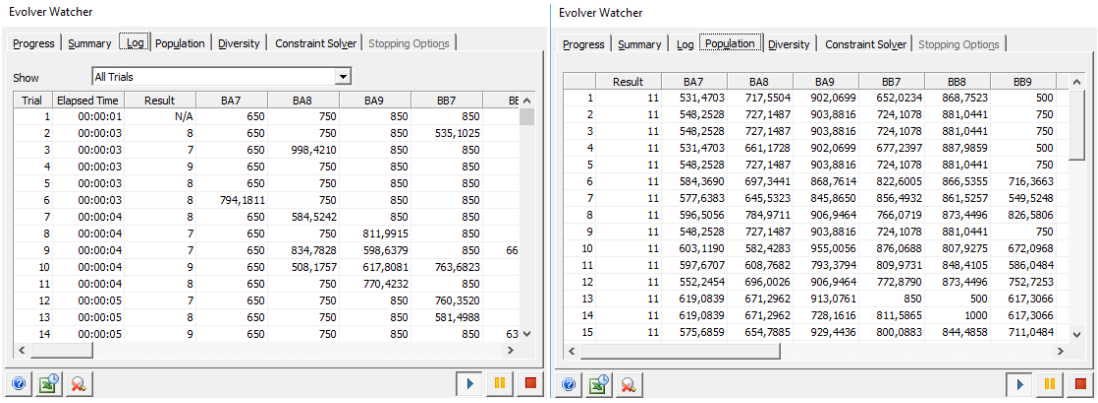
Έχοντας ολοκληρώσει όλες οι ρυθμίσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω, και έχοντας ορίσει όλες τις απαραίτητες παραμέτρους, ξεκινά η διαδικασία της βελτιστοποίησης, επιλέγοντας την εντολή «Start». Κατά την εκκίνηση της διαδικασίας εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο προόδου «Evolver Watcher» το οποίο παρουσιάζει διάφορες πληροφορίες σε σχέση με τη διαδικασία επίλυσης. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας επίλυσης, στο παράθυρο προόδου εμφανίζονται η ένδειξη «Trial», που αναφέρεται στον αριθμό της δοκιμής που εκτελείται από τη διαδικασία, η ένδειξη «Runtime» που αφορά τον χρόνο που έχει περάσει από τη στιγμή της εκκίνησης της διαδικασίας βελτιστοποίησης, η ένδειξη «Original» που περιέχει την αρχική τιμή της συνάρτησης στόχου, και τέλος την ένδειξη «Best» που απεικονίζει τη βέλτιστη λύση που έχει επιτευχθεί μέχρι εκείνη τη χρονική στιγμή. Πριν τη διαδικασία βελτιστοποίησης συνήθως δεν τηρείται κάποιος περιορισμός οπότε γίνεται εκκίνηση του «Constraint Solver» ώστε να βρεθεί μία αρχική λύση που να ικανοποιεί τους περιορισμούς. Η αρχική αυτή λύση στη συνέχεια υπόκειται στη διαδικασία βελτιστοποίησης. Ο «Constraint Solver» δεν είναι τίποτα άλλο παρά το ίδιο εργαλείο βελτιστοποίησης, το οποίο αντί της βελτιστοποίησης μια τιμής έχει ως συνάρτηση στόχου την ικανοποίηση όλων των περιορισμών. Ο χρήστης μπορεί να επιβλέψει τόσο τη διαδικασία βελτιστοποίησης όσο και τη διαδικασία εύρεσης μιας αρχικής λύσης που να ικανοποιεί τους περιορισμούς μέσω των αναλυτικών καρτελών του «Evolver Watcher» που απεικονίζονται παρακάτω. Μέσω της καρτέλας προόδου «Progress» ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να παρατηρήσει την εξέλιξη των τιμών της συνάρτησης στόχους από την αρχή της διαδικασίες ή μόνον κατά τις τελευταίες δοκιμές . Στην καρτέλα «Summary» απεικονίζονται οι τιμές που λαμβάνουν οι μεταβλητές απόφασης, ενώ δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να μεταβάλλει τους βαθμούς διασταύρωσης και μετάλλαξης κατά το δοκούν ανάλογα με τα αποτελέσματα που προκύπτουν.

Σχήμα 11.9: Παράθυρο προόδου και σύνοψη κατά την επίλυση περιορισμών



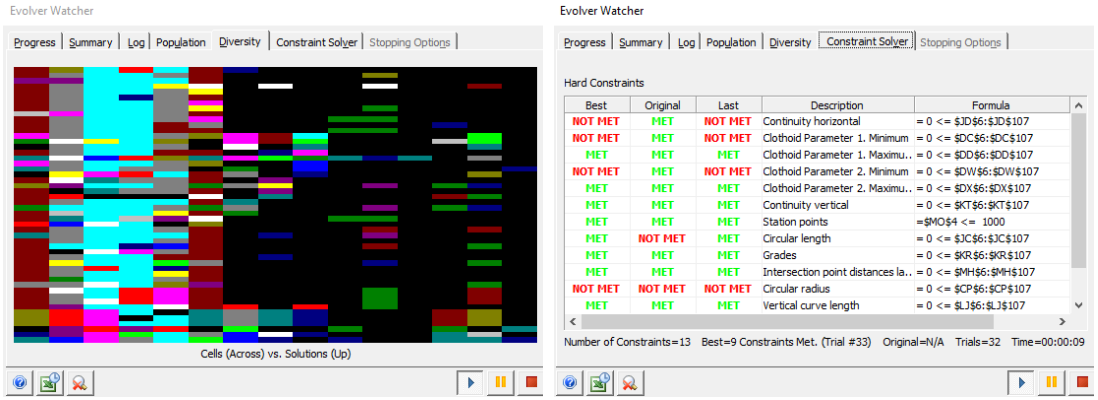
Έπειτα, στην καρτέλα «Log» γίνεται αναλυτική παρουσίαση των τιμών που λαμβάνουν οι μεταβλητές απόφασης σε κάθε δοκιμή, ενώ στην καρτέλα «Population» φαίνονται οι τιμές που έχουν λάβει τα γονίδια των χρωμοσωμάτων που απαρτίζουν τον πληθυσμό. Οι δύο καρτέλες παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα.

Σχήμα 11.10: Αρχείο καταγραφής δοκιμών και τιμές γονιδίων πληθυσμού



Στην καρτέλα «Diversity» δίνεται μια χρωματική απεικόνιση της ποικιλίας των τιμών που έχουν λάβει τα γονίδια του πληθυσμού. Οι γραμμές του πίνακα χρωμάτων είναι ίσες με το μέγεθος του πληθυσμού ενώ οι στήλες είναι ίσες με τον αριθμό των μεταβλητών απόφασης. Έτσι, φατνία ίδιου χρώματος σε διαφορετικές γραμμές μιας στήλης αντικατοπτρίζουν χρωμοσώματα με ίδια γονίδια ή αλλιώς ίδια τιμή μιας μεταβλητής απόφασης στα στοιχεία του πληθυσμού.

Σχήμα 11.11: Ανομοιογένεια πληθυσμού και περιορισμοί κατά την επίλυση



Τέλος, στην καρτέλα «Contraint Solver» η οποία μπορεί να επιλεχθεί μόνο κατά το στάδιο της επίλυσης περιορισμών και εύρεσης μιας αρχικής λύσης, παρουσιάζει κατά πόσον ικανοποιούνται οι αυστηρά ορισμένοι περιορισμοί του προτύπου στο αρχικό στάδιο, στην καλύτερη επίλυση έως τη χρονική στιγμή της τελευταίας δοκιμής και στην τελευταία επανάληψη. Η καρτέλα «Stopping Options» μπορεί να επιλεχθεί μόνο μετά το τέλος της διαδικασίας και αφορά τις επιλογές εμφάνισης της αναφοράς αποτελεσμάτων.

11.6.5 Αναφορά βελτιστοποίησης

Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία, και στην περίπτωση που έχει ικανοποιηθεί κάποια από τις συνθήκες τερματισμού, εμφανίζεται το παράθυρο «Optimization Summary», το οποίο ουσιαστικά αποτελεί μια συνοπτική έκθεση βελτιστοποίησης που περιέχει πληροφορίες όπως η ημερομηνία και η ώρα, οι ρυθμίσεις βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν, η τιμή που υπολογίζεται για το φατνίο - στόχο και τέλος η τιμή για κάθε ένα από τα ρυθμιζόμενα κελιά. Η έκθεση αυτή είναι πολύ χρήσιμη καθώς δίνει τη δυνατότητα σύγκρισης των αποτελεσμάτων των διαδοχικών βελτιστοποιήσεων και περιέχει και στοιχεία όπως τα ποσοστά ικανοποίησης των περιορισμών στο σύνολο των δοκιμών και τη συμμετοχή ή μη των διάφορων γενετικών τελεστών.

11.6.6 Ταχύτητα υπολογισμού

Κατά τη χρήση του Evolver για την επίλυση του προβλήματος, χρησιμοποιείται τόσο η βιβλιοθήκη διαδικασιών του Evolver όσο και οι συναρτήσεις του φύλλου εργασίας του Excel για την εξέταση των διάφορων σεναρίων. Ως εκ τούτου μεγάλο ποσοστό του χρόνου χρησιμοποιείται κατά την επανάληψη των υπολογισμών του φύλλου εργασίας. Υπάρχουν αρκετοί τρόποι με τους οποίους μπορεί να αυξηθεί η ταχύτητα της συνολικής διαδικασίας.

- Η ταχύτητα του Evolver εξαρτάται άμεσα από τη συχνότητα ή ταχύτητα της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας του ηλεκτρονικού υπολογιστή. Για παράδειγμα σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή με επεξεργαστή συχνότητας 2,0 GHz γίνεται σχεδόν ο διπλάσιος αριθμός δοκιμών σε σχέση με έναν υπολογιστή με επεξεργαστή 1,0 GHz. Ο υπολογιστής που χρησιμοποιήθηκε διαθέτει κεντρική μονάδα επεξεργασίας Intel® Core™ i5-2467 συχνότητας 1,6 GHz.

- Πρέπει να αποφεύγεται ο επανασχεδιασμός γραφημάτων στην οθόνη. Ο σχεδιασμός σχημάτων και αριθμών απαιτεί χρόνο ο οποίος μπορεί να υπερβαίνει ακόμη και τον μισό από αυτόν που απαιτείται για τη βελτιστοποίηση. Αν υπάρχουν γραφήματα στο φύλλο εργασίας επιβραδύνουν τον χρόνο υπολογισμού σημαντικά. Για το λόγο αυτό δίνεται η εντολή στο Excel® να μη δαπανά χρόνο στον υπολογισμό και σχεδιασμό γραφημάτων, επιλέγοντας στο παράθυρο προόδου να μη γίνεται ανανέωση των δεδομένων του φύλλου εργασίας ή κάνοντας ελαχιστοποίηση του φύλλου εργασίας. Η αύξηση του ρυθμού πραγματοποίησης δοκιμών παρατηρείται στο παράθυρο προόδου.

- Από τη στιγμή που έχει γίνει σύγκλιση σε μία λύση και δεν έχει διαπιστωθεί βελτίωσή της σε έναν μεγάλο αριθμό των πιο πρόσφατων δοκιμών, μπορεί να επιλεγεί η αύξηση του βαθμού μετάλλαξης. Έτσι, επιτρέπεται στο λογισμικό να διευρύνει την αναζήτησή του, αντί να προσπαθεί να βελτιώσει με μικρές αλλαγές τις επιλύσεις του υπάρχοντος πληθυσμού χρησιμοποιώντας κυρίως τον τελεστή διασταύρωσης. Η αλλαγή των τιμών των τελεστών μπορεί να γίνει κατά τη διάρκεια της επίλυσης από την καρτέλα «Summary» του παραθύρου «Evolver Watcher».

- Τα πεδία τιμών των μεταβλητών απόφασης θα πρέπει να είναι κατά το δυνατόν μικρότερα. Με αυτόν τον τρόπο ο χώρος αναζήτησης γίνεται μικρότερος και το λογισμικό επιταχύνει τη

διαδικασία. Βέβαια, πρέπει τα πεδία αυτά να επιτρέπουν αρκετή ευελιξία στο λογισμικό για διερεύνηση όλων των πιθανών ρεαλιστικών λύσεων.

12 Παράμετροι και Αποτελέσματα

Έχοντας περιγράψει τα δεδομένα και το λογισμικό που χρησιμοποιούνται στην εφαρμογή, στο παρόν κεφάλαιο γίνεται στην ουσία η εφαρμογή μεθόδων και αλγορίθμων για την επίλυση του μαθηματικού προτύπου βελτιστοποίησης που αναλύθηκε στο τρίτο μέρος της εργασίας. Αρχικά, παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που εισάγει ή τροποποιεί ο χρήστης στην εφαρμογή. Στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης κατά την οριζοντιογραφία και τη μηκοτομή. Επισημαίνεται ότι η βελτιστοποίηση οριζοντιογραφίας και μηκοτομής γίνεται σε ξεχωριστά στάδια, όπως συμβαίνει και κατά τη διαδικασία συμβατικής χάραξης από έναν μελετητή.

12.1 Εισαγωγή παραμέτρων

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν στην εφαρμογή. Οι παράμετροι αυτοί αφορούν στοιχεία του οδικού σχεδιασμού, των διαστημάτων αναζήτησης των μεταβλητών απόφασης καθώς και γενετικές παράμετροι που καθορίζουν δομικά στοιχεία του αλγορίθμου επίλυσης που θα χρησιμοποιηθεί.

12.1.1 Παράμετροι σχεδιασμού

Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει συγκεντρωτικά τις τιμές των παραμέτρων σχεδιασμού που χρησιμοποιήθηκαν στην εφαρμογή. Επιλέχθηκε τα σημεία αρχής και τέλους να διαταχθούν διαγώνια επί του ψηφιακού μοντέλου εδάφους ώστε να διαπιστωθεί κατά πόσον ο αλγόριθμος θα λειτουργήσει ορθά παράγοντας μια χάραξη που να αποφεύγει το κεντρικό ύψωμα στο ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή οι τιμές που επιλέχθηκαν αντλήθηκαν κυρίως από τις οδηγίες οδικών χαράξεων του ΥΠΕΧΩΔΕ (2001), με τη διαφορά ότι κατά τον υπολογισμό των απαιτήσεων ορατότητας για στάση έχει χρησιμοποιηθεί η ταχύτητα μελέτης αντί της λειτουργικής. Η απλοποίηση αυτή γίνεται στο πλαίσιο αυτής της εφαρμογής, και η τιμή του χρόνου αντίληψης και αντίδρασης έχει αντληθεί από τις οδηγίες της AASHTO (2011) που ακολουθούν αυτή τη μεθοδολογία. Η συμπερίληψη των λειτουργικών χαρακτηριστικών για ορθότερη εκτίμηση των απαιτήσεων ορατότητας θα γίνει σε επόμενη εργασία. Οι τιμές για τη μέγιστη και ελάχιστη εγκάρσια μετατόπιση μεταξύ ευθυγραμμίας και κυκλικού τόξου, καθώς και η τιμή του μέγιστου εγκάρσιου τινάγματος προέρχονται από τις οδηγίες της AASHTO (2011). Οι τιμές του ελάχιστου βάθους εκσκαφής και επιχώματος ορίστηκαν μηδενικές, καθώς δεν έχει ιδιαίτερη αξία η χρησιμοποίηση των περιορισμών αυτών σε σχέση με την προκύπτουσα υψομετρική αβεβαιότητα των δεδομένων. Οι τιμές όλων των παραμέτρων με βάση την ανάλυση που έχει προηγηθεί επιλέχθηκαν όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα. Η περίπτωση που μελετάται αφορά υπεραστική οδό με ενιαία επιφάνεια κυκλοφορίας, οπότε δεν λαμβάνονται υπ' όψιν οι περιορισμοί που αφορούν κατηγορίες αυτοκινητοδρόμων.

Πίνακας 12.1: Ορισμός παραμέτρων για το γενικό πρόβλημα βελτιστοποίησης χάραξης

Μεταβλητές	Περιγραφή	Τιμή
x_S	Τετμημένη σημείου αρχής χάραξης	550 m
y_S	Τεταγμένη σημείου αρχής χάραξης	950 m
z_S	Υψόμετρο σημείου αρχής χάραξης	740 m
x_E	Τετμημένη σημείου τέλους χάραξης	950 m
y_E	Τεταγμένη σημείου τέλους χάραξης	550 m
z_E	Υψόμετρο σημείου τέλους χάραξης	710 m
V_e	Ταχύτητα μελέτης	70 km/h
t_R	Χρόνος αντίληψης-αντίδρασης	2,5 s
h_d	Ύψος οφθαλμών οδηγού πάνω από την επιφάνεια της οδού	1,08 m
h_o	Ύψος αντικειμένου πάνω από την επιφάνεια της οδού	0,50 m
$f_{T,\max}$	Μέγιστος επιτρεπόμενος συντελεστής εφαπτομενικής τριβής	0,324
$f_{R,\max}$	Μέγιστος επιτρεπόμενος συντελεστής εγκάρσιας συνιστώσας τριβής	0,120
$s_{\max}$	Μέγιστη κατά μήκος κλίση οδού	0,08 m/m
$e_{\max}$	Μέγιστη εγκάρσια κλίση οδού	0,07 m/m
$p_{\max}$	Μέγιστη εγκάρσια μετατόπιση ευθυγραμμίας και κυκλικού τόξου	1,0 m
$p_{\min}$	Ελάχιστη εγκάρσια μετατόπιση ευθυγραμμίας και κυκλικού τόξου	0,2 m
C	Μέγιστη τιμή εγκάρσιου τινάγματος	1,2 m/s^3
$\Delta z_{f,\max}$	Μέγιστο ύψος επιχώματος (m)	35 m
$\Delta z_{f,\min}$	Ελάχιστο ύψος επιχώματος (m)	0 m
$\Delta z_{c,\max}$	Μέγιστο βάθος εκσκαφής (m)	35 m
$\Delta z_{c,\min}$	Ελάχιστο βάθος εκσκαφής (m)	0 m
e_f	Κλίση πρανούς επιχώματος (υ: β)	1:1
e_c	Κλίση πρανούς εκσκαφής (υ: β)	2:3
W	Πλάτος καταστρώματος οδού (m)	9 m
L_P	Απόσταση μεταξύ διαδοχικών σημείων πύκνωσης	10 m
K_F	Τιμή μονάδας όγκου επιχωμάτων	1,08 €/m^3
K_C	Τιμή μονάδας όγκου εκσκαφών	0,70 €/m^3

12.1.2 Παράμετροι πεδίων αναζήτησης

Εκτός από τις παραπάνω παραμέτρους εισάγονται και οι παράμετροι που αφορούν το διάστημα αναζήτησης των μεταβλητών απόφασης. Οι τιμές ορισμένων από τις παραμέτρους αυτές έχουν προκύψει με βάση τις προδιαγραφές γεωμετρικού σχεδιασμού που χρησιμοποιούνται. Οι τιμές των

παραμέτρων που καθορίζουν το διάστημα αναζήτησης των μεταβλητών απόφασης παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 12.2: Παράμετροι καθορισμού διαστήματος αναζήτησης μεταβλητών απόφασης

Μεταβλητές	Περιγραφή	Τιμή
$x_{\max}$	Μέγιστη τιμή αναζήτησης τετμημένης κορυφής κύριας πολυγωνικής	1000 m
$x_{\min}$	Ελάχιστη τιμή αναζήτησης τετμημένης κορυφής κύριας πολυγωνικής	500 m
$y_{\max}$	Μέγιστη τιμή αναζήτησης τεταγμένης κορυφής κύριας πολυγωνικής	1000 m
$y_{\min}$	Ελάχιστη τιμή αναζήτησης τεταγμένης κορυφής κύριας πολυγωνικής	500 m
$R_{\max}$	Μέγιστη τιμή διαστήματος αναζήτησης ακτίνας κυκλικού τόξου	400 m
$R_{\min}$	Ελάχιστη τιμή διαστήματος αναζήτησης ακτίνας κυκλικού τόξου	200 m
$A_{\max}$	Μέγιστη τιμή διαστήματος αναζήτησης παραμέτρου κλωθοειδούς	400 m
$A_{\min}$	Ελάχιστη τιμή διαστήματος αναζήτησης παραμέτρου κλωθοειδούς	65 m
$h_{\max}$	Μέγιστη τιμή αναζήτησης χιλιομετρικής θέσης κορυφής μηκοτομής	500 m
$h_{\min}$	Ελάχιστη τιμή αναζήτησης χιλιομετρικής θέσης κορυφής μηκοτομής	50 m
$z_{\max}$	Μέγιστη τιμή διαστήματος αναζήτησης υψομέτρου κορυφής μηκοτομής	760 m
$z_{\min}$	Ελάχιστη τιμή αναζήτησης υψομέτρου κορυφής μηκοτομής	680 m
$H_{\max}$	Μέγιστη τιμή διαστήματος αναζήτησης παραμέτρου παραβολής	8400 m
$H_{\min}$	Ελάχιστη τιμή διαστήματος αναζήτησης παραμέτρου παραβολής	2500 m

12.1.3 Γενετικές παράμετροι

Ο καθορισμός των βασικών παραμέτρων του γενετικού αλγορίθμου είναι καθοριστικός για την επίλυσή του μέσω του λογισμικού Evolver. Οι γενετικές παράμετροι αποτελούνται από το μέγεθος του πληθυσμού, τον βαθμό διασταύρωσης, καθώς και τον βαθμό μετάλλαξης. Το μέγεθος του πληθυσμού που επιλέγεται είναι 50 καθώς όσο μικρότερος είναι ο πληθυσμός τόσο γρηγορότερα οδηγείται η διαδικασία σε σύγκλιση. Βέβαια, η επίλυση που γίνεται ενδεχομένως υστερεί ως προς την πιθανότητα εύρεσης του ολικού βέλτιστου σε σχέση με την επιλογή μεγαλύτερη μεγέθους πληθυσμού. Η επόμενη καθοριστική παράμετρος για την επίλυση του γενετικού αλγορίθμου, είναι ο βαθμός διασταύρωσης. Όπως ήδη αναφέρθηκε, ο βαθμός αυτός μπορεί να πάρει τιμές μεταξύ 0,01 και 1,00, ενώ στη συγκεκριμένη περίπτωση λαμβάνει την τιμή 0,5που είναι και η προκαθορισμένη τιμή. Αντίστοιχα, ο βαθμός μετάλλαξης λαμβάνει την τιμή 0,2 η οποία είναι η μέγιστη τιμή που προτείνεται να χρησιμοποιείται στο λογισμικό. Ο βαθμός αυτός, γενικά κυμαίνεται από 0,00 έως 1,00, και γενικότερα λαμβάνει σχετικά μικρές τιμές. Σημειώνεται, ότι εκτός των αναφερθέντων λόγων η επιλογή των τιμών βασίστηκε στην συγκριτική ανάλυση πολλών διαφορετικών τιμών που γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο. Όσον αφορά, τον αρχικό πληθυσμό αυτός παράγεται με τυχαίο τρόπο μετά την επίλυση των περιορισμών. Ως συνθήκη τερματισμού έχει οριστεί η επίτευξη 10000 δοκιμών. Έχει παρατηρηθεί ότι η τιμή αυτή επαρκεί γενικώς ως προς τη σύγκλιση των τιμών ανάλογα με τις παραμέτρους που ορίζονται. Αυτό το Για την υλοποίηση του συνόλου των δοκιμών αυτών απαιτείται χρόνος υπολογισμού περίπου σαράντα λεπτών με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά του υπολογιστικού συστήματος που χρησιμοποιήθηκε, όπως αναφέρονται στην υποενότητα 11.6.6 του προηγούμενου κεφαλαίου. Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τιμές των γενετικών παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στις επιλύσεις του παρόντος κεφαλαίου.

Πίνακας 12.3: Παράμετροι καθορισμού διαστήματος αναζήτησης μεταβλητών απόφασης

Μεταβλητές	Περιγραφή	Τιμή
$x_{\max}$	Μέγεθος πληθυσμού	50
$x_{\min}$	Βαθμός διασταύρωσης	0,5
$y_{\max}$	Βαθμός μετάλλαξης	0,2
$y_{\min}$	Μέγιστος αριθμός δοκιμών	10000
$R_{\max}$	Μέγιστη τιμή διαστήματος αναζήτησης ακτίνας κυκλικού τόξου	400 m
$R_{\min}$	Ελάχιστη τιμή διαστήματος αναζήτησης ακτίνας κυκλικού τόξου	200 m

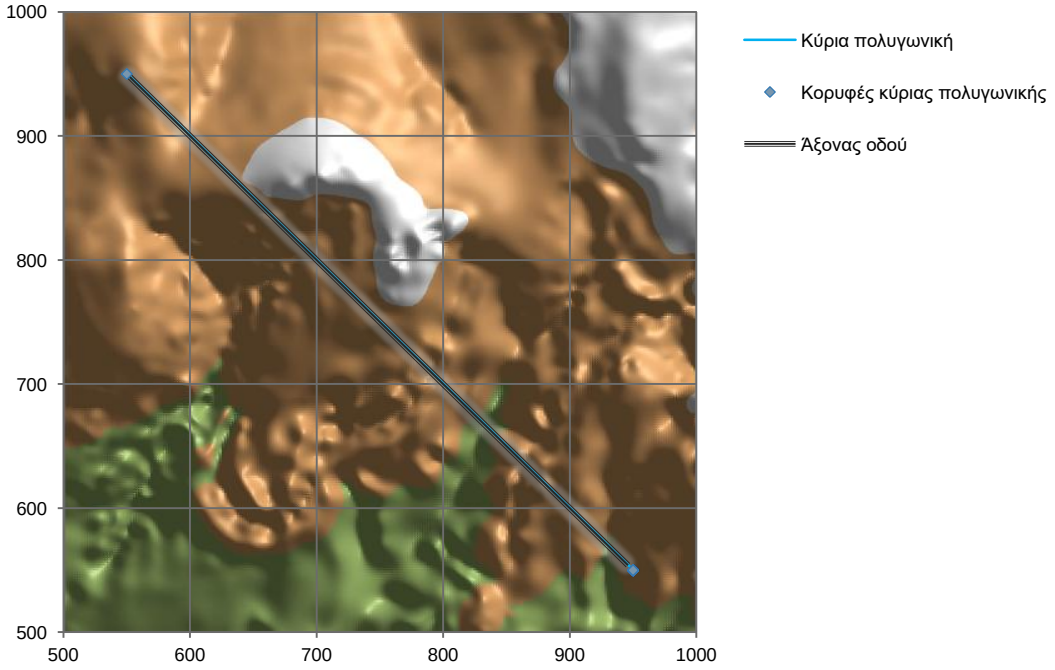
12.2 Εφαρμογή προτύπου βελτιστοποίησης χάραξης

Στην παρούσα ενότητα γίνεται εφαρμογή του προτύπου βελτιστοποίησης χάραξης όπως αυτό έχει περιγραφτεί. Με βάση της παραμέτρους που έχουν οριστεί από τον χρήστη ακολουθούνται τα στάδια που επεξηγούνται στις επόμενες υποενότητες.

12.2.1 Αρχικά δεδομένα και υπολογισμοί

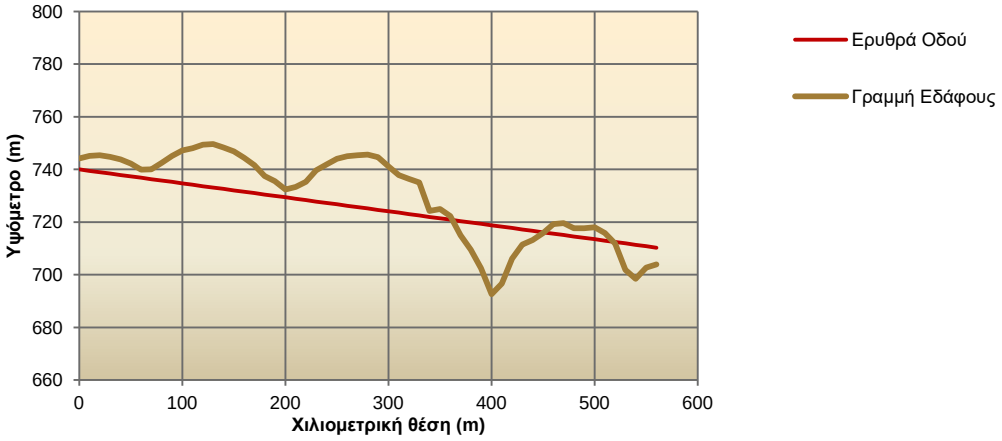
Έχοντας ορίσει τις συντεταγμένες των σημείων αρχής και τέλους που αποτελούν τις πρωταρχικές κορυφές της κύριας πολυγωνικής, δημιουργείται αυτόματα ο ευθύγραμμος άξονας της οδού που ενώνει τα δύο σημεία, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Ο άξονας πρακτικά αποτελείται από τα ευθύγραμμα τμήματα που συνδέουν τα σημεία πύκνωσης τα οποία έχουν τοποθετηθεί σε ίσα διαστήματα, ανάλογα με την καθορισμένη από τον χρήστη απόσταση.

Σχήμα 12.1: Οριζοντιογραφία πριν την έναρξη της διαδικασίας επίλυσης περιορισμών



Με βάση τα σημεία πύκνωσης του άξονα της οδού και τη διαδικασία εύρεσης υψομέτρων της ερυθράς της οδού και του εδάφους, που περιγράφεται στο ένατο κεφάλαιο δημιουργείται και το διάγραμμα της μηκοτομής όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα.

Σχήμα 12.2: Μηκοτομή πριν την έναρξη της διαδικασίας επίλυσης περιορισμών



Όλοι οι υπολογισμοί της χάραξης και των χωματισμών γίνονται με βάση το μαθηματικό πρότυπο που αναπτύχθηκε στο τρίτο μέρος της εργασίας. Το μέγεθος των όγκων χωματισμών και του κόστους της ευθύγραμμης αυτής αρχικής χάραξης παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 12.4: Όγκοι και κόστος χωματισμών για την αρχική ευθύγραμμη χάραξη

Μεταβλητές	Περιγραφή	Τιμή
E_F	Συνολικός όγκος επιχωμάτων οδού	84775 m^3
E_C	Συνολικός όγκος εκσκαφών οδού	24807 m^3
C	Τιμή συνάρτησης στόχου	86135 €

12.2.2 Βελτιστοποίηση οριζοντιογραφικής χάραξης

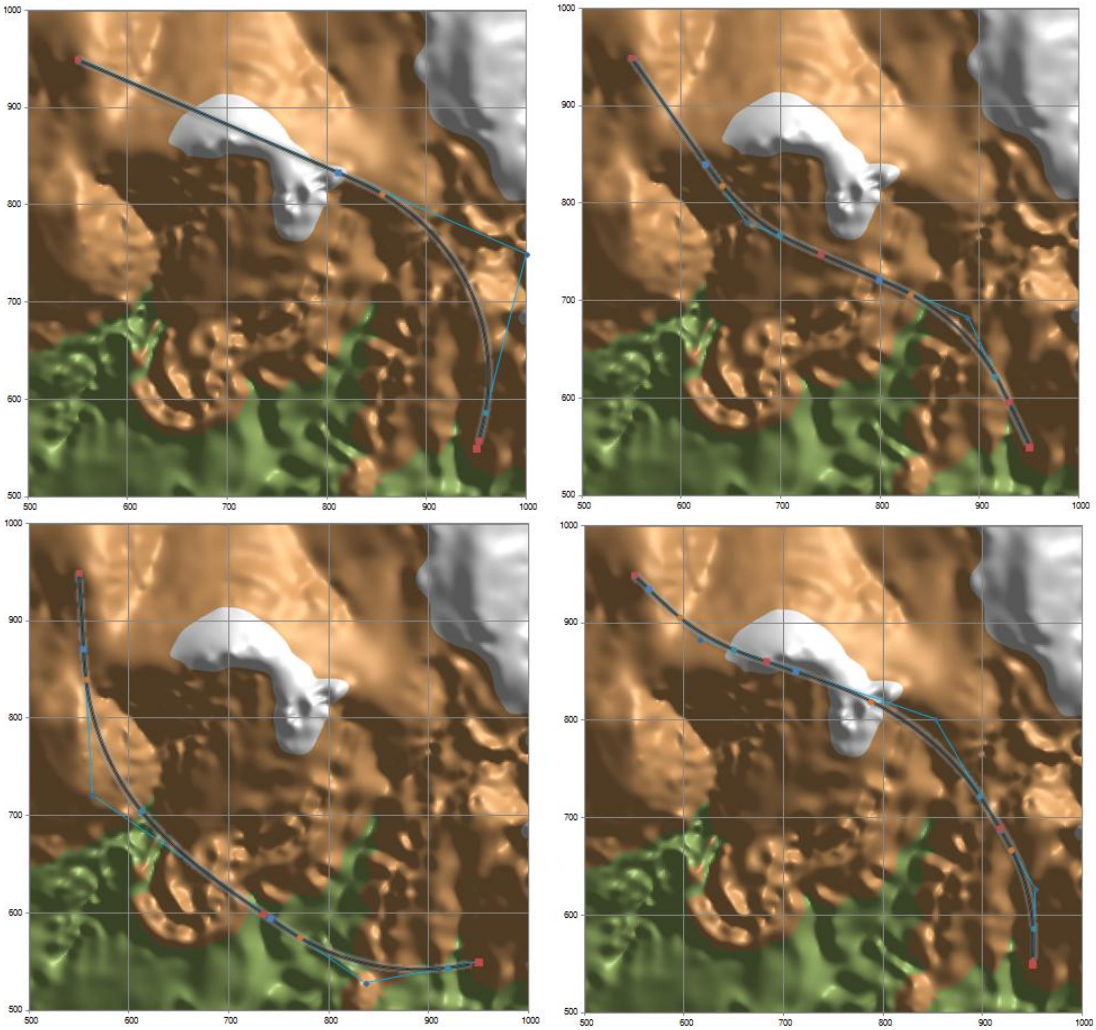
Η διαδικασία που ακολουθείται για τη βελτιστοποίηση της οριζοντιογραφικής χάραξης περιλαμβάνει δύο στάδια. Αρχικά, επιλέγεται από τον χρήστη ο αριθμός των κορυφών της κύριας πολυγωνικής γραμμής της οριζοντιογραφίας που θα χρησιμοποιηθούν. Οι κορυφές αυτές τοποθετούνται ανά ίσα διαστήματα επί του άξονα της οδού και ξεκινά η διαδικασία αυτόματης επίλυσης των αυστηρά καθορισμένων περιορισμών για την εύρεση μιας αρχικής λύσης. Έπειτα, η αρχική αυτή λύση βελτιστοποιείται ώστε να προκύψει το τελικό αποτέλεσμα.

12.2.2.1 Εύρεση αρχικής οριζοντιογραφικής χάραξης

Η εύρεση μια αρχικής λύσης που να ικανοποιεί τους περιορισμούς που έχουν τεθεί μπορεί να γίνει με δύο τρόπους. Ο πρώτος αφορά την εισαγωγή των τιμών των μεταβλητών απόφασης απευθείας από τον χρήστη και τον έλεγχο της ικανοποίησης των περιορισμών. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται μια χάραξη που να ικανοποιεί τους περιορισμούς ενώ ταυτόχρονα ο χρήστης μπορεί να προσπαθήσει μειώσει κατά το δυνατόν τον όγκο χωματισμών. Η διαδικασία αυτή απευθύνεται σε έμπειρους μελετητές οδοποιίας. Η δεύτερη διαδικασία, η οποία ακολουθείται στην παρούσα εργασία αφορά την εύρεση μιας τυχαίας αρχικής λύσης που προκύπτει μέσω της διαδικασίας επίλυσης των περιορισμών που παρέχει το λογισμικό Evolver. Έχοντας εισάγει τον αριθμό των κορυφών της πολυγωνικής γραμμής το λογισμικό εκκινεί τη διαδικασία επίλυσης των περιορισμών αυτόματα. Η επίλυση των περιορισμών γίνεται και αυτή με γενετικούς αλγορίθμους, αλλά σαν συνάρτηση στόχου

χρησιμοποιείται η μεγιστοποίηση του αριθμού των περιορισμών που ικανοποιούνται. Οι διαδικασίες επίλυσης των περιορισμών μπορούν να επαναληφθούν, ώστε να βρεθούν αρχικές λύσεις με μικρότερο αρχικό κόστος. Ο χρόνος εύρεσης αρχικών λύσεων ποικίλει ανάλογα με τον αριθμό των μεταβλητών απόφασης και την πολυπλοκότητα του προβλήματος. Όπως είναι ευνόητο η διαδικασία μπορεί να μην ολοκληρώνεται σε περιπτώσεις όπου οι περιορισμοί είναι πολύ αυστηρά καθορισμένοι. Εν κατακλείδι, σημειώνεται ότι οι αρχικές λύσεις παράγονται με εντελώς τυχαίο τρόπο και για το λόγο αυτό ενδεχομένως να διασχίζουν περιοχές που αυξάνουν τον όγκο χωματισμών. Ορισμένες από τις αρχικές λύσεις που προκύπτουν μετά την επίλυση των περιορισμών παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα.

Σχήμα 12.3: Απεικονίσεις τυχαίων αρχικών λύσεων μετά τη διαδικασία επίλυσης περιορισμών



Στον επόμενο πίνακα γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων των διαδικασιών εύρεσης πέντε αρχικών λύσεων για κάθε αριθμό εισαγόμενων κορυφών οριζοντιογραφίας. Η στήλη της αρχικής τιμής αναφέρεται στην τιμή της συνάρτησης στόχου πριν την επίλυση των περιορισμών, ενώ η στήλη του αρχικού κόστους αναφέρεται στην τιμή της συνάρτησης στόχου μετά την επίλυση των περιορισμών.

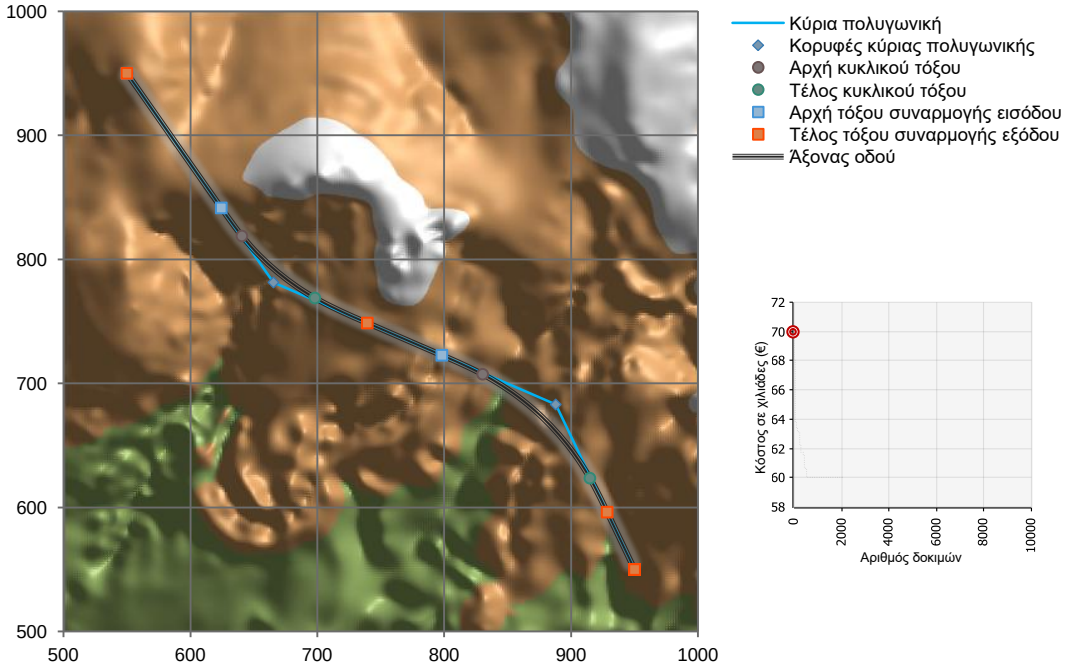
Όπως ήταν αναμενόμενο ο χρόνος εύρεσης μιας αρχικής λύσης που να ικανοποιεί τους περιορισμούς αυξήθηκε κατά πολύ στην περίπτωση της επίλυσης τριών κορυφών της κύριας πολυγωνικής. Αυτή η αύξηση οφείλεται αφ' ενός στον μεγαλύτερο αριθμό μεταβλητών απόφασης και αφ' ετέρου στο γεγονός, ότι η απόσταση των σημείων αρχής και τέλους είναι πολύ μικρή για τον ορισμό τριών ενδιάμεσων οριζοντιογραφικών καμπυλών που να πληρούν τις προδιαγραφές σχεδιασμού. Στην περίπτωση χρησιμοποίησης τεσσάρων κορυφών η επίλυση περιορισμών δεν κατέστη δυνατό να πραγματοποιηθεί, οπότε και αποκλείστηκε.

Πίνακας 12.5: Εύρεση αρχικών λύσεων οριζοντιογραφικής χάραξης με επίλυση περιορισμών

Αριθμός Κορυφών	Αρχική Τιμή	Μέγεθος Πληθυσμού	Βαθμός Διασταύρωσης	Βαθμός Μετάλλαξης	Αρχικό Κόστος	Αριθμός Δοκιμών	Χρόνος
1	86135	50	0,50	0,20	80507	98	00:24
					99309	61	00:17
					189604	62	00:16
					190758	55	00:13
					115520	109	00:24
2	86135	50	0,50	0,20	122143	307	01:09
					70085	127	00:36
					71365	515	02:01
					220283	988	03:46
					132347	372	01:30
3	86135	50	0,50	0,2	80679	2843	10:50
					132745	4164	17:56
					231305	4290	18:24
					160769	2217	12:08
					101916	3183	13:11

Με βάση τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα επιλέγονται οι λύσεις με τις μικρότερες τιμές αρχικού κόστους που έχουν προκύψει για περαιτέρω διερεύνηση και εισαγωγή ως αρχικής λύσης στη διαδικασία βελτιστοποίησης που ακολουθεί. Οι αρχικές αυτές λύσεις σημειώνονται με πράσινο χρώμα στον πίνακα. Βέβαια, η επιλογή των λύσεων αυτών δεν σημαίνει απαραίτητα πως είναι και οι πιο κατάλληλες, καθώς οι χαράξεις που προκύπτουν μπορεί να βρίσκονται κοντά σε ορισμένες τοπικά βέλτιστες λύσεις. Στις περιπτώσεις αυτές ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης στη συνέχεια ενδεχομένως να δυσκολευθεί να απομακρυνθεί από τέτοιες τοπικά βέλτιστες λύσεις ειδικά μάλιστα σε περιπτώσεις όπου έχει γίνει αστοχία στην επιλογή κατάλληλων γενετικών παραμέτρων. Περισσότερες πληροφορίες και ανάλυση αυτών των φαινομένων γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο. Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται η επιλεγμένη επίλυση περιορισμών η μία από τις τρεις επιλεγμένες αρχικές λύσεις της οριζοντιογραφικής χάραξης, η οποία περιλαμβάνει δύο κορυφές πολυγωνικής.

Σχήμα 12.4: Οριζοντιογραφική χάραξη δύο κορυφών μετά την επίλυση των περιορισμών



Στο σχήμα αυτό παρουσιάζεται τόσο η κύρια πολυγωνική γραμμή όσο και ο άξονας της οδού με τα χαρακτηριστικά του σημεία. Στο γράφημα που βρίσκεται δεξιά της οριζοντιογραφίας απεικονίζεται με ένα σημείο κόκκινου χρώματος η τιμή της συνάρτησης στόχου δηλαδή το η τιμή του αρχικού κόστους προτού ξεκινήσει η διαδικασία βελτιστοποίησης, δηλαδή όταν ο αριθμός δοκιμών είναι μηδενικός.

12.2.2.2 Βελτιστοποίηση αρχικής οριζοντιογραφικής χάραξης

Έχοντας επιλέξει ορισμένες αρχικές λύσεις που ικανοποιούν τους περιορισμούς επόμενο βήμα αποτελεί η βελτιστοποίηση τους. Όπως έχει αναφερθεί ο αλγόριθμος επίλυσης είναι πιθανοκρατικός και κατά συνέπεια το αποτέλεσμα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη γεννήτρια τυχαίων αριθμών, που αναφέρθηκε στην υποενότητα 11.6.3. Για τον λόγο αυτόν μετά την εύρεση μιας αρχικής λύσης, που να ικανοποιεί τους περιορισμούς επιλέγεται να γίνει επίλυση πέντε φορές ώστε να διαπιστωθούν τυχόν αποκλίσεις και αδυναμίες του αλγόριθμου με βάση τα δεδομένα και τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται. Τα αποτελέσματα των πέντε αυτών επιλύσεων ανάλογα με τον αριθμό των κορυφών παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 12.6: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης οριζοντιογραφικής χάραξης

Αριθμός Κορυφών	Αρχικό Κόστος	Μέγεθος Πληθυσμού	Βαθμός Διασταύρωσης	Βαθμός Μετάλλαξης	Τελικό Κόστος	Μέσος Όρος	Τυπική Απόκλιση	Συντελεστής Διακύμανσης
1	80507	50	0,50	0,20	60309	60292	285	0,47%
					60736			
					60041			
					60040			
					60332			
2	70085	50	0,50	0,20	57735	59207	1257	2,12%
					60239			
					59398			
					60561			
					58103			
3	80679	50	0,50	0,2	61178	61216	1550	2,53%
					62507			
					59220			
					60230			
					62943			

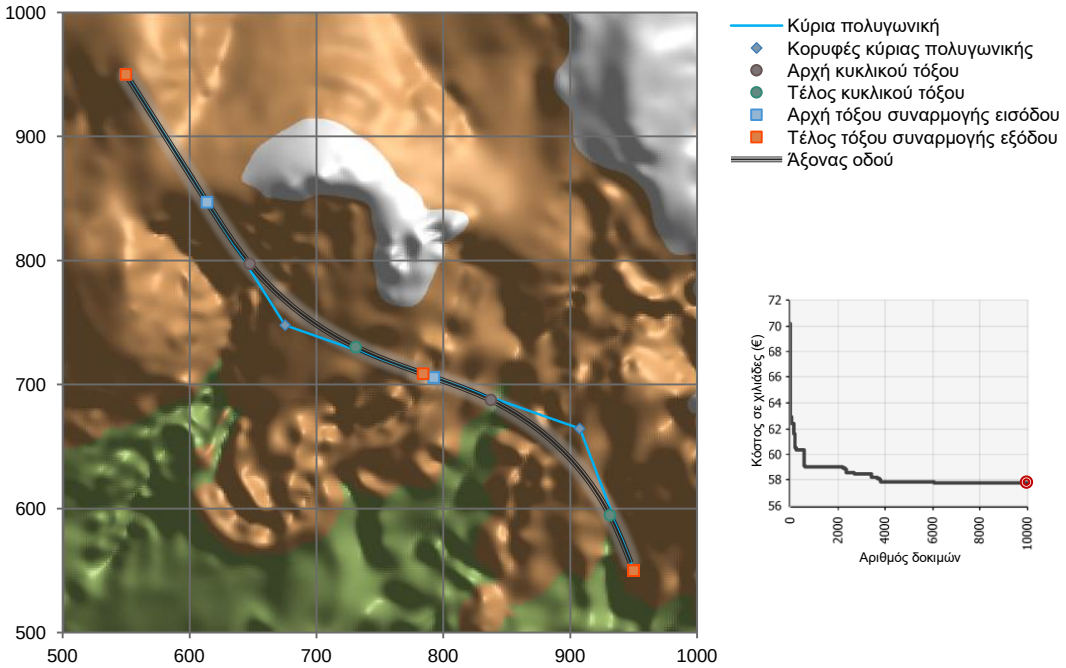
Με βάση τα στοιχεία του πίνακα αυτού διαπιστώνεται ότι η χαμηλότερη τιμή της συνάρτησης στόχου, δηλαδή του κόστους των όγκων χωματισμών σημειώθηκε κατά την πρώτη επίλυση με δύο οριζοντιογραφικές καμπύλες. Επίσης, παρατηρείται ότι ο χαμηλότερος μέσος όρος των πέντε επιλύσεων εμφανίζεται στην περίπτωση επίλυσης με δύο οριζοντιογραφικές καμπύλες. Βέβαια, με βάση την τιμή της τυπικής απόκλισης πρέπει να γίνει ο κατάλληλος στατιστικός έλεγχος, ώστε για ορισμένο διάστημα εμπιστοσύνης να καταλήξουμε με βεβαιότητα στο συμπέρασμα ότι η επίλυση με δύο κορυφές πολυγωνικής αποτελεί την προσφορότερη λύση.

Ο συντελεστής διακύμανσης προέρχεται από τον ποσοστιαίο λόγο της τυπικής απόκλισης προς τη μέση τιμή και αποτελεί ένα δείκτη που φανερώνει την ποιότητα των επιλύσεων. Οι αρκετά χαμηλές τιμές που έχουν προκύψει δείχνουν πως το σύστημα λειτουργεί ικανοποιητικά καθώς υψηλοί μέσοι όροι συνδυάζονται με χαμηλές τυπικές αποκλίσεις.

Χαρακτηριστική, είναι η περίπτωση της επίλυσης με μια κορυφή, όπου ο μικρός αριθμός μεταβλητών απόφασης έχει επιτρέψει στο σύστημα την παραγωγή επιλύσεων με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Βέβαια, θα ήταν παραπλανητικό αν ο συντελεστής αυτός χρησιμοποιείτο για σύγκριση μεταξύ των επιλύσεων διαφορετικού αριθμού κορυφών, αφού υπάρχει η πιθανότητα στις επιλύσεις με έναν συγκεκριμένο αριθμό κορυφών ο αλγόριθμος να «παγιδεύεται» σε μια τοπικά βέλτιστη τιμή παρουσιάζοντας χαμηλή τυπική απόκλιση. Στην περίπτωση αυτή, ο συντελεστής διακύμανσης θα εμφανιζόταν να έχει ιδιαίτερα

χαμηλή τιμή χωρίς η λύση να χαρακτηρίζεται από την ανάλογη ποιότητα. Παρ' όλα αυτά και έχοντας υπ' όψιν ότι οι επιλύσεις προέρχονται από με βάση έναν απλοποιημένο τρόπο υπολογισμού χωματισμών, επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί η επίλυση που εμφάνισε τη χαμηλότερη τιμή κόστους για περαιτέρω διερεύνηση. Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται η βελτιστοποιημένη οριζοντιογραφική χάραξη που αναφέρεται στην επίλυση αυτή.

Σχήμα 12.5: Βελτιστοποιημένη οριζοντιογραφική χάραξη



Στο γράφημα δεξιά της οριζοντιογραφίας της βελτιστοποιημένης χάραξης, παρατηρείται σημαντική πρόοδος μέσα στις πρώτες δοκιμές που κάνει ο αλγόριθμος καθώς η τιμή της συνάρτησης στόχου μειώνεται κατά περίπου δέκα χιλιάδες μέσα σε λίγες δοκιμές. Επίσης, φαίνεται ότι μετά τις τέσσερις χιλιάδες επαναλήψεις η λύση φαίνεται να συγκλίνει παρουσιάζοντες μικρές διαφορές. Ο χρόνος εκτέλεσης των δέκα χιλιάδων δοκιμών κυμαινόταν από 35' έως 40' περίπου χωρίς να εμφανίζεται συσχέτιση ως προς το πλήθος των χρησιμοποιούμενων κορυφών. Κατά πάσα πιθανότητα σημαντικό ρόλο έπαιξε η εκάστοτε κατάσταση του υπολογιστικού συστήματος και οι διεργασίες που εκτελούνταν στο παρασκήνιο, οι οποίες και θα επηρέασαν την υπολογιστική του απόδοση.

Το μέγεθος των όγκων χωματισμών και του κόστους της χάραξης μετά την βελτιστοποίηση της οριζοντιογραφικής χάραξης παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα. Το κόστος της βελτιστοποιημένης χάραξης είναι μειωμένο κατά 18% σε σχέση με την αρχική επίλυση που πληροί τους περιορισμούς και κατά 33% ως προς την αρχική ευθύγραμμη χάραξη.

Πίνακας 12.7: Όγκοι και κόστος χωματισμών μετά τη βελτιστοποίηση κατά την οριζοντιογραφία

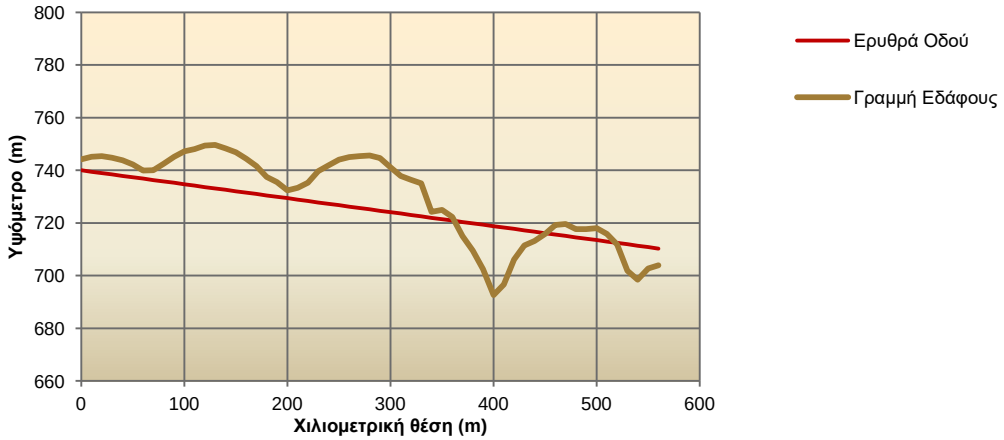
Μεταβλητές	Περιγραφή	Τιμή
E_F	Συνολικός όγκος επιχωμάτων οδού	22440 m^3
E_C	Συνολικός όγκος εκσκαφών οδού	47855 m^3
C	Τιμή συνάρτησης στόχου	57735 €

Σημειώνεται ότι η κατακόρυφη χάραξη που χρησιμοποιείται για τους παραπάνω υπολογισμούς περιλαμβάνει ένα εφαπτόμενο τμήμα σταθερής κλίσης που ξεκινά από το σημείο αρχής και καταλήγει στο σημείο τέλους και αποτελεί το αντικείμενο βελτιστοποίησης της επόμενης υποενότητας.

12.2.3 Βελτιστοποίηση κατακόρυφης χάραξης

Μετά την βελτιστοποίηση της οριζοντιογραφικής χάραξης ξεκινά το στάδιο της βελτιστοποίησης κατακόρυφης χάραξης. Στο στάδιο αυτό διατηρώντας σταθερές τις τιμές των μεταβλητών απόφασης της οριζοντιογραφικής χάραξης ακολουθείται παρόμοια διαδικασία με την προηγούμενη. Η μηκοτομή της βελτιστοποιημένης οριζοντιογραφικής χάραξης παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα. Κατά την βελτιστοποίηση οριζοντιογραφικής χάραξης ο άξονας της οδού διατηρεί σταθερή κατά μήκος κλίση η οποία υπολογίζεται ξανά σε κάθε δοκιμή σε σχέση με το συνολικό μήκος της οδού που προκύπτει.

Σχήμα 12.6: Μηκοτομή μετά τη βελτιστοποίηση της οριζοντιογραφικής χάραξης δύο κορυφών



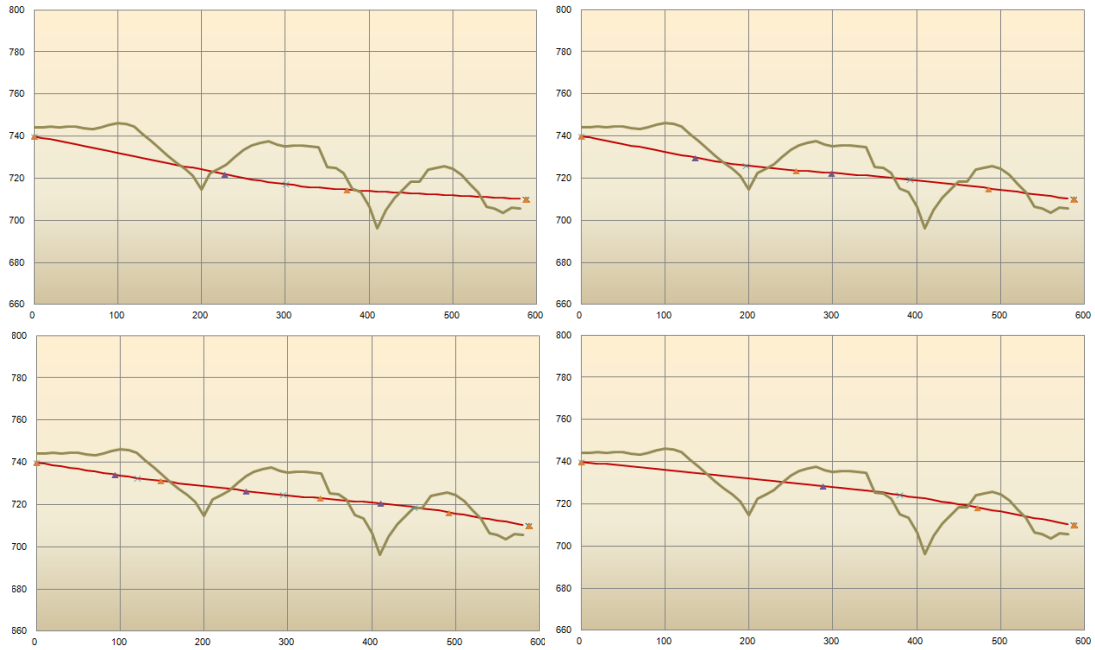
Στο στάδιο της βελτιστοποίησης της κατακόρυφης χάραξης ο χρήστης επιλέγει αρχικά τον αριθμό των κορυφών της πολυγωνικής της μηκοτομής για την έναρξη της διαδικασίας. Όπως και στο στάδιο της βελτιστοποίησης της οριζοντιογραφικής χάραξης η διαδικασία ξεκινά με την εύρεση αρχικών λύσεων που να ικανοποιούν τους περιορισμούς και στη συνέχεια ακολουθεί η βελτιστοποίηση των καλύτερων αρχικών τιμών.

12.2.3.1 Εύρεση αρχικής κατακόρυφης χάραξης

Κατά την ίδια λογική με τη διαδικασία εύρεσης μια αρχικής οριζοντιογραφικής χάραξης, η οποία να ικανοποιεί τους περιορισμούς, έτσι και για την εύρεση μιας αρχικής κατακόρυφης χάραξης, η εισαγωγή των τιμών των μεταβλητών απόφασης μπορεί να γίνει απευθείας από έναν έμπειρο χρήστη ή να χρησιμοποιηθεί η αυτοματοποιημένη διαδικασία επίλυσης των περιορισμών παράγοντας αρχικές λύσεις με τυχαίο τρόπο. Όπως και προηγούμενα χρησιμοποιήθηκε ο δεύτερος τρόπος εύρεσης αρχικών λύσεων παράγοντας πέντε διαφορετικές χαράξεις που ικανοποιούν τους περιορισμούς για κάθε αριθμό κορυφών της κύριας πολυγωνικής γραμμής. Ορισμένες από τις αρχικές λύσεις για την κατακόρυφη χάραξη που προκύπτουν μετά την επίλυση των περιορισμών παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Γενικά, οι περιορισμοί της κατακόρυφης χάραξης δεν έρχονται σε σύγκρουση σε τόσο μεγάλο βαθμό, όσο αυτοί της οριζοντιογραφίας. Επίσης, η κατακόρυφη χάραξη χαρακτηρίζεται από μικρότερο πλήθος μεταβλητών απόφασης ανά κορυφή πολυγωνικής, καθώς χρειάζονται μόνο τρεις μεταβλητές έναντι των πέντε που απαιτεί ο ορισμός κάθε οριζοντιογραφική καμπύλης.

Σχήμα 12.7: Απεικονίσεις τυχαίων αρχικών λύσεων μετά τη διαδικασία επίλυσης περιορισμών



Στον επόμενο πίνακα γίνεται αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων των διαδικασιών εύρεσης πέντε αρχικών λύσεων για κάθε αριθμό εισαγόμενων κορυφών της μηκοτομής. Η στήλη της αρχικής τιμής αναφέρεται στην τιμή της συνάρτησης στόχου πριν την επίλυση των περιορισμών, η οποία αποτελεί το αποτέλεσμα του σταδίου της βελτιστοποίησης της οριζοντιογραφικής χάραξης. Η στήλη του αρχικού κόστους αναφέρεται στην τιμή της συνάρτησης στόχου μετά την επίλυση των περιορισμών. Ο χρόνος εύρεσης μιας αρχικής κατακόρυφης χάραξης, που να ικανοποιεί τους περιορισμούς είναι κατά πολύ μικρότερος από τους αντίστοιχους χρόνους εύρεσης μιας αρχικής οριζοντιογραφικής του Πίνακα 12.5. Όπως ήταν αναμενόμενο ο χρόνος αυξήθηκε σε σχέση με τον αριθμό των κορυφών που χρησιμοποιούνται αλλά δεν χρειάστηκε πάνω από μισό λεπτό για την εύρεση μιας αρχικής λύσης. Στην περίπτωση χρησιμοποίησης τεσσάρων κορυφών η επίλυση περιορισμών δεν κατέστη δυνατό να πραγματοποιηθεί, καθώς το μήκος της χάραξης δεν επαρκούσε.

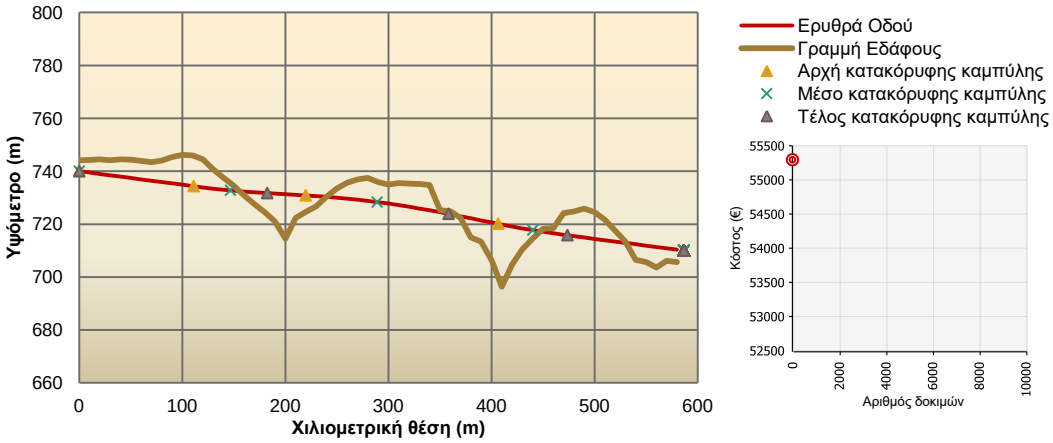
Πίνακας 12.8: Εύρεση αρχικών λύσεων κατακόρυφης χάραξης με επίλυση περιορισμών

Αριθμός Κορυφών	Αρχική Τιμή	Μέγεθος Πληθυσμού	Βαθμός Διασταύρωσης	Βαθμός Μετάλλαξης	Αρχικό Κόστος	Αριθμός Δοκιμών	Χρόνος
1	57735	50	0,50	0,20	72996	5	00:03
					55737	14	00:03
					78690	17	00:03
					62406	14	00:03
					57422	2	00:02
2	57735	50	0,50	0,20	60061	23	00:04
					64306	25	00:04
					65372	29	00:04
					62414	23	00:04
					55685	16	00:03
3	57735	50	0,50	0,2	57971	90	00:09
					55333	299	00:27
					55546	262	00:23
					57879	41	00:05
					60510	54	00:06

Με βάση τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα επιλέγονται οι λύσεις με τις μικρότερες τιμές αρχικού κόστους που έχουν προκύψει για περαιτέρω διερεύνηση και εισαγωγή ως αρχικής λύσης στη

διαδικασία βελτιστοποίησης που ακολουθεί. Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται η επιλεγμένη επίλυση περιορισμών της κατακόρυφης χάραξης με τρεις κορυφές πολυγωνικής.

Σχήμα 12.8: Κατακόρυφη χάραξη τριών κορυφών μετά την επίλυση των περιορισμών



Στο σχήμα αυτό παρουσιάζεται η ερυθρά της οδού η οποία σχηματίζεται από τη σύνδεση των σημείων πύκνωσης τα οποία ενυπάρχουν στην χάραξη χωρίς να εμφανίζονται. Στη μηκοτομή επίσης απεικονίζονται τα σημεία αρχής, μέσης και τέλους κάθε κατακόρυφης καμπύλης. Στο γράφημα που βρίσκεται δεξιά της οριζοντιογραφίας απεικονίζεται με ένα σημείο κόκκινου χρώματος η τιμή της συνάρτησης στόχου, δηλαδή η τιμή του κόστους της αρχικής κατακόρυφης χάραξης προτού ξεκινήσει η διαδικασία βελτιστοποίησής της.

12.2.3.2 Βελτιστοποίηση αρχικής κατακόρυφης χάραξης

Έχοντας επιλέξει ορισμένες αρχικές λύσεις που ικανοποιούν τους περιορισμούς επιλέγεται να επαναληφθεί η διαδικασία βελτιστοποίησης πέντε φορές ώστε να διαπιστωθούν τυχόν αποκλίσεις και αδυναμίες του αλγόριθμου με βάση τα δεδομένα και τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται. Τα αποτελέσματα των πέντε αυτών επιλύσεων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

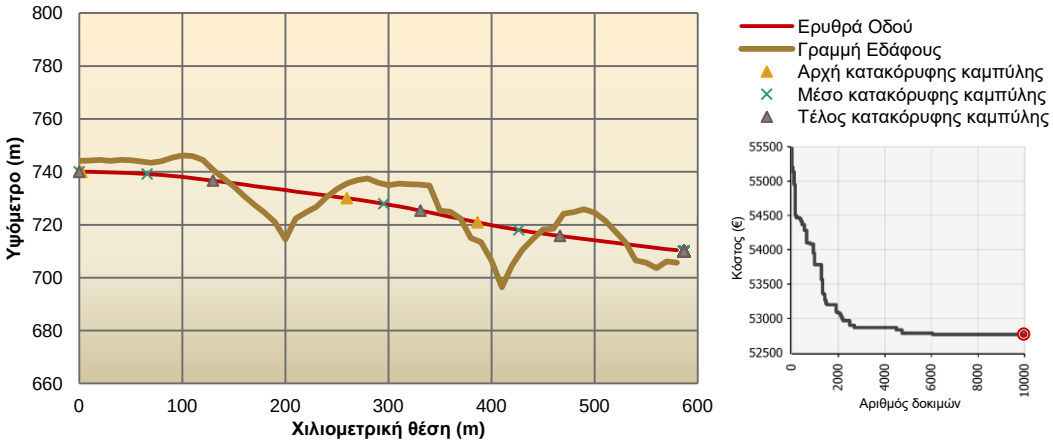
Πίνακας 12.9: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης οριζοντιογραφικής χάραξης

Αριθμός Κορυφών	Αρχικό Κόστος	Μέγεθος Πληθυσμού	Βαθμός Διασταύρωσης	Βαθμός Μετάλλαξης	Τελικό Κόστος	Μέσος Όρος	Τυπική Απόκλιση	Συντελεστής Διακύμανσης
1	55737	50	0,50	0,20	54266	54548	630	1,16%
					54266			
					54266			
					54266			
					55675			
2	55685	50	0,50	0,20	54192	54163	35	0,07%
					54142			
					54138			
					54132			
					54209			
3	55333	50	0,50	0,2	54290	53643	804	1,50%
					54212			
					52746			
					52780			
					54188			

Με βάση τα στοιχεία του πίνακα αυτού διαπιστώνεται ότι η χαμηλότερη τιμή της συνάρτησης στόχου, δηλαδή του κόστους των όγκων χωματισμών σημειώθηκε κατά την τρίτη επίλυση με τρεις κατακόρυφες καμπύλες. Επίσης, παρατηρείται ότι ο χαμηλότερος μέσος όρος των πέντε επιλύσεων

εμφανίζεται στην περίπτωση επίλυσης με τρεις κατακόρυφες καμπύλες γενικότερα. Οι εξαιρετικά χαμηλές τιμές του συντελεστή διακύμανσης δείχνουν πως το σύστημα λειτουργεί ικανοποιητικά καθώς υψηλοί μέσοι όροι συνδυάζονται με χαμηλές τυπικές αποκλίσεις. Χαρακτηριστική, είναι η περίπτωση της επίλυσης με μια κορυφή, όπου ο μικρός αριθμός μεταβλητών απόφασης έχει επιτρέψει στο σύστημα την παραγωγή επιλύσεων τεσσάρων επιλύσεων ίσες τιμές της συνάρτησης στόχου. Έχοντας υπ' όψιν ότι οι επιλύσεις προέρχονται από με βάση έναν απλοποιημένο τρόπο υπολογισμού χωματισμών, επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί η επίλυση που εμφάνισε τη χαμηλότερη τιμή κόστους για περαιτέρω διερεύνηση. Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται η βελτιστοποιημένη κατακόρυφη χάραξη.

Σχήμα 12.9: Βελτιστοποιημένη κατακόρυφη χάραξη



Στο γράφημα δεξιά βελτιστοποιημένης κατακόρυφης χάραξης, παρατηρείται πρόοδος μέσα στις πρώτες δοκιμές, καθώς η τιμή της συνάρτησης στόχου μειώνεται σημαντικά μέσα στις πρώτες δύο χιλιάδες. Επίσης, φαίνεται ότι μετά τις έξι χιλιάδες επαναλήψεις η λύση φαίνεται να συγκλίνει παρουσιάζοντες μικρές διαφορές. Αν και ο αριθμός δοκιμών παρέμεινε σταθερός και σε αυτήν την περίπτωση, ο μέγιστος χρόνος επίλυσης ήταν μικρότερος, καθώς κυμαινόταν στα 15', δηλαδή λιγότερο από το ήμισυ του χρόνου που απαιτούσε η αντίστοιχη διαδικασία βελτιστοποίησης της οριζοντιογραφικής χάραξης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως οι υπολογισμοί της κατακόρυφης χάραξης είναι πολύ πιο απλοί από τους αντίστοιχους της οριζοντιογραφικής.

12.2.4 Τελικό κόστος και όγκοι χωματισμών

Το μέγεθος των όγκων χωματισμών και του κόστους της χάραξης μετά την βελτιστοποίηση της κατακόρυφης χάραξης παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα. Το κόστος της βελτιστοποιημένης χάραξης είναι μειωμένο κατά 9% σε σχέση με την χάραξη που προέκυψε μετά τη βελτιστοποίηση της οριζοντιογραφίας και κατά 39% ως προς την αρχική ευθύγραμμη χάραξη.

Πίνακας 12.10: Τελικοί όγκοι και κόστος χωματισμών μετά τη βελτιστοποίηση

Μεταβλητές	Περιγραφή	Τιμή
E_F	Συνολικός όγκος επιχωμάτων οδού	27687 m^3
E_C	Συνολικός όγκος εκσκαφών οδού	32635 m^3
C	Τιμή συνάρτησης στόχου	52746 €

Από τα προαναφερθέντα προκύπτει ότι η μείωση του κόστους προέρχεται σε μεγαλύτερο βαθμό από την βελτιστοποίηση της οριζοντιογραφικής χάραξης, ενώ η βελτιστοποίηση της κατακόρυφης χάραξης συνδράμει κατά ένα μικρότερο ποσοστό. Ο συνολικός όγκος επιχωμάτων προκύπτει μικρότερος από τον όγκο εκσκαφών αφού έχει καθοριστεί μεγαλύτερη τιμή μοναδιαίου κόστους.

12.2.5 Αποτελέσματα μεταβλητών απόφασης

Οι τιμές των μεταβλητών απόφασης που προκύπτουν μετά τη βελτιστοποίηση της χάραξης περιλαμβάνονται στον επόμενο πίνακα. Αυτές παρουσιάζονται ως δεκαδικές όχι για λόγους ακρίβειας, αλλά για να τονιστεί ότι οι μεταβλητές αυτές δεν μοντελοποιήθηκαν ως ακέραιες και το πεδίο αναζήτησής τους ήταν συνεχές. Όσον αφορά τη μηκοτομή, σημειώνεται πως τόσο οι δύο αρχικές κυρτές καμπύλες όσο και η κοίλη που ακολουθεί έχουν λάβει την ελάχιστη τιμή του διαστήματος αναζήτησης που έχει οριστεί. Αυτό ενδεχομένως συμβαίνει, καθώς οι υπολογισμοί της ορατότητας για στάση γίνονται με βάση την θεώρηση ταχύτητα μελέτης και όχι λαμβάνοντας υπ' όψιν τα λειτουργικά χαρακτηριστικά, συμβάλλοντας, έτσι σε χαμηλότερες απαιτήσεις γενικότερα.

Πίνακας 12.11: Τελικές τιμές μεταβλητών απόφασης

Μεταβλητές	**Περιγραφή**	**Τιμή**
n	Αριθμός κορυφών κύριας πολυγωνικής εκτός αρχής κα τέλους	2
x_1	Τετμημένη πρώτης κορυφής πολυγωνικής	675,4 m
x_2	Τετμημένη δεύτερης κορυφής πολυγωνικής	907,5 m
y_1	Τεταγμένη κορυφής πρώτης πολυγωνικής	747,9 m
y_2	Τεταγμένη κορυφής δεύτερης πολυγωνικής	664,4 m
R_1	Ακτίνα κυκλικού τόξου πρώτης οριζοντιογραφικής καμπύλης	248,6 m
R_2	Ακτίνα κυκλικού τόξου πρώτης οριζοντιογραφικής καμπύλης	210,1 m
A_{1_1}	Παράμετρος κλωθοειδούς εισόδου πρώτης οριζοντιογραφικής καμπύλης	122,0 m
A_{1_2}	Παράμετρος κλωθοειδούς εισόδου δεύτερης οριζοντιογραφικής καμπύλης	100,9 m
A_{2_1}	Παράμετρος κλωθοειδούς εξόδου πρώτης οριζοντιογραφικής καμπύλης	119,4 m
A_{2_2}	Παράμετρος κλωθοειδούς εξόδου δεύτερης οριζοντιογραφικής καμπύλης	100,9 m
m	Αριθμός κορυφών πολυγωνικής κατά τη μηκοτομή εκτός αρχής και τέλους	3
h_1	Χιλιομετρική θέση πρώτης κορυφής πολυγωνικής κατά τη μηκοτομή	65,9 m
h_2	Χιλιομετρική θέση δεύτερης κορυφής πολυγωνικής κατά τη μηκοτομή	295,4 m
h_3	Χιλιομετρική θέση τρίτης κορυφής πολυγωνικής κατά τη μηκοτομή	426,5 m
z_1	Υψόμετρο πρώτης κορυφής πολυγωνικής κατά τη μηκοτομή	740,0 m
z_2	Υψόμετρο δεύτερης κορυφής πολυγωνικής κατά τη μηκοτομή	728,2 m
z_3	Υψόμετρο τρίτης κορυφής πολυγωνικής κατά τη μηκοτομή	717,7 m
H_1	Ακτίνα πρώτου τόξου στρογγύλευσης κυρτής κατακόρυφης καμπύλης	2672,5 m
H_2	Ακτίνα δεύτερου τόξου στρογγύλευσης κυρτής κατακόρυφης καμπύλης	2500,0 m
H_3	Ακτίνα τρίτου τόξου στρογγύλευσης κοίλης κατακόρυφης καμπύλης	2500,0 m

13 Ανάλυση και Αξιολόγηση

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιούνται αρκετές διαφορετικές επιλύσεις προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση διαφόρων παραμέτρων στο πρότυπο βελτιστοποίησης της χάραξης. Η μεθοδολογία εφαρμόζεται τόσο ως προς ορισμένες παραμέτρους σχεδιασμού, όσο και ως προς τις γενετικές παραμέτρους που καθορίζουν την αποδοτικότητα του αλγορίθμου επίλυσης. Για τον λόγο αυτόν πραγματοποιείται μια σειρά δοκιμών και εξάγονται ορισμένα στοιχεία. Ιδιαίτερη έμφαση δίδεται στην αναλυτική περιγραφή και ερμηνεία των αποτελεσμάτων της εφαρμογής της μεθοδολογίας με τη χρήση κατάλληλων διαγραμμάτων. Το πρότυπο RoadEvolver που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία αξιολογείται με βάση τα κριτήρια που έχουν καθιερωθεί στην έρευνα βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων.

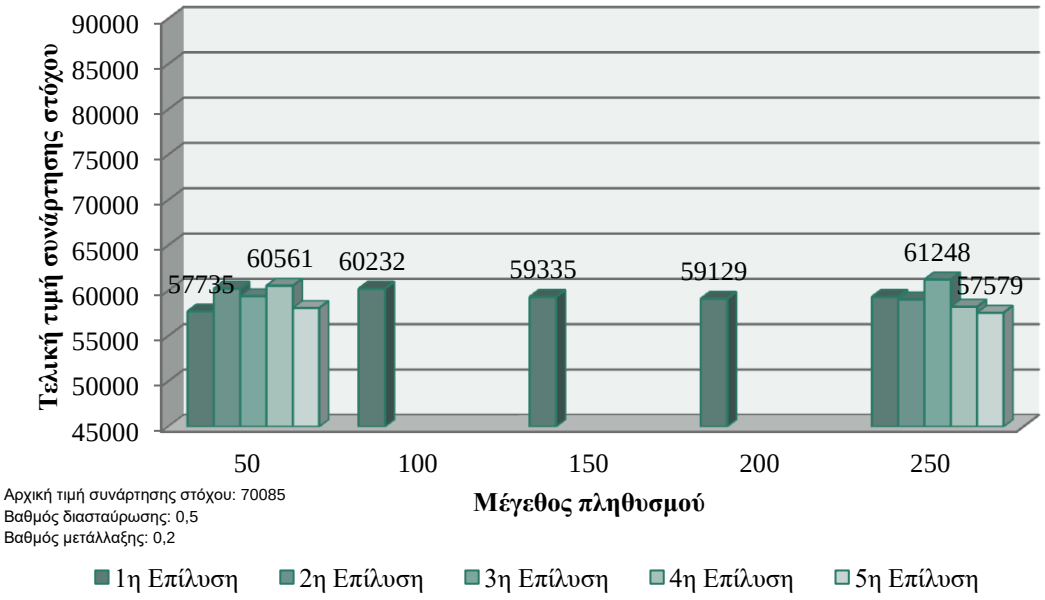
13.1 Ανάλυση ευαισθησίας γενετικών παραμέτρων

Για την ανάλυση ευαισθησίας των γενετικών παραμέτρων μελετάται το στάδιο της βελτιστοποίησης της οριζοντιογραφικής χάραξης, καθώς αυτό είναι που καθορίζει σε μεγαλύτερο βαθμό το τελικό αποτέλεσμα της συνάρτησης στόχου. Τα στοιχεία που αναλύονται αφορούν την επίδραση του βαθμού διασταύρωσης και μετάλλαξης, το μέγεθος πληθυσμού, την αρχική τιμή της συνάρτησης στόχου αλλά και τους διάφορους συνδυασμούς των παραμέτρων αυτών.

13.1.1 Μέγεθος πληθυσμού

Το μέγεθος του πληθυσμού καθορίζει πόσα χρωμοσώματα/γονότυποι πρέπει να αποθηκεύονται στη μνήμη σε κάθε δεδομένη στιγμή. Κοινή άποψη αποτελεί ότι όσο μεγαλύτερο το μέγεθος του αρχικού πληθυσμού τόσο μεγαλύτερη η πιθανότητα να βρεθεί το ολικό βέλτιστο . Από την άλλη πλευρά το μέγεθος του πληθυσμού αυξάνει τον χρόνο επίλυσης. Για το λόγο αυτό αρκετοί ερευνητές έχουν εστιάσει την προσοχή τους στην εύρεση του βέλτιστου μεγέθους πληθυσμού σε διάφορα προβλήματα. Το λογισμικό προτείνει τιμές από 30 έως 100 ενώ το μέγεθος του αρχικού πληθυσμού πρέπει να είναι γενικά ανάλογο του μεγέθους του προβλήματος. Μελετήθηκαν πέντε διαφορετικά μεγέθη πληθυσμού με τις ακραίες τιμές να μελετώνται πιο αναλυτικά με τέσσερις επιπλέον επαναλήψεις. Τα αποτελέσματα των επιλύσεων φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα. Η ελάχιστη τιμή του κόστους εμφανίζεται για το μεγαλύτερο μέγεθος πληθυσμού που μελετάται. Αυτό συμβαίνει καθώς, με αυξημένο πληθυσμό, οι πιθανότητες εύρεσης βέλτιστης λύσης είναι μεγαλύτερες, λόγω και της μεγαλύτερης ποικιλίας γονιδίων. Βέβαια, πρέπει να αναφερθεί ότι στο πλαίσιο ανάλυσης της παρούσας εργασίας επιλέχθηκε να πραγματοποιούνται δέκα χιλιάδες δοκιμές σε κάθε επίλυση με τον αλγόριθμο γενετικών αλγορίθμων. Το πλήθος αυτό επιλέχθηκε τόσο μεγάλο, ώστε να υπάρχει ασφαλές περιθώριο μέσα στο οποίο η επίλυση να καταφέρνει να συγκλίνει. Αν το πλήθος δοκιμών δεν ήταν τόσο μεγάλο ενδεχομένως η επιλογή μεγάλου μεγέθους πληθυσμού να είχε πιο δυσμενή αποτελέσματα.

Σχήμα 13.1: Αποτελέσματα ως προς το μέγεθος του πληθυσμού γονότυπων



Οι επιλύσεις με το μεγαλύτερο μέγεθος πληθυσμού εμφανίζουν εκτός της ελάχιστης τιμής κόστους και τη μέγιστη. Στο προηγούμενο διάγραμμα διαπιστώνεται επίσης πολύ χαμηλή μεταβλητότητα στις τιμές του κόστους ως προς το μέγεθος του πληθυσμού. Όσον αφορά τα αποτελέσματα των υπόλοιπων επαναλήψεων των ακραίων τιμών αυτά εμφανίζονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 13.1: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης με διαφορετικό μέγεθος πληθυσμού

Αριθμός Κορυφών	Αρχικό Κόστος	Μέγεθος Πληθυσμού	Βαθμός Διασταύρωσης	Βαθμός Μετάλλαξης	Τελικό Κόστος	Μέσος Όρος	Τυπική Απόκλιση	Συντελεστής Διακύμανσης
2	70085	50	0,50	0,20	57735	59207	1257	2,12%
					60239			
					59398			
					60561			
					58103			
2	70085	250	0,50	0,20	59332	59090	1389	2,35%
					59047			
					61248			
					58246			
					57579			

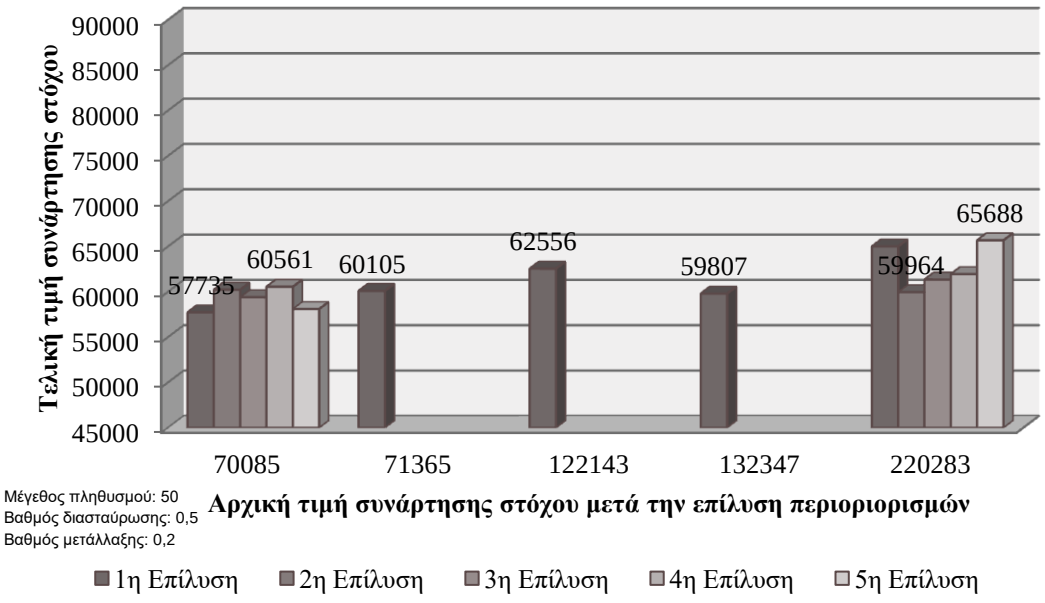
Με βάση τα αποτελέσματα των πέντε επιλύσεων, φαίνεται ότι το μεγαλύτερο μέγεθος πληθυσμού φαίνεται να πετυχαίνει επιλύσεις με χαμηλότερο κόστος καθώς ο μέσος όρος είναι χαμηλότερος στην περίπτωση αυτή. Παρ' όλα αυτά, τόσο η τυπική απόκλιση όσο και ο συντελεστής διακύμανσης για το μικρότερο μέγεθος πληθυσμού έχουν ελαφρώς χαμηλότερες τιμές και για το λόγο αυτό επιλέχθηκαν για περαιτέρω μελέτη. Για συμπεράσματα με μεγαλύτερη βεβαιότητα απαιτείται η περαιτέρω ανάλυση του πληθυσμού με περισσότερα μεγέθη και επαναλήψεις, καθώς με βάση τα υπάρχοντα στοιχεία δεν φαίνεται να υπάρχει κάποια στατιστικά σημαντική διαφορά.

13.1.2 Αρχική επίλυση

Για τη μελέτη τη συμπεριφοράς του αλγορίθμου βελτιστοποίησης έγινε έλεγχος του αλγορίθμου ως προς διαφορετικές αρχικές επιλύσεις, οι οποίες επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη σύνθεση του αρχικού πληθυσμού. Συγκεκριμένα, έγινε η επίλυση των περιορισμών πέντε φορές από τις οποίες προέκυψαν

διαφορετικές διαμορφώσεις της χάραξης, οι οποίες συνεπάγονταν με διαφορετικό κόστος χωματισμών. Στον οριζόντιο άξονα παρουσιάζονται οι πέντε αυτές αρχικές αυτές τιμές του κόστους που προέκυψαν μετά την επίλυση των περιορισμών, ενώ ο κατακόρυφος άξονας εκφράζει την τελική τιμή της συνάρτησης στόχου μετά τη βελτιστοποίηση της οριζοντιογραφικής χάραξης.

Σχήμα 13.2: Αποτελέσματα ως προς την αρχική τιμή κόστους μετά την επίλυση περιορισμών



Όπως παρατηρείται στο παραπάνω διάγραμμα για τη μικρότερη και μεγαλύτερη αρχική τιμή της συνάρτησης στόχου μετά την επίλυση περιορισμών, η διαδικασία βελτιστοποίησης επαναλαμβάνεται πέντε φορές. Τα αναλυτικά αποτελέσματα των πέντε αυτών επαναλήψεων παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 13.2: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης με διαφορετική αρχική επίλυση

Αριθμός Κορυφών	Αρχικό Κόστος	Μέγεθος Πληθυσμού	Βαθμός Διασταύρωσης	Βαθμός Μετάλλαξης	Τελικό Κόστος	Μέσος Όρος	Τυπική Απόκλιση	Συντελεστής Διακύμανσης
2	70085	50	0,50	0,20	57735	59207	1257	2,12%
					60239			
					59398			
					60561			
					58103			
2	22083	50	0,50	0,20	65009	62793	2453	3,91%
					59964			
					61353			
					61951			
					65688			

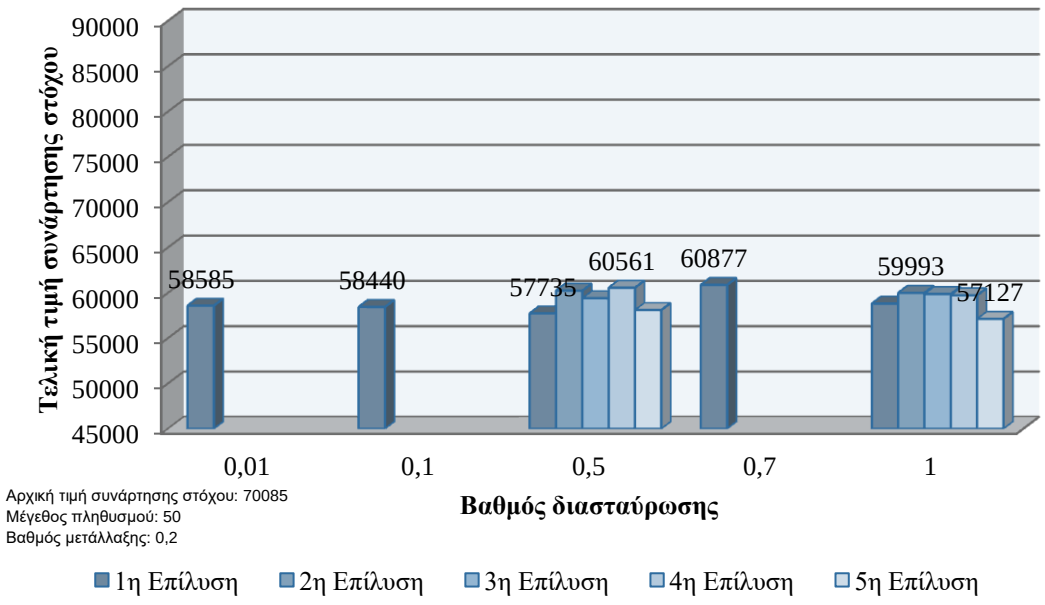
Με βάση τα στοιχεία του παραπάνω πίνακα συμπεραίνεται ότι το τελικό κόστος παρουσιάζει ορισμένη ευαισθησία ως προς το κόστος της αρχικής χάραξης που χρησιμοποιείται στη διαδικασία βελτιστοποίησης. Τόσο η μέση τιμή, όσο και η τυπική απόκλιση αυξάνονται αισθητά στην περίπτωση της μεγαλύτερης αρχικής τιμής. Προφανώς αυτό συμβαίνει, καθώς όταν η διαδικασία ξεκινά από μια λύση που απέχει κατά πολύ από τη βέλτιστη είναι πιο εύκολο να καταλήξει σε τοπικά βέλτιστες τιμές. Για το λόγο αυτό στις επόμενες υποενότητες εξετάζεται η συμπεριφορά των βαθμών διασταύρωσης και μετάλλαξης, τόσο ως προς την αρχική χάραξη χαμηλού κόστους όσο και ως προς αυτήν του υψηλού κόστους., ώστε να διαπιστωθεί η συμπεριφορά των παραμέτρων αυτών και στις δύο περιπτώσεις. Επισημαίνεται ότι ο αρχικός πληθυσμός που χρησιμοποιείται στον αλγόριθμο επίλυσης

αν και παράγεται με τυχαίο τρόπο βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην αρχική επίλυση και καταρτίζεται με τυχαίες τροποποιήσεις της.

13.1.3 Βαθμός διασταύρωσης

Η διασταύρωση εξυπηρετεί την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ διαφορετικών πιθανών λύσεων. Πιο συγκεκριμένα, όπως έχει αναφερθεί στο πέμπτο κεφάλαιο, οι τελεστές διασταύρωσης συνδυάζουν τα στοιχεία δύο χρωμοσωμάτων γονέων δημιουργώντας δύο νέους απογόνους ανταλλάσσοντας αντίστοιχα τμήματα γενετικού κώδικα των γονέων. Ο βαθμός διασταύρωσης μπορεί να λάβει τιμές από 0,01 έως 1,00 και αντικατοπτρίζει την πιθανότητα το χρωμόσωμα του απογόνου να περιέχει στοιχεία από τα χρωμοσώματα γονέων. Συγκεκριμένα, η προκαθορισμένη τιμή 0,50 σημαίνει πως υπάρχει ίση πιθανότητα τα μισά γονίδια του χρωμοσώματος απογόνου να προέρχονται από τον έναν γονέα και τα άλλα μισά από τον δεύτερο. Αντίθετα, μια τιμή 0,90 σημαίνει πως κατά πάσα πιθανότητα το 90% των στοιχείων θα προέρχονται από τον έναν γονέα και το 10% από τον δεύτερο. Όπως γίνεται κατανοητό, η τιμή 1,00 σημαίνει πως θα παράγεται ένας κλώνος από κάθε γονέα, χωρίς να λαμβάνει χώρα καμία διασταύρωση(Palisade, 2010). Αυτό σημαίνει πως δεν γίνεται ανταλλαγή μεταξύ των τιμών των μεταβλητών απόφασης μιας λύσης με αυτές κάποιας άλλης. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η συμπεριφορά της τελικής τιμής της συνάρτησης στόχου ως προς πέντε διαφορετικές τιμές βαθμού διασταύρωσης που χρησιμοποιήθηκαν κατά τις επιλύσεις στο λογισμικό Evolver.

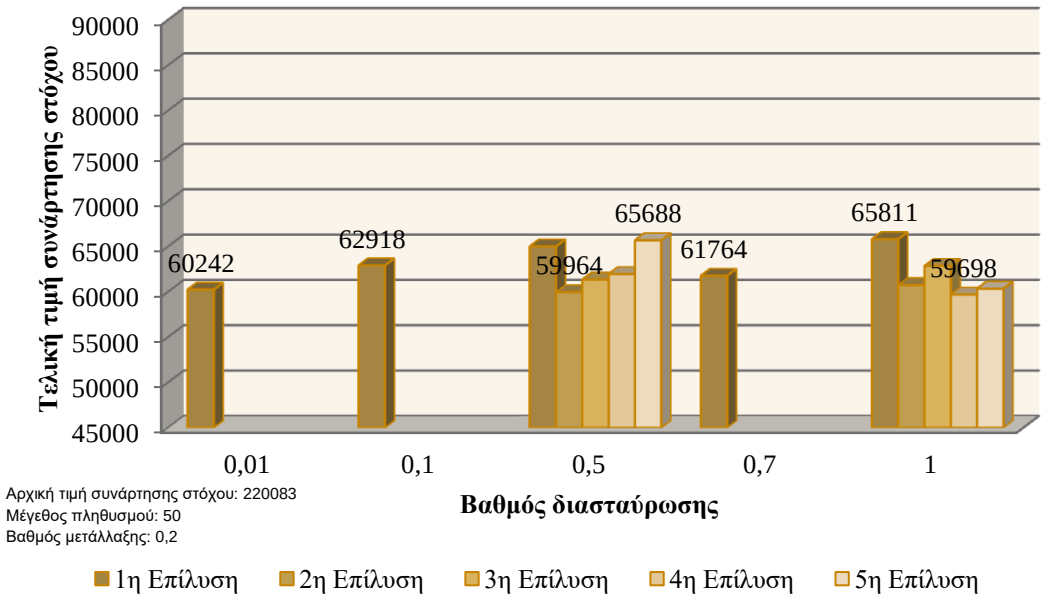
Σχήμα 13.3: Αποτελέσματα ως προς τον βαθμό διασταύρωσης για αρχική λύση χαμηλού κόστους



Όπως και το μέγεθος του πληθυσμού έτσι και ο βαθμός διασταύρωσης δεν φαίνεται να επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό μια αρχική λύση η οποία βρίσκεται κοντά στη βέλτιστη. Για το λόγο αυτό εξετάζεται και η επίπτωση του βαθμού διασταύρωσης στα αποτελέσματα όταν η αρχική λύση απέχει αρκετά από τη βέλτιστη. Αν τα δεδομένα της βέλτιστης επίλυσης βρίσκονται διασκορπισμένα μεταξύ των χρωμοσωμάτων του αρχικού πληθυσμού τότε η διασταύρωση είναι επαρκής για την εύρεση βέλτιστης λύσης χωρίς να είναι απαραίτητη η εισαγωγή των τυχαίων τιμών που γίνεται βάση των τελεστών της μετάλλαξης. Με άλλα λόγια όταν ο αρχικός πληθυσμός περιέχει τα τμήματα της βέλτιστης λύσης ο βαθμός μετάλλαξης μπορεί να λάβει μηδενική τιμή. Όταν δεν λαμβάνει μηδενική τιμή παρατηρείται μια μικρή αύξηση της μέσης τιμής και της μεταβλητότητας. Δηλαδή, μπορεί να αναφερθεί ότι οι τελεστές μετάλλαξης σε μια επίλυση που ο αρχικός της πληθυσμός περιλαμβάνει τη βέλτιστη εισάγει μια μορφή θορύβου στην επίλυση. Αντίθετα, αν η αρχική επίλυση απέχει πολύ από τη βέλτιστη, τότε η

εισαγωγή τυχαίων τιμών στα στοιχεία του πληθυσμού είναι απαραίτητη ώστε να γίνει αποτελεσματική εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης. Τα ζητήματα αυτά αποσαφηνίζονται στην επόμενη υποενότητα.

Σχήμα 13.4: Αποτελέσματα ως προς τον βαθμό διασταύρωσης για αρχική λύση υψηλού κόστους



Επιστρέφοντας στη μελέτη της συμπεριφοράς του βαθμού διασταύρωσης ως προς διαφορετικές αρχικές λύσεις παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα τα αποτελέσματα των πέντε επαναλήψεων κάθε συνδυασμού..

Πίνακας 13.3: Βελτιστοποίηση με διαφορετικό βαθμό διασταύρωσης και αρχική επίλυση

Αριθμός Κορυφών	Αρχικό Κόστος	Μέγεθος Πληθυσμού	Βαθμός Διασταύρωσης	Βαθμός Μετάλλαξης	Τελικό Κόστος	Μέσος Όρος	Τυπική Απόκλιση	Συντελεστής Διακύμανσης
2	70085	50	0,50	0,20	57735	59207	1257	2,12%
					60239			
					59398			
					60561			
					58103			
2	70085	50	1,00	0,20	58811	59106	1200	2,03%
					59993			
					59871			
					59729			
					57127			
2	220083	50	0,50	0,20	65009	62793	2453	3,91%
					59964			
					61353			
					61951			
					65688			
2	220083	50	1,00	0,20	65811	61888	2491	4,03%
					60737			
					62851			
					59698			
					60344			

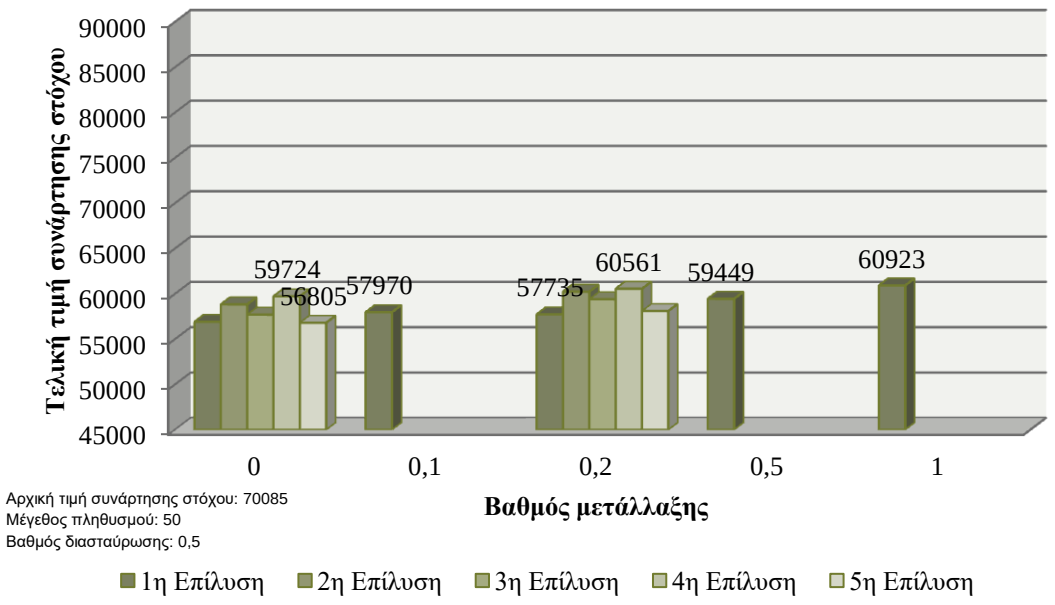
Στον προηγούμενο πίνακα, παρατηρείται ότι για την αρχική λύση χαμηλού κόστους οι μέσοι όροι των τιμών του κόστους είναι χαμηλότεροι σε σχέση με τους αντίστοιχους μέσους όρους των επιλύσεων με μεγαλύτερο αρχικό κόστος Γενικότερα, σημειώνεται ομοιόμορφη συμπεριφορά, της μέσης τιμής, όσο

και της τυπικής απόκλισης μεταξύ των επιλύσεων είτε εκτελείται η διαδικασία διασταύρωσης, είτε όχι. Μάλιστα στις περιπτώσεις που δεν υπάρχει διασταύρωση, δηλαδή στις περιπτώσεις που ο αντίστοιχος βαθμός διασταύρωσης είναι ίσος με τη μονάδα παρατηρούνται ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα, αφού τόσο η μέση τιμή της αρχικής επίλυσης χαμηλού κόστους, όσο και η μέση τιμή της αρχικής επίλυσης υψηλού κόστους για βαθμό διασταύρωσης ίσο με το μονάδα είναι χαμηλότερες από τις αντίστοιχες μέσες τιμές για βαθμό διασταύρωση ίσο με 0,5. Τελικώς, μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι η επιλογή του βαθμού διασταύρωσης δεν επηρεάζει ιδιαίτερα τη διαδικασία βελτιστοποίησης και είναι μάλλον ο βαθμός μετάλλαξης που πρέπει να μελετηθεί εκτενέστερα.

13.1.4 Βαθμός μετάλλαξης

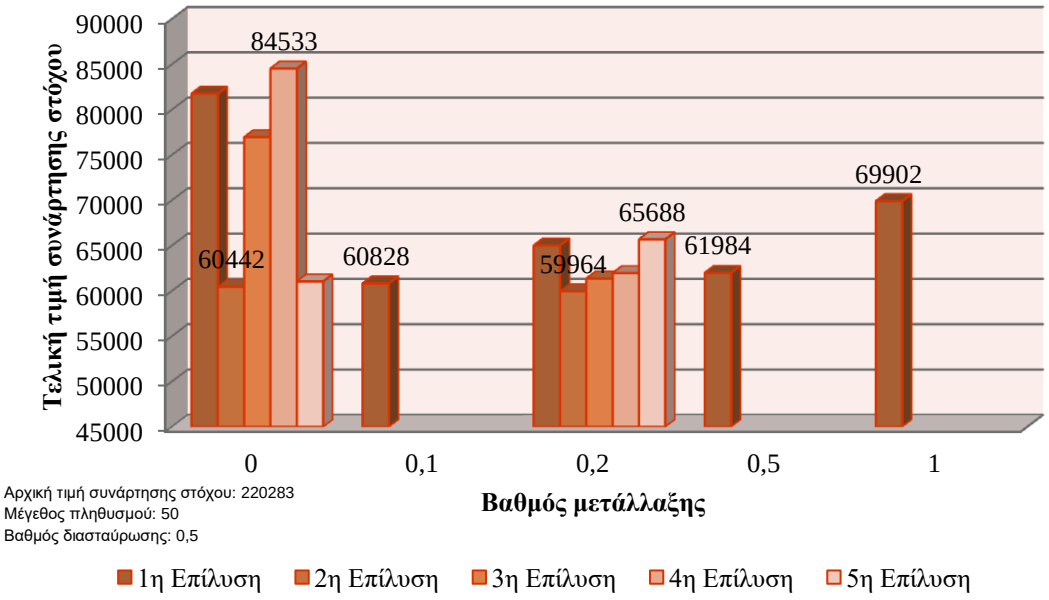
Η μετάλλαξη είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της ανομοιογένειας ενός πληθυσμού ώστε να μπορεί να προσαρμοστεί σε ένα δυναμικά μεταβαλλόμενο περιβάλλον. Η διαδικασία της μετάλλαξης αλλάζει αυθαίρετα ένα ή περισσότερα γονίδια ενός συγκεκριμένου χρωμοσώματος. Πραγματοποιείται με τυχαία αλλαγή γονιδίων και με πιθανότητα ίση με το ρυθμό μετάλλαξης. Η μετάλλαξη εξυπηρετεί την εισαγωγή νέων πιθανών λύσεων, διαφορετικών από τις υπάρχουσες, στον ήδη υπάρχοντα πληθυσμό. Ο βαθμός μετάλλαξης μπορεί να λάβει τιμές από 0,00 έως 1,00 και αντικατοπτρίζει την πιθανότητα τα χρωμοσώματα των απογόνων να περιέχουν γονίδια με τυχαίες τιμές εντός του διαστήματος αναζήτησης. Η διαδικασία της μετάλλαξης λαμβάνει χώρα μετά τη διαδικασία διασταύρωσης, οπότε τιμή βαθμού μετάλλαξης ίση με 1,00 σημαίνει πως θα παραχθούν εντελώς τυχαίες νέες λύσεις χωρίς να έχουν καμία επίδραση οι τελεστές διασταύρωσης.

Σχήμα 13.5: Αποτελέσματα ως προς τον βαθμό μετάλλαξης για αρχική λύση χαμηλού κόστους



Όπως διαπιστώθηκε στην προηγούμενη υποενότητα αν όλα τα στοιχεία της βέλτιστης λύσης υπήρχαν στον αρχικό πληθυσμό, τότε οι τελεστές διασταύρωσης θα επαρκούσαν για την εύρεση της βέλτιστης λύσης. Αυτή η διαπίστωση επαληθεύεται με βάση τα αποτελέσματα του παραπάνω διαγράμματος, καθώς φαίνεται πως στην περίπτωση της επίλυσης με αρχική τιμή που δεν απέχει πολύ από τη βέλτιστη και μηδενικό βαθμό μετάλλαξης παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα. Αυτό συμβαίνει καθώς ο αρχικός πληθυσμός καταρτίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε οι μικρές τροποποιήσεις που γίνονται στην αρχική λύση να περιλαμβάνουν τα τμήματα της βέλτιστης λύσης που απαιτούνται. Οι αρνητικές συνέπειες όμως της εκλογής μηδενικού βαθμού μετάλλαξης φαίνονται στο επόμενο διάγραμμα.

Σχήμα 13.6: Αποτελέσματα ως προς τον βαθμό μετάλλαξης για αρχική λύση υψηλού κόστους



Στο διάγραμμα είναι φανερή η ραγδαία αύξηση της μεταβλητότητας με την χρήση αρχικής λύσης που να απέχει περισσότερο από τη βέλτιστη. Στην περίπτωση αυτή, ο αρχικός πληθυσμός σπανίως διαθέτει τα απαραίτητα τμήματα της βέλτιστης χάραξης και κατά συνέπεια η χρήση τελεστών μετάλλαξης είναι βαρύνουσας σημασίας για την εισαγωγή των τυχαίων τιμών που απαιτούνται για τη σύγκλιση προς τη βέλτιστη λύση. Πιο αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 13.4: Βελτιστοποίηση με διαφορετικό βαθμό μετάλλαξης και αρχική επίλυση

Αριθμός Κορυφών	Αρχικό Κόστος	Μέγεθος Πληθυσμού	Βαθμός Διασταύρωσης	Βαθμός Μετάλλαξης	Τελικό Κόστος	Μέσος Όρος	Τυπική Απόκλιση	Συντελεστής Διακύμανσης
2	70085	50	0,50	0,00	56911	57995	1263	2,18%
					58838			
					57698			
					59724			
					56805			
2	70085	50	0,50	0,20	57735	59207	1257	2,12%
					60239			
					59398			
					60561			
					58103			
2	22083	50	0,50	0,00	81762	72946	11469	15,72%
					60442			
					76952			
					84533			
					61039			
2	22083	50	0,50	0,20	65009	62793	2453	3,91%
					59964			
					61353			
					61951			
					65688			

Παρατηρείται ότι αν και οι επιλύσεις με μηδενικό βαθμό μετάλλαξης παρουσιάζουν χαμηλότερη μέση τιμή κόστους στην περίπτωση μιας αρχικής χάραξης χαμηλού κόστους, στην περίπτωση αρχικών χαράξεων με μεγάλη διαφορά κόστους από το βέλτιστο τα στατιστικά μεγέθη αυξάνονται δραματικά. Το γεγονός αυτό καθιστά τη βελτιστοποίηση με μηδενικό βαθμό μετάλλαξης απαράδεκτη καθώς όπως

φαίνεται οι επιλύσεις προσεγγίζουν μόνο τοπικά βέλτιστες τιμές βάση των στοιχείων που εμπεριέχουν στον αρχικό τους πληθυσμό.

13.1.5 Αρχική επίλυση και γενετικές παράμετροι

Με βάση την παραπάνω ανάλυση τα στοιχεία που επηρεάζουν περισσότερο τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης της οριζοντιογραφικής χάραξης είναι ο βαθμός μετάλλαξης και η αρχική χάραξη μετά την επίλυση των περιορισμών. Προκειμένου να διαπιστωθεί η επίδραση των παραμέτρων αυτών στη βελτιστοποίηση της οριζοντιογραφικής χάραξης έγιναν επίσης οι δοκιμές διαφόρων συνδυασμών των παραμέτρων αυτών. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 13.5: Επιλύσεις με διαφορετικές αρχικές επιλύσεις και γενετικές παραμέτρους

Α/α	Αρχικός Πληθυσμός	Βαθμός Διασταύρωσης	Βαθμός Μετάλλαξης	Συνάρτηση Στόχου	Μέσος Όρος	Τυπική Απόκλιση	Αρχικό Κόστος
1.1.1				61072			122143
1.1.2				57970			70085
1.1.3	50	0,50	0,10	59823	61509	3750	71365
1.1.4				60828			220283
1.1.5				67852			132347
1.2.1				60295			122143
1.2.2				62573			70085
1.2.3	50	0,10	0,10	61312	69972	16701	71365
1.2.4				66089			220283
1.2.5				99589			132347
1.3.1				62556			122143
1.3.2				57735			70085
1.3.3	50	0,50	0,20	60105	61042	2800	71365
1.3.4				65009			220283
1.3.5				59807			132347
1.4.1				61997			122143
1.4.2				58440			70085
1.4.3	50	0,10	0,20	60359	62045	3023	71365
1.4.4				62918			220283
1.4.5				66513			132347
1.5.1				61562			122143
1.5.2				56911			70085
1.5.3	50	0,50	0,00	61129	68232	11618	71365
1.5.4				81762			220283
1.5.5				79796			132347
1.6.1				61856			122143
1.6.2				58554			70085
1.6.3	50	0,10	0,00	58884	65427	11409	71365
1.6.4				85616			220283
1.6.5				62225			132347

Στον προηγούμενο πίνακα σημειώνονται με πράσινο χρώμα οι τέσσερις επιλύσεις που εμφάνισαν τη χαμηλότερη τιμή κόστους και με κόκκινο οι τέσσερις λύσεις με το μεγαλύτερο κόστος. Με πράσινο χρώμα επίσης σημειώνεται η χαμηλότερη μέση τιμή και τυπική απόκλιση.

Με βάση τα αποτελέσματα επιλέχθηκαν τελικώς οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στην εφαρμογή. Βέβαια, οι επιλογές αυτές χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης, καθώς όπως διαπιστώθηκε, τόσο οι τιμές του μεγέθους του πληθυσμού, όσο και ο βαθμός διασταύρωσης που επιλέχθηκαν δεν είναι ιδιαίτερα δεσμευτικοί. Αυτό όμως που διαπιστώνεται στον παραπάνω πίνακα είναι η σαφέστερη

υπεροχή βαθμού μετάλλαξης 0,2 έναντι του 0,1 και του μηδενός, οι οποίοι οδηγούν σε τοπικά βέλτιστα τιμές. Βέβαια, ακόμη χρειάζεται πληθώρα δοκιμών για εξαγωγή πιο ασφαλών συμπερασμάτων.

13.2 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων σχεδιασμού

Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται η επίδραση που έχει η αλλαγή των επιλογών σχεδιασμού στο τελικό κόστος της βελτιστοποιημένης χάραξης. Συγκεκριμένα, το πρότυπο εφαρμόζεται με βάση τα ίδια δεδομένα αυξάνοντας την τιμή της ταχύτητας μελέτης και κάνοντας τις απαραίτητες τροποποιήσεις στις τιμές των παραμέτρων που σχετίζονται με αυτήν. Όπως έχει αναφερθεί η ταχύτητα μελέτης αποτελεί ένα βασικό στοιχείο για τη χάραξη της οδού αν και η θεώρησή της παρουσιάζει ορισμένα προβλήματα όπως διαπιστώθηκε στο τρίτο κεφάλαιο.

Πολλοί τεχνικοί, οικονομικοί, κοινωνικοί και περιβαλλοντικοί παράγοντες επηρεάζονται από την ταχύτητα μελέτης, όπως εξετάστηκε στο τρίτο κεφάλαιο. Οι μικρές τιμές ταχύτητας μελέτης ορίζουν μικρές ακτίνες καμπυλότητας στην οριζοντιογραφία και συνεπώς μικρά βάθη ορυγμάτων και ύψη επιχωμάτων, αφού η χάραξη προσαρμόζεται περισσότερο στο φυσικό ανάγλυφο. Αντίθετα οι υψηλές τιμές ταχυτήτων ορίζουν μία χάραξη με μεγαλύτερες ακτίνες καμπυλότητας και συνεπώς μεγαλύτερους όγκους χωματισμών. Στην περίπτωση αυτή μελετάται η επίδραση της αύξησης της ταχύτητα μελέτης στα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης κατά την οριζοντιογραφία και τη μηκοτομή.

13.2.1 Δεύτερη εφαρμογή μεθοδολογίας

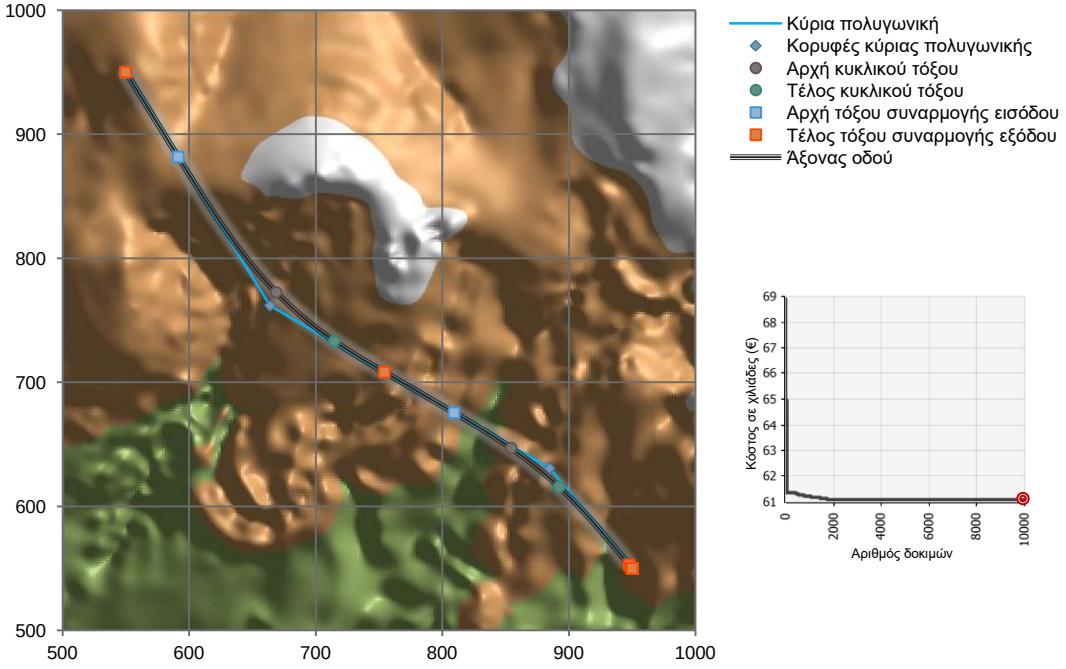
Η αλλαγή της ταχύτητας μελέτης συνοδεύεται και με αυξομειώσεις άλλων παραμέτρων σχεδιασμού που σχετίζονται με αυτή. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται μικρότερες τιμές επιτρεπόμενων συντελεστών τριβής και κατά μήκος κλίσης. Αντίθετα, τόσο οι ακτίνες των κυκλικών, όσο και οι παράμετροι των τόξων συναρμογής και των κατακόρυφων καμπυλών αυξάνονται με βάση τις προδιαγραφές. Οι τιμές των παραμέτρων που διαφοροποιούνται κατά στη μελέτη περίπτωσης αυτής της ενότητας παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα. Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι που χρησιμοποιούνται είναι ίσες με αυτές της εφαρμογής του προηγούμενου κεφαλαίου.

Πίνακας 13.6: Παράμετροι που διαφοροποιούνται για τη δεύτερη εφαρμογή του προτύπου

Μεταβλητές	Περιγραφή	Τιμή
V_e	Ταχύτητα μελέτης	80 km/h
$f_{T,\max}$	Μέγιστος επιτρεπόμενος συντελεστής εφαπτομενικής τριβής	0,299
$f_{R,\max}$	Μέγιστος επιτρεπόμενος συντελεστής εγκάρσιας συνιστώσας τριβής	0,111
$s_{\max}$	Μέγιστη κατά μήκος κλίση οδού	0,07 m/m
$R_{\max}$	Μέγιστη τιμή διαστήματος αναζήτησης ακτίνας κυκλικού τόξου	600 m
$R_{\min}$	Ελάχιστη τιμή διαστήματος αναζήτησης ακτίνας κυκλικού τόξου	280 m
$A_{\max}$	Μέγιστη τιμή διαστήματος αναζήτησης παραμέτρου κλωθοειδούς	600 m
$A_{\min}$	Ελάχιστη τιμή διαστήματος αναζήτησης παραμέτρου κλωθοειδούς	90 m
$H_{\max}$	Μέγιστη τιμή διαστήματος αναζήτησης παραμέτρου παραβολής	10000 m
$H_{\min}$	Ελάχιστη τιμή διαστήματος αναζήτησης παραμέτρου παραβολής	3300 m

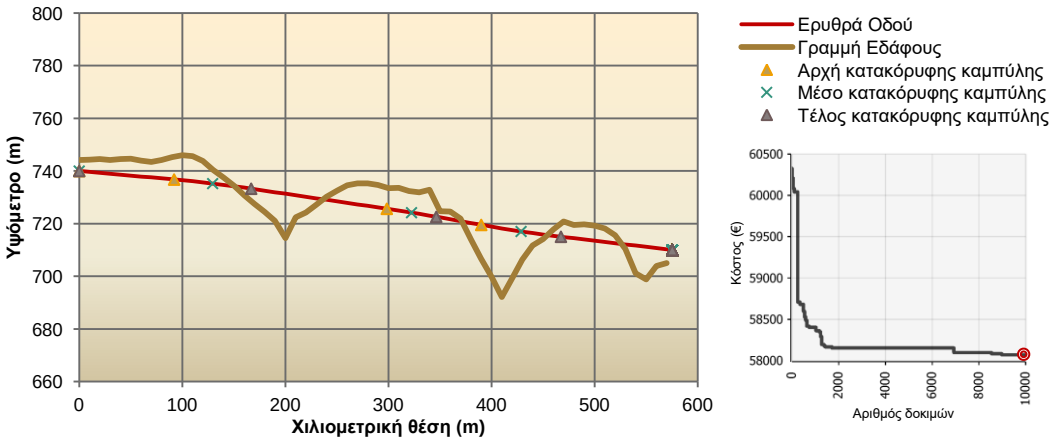
Η βελτιστοποιημένη οριζοντιογραφική χάραξη με βάση της παραπάνω παραμέτρους παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα. Όπως είναι ευδιάκριτο η χάραξη είναι περισσότερο τεταμένη ως προς αυτήν που προέκυψε κατά τη μελέτη του προηγούμενου κεφαλαίου. Συγκεκριμένα, παρατηρείται μεγέθυνση των γεωμετρικών στοιχείων της χάραξης όπως οι ακτίνες και μήκη των οριζοντιογραφικών καμπυλών.

Σχήμα 13.7: Βελτιστοποιημένη οριζοντιογραφική χάραξη δεύτερης μελέτης περίπτωσης



Όσον αφορά το διάγραμμα της μηκοτομής είναι εμφανής η χρήση ακτινών και μηκών των κυρτών και κοίλων κατακόρυφων καμπυλών μεγαλύτερου μεγέθους, λόγω αυξημένων απαιτήσεων ορατότητας. Επίσης σημειώνεται μια πολύ μικρή μείωση του συνολικού μήκους της χάραξης κατά περίπου 2% λόγω της αύξησης της ταχύτητας μελέτης.

Σχήμα 13.8: Βελτιστοποιημένη κατακόρυφη χάραξη δεύτερης μελέτης περίπτωσης



Γενικά, τα γεωμετρικά στοιχεία μελέτης της οριζοντιογραφίας και της μηκοτομής, καθορισμένα από την επιλογή της ταχύτητας μελέτης, θα πρέπει να δημιουργούν τις προϋποθέσεις για μία αρμονική χάραξη της οδού στο φυσικό ανάγλυφο. Στην περίπτωση της αύξησης της ταχύτητας μελέτης, η χάραξη είναι πιο τεταμένη, με μεγάλες ακτίνες καμπυλότητας στην οριζοντιογραφία και στη μηκοτομή. Βέβαια, στην περίπτωση αυτή παρατηρείται αύξηση κατά 20% του όγκου επιχωμάτων, ενώ

για τα ορύγματα σημειώνεται μείωση του όγκου κατά 4% συντελώντας στην εξισορρόπηση του όγκου εκσκαφών και επιχωμάτων. Τα στοιχεία αυτά αντλούνται με βάση τον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 13.7: Όγκοι και κόστος χωματισμών μετά τη βελτιστοποίηση κατά την οριζοντιογραφία

Μεταβλητές	Περιγραφή	Τιμή
E_F	Συνολικός όγκος επιχωμάτων οδού	33197 m^3
E_C	Συνολικός όγκος εκσκαφών οδού	31190 m^3
C	Τιμή συνάρτησης στόχου	57687 €

13.2.2 Τρίτη εφαρμογή μεθοδολογίας

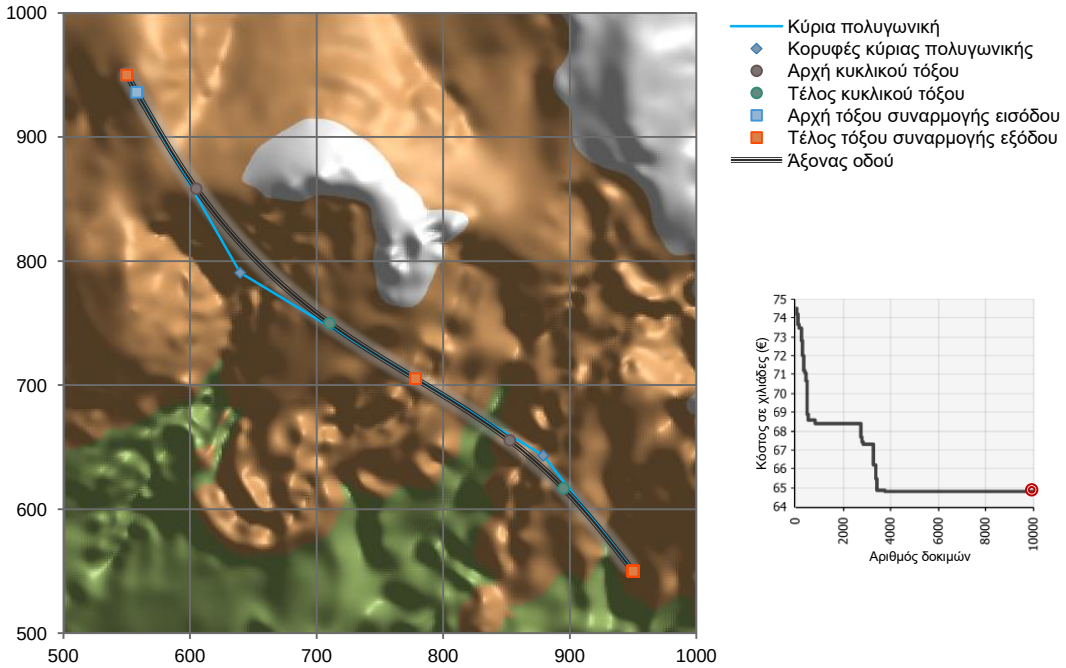
Στην περίπτωση αυτή μελετάται η βελτιστοποίηση της χάραξης με ταχύτητα μελέτης 90 km/h. Οι υπόλοιπες παράμετροι διαμορφώνονται σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 13.8: Παράμετροι που διαφοροποιούνται για την τρίτη εφαρμογή του προτύπου

Μεταβλητές	Περιγραφή	Τιμή
V_e	Ταχύτητα μελέτης	90 km/h
$f_{T,\max}$	Μέγιστος επιτρεπόμενος συντελεστής εφαπτομενικής τριβής	0,276
$f_{R,\max}$	Μέγιστος επιτρεπόμενος συντελεστής εγκάρσιας συνιστώσας τριβής	0,102
$s_{\max}$	Μέγιστη κατά μήκος κλίση οδού	0,07 m/m
$R_{\max}$	Μέγιστη τιμή διαστήματος αναζήτησης ακτίνας κυκλικού τόξου	600 m
$R_{\min}$	Ελάχιστη τιμή διαστήματος αναζήτησης ακτίνας κυκλικού τόξου	370 m
$A_{\max}$	Μέγιστη τιμή διαστήματος αναζήτησης παραμέτρου κλωθοειδούς	600 m
$A_{\min}$	Ελάχιστη τιμή διαστήματος αναζήτησης παραμέτρου κλωθοειδούς	120 m
$H_{\max}$	Μέγιστη τιμή διαστήματος αναζήτησης παραμέτρου παραβολής	12000 m
$H_{\min}$	Ελάχιστη τιμή διαστήματος αναζήτησης παραμέτρου παραβολής	4200 m

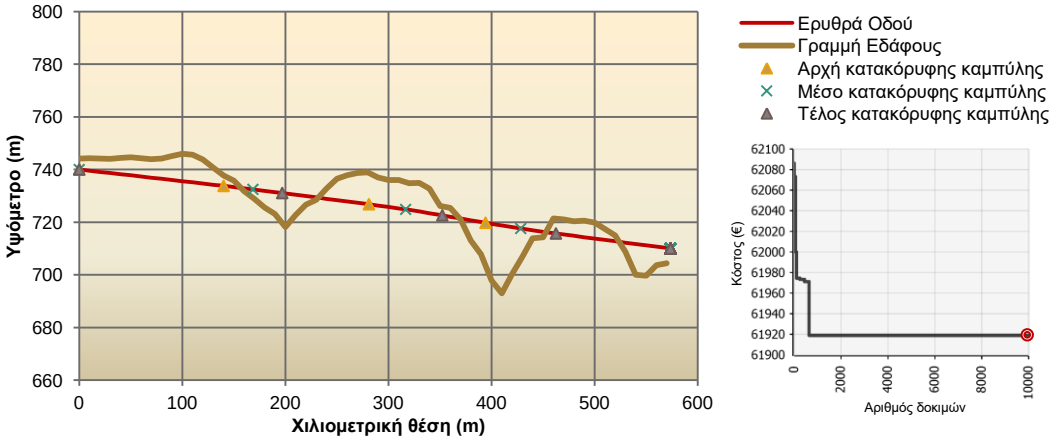
Ακολουθείται η ίδια διαδικασία βελτιστοποίησης αρχικά της οριζοντιογραφικής και έπειτα της κατακόρυφης χάραξης. Η διαδικασία περιγράφεται αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η βελτιστοποιημένη οριζοντιογραφική χάραξη παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.

Σχήμα 13.9: Βελτιστοποιημένη οριζοντιογραφική χάραξη τρίτης μελέτης περίπτωσης



Χαρακτηριστικό του γραφήματος επίλυσης δεξιά από το διάγραμμα οριζοντιογραφίας είναι ότι στο διάστημα μεταξύ των δύο και τεσσάρων χιλιάδων δοκιμών σημειώθηκε δραματική μείωση του κόστους. Το φαινόμενο αυτό αν και δεν έχει εμφανιστεί τόσο έντονα στις προηγούμενες επιλύσεις που παρουσιάστηκαν στο πλαίσιο της εργασίας, εντούτοις εμφανίστηκε σε πολλές από τις υπόλοιπες επιλύσεις που έγιναν και για το λόγο αυτό επιλέχθηκε το πλήθος των δοκιμών να είναι τόσο μεγάλο. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η βελτιστοποιημένη χάραξη κατά τη μηκοτομή.

Σχήμα 13.10: Βελτιστοποιημένη κατακόρυφη χάραξη τρίτης μελέτης περίπτωσης



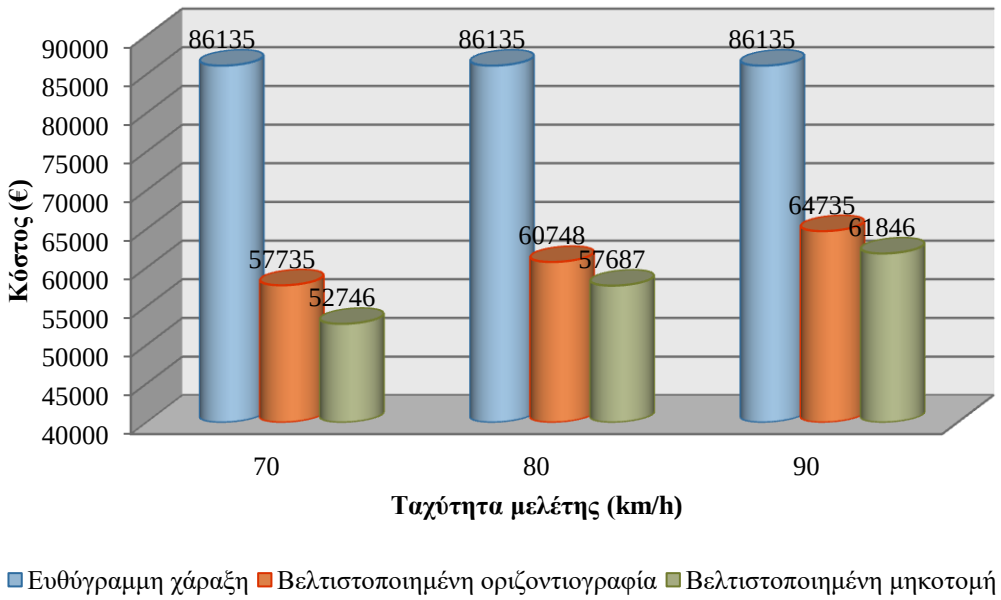
Είναι φυσικό επακόλουθο, οι τεταμένες χαράξεις και οι μεγάλες ακτίνες καμπυλότητας της σε ένα έντονα πτυχωμένο ανάγλυφο, να προκαλούν μεγαλύτερο όγκο χωματουργικών εργασιών. Ως άμεση συνέπεια της αύξησης των χωματουργικών εργασιών προκύπτουν οι αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις που καλύπτουν την παραγωγή, μεταφορά, διάστρωση και οριστική διαμόρφωση των χωματουργικών έργων, της υποδομής, δηλαδή, της οδού. Όπως είναι αναμενόμενο η περισσότερη τεταμένη έχει ελάχιστα μικρότερο μήκος και προσφέρει μειωμένο χρόνο διαδρομής. Με βάση τα στοιχεία του επόμενου πίνακα παρατηρούμε ότι ο όγκος επιχωμάτων αυξήθηκε κατά 48%, ενώ ο όγκος εκσκαφών μειώθηκε περαιτέρω κατά 6% σε σχέση με την επίλυση του προηγούμενου κεφαλαίου.

Πίνακας 13.9: Όγκοι και κόστος χωματισμών μετά τη βελτιστοποίηση της δεύτερης περίπτωσης

Μεταβλητές	Περιγραφή	Τιμή
E_F	Συνολικός όγκος επιχωμάτων οδού	40847 m^3
E_C	Συνολικός όγκος εκσκαφών οδού	30790 m^3
C	Τιμή συνάρτησης στόχου	61486 €

13.2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων με διαφορετικές παραμέτρους σχεδιασμού

Στο προηγούμενο κεφάλαιο μελετήθηκε η περίπτωση των οδού για ταχύτητα μελέτης 70 km/h, ενώ στις δύο προηγούμενες ενότητες παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης για ταχύτητες μελέτης της τάξης των 80 km/h και 90 km/h. Όπως αναφέρθηκε η ταχύτητα μελέτης επηρεάζει άλλες παραμέτρους σχεδιασμού, οι οποίες και τροποποιήθηκαν κατάλληλα. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της τιμής της συνάρτησης στόχου μετά από κάθε στάδιο βελτιστοποίησης για κάθε μια από τις τρεις μελέτες περίπτωσης που αναπτύχθηκαν στην παρούσα εργασία.



Με βάση τα στοιχεία του παραπάνω διαγράμματος, εξάγεται ότι η αύξηση της ταχύτητας μελέτης κατά 10 km/h συνεπάγεται με αύξηση του τελικού κόστους κατά 9%, ενώ η αύξηση της ταχύτητας μελέτης κατά 20 km/h εμφανίζει αντίστοιχη αύξηση κόστους κατά 17%. Βέβαια, όπως έχει αναφερθεί είναι αναγκαία η εκτίμηση του όγκου χωματισμών με μεγαλύτερη ακρίβεια. Παρ' όλα αυτά το πρότυπο φαίνεται πως αποδίδει ικανοποιητικά καθώς εμφανίζει την αναμενόμενη συμπεριφορά ανάλογα με τις εκάστοτε τροποποιήσεις των παραμέτρων.

Σε κάθε περίπτωση, η σύγκριση μεταξύ εφαρμογών του προτύπου σε χαράξεις μεγαλύτερου μήκους από αυτήν που μελετάται στην παρούσα εργασία, ενδεχομένως να παρουσιάσει ακόμη μεγαλύτερες διαφορές του τελικού κόστους ως προς την ταχύτητα μελέτης. Αυτό συμβαίνει καθώς για μεγάλες αποστάσεις, η διαμόρφωση της χάραξης μπορεί να ακολουθεί διαφορετική πορεία σε σχέση με τις προτεινόμενες ταχύτητες σχεδιασμού.

Τα αναλυτικά αποτελέσματα των τιμών μεταβλητών απόφασης και η σύγκρισή τους με τις αντίστοιχες τιμές που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα. Σημαντικές αυξήσεις παρατηρούνται τόσο στις ακτίνες των κυκλικών τόξων και των παραμέτρων των κλωθοειδών, όσο και στις παραμέτρους των κατακόρυφων καμπυλών. Οι αυξήσεις αυτές είναι ακόμη μεγαλύτερες στην τρίτη εφαρμογή του προτύπου, όπου η ταχύτητα μελέτης αυξάνεται περισσότερο.

Πίνακας 13.10: Τελικές τιμές μεταβλητών απόφασης

Μεταβλητές	**Ταχύτητα μελέτης**						
	70 km/h	**80 km/h**			**90 km/h**		
	Τιμή	**Τιμή**	**Διαφορά ως προς τιμή για 70km/h**		**Τιμή**	**Διαφορά προς τιμή για 70 km/h**	
n	2	2	-	-	2	-	-
x_1	675,4 m	664,0 m	-11,4 m	-1,7%	639,5 m	-35,9 m	-5,3%
x_2	907,5 m	884,9 m	-22,6 m	-2,5%	879,0 m	-28,5 m	-3,1%
y_1	747,9 m	761,8 m	+13,9 m	+1,9%	790,5 m	+42,6 m	+5,7%
y_2	664,4 m	630,6 m	-33,8 m	-5,1%	643,2 m	-21,2 m	-3,2%
R_1	248,6 m	307,1 m	+58,5 m	+23,5%	468,5 m	+220,0 m	+88,5%
R_2	210,1 m	331,3 m	+121,2 m	+57,7%	395,5 m	+185,4 m	+88,2%
A_{1_1}	122,0 m	203,2 m	+81,2 m	+66,6%	206,4 m	+84,4 m	+69,2%
A_{1_2}	100,9 m	133,1 m	+32,2 m	+31,9%	188,3 m	+87,4 m	+86,6%
A_{2_1}	119,4 m	120,0 m	+0,6 m	+0,5%	195,2 m	+75,8 m	+63,5%
A_{2_2}	100,9 m	166,6 m	+65,7 m	+65,1%	184,9 m	+84,0 m	+83,2%
m	3	3	-	-	3	-	-
h_1	65,9 m	129,5 m	+63,6 m	+96,5%	168,5 m	+102,6 m	+155,7%
h_2	295,4 m	322,4 m	+27,0 m	+9,1%	316,7 m	+21,3 m	+7,2%
h_3	426,5 m	428,7 m	+2,2 m	+0,5%	428,4 m	+1,9 m	+0,5%
z_1	740,0 m	735,4 m	-4,6 m	-0,6%	732,5 m	-7,5 m	-1,0%
z_2	728,2 m	724,3 m	-3,9 m	-0,5%	725,0 m	-3,2 m	-0,4%
z_3	717,7 m	716,8 m	-0,9 m	-0,1%	717,5 m	-0,2 m	0,0%
H_1	2672,5 m	3300,0 m	+627,5 m	+23,5%	9290,5 m	+6618,0 m	+247,6%
H_2	2500,0 m	3960,3 m	+1460,3 m	+58,4%	4200,7 m	+1700,7 m	+68,0%
H_3	2500,0 m	3300,0 m	+800,0 m	+32,0%	4200,0 m	+1700,0 m	+68,0%

13.3 Αξιολόγηση βάσει κριτηρίων ικανοποιητικών προτύπων

Στο έβδομο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας διατυπώθηκαν ορισμένα κριτήρια για την αξιολόγηση των προτύπων βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων. Στην ενότητα αυτή εξετάζεται το πρότυπο RoadEvolver, που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία, ως προς τα κριτήρια αυτά.

Αρχικά, όσον αφορά το κόστος που λαμβάνεται υπ' όψιν πρέπει να αναφερθεί ότι το πρότυπο που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία είναι προσανατολισμένο για χρήση στο στάδιο της προμελέτης σε αντίθεση με τα υπόλοιπα πρότυπα βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων που χρησιμοποιούνται στο

στάδιο της προκαταρκτικής μελέτης. Για τον λόγο αυτό το κόστος που λαμβάνει υπ' όψιν το πρότυπο αφορά μόνο το κόστος του όγκου χωματισμών, το οποίο είναι και το πλέον ευαίσθητο στις επιλογές σχεδιασμού για το στάδιο της προμελέτης. Βέβαια, απαιτείται η συμπερίληψη και άλλων στοιχείων κόστους, η οποία θα γίνει σε επόμενη εργασία. Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την προμελέτη και την προκαταρκτική μελέτη, ο αναγνώστης παραπέμπεται στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας.

Όσον αφορά τους περιορισμούς του σχεδιασμού που λήφθηκαν υπ' όψιν αυτοί αντλήθηκαν από οδηγίες γεωμετρικού σχεδιασμού διαφόρων χωρών και ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ποιους θέλει να χρησιμοποιήσει κατά τη βελτιστοποίηση ανάλογα με τις προδιαγραφές που ισχύουν.

Το πρότυπο είναι καινοτόμο τόσο ως προς το πλήθος, όσο και ως προς το είδος των περιορισμών που έχουν ληφθεί υπ' όψιν σε σχέση με τα υπάρχοντα πρότυπα βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα, εκτός από περιορισμούς σε οριζοντιογραφία και μηκοτομή ξεχωριστά έχουν συμπεριληφθεί και περιορισμοί για τον επιτυχή συνδυασμό τους. Επόμενο στάδιο αποτελεί η συμπερίληψη αναλυτικών στοιχείων των διατομών και λειτουργικών χαρακτηριστικών ώστε να είναι δυνατή η διατύπωση επιπλέον περιορισμών.

Πολλά πρότυπα βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων παράγουν μια απλή χάραξη που αποτελείται από ευθύγραμμα τμήματα η μια μαθηματική καμπύλη στην οποία δεν διαχωρίζονται οι ευθυγραμμίες από τις οριζοντιογραφικές καμπύλες, ή τα εφαπτόμενα τμήματα από τις παραβολικές καμπύλες της μηκοτομής. Αντίθετα τα αποτελέσματα βελτιστοποίησης με το RoadEvolver περιλαμβάνουν χαράξεις με διακριτά γεωμετρικά στοιχεία, τα οποία περιγράφονται από ξεχωριστές μαθηματικές σχέσεις, οι οποίες συνδέονται μέσω περιορισμών. Μάλιστα, στο πρότυπο υπάρχει η καινοτόμα θεώρηση ασύμμετρων οριζοντιογραφικών καμπυλών με διαφορετικά τόξα συναρμογής εισόδου και εξόδου σε κάθε καμπύλη.

Προφανώς, η μεγάλη δυσκολία που διαπιστώθηκε κατά την προτυποποίηση και ένταξη όλων των σχέσεων των ασύμμετρων οριζοντιογραφικών καμπυλών σε ένα πρότυπο βελτιστοποίησης καθιστούσε την θεώρησή τους έως τώρα δυσχερή. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζει επιτυχώς η παρούσα εργασία ενώ μελλοντική επιδίωξη αποτελεί η ένταξη στο πρότυπο και άλλων μορφών τόξων συναρμογής, όπως η ωοειδής καμπύλη.

Η μαθηματική προτυποποίηση των κορυφών της οριζοντιογραφίας επιτρέπει τη δημιουργία οπισθόδρομων χαράξεων, όπως αυτές περιγράφηκαν στο όγδοο κεφάλαιο. Βέβαια, απαιτείται έλεγχος του προτύπου με αντίστοιχη εφαρμογή σε μελέτη περίπτωσης.

Η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση στις τρεις διαστάσεις αποτελεί θέμα διερεύνησης επόμενης εργασίας. Το πρόβλημα με μία τέτοια θεώρηση είναι ότι με την εισαγωγή όλων των μεταβλητών απόφασης σε μία ενιαία διαδικασία, ο χώρος αναζήτησης θα αυξηθεί εκθετικά καθιστώντας το πρόβλημα δισεπίλυτο. Υπάρχει ανάγκη επισταμένης μελέτης των αλγορίθμων βελτιστοποίησης που παρουσιάζονται στο έκτο κεφάλαιο και ενδεχομένως να είναι απαραίτητη η ανάπτυξη ενός νέου υβριδικού αλγορίθμου για την επίλυση ενός τέτοιου προβλήματος. Παρ' όλα αυτά, αν και η βελτιστοποίηση δεν γίνεται ταυτόχρονα στις τρεις διαστάσεις έχουν ληφθεί κατάλληλοι περιορισμοί για την επιτυχή χάραξη στον χώρο των τριών διαστάσεων. Επίσης, είναι δυνατός ο καθορισμός μιας επαναληπτικής διαδικασίας μεταξύ των βελτιστοποιήσεων κατά οριζοντιογραφία και μηκοτομή, όπως στο πρότυπο του Fan (2004), προσεγγίζοντας με αυτόν τον τρόπο το πρόβλημα.

Η εύρεση του ολικού βέλτιστου ή μια τιμής κοντά σε αυτό φαίνεται να επιτυγχάνεται στην παρούσα εργασία. Για την υποστήριξη αυτού έγιναν πολλές δοκιμές και έλεγχοι με διάφορες γενετικές παραμέτρους ενώ τα καλύτερα αποτελέσματα εμφανίζουν σύγκλιση προς μία τιμή. Φυσικά αυτό σημαίνει πως η προσέγγιση της παρούσας εργασίας βρίσκει τη βέλτιστη λύση υπό τις παραδοχές και υποθέσεις που γίνονται και όχι καθολικά στο πρόβλημα βελτιστοποίησης χαράξεων.

Η απόδοση των γενετικών αλγορίθμων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία είναι υψηλή καθώς από τις πρώτες δοκιμές της διαδικασίας βελτιστοποίησης εμφανίζονται σημαντικές μειώσεις στο κόστος. Με βάση την ανάλυση ευαισθησίας των γενετικών παραμέτρων διαπιστώθηκε ότι σημαντικό ρόλο στην τελική επίλυση παίζουν τόσο η αρχική χάραξη που χρησιμοποιείται στην διαδικασία βελτιστοποίησης, όσο και ο βαθμός μετάλλαξης που χρησιμοποιείται. Εκτός, από τις γενετικές παραμέτρους εξετάστηκαν και οι επιδράσεις των παραμέτρων σχεδιασμού με το πρότυπο να καταλήγει σε λογικά αποτελέσματα.

Όσον αφορά τις απαιτήσεις μνήμης το βιβλίο εργασίας που δημιουργήθηκε με όλες τους υπολογισμούς συμπεριλαμβανομένου του πίνακα υψομέτρων είχε συνολικό όγκο δεδομένων 40 MB.Όσον αφορά, την υπολογιστική ισχύ και τους χρόνους επίλυσης παρατηρήθηκε ότι στο πρόβλημα βελτιστοποίησης της οριζοντιογραφικής χάραξης ο χρόνος εκτέλεσης 10000 δοκιμών ήταν περί τα 40 λεπτά ενώ για το πρόβλημα βελτιστοποίησης της κατακόρυφης χάραξης ο αντίστοιχος χρόνος ήταν κυμάνθηκε περί τα 15 λεπτά. Αυτό συμβαίνει καθώς οι υπολογισμοί της οριζοντιογραφικής χάραξης που γίνονται σε κάθε επανάληψη είναι πολλοί πιο περίπλοκοι από τους αντίστοιχους της κατακόρυφης.

Επισημαίνεται, ότι ο αριθμός των 10000 δοκιμών ήταν αρκετά μεγάλος ώστε να εξασφαλίζεται η σύγκλιση. Σε πολλές όμως περιπτώσεις 2000 δοκιμές ήταν αρκετές για την εξασφάλιση μιας ικανοποιητικής λύσης. Αυτοί οι χρόνοι σημειώθηκαν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή με κεντρική μονάδα επεξεργασία συχνότητας 1,6 GHz . Προφανώς, χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικούς υπολογιστές με επεξεργαστές υψηλότερων δυνατοτήτων οι παραπάνω χρόνοι θα ελαχιστοποιούνται.

Ο αριθμός των κορυφών αν και αποτελεί μεταβλητή απόφασης στο πρόβλημα σχεδιασμού μιας οδού, εντούτοις δεν έγινε άμεση εισαγωγή τους στο πρότυπο βελτιστοποίησης. Αντίθετα, ακολουθήθηκε η μέθοδος απαρίθμησης των εναλλακτικών λύσεων. Βέβαια, αυτό δεν είναι απαραίτητο αν ακολουθηθεί μια τεχνική παρόμοια με αυτήν που εισήγαγαν οι Chan & Fan (2003), όπου χρησιμοποιούντα κενά γονίδια για να υποδηλώσουν κορυφές που δεν χρησιμοποιούνται. Για όλες τις υπόλοιπες μεταβλητές απόφασης ο χώρος ήταν συνεχής ικανοποιώντας έτσι το αντίστοιχο κριτήριο.

Στη μελέτη περίπτωσης της παρούσας εργασίας δεν υπήρχαν περιοχές από τις οποίες δεν επιτρέπεται να διέλθει η χάραξη. Βέβαια, αυτό μπορεί να γίνει πολύ εύκολα τροποποιώντας τον πίνακα υψομέτρων ώστε με κατάλληλες τιμές να αποφεύγονται. Τέτοιες περιοχές, όπως και άλλα χαρτογραφικά δεδομένα μπορούν να εισαχθούν σε ένα σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών επιτρέποντας μεγάλη ευελιξία στη διαχείριση των πληροφοριών και των υπολογισμό διάφορων στοιχείων κόστους. Στο ενδέκατο κεφάλαιο χρησιμοποιήθηκαν τα εργαλεία ενός τέτοιου συστήματος για την επεξεργασία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Απαιτείται διερεύνηση για απευθείας ενσωμάτωση ενός προτύπου βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων σε ένα σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών.

Στην παρούσα εργασία έγινε προσπάθεια μίμησης της συμβατικής διαδικασίας χάραξης όπου η μελέτη της οριζοντιογραφίας και της μηκοτομής γίνεται ξεχωριστά. Έτσι και στην παρούσα εργασία η βελτιστοποίηση γίνεται σε δύο στάδια θεωρώντας ανεξάρτητες τις κορυφές της μηκοτομής από αυτές της οριζοντιογραφίας αλλά εξασφαλίζοντας τον επιτυχή συνδυασμό τους μέσω κατάλληλων περιορισμών.

Στο πρότυπο αποτελεί καινοτομία η εισαγωγή των παραμέτρων κλωθοειδών εισόδου και εξόδου σαν ξεχωριστές μεταβλητές ενώ γίνονται όλοι οι απαραίτητοι υπολογισμοί ασύμμετρων οριζοντιογραφικών καμπυλών. Το στοιχείο αυτό διαφοροποιεί το RoadEvolver ως προς τα υπόλοιπα πρότυπα βελτιστοποίησης θέτοντας τις βάσης για χρήση του στο στάδιο της προμελέτης. Τα κύρια σημεία της αξιολόγησης εκφράζονται συνοπτικά στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 13.11: Αξιολόγηση RoadEvolver ως προς κριτήρια προτύπων βελτιστοποίησης χάραξης

Κριτήριο	**Αξιολόγηση**
1. Σημαντικά και ευαίσθητα κόστη	• Προσανατολισμός για χρήση του προτύπου στο στάδιο προμελέτης • Θεώρηση μόνο του κόστους του όγκου χωματισμών • Ανάγκη για περαιτέρω διερεύνηση
2. Περιορισμοί οδικών χαράξεων	• Διερευνήθηκαν προδιαγραφές σχεδιασμού διαφόρων χωρών • Θεώρηση περιορισμών οριζοντιογραφίας και μηκοτομής • Θεώρηση περιορισμών επιτυχούς συνδυασμού τους • Καινοτόμο πρότυπο ως προς πλήθος και είδος περιορισμών σε σχέση με άλλα πρότυπα βελτιστοποίησης χαράξεων
3. Ρεαλιστική χάραξη	• Κάθε γεωμετρικό στοιχείο είναι διακριτό στη χάραξη • Δεν χρησιμοποιείται ενιαία καμπύλη αλλά ξεχωριστές σχέσεις • Καινοτόμα θεώρηση μη συμμετρικών τόξων συναρμογής σε πρότυπο βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων
4. Οπισθόδρομη χάραξη	• Το πρότυπο αναπτύχθηκε ώστε να μπορεί να διαχειρίζεται περιπτώσεις οπισθόδρομων χαράξεων • Απαιτείται έλεγχος με μελέτη περίπτωσης
5. Βελτιστοποίηση ταυτόχρονα στις τρεις διαστάσεις	• Απαιτείται διερεύνηση • Δυσκολία η εκθετική αύξηση του χώρου αναζήτησης • Λήφθηκαν περιορισμοί για την ορθή χάραξη στον χώρο • Δυνατός ο καθορισμός μιας επαναληπτικής διαδικασίας
6. Εύρεση ολικού βέλτιστου	• Πιθανή ως προς τις θεωρήσεις και παραδοχές που έχουν γίνει • Διερευνήθηκαν πολλοί συνδυασμοί γενετικών παραμέτρων • Αποτελέσματα δείχνουν σύγκλιση προς μία τιμή
7. Αλγόριθμος επίλυσης	• Υψηλή απόδοση από τις πρώτες δοκιμές • Ευαισθησία ως προς αρχική επίλυση και βαθμό μετάλλαξης • Ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς παραμέτρους σχεδιασμού
8. Απαιτήσεις μνήμης και υπολογιστικής ισχύος	• Όγκος δεδομένων βιβλίου εργασίας 40MB • Επεξεργαστής 1,6 GHz απέδωσε 10000 δοκιμές σε 35’ για βελτιστοποίηση οριζοντιογραφίας και ίδιο αριθμός δοκιμών σε 15’ για βελτιστοποίηση μηκοτομής
9. Χώρος αναζήτησης της λύσης	• Απαρίθμηση για αριθμό κορυφών οριζοντιογραφίας και μηκοτομής • Συνεχής για τις υπόλοιπες μεταβλητές
10. Μη προσβάσιμες περιοχές	• Δεν διερευνήθηκαν • Εύκολη διαχείριση μέσω πίνακα υψομέτρων
11. Συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών	• Δημιουργία ψηφιακού μοντέλου εδάφους προτύπου μέσω ΣΓΠ • Απαιτείται διερεύνηση απευθείας ενσωμάτωσης
12. Μεταβλητές απόφασης	• Προσπάθεια μίμησης της συμβατικής διαδικασίας χάραξης με μελέτη οριζοντιογραφίας και μηκοτομής κατά στάδια • Ανεξάρτητες κορυφές οριζοντιογραφίας και μηκοτομής και σύνδεση αυτών μέσω περιορισμών • Καινοτομία προτύπου ως προς την εισαγωγή παραμέτρων κλωθοειδών εισόδου και εξόδου σαν ξεχωριστές μεταβλητές απόφασης

14 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται ένα πρότυπο βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων κατά την οριζοντιογραφία και τη μηκοτομή, το οποίο ονομάστηκε RoadEvolver. Στόχος του προτύπου είναι ο σχεδιασμός της χάραξης σε επίπεδο προμελέτης που αποφέρει το χαμηλότερο κόστος λαμβάνοντας υπ' όψιν μια πληθώρα περιορισμών που απορρέουν από τις οδηγίες γεωμετρικού σχεδιασμού οδών. Για τη διαχείριση των δεδομένων, την προτυποποίηση και την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιούνται λειτουργίες διαφόρων λογισμικών πακέτων. Ο χρήστης επιλέγει τα σημεία αρχής και τέλους της χάραξης και εισάγει μια σειρά παραμέτρων ανάλογα με τις ισχύουσες προδιαγραφές. Ο σχεδιασμός και η υλοποίηση του προτύπου έγινε μετά την εκτεταμένη ανασκόπηση τόσο των στοιχείων του οδικού σχεδιασμού όσο και των υπαρχόντων μεθόδων και προτύπων βελτιστοποίησης. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια σύντομή παρουσίαση των ευρημάτων και των συμπερασμάτων της εργασίας, ενώ παρατίθενται και οι προτάσεις για αξιοποίηση και επέκταση του προτύπου.

14.1 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Στο μαθηματικό πρότυπο βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία έγινε προσπάθεια μίμησης της συμβατικής διαδικασίας χάραξης. Η βελτιστοποίηση γίνεται σε δύο στάδια θεωρώντας ανεξάρτητες τις κορυφές της μηκοτομής από αυτές της οριζοντιογραφίας αλλά εξασφαλίζοντας τον επιτυχή συνδυασμό τους μέσω κατάλληλων περιορισμών. Καινοτομία αποτελεί η εισαγωγή των παραμέτρων κλωθοειδών εισόδου και εξόδου σαν ξεχωριστές μεταβλητές απόφασης ενώ γίνονται όλοι οι απαραίτητοι υπολογισμοί ασύμμετρων οριζοντιογραφικών καμπυλών. Το στοιχείο αυτό διαφοροποιεί το RoadEvolver ως προς τα υπόλοιπα πρότυπα βελτιστοποίησης θέτοντας τις βάσεις για χρήση του στο στάδιο της προμελέτης.

Όσον αφορά τους περιορισμούς του σχεδιασμού που λήφθηκαν υπ' όψιν αυτοί αντλήθηκαν από οδηγίες γεωμετρικού σχεδιασμού διαφόρων χωρών και ο χρήστης είναι σε θέση να επιλέξει τους περιορισμούς που θα λάβει υπ' όψιν ανάλογα με τις προδιαγραφές που ισχύουν. Το πρότυπο είναι καινοτόμο τόσο ως προς το πλήθος, όσο και ως προς το είδος των περιορισμών που έχουν ληφθεί υπ' όψιν σε σχέση με τα υπάρχοντα πρότυπα βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα, εκτός από περιορισμούς σε οριζοντιογραφία και μηκοτομή ξεχωριστά έχουν συμπεριληφθεί και περιορισμοί για τον επιτυχή συνδυασμό τους.

Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας της μεθόδου πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας. Με βάση την ανάλυση των γενετικών παραμέτρων φάνηκε ότι η αρχική χάραξη που διαμορφώνεται μετά την

επίλυση περιορισμών επιδρά σημαντικά στη εύρεση της βέλτιστης λύσης. Συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερο είναι το αρχικό κόστος, τόσο πιο δύσκολη η εύρεση της βέλτιστης χάραξης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η εισαγωγή τυχαίων τιμών στις μεταβλητές απόφασης κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης, που εκφράζεται με το βαθμό μετάλλαξης είναι απαραίτητη ώστε να εξερευνάται μεγαλύτερο τμήμα του χώρου αναζήτησης και να αποφεύγονται τοπικά βέλτιστες τιμές. Οι χρόνοι επίλυσης για το πρόβλημα της οριζοντιογραφικής χάραξης ήταν υπερδιπλάσιοι από τους αντίστοιχους της κατακόρυφης.

Τα γεωμετρικά στοιχεία μελέτης της οριζοντιογραφίας και της μηκοτομής, καθορισμένα από την επιλογή της ταχύτητας μελέτης, θα πρέπει να δημιουργούν τις προϋποθέσεις για μία αρμονική χάραξη της οδού στο φυσικό ανάγλυφο. Στην περίπτωση της αύξησης της ταχύτητας μελέτης, η χάραξη είναι πιο τεταμένη, με μεγάλες ακτίνες καμπυλότητας στην οριζοντιογραφία και στη μηκοτομή. Το σύστημα βελτιστοποίησης ανταποκρίθηκε στις απαιτήσεις επιβεβαιώνοντας, ότι χαράξεις με μεγαλύτερες ταχύτητες σχεδιασμού οδηγούν σε αποτελέσματα αυξημένου όγκου χωματισμών και κόστους

14.2 Συνολικά συμπεράσματα

Ο καθορισμός της βέλτιστης οδικής χάραξης στις τρεις διαστάσεις αποτελεί ένα πρόβλημα, το οποίο είναι δύσκολο να επιλυθεί χωρίς ανθρώπινη καθοδήγηση. Οι υπολογιστικές μέθοδοι είναι απαραίτητες για την αυτοματοποίηση της αναζήτησης μέσω εφικτών λύσεων για τον καθορισμό της χάραξης που ενέχει το μικρότερο κόστος.

Για την επίτευξη μιας αρμονικής χάραξης της οδού στον χώρο απαιτείται συγκρίσιμη κλίμακα μεταβολών στην οριζοντιογραφία και τη μηκοτομή, δηλαδή μικρές μεταβολές στην οριζοντιογραφία δεν θα πρέπει να συνδυάζονται με μεγάλες μεταβολές στη μηκοτομή. Με τη σύμπτωση των σημείων καμπής στην οριζοντιογραφία και τη μηκοτομή προκύπτει μια επιτυχημένη τρισδιάστατη χάραξη της οδού στον χώρο που αντιστοιχεί με αρμονικές μορφές που υπάρχουν στο φυσικό εδαφικό ανάγλυφο ενώ, οι καμπύλες της μηκοτομής πρέπει να περιέχονται στις καμπύλες της οριζοντιογραφίας. Τα στοιχεία αυτά της χάραξης της οδού στον χώρο περιλαμβάνονται στο πρότυπο βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων που αναπτύσσεται στην παρούσα εργασία υπό μορφή περιορισμών. Στην εργασία γίνεται επίσης εκτενής μαθηματική προτυποποίηση περιορισμών που απορρέουν από οδηγίες γεωμετρικού σχεδιασμού οδών καθιστώντας το πρωτοπόρο ως προς το είδος και πλήθος από το οποίο ο χρήστης καλείται να επιλέξει. Οι οδηγίες σχεδιασμού οδών υφίστανται συνεχείς τροποποιήσεις και βελτιώσεις, εκφράζοντας τη συνεχή εξέλιξη στην επιστημονική γνώση και έρευνα. Οι διαφορές και οι ατέλειες των προδιαγραφών οφείλονται στην έλλειψη μοντέλου πρόβλεψης των ταχυτήτων σε κάθε θέση της οδού, αλλά και στην έλλειψη μοντέλου επακριβούς ελέγχου της υπάρχουσας ασφάλειας κατά την κίνηση του οχήματος. Βασικά στοιχεία για τη διατύπωση των αρχών και των κανόνων των προδιαγραφών που διέπουν τη μελέτη χάραξης μίας οδού είναι η επιλογή της ταχύτητας μελέτης και η εκτίμηση του συντελεστή τριβής του οδοστρώματος. Από την συγκριτική μελέτη μεταξύ διάφορων οδηγιών χάραξης καθώς και από τα αποτελέσματα ερευνών συμπεραίνεται ότι υπάρχουν πολλές και ουσιαστικές διαφορές ως προς την επιλογή των επιτρεπόμενων τιμών του συντελεστή της εφαπτομενικής και της εγκάρσιας συνιστώσας της τριβής. Η αντιμετώπιση του οχήματος ως στερεό σώμα όπου η μάζα του είναι συγκεντρωμένη στο κέντρο βάρους παρουσιάζει σημαντικές απλουστεύσεις και παραδοχές που δεν ανταποκρίνονται απαραίτητα στην πραγματική κίνηση των οχημάτων, ενώ αγνοούνται σημαντικές παραμέτρους της μελέτης που επηρεάζουν την οδική ασφάλεια. Για τους λόγους αυτούς οι παράμετροι αυτοί εισάγονται κατευθείαν από τον χρήστη στο πρότυπο. Βασική αρχή της μεθόδου της ταχύτητας μελέτης είναι η διατήρηση σταθερής ταχύτητας σε όλο το μήκος της οδού και έχει αποδειχθεί στην πράξη ανεπαρκής για τη μείωση των διακυμάνσεων της πραγματικής ταχύτητας των οχημάτων.

Το διάγραμμα μάζας χρησιμοποιείται συχνά στον οδικό σχεδιασμό για την εξισορρόπηση των ποσοτήτων εκσκαφών και επιχωματώσεων. Βέβαια, αυτό παρουσιάζει ορισμένες ελλείψεις οι οποίες

αποτέλεσαν αφορμή για την ανάπτυξη προτύπων βελτιστοποίησης των χωματουργικών εργασιών. Ο γραμμικός προγραμματισμός έχει χρησιμοποιηθεί σε αρκετές έρευνες για το σχεδιασμό της διανομής των εκχωμάτων και για την επιλογή των κατά μήκος κλίσεων που ελαχιστοποιούν το κόστος των χωματουργικών. Τα αρχικά μαθηματικά πρότυπα που αναπτύχθηκαν για τη βελτιστοποίηση της κατακόρυφης χάραξης βασίζονταν στη δημιουργία μια ομαλοποιημένης γραμμής εδάφους χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές. Στα πρότυπα αυτά δεν λαμβάνονταν υπ' όψιν περιορισμοί του σχεδιασμού όπως αυτός της μέγιστης κατά μήκος κλίσης. Ο δυναμικός προγραμματισμός έχει χρησιμοποιηθεί για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης χάραξης τόσο κατά την οριζοντιογραφία και τη μηκοτομή ξεχωριστά, όσο και για τη βελτιστοποίηση της τρισδιάστατης χάραξης ταυτόχρονα. Η προσέγγιση αυτή επέτρεψε την προτυποποίηση περισσότερο περίπλοκων συναρτήσεων κόστους για τον καθορισμό της βέλτιστης χάραξης. Παρ' όλα αυτά για μεγάλου μεγέθους προβλήματα υπάρχει μικρή πιθανότητα επιλογής της διαδρομής που ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος. Στη βιβλιογραφία υπάρχει πληθώρα αλγορίθμων που βασίζονται σε διαδικασίες που συμβαίνουν στη φύση και εμπνέονται από επιστήμες όπως η χημεία, η φυσική και κυρίως η βιολογία. Μέσα σε αυτούς ανήκουν και οι γενετικοί αλγόριθμοι, οι οποίοι φαίνεται πως προσαρμόζονται αρκετά καλά στο πρόβλημα βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων.

Τα υπάρχοντα μαθηματικά πρότυπα αν και αποδίδουν σωστά κάτω από ορισμένες συνθήκες, εντούτοις έχουν ορισμένες ελλείψεις και η εφαρμογή τους παραμένει αρκετά περιορισμένη. Οι δυσκολίες στην ανάπτυξη ενός ισχυρού και εύκολα εφαρμόσιμου προτύπου οφείλονται αφ' ενός στην πολύπλοκη σχέση του κόστους που σχετίζεται με μια χάραξη και αφ' ετέρου με την ικανοποίηση εξ' ίσου πολύπλοκων περιορισμών. Επιπροσθέτως, εφ' όσον το πρόβλημα διαθέτει συνεχή χώρο αναζήτησης, υπάρχει άπειρος αριθμός εναλλακτικών λύσεων. Για τον λόγο αυτό απαιτείται ένα ισχυρό μαθηματικό πρότυπο και ένας αποδοτικός αλγόριθμος επίλυσής του προβλήματος. Υπάρχουν αρκετοί λόγοι για την προφανή έλλειψη προόδου στην εφαρμογή μεθόδων βελτιστοποίησης στις οδικές χαράξεις. Κατά τη μακρά διάρκεια ανάπτυξης των προτύπων μαθηματικού προγραμματισμού, οι δυσμενείς περιβαλλοντικές επιδράσεις των αυτοκινητοδρόμων και άλλων κύριων οδών άρχισαν να λαμβάνουν όλο και μεγαλύτερη προσοχή, καθώς η κοινή γνώμη αντιδρούσε. Κατά συνέπεια, προωθήθηκε η προσέγγιση της κατάστρωσης και αξιολόγησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων διαφόρων οδεύσεων που οδηγούσε στην τελική επιλογή μέσω μεθόδων πολυκριτηριακής ανάλυσης. Όπως φαίνεται οι αναλυτικές διαδικασίες για τη βελτιστοποίηση χάραξης δεν αξιοποιήθηκαν στο εύρος των δυνατοτήτων τους.

Ο σκοπός της προμελέτης είναι ο καθορισμός με επαρκή προσέγγιση της θέσης και γεωμετρίας της οδού. Για τον λόγο αυτόν η διαμόρφωση της χάραξης πρέπει να είναι ρεαλιστική περιλαμβάνοντας τα απαραίτητα λεπτομερή γεωμετρικά στοιχεία που την αποτελούν. Οι μορφές αναπαράστασης της χάραξης στα υπάρχοντα πρότυπα βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων παρουσιάζουν ορισμένες ελλείψεις καθιστώντας τις μάλλον ακατάλληλες για χρήση στο στάδιο της προμελέτης. Ένα πρότυπο, το οποίο μπορεί να μιμηθεί τη συμβατική διαδικασία σχεδιασμού που ακολουθεί ένας μελετητής οδοποιίας θα ικανοποιούσε τις απαραίτητες συνθήκες για χρήση στο στάδιο αυτό. Το πρότυπο που αναπτύσσεται στην παρούσα εργασία εστιάζεται σε αυτό το πρόβλημα. Η πρωτοτυπία της εργασίας έγκειται στη θεώρηση ασύμμετρων οριζοντιογραφικών καμπυλών, λαμβάνοντας υπ' όψιν όλες εκείνες τις μεταβλητές απόφασης που επιτρέπουν τη ρεαλιστική αναπαράσταση της χάραξης κατά την οριζοντιογραφία και τη μηκοτομή.

Τα υπάρχοντα μαθηματικά πρότυπα που έχουν αναπτυχθεί για τη βελτιστοποίηση των οδικών χαράξεων παρουσιάζουν διάφορα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Καμία από τις προσεγγίσεις που περιγράφονται δεν είναι καθολικά καλύτερη από τις υπόλοιπες και υπάρχει πάντα ένα αντιστάθμισμα μεταξύ των πλεονεκτημάτων άλλων προσεγγίσεων. Οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι μια μεθευρετική μέθοδος βελτιστοποίησης στην οποία έχουν εστιαστεί οι έρευνες στο πεδίο της βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων. Εξαιτίας των δυσκολιών της αναπαράστασης της οδικής χάραξης, καθώς επίσης της πολυπλοκότητας του κόστους και των περιορισμών που ενυπάρχουν στο πρόβλημα, η προσέγγιση φαίνεται να προσαρμόζεται αρκετά καλά στο πρόβλημα βελτιστοποίησης της χάραξης. Στο τέταρτο

μέρος της εργασίας η μεθευρετική αυτή μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για τη βελτιστοποίηση της οριζοντιογραφίας και της μηκοτομής ενός τμήματος οδού. Η απόδοση των γενετικών αλγορίθμων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία είναι υψηλή καθώς από τις πρώτες δοκιμές της διαδικασίας βελτιστοποίησης εμφανίζονται σημαντικές μειώσεις στο κόστος. Η εύρεση του ολικού βέλτιστου ή μια τιμής κοντά σε αυτό φαίνεται να επιτυγχάνεται στην παρούσα εργασία. Για την υποστήριξη αυτού έγιναν πολλές δοκιμές και έλεγχοι με διάφορες γενετικές παραμέτρους ενώ τα καλύτερα αποτελέσματα εμφανίζουν σύγκλιση προς μία τιμή. Φυσικά αυτό δεν σημαίνει πως το πρότυπο βρίσκει τη βέλτιστη λύση καθολικά στο πρόβλημα βελτιστοποίησης χαράξεων, αλλά μόνον υπό τις παραδοχές και υποθέσεις που γίνονται και. Με βάση την ανάλυση ευαισθησίας των γενετικών παραμέτρων διαπιστώθηκε ότι σημαντικό ρόλο στην τελική επίλυση παίζουν τόσο η αρχική χάραξη που χρησιμοποιείται στην διαδικασία βελτιστοποίησης, όσο και ο βαθμός μετάλλαξης που χρησιμοποιείται. Εκτός, από τις γενετικές παραμέτρους εξετάστηκαν και οι επιδράσεις των παραμέτρων σχεδιασμού με το πρότυπο να καταλήγει σε λογικά αποτελέσματα. Όσον αφορά τα στοιχεία απαιτήσεων μνήμης, της υπολογιστική ισχύος και των χρόνων επίλυσης του προβλήματος βελτιστοποίησης της χάραξης, αυτά διατηρούνται σε διαχειρίσιμα μεγέθη για τα σύγχρονα υπολογιστικά συστήματα.

Πολλά πρότυπα βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων παράγουν μια απλή χάραξη που αποτελείται από ευθύγραμμα τμήματα η μια μαθηματική καμπύλη στην οποία δεν διαχωρίζονται οι ευθυγραμμίες από τις οριζοντιογραφικές καμπύλες, ή τα εφαπτόμενα τμήματα από τις παραβολικές καμπύλες της μηκοτομής. Οι προσεγγίσεις ταυτόχρονης βελτιστοποίησης στις τρεις διαστάσεις κάνουν ορισμένες παραδοχές ως προς τη σχέση της οριζοντιογραφικής κατακόρυφης χάραξης, καθώς ο χώρος αναζήτησης αυξάνεται εκθετικά από τις δύο στις τρεις διαστάσεις. Κατά συνέπεια περιορίζεται ουσιαστικά ο χώρος αναζήτησης σε ένα υποσύνολο των εφικτών λύσεων οδηγώντας σε επιλύσεις χαμηλότερης ποιότητας. Αντίθετα τα αποτελέσματα βελτιστοποίησης με το RoadEvolver περιλαμβάνουν χαράξεις με διακριτά γεωμετρικά στοιχεία, τα οποία περιγράφονται από ξεχωριστές μαθηματικές σχέσεις, οι οποίες συνδέονται μέσω περιορισμών. Η μαθηματική προτυποποίηση των κορυφών της οριζοντιογραφίας επιτρέπει τη δημιουργία οπισθόδρομων χαράξεων. Μάλιστα, στο πρότυπο συμπεριλαμβάνονται οι υπολογισμοί ασύμμετρων οριζοντιογραφικών καμπυλών καθιστώντας το πρότυπο καινοτόμο ως προς την προσέγγισή του. Προφανώς, η μεγάλη δυσκολία που διαπιστώθηκε κατά την προτυποποίηση και ένταξη όλων των σχέσεων των ασύμμετρων οριζοντιογραφικών καμπυλών σε ένα πρότυπο βελτιστοποίησης καθιστούσε την θεώρησή τους έως τώρα δυσχερή. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζει επιτυχώς η παρούσα εργασία με τη θεώρηση ξεχωριστών μεταβλητών απόφασης για τις θέσεις των κορυφών της πολυγωνικής, τις ακτίνες των κυκλικών τόξων και τις παραμέτρους των τόξων συναρμογής. Για όλες τις μεταβλητές απόφασης ο χώρος ήταν συνεχής ικανοποιώντας έτσι το αντίστοιχο κριτήριο.

Όσον αφορά το υπολογιζόμενο κόστος πρέπει να αναφερθεί ότι το πρότυπο που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία είναι προσανατολισμένο για χρήση στο στάδιο της προμελέτης σε αντίθεση με τα υπόλοιπα πρότυπα βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων που χρησιμοποιούνται στο στάδιο της προκαταρκτικής μελέτης. Για τον λόγο αυτό το κόστος που λαμβάνει υπ' όψιν το πρότυπο αφορά το κόστος του όγκου χωματισμών, το οποίο είναι και το πλέον ευαίσθητο στις επιλογές σχεδιασμού για το στάδιο της προμελέτης. Βέβαια, με απλές τροποποιήσεις μπορεί να γίνει εύκολα η συμπερίληψη και άλλων στοιχείων κόστους.

14.3Προτάσεις αξιοποίησης προτύπου

Το πρότυπο RoadEvolver, που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας έχει ως στόχο τη βελτιστοποίηση οδικών χαράξεων κατά την οριζοντιογραφία και τη μηκοτομή. Για πρώτη φορά, ένα μαθηματικό πρότυπο βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων λαμβάνει υπ' όψιν τις ίδιες μεταβλητές για τις οποίες καλείται να αποφασίσει ένας μελετητής στο στάδιο της προμελέτης. Παρά τις ελλείψεις που έχουν διαπιστωθεί, το πρότυπο μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο στο πεδίο του γεωμετρικού

σχεδιασμού οδών υποβοηθώντας τη διαδικασία χάραξης για μικρά τμήματα οδών. Απαιτείται ακόμη σημαντική ερευνητική προσπάθεια για τη δημιουργία μιας αυτοτελούς εφαρμογής.

Το πρότυπο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί επικουρικά σε βελτιώσεις οδών. Με δεδομένη μια χάραξη ο χρήστης είναι σε θέση να διαπιστώσει ποια τμήματα της οδού ικανοποιούν τους περιορισμούς που έχει τεθεί και ποια τμήματα χρειάζονται τροποποιήσεις. Μέσα από την εφαρμογή δίνεται η δυνατότητα να διατηρηθούν σταθερές ορισμένες μεταβλητές απόφασης και με αυτόν τον τρόπο μπορούν να διατηρηθούν στοιχεία της υπάρχουσας χάραξης και να τροποποιηθούν μόνο όσα δεν ικανοποιούν τους περιορισμούς συμβάλλοντας με αυτό τον τρόπο στην εξοικονόμηση πόρων.

14.4 Περαιτέρω έρευνα

Στην παρούσα ενότητα γίνονται προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση του αντικειμένου της εργασίας, είτε με άλλες μεθόδους, είτε με εξέταση πρόσθετων χαρακτηριστικών και άλλων παραμέτρων. Οι προτάσεις αφορούν τόσο την προτυποποίηση του γεωμετρικού σχεδιασμού και του υπολογισμού του κόστους όσο και θέματα των μεθόδων βελτιστοποίησης και τη συμβατότητα με άλλα συστήματα.

14.4.1 Προτυποποίηση γεωμετρικού σχεδιασμού οδών

Οι προτάσεις για περαιτέρω έρευνα που αφορούν τον γεωμετρικό σχεδιασμό αφορούν την επέκταση του προτύπου βελτιστοποίησης ώστε να συμπεριλάβει λειτουργικά χαρακτηριστικά οδών, στοιχεία διατομών και ορατότητας. Το πρότυπο πρέπει επίσης να δέχεται περισσότερες παραμέτρους και να υπολογίζει διάφορες μορφές κατά την αλληλουχία των γεωμετρικών στοιχείων της χάραξης. Οι προτάσεις για τα θέματα αυτά διατυπώνονται στα επόμενα εδάφια.

14.4.1.1 Λειτουργικά χαρακτηριστικά οδών

Στο πρότυπο βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκε, οι υπολογισμοί των ελάχιστων τιμών των γεωμετρικών στοιχείων έγιναν με βάση τη ταχύτητα μελέτης, η θεώρηση της οποίας εμφανίζει ορισμένα προβλήματα, όπως διαπιστώθηκε στο τρίτο κεφάλαιο. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η συμπερίληψη στους υπολογισμούς των αναμενόμενων λειτουργικών χαρακτηριστικών, τα οποία εμφανίζουν σημαντικές αποκλίσεις σε κάθε χώρα. Συνεπώς, στόχο μελλοντικής έρευνας πρέπει να αποτελέσει η επέκταση του προτύπου για τη συμπερίληψη της λειτουργικής κατηγοριοποίησης των οδών, τόσο υπεραστικών όσο και αστικών, με ενσωμάτωση των αντίστοιχων εθνικών προδιαγραφών που χρησιμοποιούνται. Ιδιαίτερη μέριμνα πρέπει να δοθεί στα στοιχεία εκείνα που συμβάλλουν στην αρμονία της χάραξης και κατ' επέκταση την οδική ασφάλεια όπως συζητήθηκε στο πέμπτο κεφάλαιο.

14.4.1.2 Διατομές

Στο πλαίσιο της εργασίας μελετήθηκαν μόνο τα στοιχεία της οριζοντιογραφίας και της μηκοτομής χωρίς να λαμβάνονται υπ' όψιν τα στοιχεία των διατομών. Όπως είναι ευνόητο η ενσωμάτωση της μελέτης των διατομών θα επιφέρει αύξηση του αριθμού των μεταβλητών απόφασης. Στοιχεία όπως το πλάτος της οδού με πιθανές διαπλατύνσεις, οι επικλίσεις και οι συναρμογές τους, οι πρόσθετες λωρίδες κυκλοφορίας, οι κατά μήκος κλίσεις των οριογραμμών της οδού και η απορροή των υδάτων θα πρέπει να συμπεριληφθούν με ταυτόχρονη εξασφάλιση της ασφαλούς δυναμικής της κίνησης των οχημάτων.

14.4.1.3 Ορατότητα

Περαιτέρω μελέτη χρειάζονται και τα θέματα ορατότητας με συμπερίληψη των απαιτήσεων για προσπέραση, υπόγειες διαβάσεις και ο έλεγχος ορατότητας κατά την οριζοντιογραφία. Επίσης, στο πρότυπο μπορούν να ενσωματωθούν πρότυπα υπολογισμού τρισδιάστατων μηκών ορατότητας και να προστεθούν οι περιορισμοί που αφορούν τον αριθμό του μέγιστου αριθμού θλάσεων της χάραξης που βρίσκονται εντός του οπτικού πεδίου του οδηγού, όπως περιγράφτηκαν στο τέταρτο κεφάλαιο.

14.4.1.4 Εισαγωγή παραμέτρων και γεωμετρικά στοιχεία

Στόχο αποτελεί η επέκταση του προτύπου, ώστε αν το επιθυμεί ο χρήστης να μπορεί να εισάγει τιμές ακτίνας για τα σημεία αρχής και τέλους. Στο πρότυπο πρέπει επίσης να δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να εισάγει εκτός από τις συντεταγμένες αρχής και τέλους, την αρχική και τελική γωνία διεύθυνσης καθώς και αρχικό ή τελικό μήκος ευθυγραμμίας. Εναλλακτικά ενδεχομένως να δίνεται η δυνατότητα εισαγωγής των συντεταγμένων δύο ή τριών κορυφών πολυγωνικής κατά την αρχή και το τέλος της χάραξης ταυτόχρονα με τα παραπάνω στοιχεία, ώστε να αποτυπώνεται η υπάρχουσα κατάσταση των κλάδων που προηγούνται ή έπονται του υπό μελέτη τμήματος. Επίσης, ο χρήστης πρέπει να μπορεί να επιλέγει αν η χάραξη θα ξεκινά με κυκλικό τόξο δηλαδή να μπορεί να εισάγει αρχική και τελική ακτίνα καμπυλότητας καθώς και να υπάρχει πρόβλεψη για ύπαρξη τόξου συναρμογής εξόδου ή εισόδου κατά την αρχή ή το τέλος αντίστοιχα. Σημεία ή περιοχές υποχρεωτικής διέλευσης του άξονα της οδού που καθορίζονται από τον χρήστη πρέπει επίσης να ενσωματωθούν.

Αν και στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε μια πρωτότυπη θεώρηση για σύμμετρες οριζοντιογραφικές καμπύλες, εντούτοις λήφθηκαν υπ' όψιν μόνο απλά τόξα συναρμογής και σιγμοειδείς καμπύλες. Αντικείμενο διερεύνησης επόμενης εργασίας θα αποτελέσει η ενσωμάτωση και άλλων μορφών αλληλουχίας των γεωμετρικών στοιχείων της χάραξης, όπως οι ωοειδείς καμπύλες που περιγράφτηκαν στο τρίτο κεφάλαιο. Το πρότυπο μπορεί επίσης να επεκταθεί συμπεριλαμβάνοντας στοιχεία μεταφορών και πρόβλεψης της ζήτησης για κυκλοφορία ώστε ορισμένοι παράμετροι σχεδιασμού να επιλέγονται αυτόματα. Σημαντική είναι επίσης η θεώρηση του υπάρχοντος οδικού δικτύου και η προτυποποίηση οδικών κόμβων.

14.4.2 Συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών και δεδομένα

Τα συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών προσφέρουν πολλές δυνατότητες τις οποίες μπορεί να αξιοποιήσει το πρότυπο RoadEvolver. Χρησιμοποιώντας ψηφιοποιημένα χαρτογραφικά δεδομένα όπως αεροφωτογραφίες, οριογραμμές ιδιοκτησιών, ζώνες αντικειμενικών αξιών, χρήσεις γης, γεωλογικοί και εδαφοτεχνικοί χάρτες και άλλα, μπορούν να μοντελοποιηθούν περιοχές αυξημένου κόστους ή άλλες στις οποίες να μην επιτρέπεται η διέλευση του οδικού άξονα. Μέσω της υπέρθεση των επιπέδων αυτών το πρότυπο βελτιστοποίησης θα είναι ικανό να συνθέτει όλες τις υπάρχουσες πληροφορίες για την τελική επίλυση. Δυσκολία, μπορεί να αποτελέσει το γεγονός το παρόν πρότυπο εντοπίζει τη λύση χρησιμοποιώντας έναν μόνο τελικό πίνακα υψομέτρων και ενδεχομένως να είναι δύσκολη η εργασία σε περισσότερα του ενός επιπέδου. Απαραίτητη είναι η έρευνα προς την πλευρά αξιοποίησης διανυσματικών μορφών αναπαράστασης των δεδομένων όπως τα δίκτυα ακανόνιστων τριγώνων και οι ισοϋψείς. Επίσης είναι επιθυμητή η απευθείας με ένα σύστημα ηλεκτρονικής σχεδίασης, ώστε να παράγονται με αυτοματοποιημένο τρόπο τα τελικά σχέδια οριζοντιογραφίας, μηκοτομής και διατομών.

14.4.3 Υπολογισμός κόστους

Στην παρούσα εργασία έγινε θεώρηση του κόστους που σχετίζεται με τον όγκο εκσκαφών και επιχωμάτων, καθώς θεωρήθηκε το πλέον ευαίσθητο ως προς τις επιλογές διαμόρφωσης της χάραξης στο στάδιο της προμελέτης. Ο υπολογισμός όμως αυτού του κόστους χρειάζεται βελτιώσεις ώστε να αυξηθεί η ακρίβεια του προτύπου. Επίσης, όπως διαπιστώθηκε στο δεύτερο και το όγδοο κεφάλαιο υπάρχουν πολλά ακόμη στοιχεία κόστους που μπορούν να εισαχθούν στη συνάρτηση στόχου. Ορισμένες προτάσεις σχετικά με τα θέματα αυτά παρατίθενται στη συνέχεια.

14.4.3.1 Κόστος κατασκευής

Ο υπολογισμός του τελικού όγκου χωματισμών βασίστηκε σε ένα απλοποιημένο μοντέλο διατομών που ορίζονται με βάση τη διαφορά των υψομέτρων της οδού και του εδάφους στο σημείο πύκνωσης του άξονα της οδού, ενώ θεωρήθηκαν ενιαίες κλίσεις πρανών και πλάτος οδού σε όλο το μήκος της

χάραξης. Με τον τρόπο αυτό οι διατομές που προέκυπταν αφορούσαν είτε δημιουργία ορύγματος ή επιχώματος χωρίς να συμπεριλαμβάνονται μικτές διατομές. Ήδη έχει δρομολογηθεί η ανάπτυξη των σχέσεων εκείνων που θα επιτρέπουν την λήψη περισσότερων του ενός χαρακτηριστικών σημείων σε κάθε διατομή ώστε να επιτευχθεί πιο ακριβής υπολογισμός των όγκων των χωματισμών με ταυτόχρονη θεώρηση συντελεστών επιπλήσματος και συμπύκνωσης. Επίσης, το μοναδιαίο κόστος του όγκου χωματισμών θεωρήθηκε σταθερό, γεγονός που δεν ανταποκρίνεται στις πραγματικές συνθήκες. Οι χωματουργικές εργασίες που απαιτούνται για την κατασκευή μιας οδού αφορούν πολλές περισσότερες διαδικασίες. Για παράδειγμα, αν ο καθαρός όγκος χωματουργικών είναι θετικός, τότε η επιπλέον αυτή ποσότητα πρέπει να μεταφερθεί σε έναν ή περισσότερους χώρους απόθεσης. Αντίθετα αν είναι αρνητικός, το έλλειμμα πρέπει να εξευρεθεί από έναν ή περισσότερους δανειοθαλάμους.

Στον οδικό σχεδιασμό, ένας σημαντικός τρόπος ελαχιστοποίησης του κόστους των χωματουργικών είναι η εξισορρόπηση του όγκου εκσκαφών και επιχωμάτων. Όμως, κατά την εκσκαφή και μεταφορά για κατασκευή ενός επιχώματος, το υλικό μπορεί να συμπυκνωθεί και τελικώς όγκος να είναι μικρότερος από την αρχική ποσότητα. Το μέγεθος της συμπύκνωσης εξαρτάται από το είδος του εδάφους και το ύψος των επιχωμάτων. Συνεπώς, προκύπτει η ανάγκη εξισορρόπησης του όγκου εκσκαφών και επιχωμάτων ανάλογα με το κόστος μεταφοράς χωματισμών, τη θεώρηση της καταλληλότητας χρήσης των υλικών εκσκαφής, το κόστος δημιουργίας δανειοθαλάμων και χώρων απόθεσης και την επιλογή των απαιτούμενων μέσων παραγωγής, στοιχεία τα οποία έχουν προσπαθήσει να προσεγγίσουν τα πρότυπα βελτιστοποίησης χωματουργικών εργασιών που περιγράφονται στο έβδομο κεφάλαιο. Επίσης, σε ορισμένες περιπτώσεις είναι προτιμότερη κατασκευή γεφυρών ή σηράγγων έναντι ορυγμάτων και επιχωμάτων μεγάλου μεγέθους. Η προτυποποίηση αυτών είναι απαραίτητη όπως και η συμπερίληψη τεχνικών έργων, όπως τοίχοι αντιστήριξης, οχετοί και άλλες υδραυλικές κατασκευές, που όπως είδαμε στο δεύτερο κεφάλαιο, παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του τελικού κατασκευαστικού κόστους. Συνεπώς, στόχο περαιτέρω έρευνας θα αποτελέσει η αναλυτική τιμολόγηση όλων των υλικών και εργασιών για την κατασκευή της οδού, που αφορούν το στάδιο της προμελέτης και η ενσωμάτωση ενός προτύπου βελτιστοποίησης χωματουργικών εργασιών όπως αυτά που περιγράφτηκαν στο έβδομο κεφάλαιο.

14.4.3.2 Άλλες κατηγορίες κόστους

Η συμπερίληψη άλλων στοιχείων κόστους πέραν των κατασκευαστικών, όπως το κόστος χρηστών αποτελεί αντικείμενο διερεύνησης. Ο υπολογισμός του κόστους χρηστών είναι πιο περίπλοκος ενώ διάφορα πρότυπα έχουν αναπτυχθεί για την εκτίμησή του συμπεριλαμβάνοντας το λειτουργικό κόστος των οχημάτων, τους χρόνους διαδρομών και το κόστος ατυχημάτων. Αυτά τα πρότυπα έχουν αναπτυχθεί μέσω παλινδρομήσεων από ιστορικά δεδομένα, ενώ υπάρχουν διαφοροποιήσεις ανάλογα με την χώρα ή τη γεωγραφική περιοχή προέλευσης. Λόγω αυτών των δυσκολιών δεν έχει ακόμη αναπτυχθεί ένα πρότυπο για τον προσδιορισμό του κόστους χρηστών με ακρίβεια. Όσον αφορά άλλες περιβαλλοντικές, κοινωνικές και πολιτικές αποφάσεις, αυτές πρέπει επίσης να αναπαρασταθούν ενδεχομένως με μια αναλυτική ιεραρχική διαδικασία πολυκριτηριακής λήψης αποφάσεων, ώστε να εξετάζονται αρχικά τα στοιχεία εκείνα με τη μεγαλύτερη βαρύτητα.

14.4.4 Πρότυπο βελτιστοποίησης και μέθοδοι επίλυσης

Στην εργασία αυτή αναπτύχθηκε ένα πρότυπο, το οποίο χρησιμοποιεί γενετικούς αλγορίθμους για τη βελτιστοποίηση των οδικών χαράξεων. Στο προηγούμενο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας έγινε μια προσπάθεια ανάλυσης της συμπεριφοράς του αλγορίθμου με τροποποιημένες παραμέτρους. Γεγονός αποτελεί ότι υπάρχουν άπειροι συνδυασμοί γενετικών παραμέτρων οι οποίες δεν έχουν εξεταστεί ώστε να καθοριστεί το μίγμα εκείνο που παρουσιάζει την καλύτερη συμπεριφορά. Βέβαια, με βάση την ανάλυση που προηγήθηκε φάνηκε πως αποδίδει σε ικανοποιητικό βαθμό για χαράξεις μικρού μήκους. Για την αύξηση της ταχύτητα σύγκλισης της διαδικασίας πρέπει να μελετηθεί η δυνατότητα κατάρτισης του αρχικού πληθυσμού με ορισμένες αρχικές λύσεις καθώς αυτοί γίνεται με τυχαίο τρόπο στην παρούσα φάση.

Το πρότυπο βελτιστοποίησης μπορεί επίσης να διαμορφωθεί έτσι ώστε να συμπεριλάβει πολλαπλές συναρτήσεις στόχου. Για παράδειγμα εκτός της μείωσης του όγκου των χωματισμών ως στόχος θα μπορούσε να τεθεί και η εξισορρόπηση του όγκου εκσκαφών και επιχωμάτων. Στο πρότυπο υπάρχει η δυνατότητα ένταξης αυτών των στοιχείων μέσω κατάλληλης διαχείρισης των περιορισμών με εισαγωγή ποινών. Το μέγεθος των ποινών που έχει η παραβίαση των περιορισμών και εισάγεται σαν επιπλέον κόστος στη συνάρτηση στόχου πρέπει επίσης να αναλυθεί περαιτέρω ώστε εκφράζει το αντίστοιχο αντιστάθμισμα στη μονάδα κόστους. Επίσης, περαιτέρω έρευνα απαιτεί η εισαγωγή όλων των μεταβλητών απόφασης σε ένα πρότυπο ταυτόχρονης βελτιστοποίησης στις τρεις διαστάσεις. Βέβαια, όπως αναφέρθηκε ο χώρος αναζήτησης αυξάνεται εκθετικά καθιστώντας το πρόβλημα δισεπίλυτο. Υπάρχει ανάγκη επισταμένης μελέτης των αλγορίθμων βελτιστοποίησης που παρουσιάζονται στο έκτο κεφάλαιο και ενδεχομένως να είναι απαραίτητη η ανάπτυξη ενός νέου υβριδικού αλγορίθμου για την επίλυση ενός τέτοιου προβλήματος. Εναλλακτικά είναι δυνατός ο καθορισμός μιας επαναληπτικής διαδικασίας μεταξύ των βελτιστοποιήσεων κατά την οριζοντιογραφία και τη μηκοτομή. Για τον αριθμό των κορυφών της πολυγωνικής ακολουθήθηκε η μέθοδος απαρίθμησης των εναλλακτικών λύσεων στην παρούσα εργασία. Η εισαγωγή αυτών των μεταβλητών απόφασης απευθείας στο πρότυπο βελτιστοποίησης αποτελεί μελλοντική επέκταση.

Όπως αναφέρεται στο έκτο κεφάλαιο, έχει αναπτυχθεί πλήθος μεθευρετικών και μη αλγορίθμων για την επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων βελτιστοποίησης, ενώ στο έβδομο κεφάλαιο διαπιστώθηκε πως ορισμένοι από αυτούς τους αλγορίθμους έχουν χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση του οδικού σχεδιασμού. Απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση, τόσο των αλγορίθμων που έχουν χρησιμοποιηθεί στα προβλήματα βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων, όσο και αυτών που η συμπεριφορά τους σε ένα τέτοιο πρόβλημα δεν έχει μελετηθεί έως τώρα.

Βιβλιογραφία

AASHO. (1938). *A Policy on Highway Classification.* Washington, D.C., U.S.A.: American Association of State Highway Officials.

AASHO. (1954). *A Policy on Geometric Design of Rural Highways.* Washington, D.C., U.S.A.: American Association of State Highway Officials.

AASHO. (1984). *A Policy on Geometric Design of Highway and Streets* (1st ed.). Washington, D.C., U.S.A.: American Association of State Highway Officials.

AASHTO. (2011). *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets* (6th ed.). Washington, D.C., U.S.A.: American Association of State Highway and Transportation Officials.

Akay, A. E. (2003). *Minimizing Total Cost of Construction, Maintenance, and Transportation Costs with Computer-Aided Forest Road Design.* PhD dissertation, Oregon State University, Department of Forest Engineering, Corvallis, OR.

Akay, A. E. (2004, September 27). A New Method of Designing Forest Roads. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 28*(4), pp. 273-279.

Akay, A. E. (2006, October 1). Minimizing Total Costs of Forest Roads with Computer-Aided Design Model. *Sadhana , 31*(5), pp. 621-633.

Akay, A. E., & Sessions, J. (2005, July 1). Applying the Decision Support System, TRACER, to Forest Road Design. *Western Journal of Applied Forestry, 20*(3), pp. 184-191.

Akay, A. E., Aruga, K., Bettinger, P., & Sessions, J. (2013). Using Optimization Techniques in Designing Forest Roads and Road Networks. *Journal of the Bartin Faculty of Forestry, 15*(1), pp. 49-62.

Akay, A. E., Boston, K., & Sessions, J. (2005, June 1). The Evolution of Computer-Aided Road Design Systems. *International Journal of Forest Engineering, 16*(2), pp. 73-79.

Al-Hadad, B. A. (2011). *An Approach to the Highway Alignment Development Process Using Genetic Algorithm Based Optimization.* PhD dissertation, University of Nottingham, Department of Civil Engineering.

Al-Hadad, B. A., Mawdesley, M. J., & Stace, R. (2010). A Genetic Algorithm Approach to Highway Alignment Development. In W. Tizani (Ed.), *Proceedings of the International Conference on Computing in Civil and Building Engineering.* Nottingham University Press.

Aljohani, M. S., & Moreb, A. A. (2003). Roadway Profile Modeled by Polynomials to Minimize Earthwork Cost. *WSEAS Transactions on Mathematics*, pp. 210-213.

Al-Sobky, A.-S. A. (2014). An Optimization Approach for Highway Vertical Alignment Using the Earthwork Balance Condition. *World Applied Sciences Journal, 29*(7), pp. 884-891.

Amiridis, K., & Psarianos, B. (2014, October). Application of Differential Geometry to Solve the Highway Alignment Location Problem. *Vestnik, 171*(10), pp. 262-270.

Angulo, E., Castillo, E., García-Ródenas, R., & Sánchez-Vizcaíno, J. (2012, May). Determining Highway Corridors. *Journal of Transportation Engineering, 138*(5), pp. 557-570.

Angulo, E., Castillo, E., García-Ródenas, R., & Sánchez-Vizcaíno, J. (2014, January 31). A Continuous Bi-Level Model for the Expansion of Highway Networks. *Computers & Operations Research, 41*, pp. 262-276.

Angulo, E., García-Ródenas, R., & Espinosa-Aranda, J. L. (2014, August 20). A Lagrangian Relaxation Approach for Expansion of a Highway Network. *Annals of Operations Research*, pp. 1-26.

Antoniotti, P. (1969). APPOLON: A New Road Design Optimization Procedure. *PTRC Symposium on Cost Models and Optimization in Road Location, Design and Construction* (pp. 236-241). London: Planning and Transport Research and Computation Co., Ltd.

Aruga, K. (2005, August 1). Tabu Search Optimization of Horizontal and Vertical Alignments of Forest Roads. *Journal of Forest Research, 10*(4), pp. 275-284.

Aruga, K., Chung, W., Akay, A. E., Sessions, J., & Miyata, E. S. (2007, January 1). Incorporating Soil Surface Erosion Prediction into Forest Road Alignment Optimization. *International Journal of Forest Engineering, 18*(1), pp. 24-32.

Aruga, K., Sessions, J., & Akay, A. E. (2005, April 1). Application of an Airborne Laser Scanner to Forest Road Design with Accurate Earthwork Volumes. *Journal of Forest Research, 10*(2), pp. 113-123.

Aruga, K., Sessions, J., & Akay, A. E. (2005, April 1). Heuristic Planning Techniques Applied to Forest Road Profiles. *Journal of Forest Research, 10*(2), pp. 83-92.

Aruga, K., Sessions, J., & Miyata, E. S. (2005, December 1). Forest road design with soil sediment evaluation using a high-resolution DEM. *Journal of Forest Research, 10*(6), pp. 471-479.

Aruga, K., Tashaka, T., Sessions, J., & Miyata, E. S. (2006, June 14). Tabu Search Optimization of Forest Road Alignments Combined with Shortest Paths and Cubic Splines. *Croatian Journal of Forest Engineering, 27*(1), pp. 37-47.

Athanassoulis, G. C., & Calogero, V. (1973). Optimal Location of a New Highway from A to B: A Computer Technique for Route Planning. *PTRC Seminar Proceedings on Cost Models & Optimization in Highway (Session L9).* London.

Austroads. (2010). *Guide to Road Design Part 3: Geometric Design* (2nd ed.). (D. Barton, Ed.) Sydney, New South Wales, Australia: Austroads.

Austroads. (2014). *Updating Environmental Externalities Unit Values.* Sydney: Austroads.

Avni, A., Burley, P., Casey, P., Cherney, J., Christiansen, L., Daly, J. S., . . . Yu, H. (2015, March). Literature Searches and Literature Reviews for Transportation Research Projects. How to Search, Where to Search, and How to Put It All Together: Current Practices. *Transportation Research Circular(E-C194)*. Washington, D.C., U.S.A.: Transportation Research Board.

Bailey, A. C. (1979). *Estimating Highway Construction Costs: Program COSMOS: Drainage Cost Models.* TRRL Report SR 459, Department of the Environment, Department of Transport, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.

Baker, A. B. (1972). *The Design and Phasing of Horizontal and Vertical Alignment: Program Janus.* TRRL Report LR 469, Department of the Environment, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.

Barnett, J., Haile, E. R., & Moyer, R. A. (1936). Safe Side Friction Factors and Superelevation. *Highway Research Board Proceedings. 16*, pp. 69-80. Washington, D.C.: Highway Research Board.

Bartlett, R. (2016, January). Road Design Standards. *5.3a*. Norway.

Bauschke, H. H., & Koch, V. R. (2012, January 18). Projection Methods: Swiss Army Knives for Solving Feasibility and Best Approximation Problems with Halfspaces. *Infinite Products of Operators and Their Applications.* Haifa: Technion.

Bauschke, H. H., & Koch, V. R. (2014, July 17). Determining Feasible Splines with Engineering Constraints Using Projection Methods. *U.S. Patent Application No. 14/157,421, Publication No. US 2014/0200864 A1*. Washington, D.C, U.S.A.: United States Patent and Trademark Office.

Bosurgi, G., Pellegrino, O., & Sollazzo, G. (2013, November). A PSO Highway Alignment Optimization Algorithm Considering Environmental Constraints. *Advances in Transportation Studies*(31), pp. 63-80.

Calogero, V. (1968). Optimisation of the Vertical Profile. *PRTC Seminar Proceedings.* London.

Calogero, V. (1969, December 1). A New Method in Road Design: Polynomial Alignment. *Computer-Aided Design, 1*(2), pp. 19-29.

Calogero, V., Barth, K., & Athanassoulis, G. (1978, July 31). Storing and Retrieving Locational Data. *Computer-Aided Design, 10*(4), pp. 249–256.

Chang, A. J. (2011). *Optimal Curvature and Gradient-Constrained Paths with Anisotropic Costs.* PhD dissertation, University of Melbourne, Department of Mechanical Engineering, Parkville.

Chapra, S. C., & Canale, R. P. (1988). *Numerical Methods for Engineers.* New York, NY, U.S.A.: McGraw-Hill.

Chard, M. E. (1972). *Ground-Data Processing before Optimization of the Vertical Alignment: Program PRELUDE.* TRRL Report LR 459, Department of the Environment, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.

Chen, J.-X., & Lv, M.-X. (2014, April 8). Life Circle Cost Minimizing Modeling for Highway Alignment base on Genetic Algorithm. *Journal of Multimedia, 9*(4), pp. 514-521.

Cheng, J.-F., & Lee, Y. (2006, December). Model for Three-Dimensional Highway Alignment. *Journal of Transportation Engineering, 132*(12), pp. 913–920.

Chew, E. P., Goh, C. J., & Fwa, T. F. (1989, October 31). Simultaneous Optimization of Horizontal and Vertical Alignments for Highways. *Transportation Research Part B: Methodological, 23*(5), pp. 315-329.

Christian, J., & Caldera, H. (1988, August 1). Earthmoving Cost Optimization by Operational Research. *Canadian Journal of Civil Engineering, 15*(4), pp. 679-684.

Chung, C.-W. (1982). *Computerized Optimization of Highway Geometric Alignment Design.* PhM thesis, University of Hong Kong, Department of Civil Engineering, Pokfulam.

Craine, G. S., & Heatherington, S. (1974). Optimum Route Location Program. *PTRC Summer Annual Meeting.* Durham County Council.

Criswell, H. (1935). Aspects of Highway-Curve Design. *Minutes of the Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 240*(1935), pp. 152-183.

Dabbour, E. (2013). Optimizing Highway Profiles for Individual Cost Items. *International Journal for Traffic and Transport Engineering, 3*(4), pp. 440-447.

Dabbour, E., Raahemifar, K., & Easa, S. M. (2002). Optimum Vertical Curves For Highway Profilesusing Nonlinear Optimization. *Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering,* (pp. 1-9). Montreal, QC.

Davies, H. E. (1972). *Optimizing Highway Vertical Alignments to Minimize Construction Costs: Program MINERVA.* TRRL Report LR 463, Department of the Environment, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.

Davies, H. E., & Broughton, J. (1979). *Horizontal Alignment Optimization: Test of Program NOAH on a Motorway Scheme.* TRRL Report LR 894, Department of the Environment, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.

de Lima, R. X., Nobre Júnior, E. F., de Athayde Prata, B., & Weissman, J. (2013, August). Distribution of Materials in Road Earthmoving and Paving: Mathematical Programming Approach. *Journal of Construction Engineering and Management, 139*(8), pp. 1046-1054.

de Smith, M. J. (2006, January 1). Determination of Gradient and Curvature Constrained Optimal Paths. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 21*(1), pp. 24-38.

Dell'Acqua, G. (2012, January 1). Using Fuzzy Inference Systems to Optimize Highway Alignments. *International Journal for Traffic and Transport Engineering, 2*(1), pp. 44-59.

DMRB. (2002, February). Highway Link Design. *Design Manual for Roads and Bridges, 6.1.1*. U.K.: The Highways Agency, Scottish Executive Development Department, The National Assembly for Wales, The Department for Regional Development Northern Ireland.

Easa, S. M. (1987, March 1). Earthwork Allocations with Nonconstant Unit Costs. *Journal of Construction Engineering and Management, 113*(1), pp. 34-50.

Easa, S. M. (1988a, March 31). Selection of Roadway Grades that Minimize Earthwork Cost Using Linear Programming. *Transportation Research Part A: General, 22*(2), pp. 121-136.

Easa, S. M. (1988b, December 1). Earthwork Allocations with Linear Unit Costs. *Journal of Construction Engineering and Management, 114*(4), pp. 641-655.

Easa, S. M. (1989, June 1). Discussion: Earthmoving Cost Optimization by Operational Research. *Canadian Journal of Civil Engineering, 16*(3), p. 408.

Easa, S. M., & Kikuchi, S. (2009, June 1). Generalized Method for Estimating Best-Fit Vertical Alignments for Profile Data. *International Scholarly and Scientific Research & Innovation, 33*(9), pp. 693-701.

Easa, S. M., & Mehmood, A. (2007, September 1). Establishing Highway Horizontal Alignment to Maximize Design Consistency. *Canadian Journal of Civil Engineering, 34*(9), pp. 1159-1168.

Easa, S. M., & Mehmood, A. (2008, October). Optimizing Design of Highway Horizontal Alignments: New Substantive Safety Approach. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 23*(7), pp. 560–573.

Eldrandaly, K. A., Hassan, M. M., & AbdelAziz, N. M. (2015, January 1). A Modified Artificial Bee Colony Algorithm for Solving Least-Cost Path Problem in Raster GIS. *Applied Mathematics & Information Sciences, 9*(1), pp. 147-154.

Fambro, D. B., Fitzpatrick, K., & Koppa, R. J. (1997). *Determination of Stopping Sight Distances.* Texas A&M University, Texas Transportation Institute. Washington, D.C.: Transportation Research Board.

FGSV. (2011). *Guidelines for the Design of Motorways (RAA-R1)* (2008 ed.). (M. Irzik, K. Lemke, C. Lippold, M. Rohloff, W. Wirth, Eds., A. Flanagan, W. Brilon, & R. Troutbeck, Trans.) Cologne, Germany: FGSV Verlag GmbH.

FGSV. (2012). *Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL).* Cologne, Germany: FGSV Verlag GmbH.

Fitzpatrick, K., Carlson, P., Brewer, M. A., Wooldridge, M. D., & Miaou, S.-P. (2003). *Design Speed, Operating speed, and Posted Speed Practices.* Texas A&M University, Texas Transportation Institute. Washington, D.C.: Transportation Research Board.

Fwa, T. F. (1989). Highway Vertical Alignment Analysis by Dynamic Programming. *Transportation Research Record*(1239), pp. 1-9.

Fwa, T. F., Chan, W. T., & Sim, Y. P. (2002, September). Optimal Vertical Alignment Analysis for Highway Design. *Journal of Transportation Engineering, 128*(5), pp. 395–402.

Galin, D. (1981, August). Speeds on Two-Lane Rural Roads - A Multiple Regression Analysis. *Traffic Engineering & Control, 22*(8/9), pp. 453-460.

Gallagher, W. E. (2002). Route Alignment and Road Geometry. In R. Bridle, & J. Porter (Eds.), *The Motorway Achievement: Frontiers of Knowledge and Practice* (Vol. II, p. 569). London, U.K.: Thomas Telford.

Giles, M. J. (2004, July). Driver Speed Compliance in Western Australia: A Multivariate Analysis. *Transport Policy, 11*(3), pp. 227-235.

Gipps, P. G. (1992, June). ALIGN_3D: A Package to Optimise Route Alignment. *Road and Transport Research, 1*(2), pp. 50-59.

Gipps, P. G., Gu, K. Q., Held, A., & Barnett, G. (2001, April 30). New Technologies for Transport Route Selection. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 9*(2), pp. 135-154.

Gipps, P. G., Rufford, P., Dobbin, A., & Gu, K. Q. (1996). The Application of New Technologies to Planning Alignments. *Proceedings Roads 96 Conference* (pp. 407-422). Christchurch: Australian Roads Research Board.

Gladding, D. G. (1964). *Automatic Selection of Horizontal Alignments in Highway Location.* MSc thesis, Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Cambridge, MA.

Goh, C. J., & Teo, K. L. (1988, January). Control Parametrization: A Unified Approach to Optimal Control Problems with General Constraints. *Automatica, 24*(1), pp. 3-18.

Goh, C. J., Chew, E. P., & Fwa, T. F. (1988, December 31). Discrete and Continuous Models for Computation of Optimal Vertical Highway Alignment. *Transportation Research Part B: Methodological, 22*(6), pp. 399-409.

Göktepe, A. B., & Karasahin, M. (2011). Weighted Ground Line Based Optimal Alignment of Highways. *Mechanics Transport Communication*(3), pp. 19-27.

Göktepe, A. B., Altun, S., & Ahmedzade, P. (2009, January 15). Optimization of Vertical Alignment of Highways Utilizing Discrete Dynamic Programming and Weighted Ground Line. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, 33*(2), pp. 105-116.

Göktepe, A. B., Lav, A. H., & Altun, S. (2005). Dynamic Optimization Algorithm for Vertical Alignment of Highways. *Mathematical and Computational Applications, 10*(3), pp. 341-350.

Göktepe, A. B., Lav, A. H., & Altun, S. (2009, November). Method for Optimal Vertical Alignment of Highways. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport, 162*(4), pp. 177-188.

Göktepe, A. B., Lav, A. H., Altun, S., & Altintas, G. (2008). Fuzzy Decision Support System to Determine Swell/Shrink Factor Affecting Earthwork Optimization of Highways. *Mathematical and Computational Applications, 13*(1), pp. 61-70.

Goodchild, M. F. (1977, January 1). An Evaluation of Lattice Solutions to the Problem of Corridor Location. *Environment and Planning A, 9*(7), pp. 727-738.

Hale, A. R. (1990). Safety and Speed: A Systems View of Determinants and Control Measures. *IATSS research, 14*(1), pp. 59-65.

Hare, W., Hossain, S., Lucet, Y., & Rahman, F. (2014, April 30). Models and Strategies for Efficiently Determining an Optimal Vertical Alignment of Roads. *Computers & Operations Research, 44*, pp. 161-173.

Hare, W., Koch, V. R., & Lucet, Y. (2011, December 1). Models and Algorithms to Improve Earthwork Operations in Road Design Using Mixed Integer Linear Programming. *European Journal of Operational Research, 215*(2), pp. 470-480.

Hare, W., Lucet, Y., & Rahman, F. (2015, March 16). A Mixed-Integer Linear Programming Model to Optimize the Vertical Alignment Considering Blocks and Side-Slopes in Road Construction. *European Journal of Operational Research, 241*(3), pp. 631-641.

Hayman, R. W. (1970). Optimization of Vertical Alignment for Highways through Mathematical Programming. *Highway Research Record*(306), pp. 1-9.

Heinimann, H. R., Stückelberger, J., & Chung, W. (2003). Improving Automatic Grid Cell Based Road Route Location Procedures. *Proceedings Austro2003: High Tech Forest Operations for Mountainous Terrain.* Schlaegl.

Hickerson, T. F. (1964). *Route Location and Design* (5th ed.). New York, NY, U.S.A.: McGraw-Hill Inc.

Hirpa, D., Hare, w., Lucet, Y., Pushak, Y., & Tesfamariam, S. (2016, February 3). A Bi-Objective Optimization Framework for Three-Dimensional Road Alignment Design. *arXiv:1602.01379.*

Hodges, J. W. (1972). *Estimation of Road Construction Costs in St. Lucia Using Computer Optimization Techniques.* TRRL Report LR 486, Department of the Environment, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.

Hogan, J. D. (1973). Experience with OPTLOC: Optimum Location of Highways by Computer. *PTRC Seminar Proceedings on Cost Models and Optimization in Highways (Session L10).* London.

Hossain, S. (2013). *Models and Strategies for Efficiently Optimizing the Vertical Alignment of Roads for Multimaterial.* MSc thesis, University of British Columbia, College of Graduate Studies, Kelowna, BC.

Howard, B. E., Bramnick, Z., & Shaw, J. F. (1968, June). Optimum Curvature Principle in Highway Routing. *Journal of the Highway Division, 94*(1), pp. 61-82.

Ichihara, K., Tanaka, T., Sawaguchi, I., Umeda, S., & Toyokawa, K. (1996, February 16). The Method for Designing the Profile of Forest Roads Supported by Genetic Algorithm. *Journal of Forest Research, 1*(1), pp. 45-49.

Jayawardane, A. K., & Price, A. D. (1994a, August). A New Approach for Optimizing Earth Moving Operations. Part I. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport, 105*(3), pp. 195-207.

Jayawardane, A. K., & Price, A. D. (1994b, August). A New Approach for Optimizing Earth Moving Operations: Part II. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport, 105*(3), pp. 249-258.

Jha, M. K. (2000). *A Geographic Information Systems-Based Model for Highway Design Optimization.* PhD dissertation, University of Maryland, Department of Civil Engineering, College Park, MD.

Jha, M. K. (2013). Metaheuristic Applications in Highway and Rail Infrastructure Planning and Design: Implications to Energy and Environmental Sustainability. In X.-S. Yang, A. H. Gandomi, S. Talatahari, & A. H. Alavi, *Metaheuristics in Water, Geotechnical and Transport Engineering* (pp. 365–384). Elsevier.

Jha, M. K., & Kim, E. (2004). Demand Considerations In Locating Transportation Facilities: A Case Of Highway Alignments. In C. A. Brebbia, & L. C. Wadhwa (Ed.), *Urban Transport X: Urban Transport and the Environment in the 21st Century. 75*, pp. 131-140. Southampton: WIT Press.

Jha, M. K., & Schonfeld, P. (2004, July 31). A Highway Alignment Optimization Model Using Geographic Information Systems. *Transportation Research Part A: Policy and Practice, 38*(6), pp. 455-481.

Jha, M. K., Davis, C., & Kang, M.-W. (2007, November). State-of-the-art Intelligent Road Design Model with Genetic Algorithms, Geographic Information Systems, and CADD. (C. Benedetto, Ed.) *Advances in Transportation Studies, 13*, pp. 41-52.

Jha, M. K., Davis, C., & Okonkwo, F. (2005). A Conceptual Framework for Optimizing Highway Networks. In C. A. Brebbia, & L. Wadhwa (Ed.), *Urban Transport XI: Urban Transport and the Environment in the 21st Century. 78*, pp. 395-403. Southampton: WIT Press.

Jha, M. K., Ogallo, H. G., & Owolabi, O. (2014, February 5). A Quantitative Analysis of Sustainability and Green Transportation Initiatives in Highway Design and Maintenance. *Procedia - Social and Behavioral Sciences, 111*, pp. 1185-1194.

Jha, M. K., Schonfeld, P., Jong, J.-C., & Kim, E. (2006). *Intelligent Road Design.* Southampton, Hampshire, U.K.: WIT Press.

Jia, P., Sun, Z., Kato, H., & Hayashi, Y. (2007). Incorporating Network Impact Analysis into Road Alignment Optimization. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 7*, pp. 2074-2089.

Jian-xin, C., & Qing, L. (2011). Research on Cost-oriented Modeling and Optimization for Highway Alignment. *Procedia Engineering, 15*, p. Procedia Engineering.

Jolliffe, H. A. (1976). *Dynamic Programming Model for Selection of Optimum Logging Road Surface.* MSc thesis, University of British Columbia, Faculty of Forestry, Vancouver, BC.

Jong, J.-C. (1998). *Optimizing Highway Alignments with Genetic Algorithms.* PhD dissertation, University of Maryland, Department of Civil Engineering, College Park, MD.

Jong, J.-C., & Schonfeld, P. (2003, February 28). An Evolutionary Model for Simultaneously Optimizing Three-dimensional Highway Alignments. *Transportation Research Part B: Methodological, 37*(2), pp. 107-128.

Jong, J.-C., Jha, M. K., & Schonfeld, P. (2000, July). Preliminary Highway Design with Genetic Algorithms and Geographic Information Systems. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 15*(4), pp. 261-271.

Kang, M.-W. (2008). *An Alignment Optimization Model for a Simple Highway Network.* PhD dissertation, University of Maryland, Faculty of Graduate School, College Park, MD.

Kang, M.-W., Jha, M. K., & Schonfeld, P. (2012, April 30). Applicability of Highway Alignment Optimization Models. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 21*(1), pp. 257-286.

Kang, M.-W., Jha, M. K., Shariat, S., Schonfeld, P., & Wang, Z. (2011). *Alternative Alignments Development and Evaluation for the US 220 Project in Maryland.* Final Report, Maryland Department of Transportation, Maryland State Highway Administration, Baltimore, MD.

Kang, M.-W., Schonfeld, P., & Jong, J.-C. (2007, March). Highway Alignment Optimization through Feasible Gates. *Journal of Advanced Transportation, 41*(2), pp. 115-144.

Kang, M.-W., Schonfeld, P., & Yang, N. (2009, February). Prescreening and Repairing in a Genetic Algorithm for Highway Alignment Optimization. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 24*(2), pp. 109-119.

Kang, M.-W., Shariat, S., & Jha, M. K. (2013, June 30). New Highway Geometric Design Methods for Minimizing Vehicular Fuel Consumption and Improving Safety. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 31*, pp. 99-111.

Kang, M.-W., Yang, N., Schonfeld, P., & Jha, M. K. (2010, December). Bilevel Highway Route Optimization . *Transportation Research Record*(2197), pp. 107-117.

Kataria, S., Samdani, S. A., & Singh, A. K. (2005). Ant Colony Optimization in Earthwork Allocation. *International Conference on Intelligent Systems.* Kuala Lumpur.

Kazemi, S. F., & Shafahi, Y. (2013). An Integrated Model Of Parallel Processing And PSO Algorithm For Solving Optimum Highway Alignment Problem. In W. Rekdalsbakken, R. T. Bye, & H. Zhang (Ed.), *Proceedings 27th European Conference on Modelling and Simulation* (pp. 551-557). Alesund: European Council for Modelling and Simulation.

Kim, E. (2001). *Modeling Intersections and Other Structures in Highway Alignment Optimization.* PhD dissertation, University of Maryland, Department of Civil Engineering, College Park, MD.

Kim, E., Jha, M. K., & Schonfeld, P. (2004, March). Intersection Construction Cost Functions for Alignment Optimization. *Journal of Transportation Engineering, 130*(2), pp. 194-203.

Kim, E., Jha, M. K., & Son, B. (2003). A Stepwise Highway Alignment Optimization using Genetic Algorithms. *Proceedings of the 82nd Transportation Research Board Meeting.* Washington, D.C.: Transportation Research Board.

Kim, E., Jha, M. K., & Son, B. (2005, May 31). Improving the Computational Efficiency of Highway Alignment Optimization Models through a Stepwise Genetic Algorithms Approach. *Transportation Research Part B: Methodological, 39*(4), pp. 339-360.

Kim, E., Jha, M. K., Lovell, D. J., & Schonfeld, P. (2004, March). Intersection Modeling for Highway Alignment Optimization. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 19*(2), pp. 119-129.

Kim, E., Jha, M. K., Schonfeld, P., & Kim, H. S. (2007, February). Highway Alignment Optimization Incorporating Bridges and Tunnels. *Journal of Transportation Engineering, 133*(2), pp. 71–81.

Knight, J. R. (1977). Narrow Band Optimisation of Highways, Program NOAH. *PTRC Summer Meeting.*

Koch, V. R. (2010). *Optimizing Earthwork Block Removal in Road Construction.* MSc thesis, University of British Columbia, College of Graduate Studies, Kelowna, BC.

Koch, V. R. (2013, March 28). Road Design Optimization. *U.S. Patent Application No. 13/626,451, Publication No. US 2013/0080124 A1*. Washington, D.C., U.S.A.: United States Patent and Trademark Office.

Koch, V. R., & Liu, S. (2015, June 4). Horizontal Optimization of Transport Alignments. *U.S. Patent Application No. 14/530,009, Publication No. US 2015/0154323 A1*. Washington, D.C., U.S.A.: United States Patent and Trademark Office.

Koch, V. R., & Lucet, Y. (2010, May 1). A Note on: Spline Technique for Modeling Roadway Profile to Minimize Earthwork Cost. *Journal of Industrial and Management Optimization, 6*(2), pp. 393-400.

Korzhenevych, A., Dehnen, N., Bröcker, J., Holtkamp, M., Meier, H., Gibson, G., . . . Cox, V. (2014). *Handbook on External Costs of Transport.* Final report, European Comission, Directorate-General for Mobility and Transport, London.

Krammes, R., & Garnham, M. (1998, January). Worldwide Review of Alignment Design Policies. *Transportation Research Circular*(E-C003), pp. 19:1-17.

Kühn, W., & Jha, M. K. (2006). Using Visualization for the Design Process of Rural Roads. *5th International Visualization in Transportation Symposium and Workshop*, (p. 10). Denver, CO.

Kusano, S., Takahashi, H., Yamasaki, M., Terao, T., Tashiro, N., Lorentzen, T. H., . . . Fukase, T. (2009). A 3-D Model for Optimal Alignment Search System of Highway Design by Extended Digital Mapping Data. *16th ITS World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services.* Stockholm: Intelligent Transportation Society of America.

Lamm, R., & Choueiri, E. M. (1991). Traffic Safety on Two Continents - A Ten Year Analysis of Human and Vehicular Involvement. *Strategic Highway Research Program and Traffic Safety on Two Continents Conference Proceedings* (pp. 121-136). Gothenburg: Swedish National Road and Traffic Research Institute.

Lamm, R., Psarianos, B., & Mailaender, T. (1999). *Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook.* New York, NY, U.S.A.: McGraw-Hill.

Lee, Y., & Cheng, J.-F. (2001, June 30). A Model for Calculating Optimal Vertical Alignments of Interchanges. *Transportation Research Part B: Methodological, 35*(5), pp. 423-445.

Lee, Y., & Cheng, J.-F. (2001, August 1). Optimizing Highway Grades to Minimize Cost and Maintain Traffic Speed. *Journal of Transportation Engineering, 127*(4), pp. 303-310.

Lee, Y., & Liu, H. L. (2006). An Optimization Heuristic for the Highway Horizontal Alignment Problem. *Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering*, (pp. 866-875). Montreal, QC.

Lee, Y., Tsou, Y.-R., & Liu, H. (2009, April). Optimization Method for Highway Horizontal Alignment Design. *Journal of Transportation Engineering, 135*(4), pp. 217–224.

Li, W., Pu, H., Zhao, H., & Liu, W. (2013, January 11). Approach for Optimizing 3D Highway Alignments Based on Two-stage Dynamic Programming. *Journal of Software, 8*(11), pp. 2967-2973.

Liatsis, P., & Tawfik, H. M. (1999, December 22). Two-dimensional Road Shape Optimisation Using Genetic Algorithms. *Mathematics and Computers in Simulation, 51*(1-2), pp. 19-31.

Litman, T. (2009). *Transportation Cost and Benefit Analysis.* Victoria Transport Policy Institute, Victoria, BC.

Liu, K., & Sessions, J. (1993, January 1). Preliminary Planning of Road Systems Using Digital Terrain Models. *International Journal of Forest Engineering, 4*(2), pp. 27-32.

Liu, X., Jin, M., Jia, Z., & Nie, Y. (2013, December 15). Research on Optimization of Complex Section Route Scheme of Mountainous Expressway Based on Multi-objective Decision Making Method. *Information Technology Journal, 12*(13), pp. 2587-2592.

Maji, A. (2008). *Multi-objective Highway Alignment Optimization.* DEng dissertation, Morgan State University, Department of Civil Engineering, Baltimore, MD.

Maji, A., & Jha, M. K. (2011, December 31). A Multiobjective Analysis of Impacted Area of Environmentally Preserved Land and Alignment Cost for Sustainable Highway Infrastructure Design. *Procedia - Social and Behavioral Sciences, 20*, pp. 966-972.

Maji, A., & Jha, M. K. (2011, October). Highway Alignment Optimization Using Cost-Benefit Analysis Under User Equilibrium. *International Journal of Operations Research and Information Systems, 2*(4), pp. 19-33.

Maji, A., & Jha, M. K. (2012, July). Comparison of Single and Multi Objective Highway Alignment Optimization Algorithms. (A. Benedetto, Ed.) *Advances in Transportation Studies, 27*, pp. 5-16.

Mandow, L., & Pérez-de-la-Cruz, J.-L. (2004, October 30). Sindi: an Intelligent Assistant for Highway Design. *Expert Systems with Applications, 27*(4), pp. 635-644.

Mayer, R. H., & Stark, R. M. (1981, June). Earthmoving Logistics. *Journal of the Construction Division, 107*(2), pp. 297-312.

Mertzanis, F. S., & Hatzi, V. J. (2011). Model for Sight Distance Calculation and Three-dimensional Alignment Evaluation in Divided and Undivided Highway. *3rd International Conference on Road Safety and Simulation.* Indianapolis, IN.

Miao, K., Li, L., Yang, X.-L., & Huo, Y.-Y. (2009). Ant Colony Optimization Algorithm for Vertical Alignment of Highways. In X. Zhang, X. Yu, H. Fu, & J. Zhang (Ed.), *Characterization, Modeling, and Performance of Geomaterials*, (pp. 99-108). Changsha Hunan, China.

Mil, S., & Piantanakulchai, M. (2013). Vertical Alignment Optimization using Customized Polynomial Regression Model. *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. 9.* Eastern Asia Society for Transportation Studies.

Mondal, S. (2014). *Horizontal Alignment Optimization in Road Design.* MSc thesis, University of British Columbia, College of Graduate Studies, Kelowna, BC.

Mondal, S., Lucet, Y., & Hare, W. (2015, December 31). Optimizing Horizontal Alignment of Roads in a Specified Corridor. *Computers & Operations Research, 64*, pp. 130-138.

Moreb, A. A. (1996, August 23). Linear Programming Model for Finding Optimal Roadway Grades that Minimize Earthwork Cost. *European Journal of Operational Research, 93*(1), pp. 148-154.

Moreb, A. A. (2009, May 1). Spline Technique for Modeling Roadway Profile to Minimize Earthwork Cost. *Journal of Industrial and Management Optimization, 5*(2), pp. 275-283.

Moreb, A. A., & Aljohani, M. S. (2002). A Second Order Polynomial Describing Roadway Grades that Mininimizes Earthwork Cost Using Linear Programming. *The Seventh SIAM Conference on Optimization.* Toronto.

Moreb, A. A., & Aljohani, M. S. (2004, April 1). Quadratic Representation for Roadway Profile that Minimizes Earthwork Cost. *Journal of Systems Science and Systems Engineering, 13*(2), pp. 245-252.

Moreb, A. A., & Bafail, A. O. (1994, December 1). A Linear Programming Model Combining Land Levelling and Transportation Problems. *Journal of the Operational Research Society, 45*(12), pp. 1418-1424.

Moselhi, O., & Alshibani, A. (2009, September 15). Optimization of Earthmoving Operations in Heavy Civil Engineering Projects. *Journal of Construction Engineering and Management, 135*(10), pp. 948-954.

Murchland, J. D. (1973). Methods of Vertical Profile Optimisation for an Improvement to an Existing Road. *PTRC Seminar Proceedings on Cost Models and Optimisation in Highways (Session L12).* London.

Nandgaonkar, S. M. (1981, June). Earthwork Transportation Allocations: Operations Research. *Journal of the Construction Division, 107*(2), pp. 373-392.

Nasiri, M., & Lotfalian, M. (2012, June 1). Programming and Forest Road Planning. *Journal of Ecology and Environmental Sciences, 3*(2), pp. 68-73.

Nicholson, A. J. (1973). *A Variational Approach to Optimal Route Location.* PhD dissertation, University of Canterbury, College of Engineering, Christchurch.

Nicholson, A. J., Elms, D. G., & Williman, A. (1975, October 31). Optimal Highway Route Location. *Computer-Aided Design, 7*(4), pp. 255-261.

Nicholson, A. J., Elms, D. G., & Williman, A. (1976). A Variational Approach to Optimal Route Location. *Highway Engineers, 23*, pp. 22-25.

O'Brien, W. T., & Bennett, D. W. (1969). A Dynamic Programming Approach to Optimal Route Location. *PTRC Symposium on Cost Models and Optimization in Road Location, Design and Construction* (pp. 175-199). London: Planning and Transport Research and Computation Co., Ltd.

OECD. (1973). *Optimization of Road Alignment by the Use of Computers.* Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development.

Oglesby, C. H., & Hicks, R. G. (1982). *Highway Engineering* (4th Edition ed.). New York, NY, U.S.A.: John Wiley & Sons.

Olsson, M. (2013). *Usability of Computer Optimizing Program for Road Alignment in the Planning Process.* MSc thesis, Chalmers University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Göteborg.

Ostler, P. (1978). *Estimation of Bridge Construction Costs: Program COSMOS.* TRRL Report SR 404, Department of the Environment, Department of Transport, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.

Ostler, P., Bailey, A. C., & Stott, J. P. (1979). *Estimating Highway Construction Costs: Program COSMOS.* TRRL Report LR 863, Department of the Environment, Department of Transport, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.

Özkan, E. (2013). *Optimization of Highway Vertical Alignment by Direct Search Techinique.* MSc thesis, Middle East Technical University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara.

Palisade. (2010). *Guide to Using Evolver The Genetic Algorithm Solver for Microsoft Excel.* Ithaca, NY: Palisade Corporation.

Pantha, B. R., Yatabe, R., & Bhandary, N. P. (n.d.). GIS-based Roadway Route Optimization Incorporating Landslide Susceptibility Condition: A Case of Kathmandu - Hetauda Section, Nepal. *International Conference on Disasters and Development: Bridging the Gap between Theory and Practice*, (pp. 73-84).

Parker, N. A. (1977). Rural Highway Route Corridor Selection. *Transportation Planning and Technology, 3*(4), pp. 247-256.

Pearman, A. D. (1973). Investigation of the Objective Function in Problems of Optimising Highway Vertical Alignment. *PRTC Seminar Proceedings on Cost Models and Optimisation in Highways (Session L18).* London.

Pérez de la Cruz, J. L., Conejo-Muñoz, R., Morales-Bueno, R., & Puy-Huarte, J. (1995, December 31). Highway Design by Constraint Specification. *Artificial Intelligence in Engineering, 9*(2), pp. 127-139.

Psarianos, B. (2010). A EU Perspective on Self-Explaining, Self-Enforcing Roads. *Transportation Reserch Board 89th Annual Meeting.* Washington, D.C.: Transportation Research Board.

Pushak, Y., Hare, W., & Lucet, Y. (2016, January 16). Multiple-Path Selection for new Highway Alignments using Discrete Algorithms. *European Journal of Operational Research, 248*(2), pp. 415-427.

Puy Huarte, J. (1973). OPYGAR: Optimisation and Automatic Design of Highway Profiles. *PTRC Seminar Proceedings on Cost Models and Optimisation in Highways (Session L13).* London.

Rahman, F. (2012). *Optimizing the Vertical Alignment under Earthwork Block Removal Constraints in Road Construction.* MSc thesis, University of British Columbia, College of Graduate Studies, Kelowna, BC.

Razouki, S. S., & Al-Zubaidi, M. A. (1999, February 26). Effect of Cost Ratio on Optimum Road Location in Heterogeneous Terrain (Research Note). *Dirasat: Engineering Sciences, 26*(2), pp. 279-288.

ReVelle, C. S., Whitlatch, E. E., & Wright, J. R. (1997). *Civil and Environmental Systems Engineering.* Upper Saddle River, NJ, U.S.A.: Prentice Hall PTR.

Roberts, P. O. (1957). Using New Methods in Highway Location. *Photogrammetric Engineering, 23*(3), pp. 563-569.

Robinson, R. (1971). *Feasibility Checking by Computer of the Vertical Alignment of a New Road.* TRRL Report LR 399, Department of the Environment, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.

Robinson, R. (1972a). *A Computer Method for Designing the Vertical Alignment of a Road: Program VENUS I.* TRRL Report LR 457, Department of the Environment, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.

Robinson, R. (1972b). *A Further Computer Method for Designing the Vertical Alignment of a Road: Program VENUS II.* TRRL Report LR 458, Department of the Environment, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.

Robinson, R. (1973). Automatic Design of the Road Vertical Alignment. *PTRC Seminar Proceedings on Cost Models and Optimization in Highways (Session L19).* London.

Robinson, R. (1976). *Automatic Generation of the Highway Vertical Alignment: Program VENUS.* TRRL Report LR 700, Department of the Environment, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.

Roy, G. G. (1979, January 31). Computer-Aided Approach to Route Location. *Computer Aided Design, 11*(1), pp. 23-26.

Saffarzadeh, M., & Broujerdian, A. M. (2007). A Route Location Model Considering High Cost Zones. *11th World Conference on Transport Research.* Berkeley, CA: World Conference on Transport Research Society.

Saffarzadeh, M., & Broujerdian, A. M. (2007, April 1). Optimum Route Location Model Considering the Trip Generation Centers and Protected Zones. *Iranian Journal of Science and Technology, 31*(B2), pp. 167-178.

Sajjadi, S. M., Yunus, M. Z., Che, O., Puan, T. M., & Beheshti, S. A. (2014, July). The Effects of Safety Optimization on Highway Alignment: A Review. *International Journal of Engineering and Innovative Technology, 4*(1), pp. 240-246.

Schacke, I. (1972). Optimization of Vertical Alignment - A Case Study. *Computer Systems in Highway Design Proceedings*, (pp. 280-290). Copenhagen.

Schonfeld, P., Jha, M. K., Kang, M.-W., & Karri, G. A. (2007). *Improved Alignment Optimization and Evaluation.* Final Report, Maryland Department of Transportation, Maryland State Highway Administration, Baltimore, MD.

Schonfeld, P., Kang, M. W., & Jha, M. K. (2005). *3D Highway Alignment Optimization for Brookeville Bypass.* Maryland State Highway Administration.

Sessions, J., & Chung, W. (2001). NETWORK 2001 – Transportation Planning Under Multiple Objectives. *Proceedings of the International Mountain Logging and 11th Pacific Northwest Skyline Symposium*, (pp. 10-12). Seattle, WA.

Shaw, J. F., & Howard, B. E. (1981). Comparison of Two Integration Methods in Transportation Routing. *Transportation Research Record*(806), pp. 8-13.

Shaw, J. F., & Howard, B. E. (1982, May). Expressway Route Optimization by OCP. *Journal of Transportation Engineering, 108*(3), pp. 227-243.

Shortt, W. H. (1909, January). A Practical Method for the Improvement of Existing Railway Curves. *Minutes of the Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 176*(1909), pp. 97-118.

Smith, B. L., & Lamm, R. (1994). Coordination of Horizontal and Vertical Alignment with Regard to Highway Aesthetics. *Transportation Research Record*(1445), pp. 73-85.

Son, J., Mattila, K. G., & Myers, D. S. (2005, March). Determination of Haul Distance and Direction in Mass Excavation. *Journal of Construction Engineering and Management, 131*(3), pp. 302-309.

Stamos, A. A. (2008). Optimization of Highway Gradeline using the Simulated Annealing Method. *International Conference on Engineering Optimization.* Rio de Janeiro.

Stark, R. M., & Nicholls, R. L. (1972). *Mathematical foundations for design: Civil engineering systems.* New York, NY, U.S.A.: McGraw-Hill.

Stott, J. P. (1972). The Optimization of Horizontal and Vertical Alignment. In A. K. Turner (Ed.), *Computer Systems in Highway Design, Proceedings of the NATO Advanced Study Institute* (pp. 237-258). Copenhagen: North Atlantic Treaty Organization.

Stott, J. P. (1973, March 1). The Optimization of Road Layout by Computer Methods. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 55*(1), pp. 67-85.

Stott, J. P., Calogero, V., Hickman, D., & Roumeliotis, P. (1981). *Broad Band Route Selection by Program BRUTUS: Test on a Section of Motorway.* TRRL Report LR 985, Department of the Environment, Department of Transport, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.

Stückelberger, J. A. (2008). *A Weighted-Graph Optimization Approach for Automatic Location of Forest Road Networks.* ETH. Zürich: vdf Hochschulverlag AG.

TAC-ATC. (1999). *Geometric Design Guide for Canadian Roads.* Ottawa, ON, Canada: Transportation Association of Canada.

Tan, J. (2000, June 1). Application of Dynamic Programming to Optimum Location of a Forest Road. *International Journal of Forest Engineering, 11*(2), pp. 33-42.

Tao, F. (2005). *Bi-level Genetic Algorithm Approach for 3D Road Alignment Optimization.* MSc thesis, National University of Singapore, Department of Civil Engineering, Singapore.

Tat, C. W., & Tao, F. (2003). Using GIS and Genetic Algorithm in Highway Alignment Optimization. *Proceedings of Intelligent Transportation Systems. 2*, pp. 1563-1567. Institute of Electrical and Electronics Engineers.

Teo, K. L., & Goh, C. J. (1987, October). A Simple Computational Procedure for Optimization Problems with Functional Inequality Constraints. *IEEE Transactions on Automatic Control, 32*(10), pp. 940-941.

Thomson, N. R., & Sykes, J. F. (1988, October 10). Route Selection through a Dynamic Ice Field Using the Maximum Principle. *Transportation Research Part B: Methodological, 22*(5), pp. 339-356.

TRB. (2011, July). Modeling Operating Speed: Synthesis Report. *Transportation Research Circular(E-C151).* (Y. Hassan, M. Sarhan, & R. Porter, Eds.) Washington, D.C., U.S.A.: Transportation Research Board.

Trietsch, D. (1983). *A Family of Methods for the Preliminary Design of Highways.* PhD dissertation, Tel Aviv University, Faculty of Management, Tel Aviv.

Trietsch, D. (1987a, February). A Family of Methods for Preliminary Highway Alignment. *Transportation Science, 21*(1), pp. 17-25.

Trietsch, D. (1987b, February). Comprehensive Design of Highway Networks. *Transportation Science, 21*(1), pp. 26-35.

Trypia, M. (1979, November 30). Minimizing 'Cut and Fill' Costs in Roadmaking. *Computer-Aided Design, 11*(6), pp. 337-339.

Tunalioğlu, N., & Soycan, M. (2011, October 9). An Approach with Distance-Angle Based Search Algorithm in Route Design for Minimizing Earthwork. *International Journal of Physical Sciences, 6*(23), pp. 5442-5453.

Tunalioğlu, N., & Soycan, M. (2014, March 1). A Novel Route Design Methodology on Minimizing Level Differences Between Grade and Ground Line. *Journal of the Association of Surveyors of Slovenia, 58*(1), pp. 140-154.

Turner, A. K. (1968). *Computer-Assisted Procedures to Generate and Evaluate Regional Highway Alternatives, Part 1.* Joint Highway Research Project, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, IN.

Turner, A. K. (1969a). *The GCARS System Fortran IV Programmers Manual, Part A - Programs for Data Collection and Evaluation Part 3 A.* Joint Highway Research Project, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, IN.

Turner, A. K. (1969b). *The GCARS System Fortran IV Programmers Manual, Part B - Programs for Generation of Alternatives Part 3 B.* Joint Highway Research Project, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, IN.

Turner, A. K. (1969c). *The GCARS System Fortran IV Programmers Manual, Part C - Programs for Contour Mapping Part 3 C.* Joint Highway Research Project, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, IN.

Turner, A. K. (1969d). *The GCARS System Fortran IV Users Manual, Part 2.* Joint Highway Research Project, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, IN.

Turner, A. K. (1969e). *The GCARS II System: Technical Paper.* Joint Highway Research Project, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, IN.

Turner, A. K. (1978, December). A Decade of Experience in Computer Aided Route Selection. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 44*(12), pp. 1561-1576.

Turner, A. K., & Miles, R. D. (1970). *The GCARS System - a Computer-Assisted Method of Regional Route Location: Techical Paper.* Joint Highway Research Project, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, IN.

Turner, A. K., & Miles, R. D. (1971). The GCARS System: A Computer-Assisted Method of Regional Route Location. *Highway Research Record*(348), pp. 1-15.

Vitkiene, J., & Puodziukas, V. (2014). Design of Road Based on the Applicable Design Methods used in Western European Countries. *Environmental Engineering. Proceedings of the International Conference on Environmental Engineering.* Vilnius.

VSS. (n.d.). Swiss Norms 640 080 b, 090b, 100a, 105b, 110, 120, 135, 138b, 140. *Linienführung, Entwurf von Verkehrsanlagen, 1. Teil*. Zurich, Switzerland: Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute.

Wan, F. Y. (1995). *Introduction to the Calculus of Variations and its Applications.* New York, NY, U.S.A.: Chapman & Hall.

Withey, K. H. (1972). *The Optimization of the Vertical Alignment of the M.5 Motorway from Chelston to Blackbrook.* TRRL Report LR 473, Department of the Environment, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.

Yamasaki, M., Inoue, M., Fukase, T., Ishimoto, I., Iwamoto, I., & Shimizu, S. (2014). A 3-D VR Model for Optimal Alignment Search System of Highway Design (OHPASS) using ASTER

GDEM. *21st ITS World Congress Conference Proceedings*. Detroit, MI: Intelligent Transportation Society of America.

Yang, N., Kang, M.-W., Schonfeld, P., & Jha, M. K. (2014, March 31). Multi-objective Highway Alignment Optimization Incorporating Preference Information. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 40*, pp. 36-48.

Yang, Z., Feng, T., & Peng, J. (2003, October). Optimizing Highway Alignment in Road Network. In K. Satoh (Ed.), *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. 4*, pp. 373-380. Fukuoka: Eastern Asia Society for Transportation Studies.

Yu, C., Lee, J., & Munro-Stasiuk, M. J. (2003, April 1). Extensions to Least-Cost Path Algorithms for Roadway Planning. *International Journal of Geographical Information Science, 17*(4), pp. 361-376.

Zhang, A., Boardman, A. E., Gillen, D., & Waters II, W. G. (2004). *Towards Estimating the Social and Environmental Costs of Transportation in Canada.* Transport Canada, Vancouver, BC.

Zhang, X., & Armstrong, M. P. (2005). Using a Genetic Algorithm to Generate Alternatives for Multi-Objective Corridor Location Problems. *Proceedings of 8th International Conference on GeoComputation* .

Αμοιρίδης, Κ. (2014). *Τρισδιάστατη Χάραξη Οδού Με Εφαρμογή Διαφορικής Γεωμετρίας Και Καμπυλών Παρεμβολής B-Spline.* Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Αθήνα.

Βασιλάς, Α. (2013). *Ανάπτυξη Λογισμικού για Ψηφιακή Απόδοση της Χάραξης Υφιστάμενης Οδού.* Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Αθήνα.

Γιαννής, Γ. (2010). *Οδηγίες για την Ετοιμασία της Διπλωματικής Εργασίας.* Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Αθήνα.

Κανελλαΐδης, Γ., Καλτσούνης, Α., Μαλέρδος, Γ., Γλαρός, Γ., Δραγομάνοβιτς, Α., & Βαρδάκη, Σ. (2013). *Σημειώσεις Οδοποιίας ΙΙ.* Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Αθήνα.

Κανελλαΐδης, Γ., Μαλέρδος, Γ., Γλαρός, Γ., Δραγομάνοβιτς, Α., & Βαρδάκη, Σ. (2014). *Σημειώσεις Οδοποιίας Ι.* Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Αθήνα.

Κεχαγιά, Φ. (2005). *Βελτιστοποίηση Σχεδιασμού Οδικών Χαράξεων μέσω Προσδιορισμού των Οικονομικών και Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων.* Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Θεσσαλονίκη.

Κιμούνδρης, Α. (1994). *Συμβολή στη Διερεύνηση της Επίδρασης των Γεωμετρικών Χαρακτηριστικών της Οδού στη Συμπεριφορά του Οδηγού.* Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Θεσσαλονίκη.

Κωτσόβολος, Κ. Χ. (1998). *Συγκοινωνιακά Έργα, Τεύχος Α': Οδοποιία.* Αθήνα, Αττική, Ελλάδα: Ίδρυμα Ευγενίδου.

Λάμπρου, Ε., & Πανταζής, Γ. (2010). *Εφαρμοσμένη Γεωδαισία* (2η εκδ.). Περαία, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα: Ζήτη.

Λυκοθανάσης, Σ. (2001). *Γενετικοί Αλγόριθμοι και Εφαρμογές.* Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας, Πάτρα.

Μαρινάκης, Ι., Μαρινάκη, Μ., Ματσατσίνης, Ν. Φ., & Ζοπουνίδης, Κ. (2011). *Μεθευρετικοί και Εξελικτικοί Αλγόριθμοι σε Προβλήματα Διοικητικής Επιστήμης.* (Κ. Ζοπουνίδης, Επιμ.) Αθήνα, Αττική, Ελλάδα: Κλειδάριθμος.

Μπουτσάκης, Α. (2013). *Χάραξη Οδού στον Χώρο με Χρήση Καμπυλών Ελεύθερης Μορφής NURBS (Non-uniform Rational Basis Spline).* Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Αθήνα.

Πισπιρίγκος, Α. (2014). *Ανάπτυξη Λογισμικού για τη Βελτιστοποίηση της Κίνησης Γαιών.* Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Αθήνα.

Πολυράκης, Ι. Α. (2008). *Στοιχειώδης Διαφορική Γεωμετρία.* Αθήνα, Αττική, Ελλάδα.

ΥΔΕ. (1962). *Διαμόρφωση Διατομών Ελληνικών Οδών.* Αθήνα: Υπουργείο Δημοσίων Έργων.

ΥΔΕ. (1964). *Διαμόρφωση Ελιγμών Ελληνικών Οδών.* Αθήνα: Υπουργείο Δημοσίων Έργων.

ΥΠΕΧΩΔΕ. (2001). *Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων - Τεύχος 3: Χαράξεις.* Υπουργεό Περιβάλλοντος Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων, Διεύθυνση Μελετών Έργων Οδοποιίας, Αθήνα.

ΥΠΕΧΩΔΕ. (2002). *Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων - Τεύχος 8: Αποχέτευση - Στράγγιση - Υδραυλικά Έργα Οδών.* Υπουργείο Περιβάλλοντος Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων, Διεύθυνση Μελετών Έργων Οδοποιίας, Αθήνα.

Φρατζεσκάκης, Ι. Μ., & Γκόλιας, Ι. Κ. (1994). *Οδική Ασφάλεια* (2η εκδ.). Αθήνα, Αττική, Ελλάδα: Παπασωτηρίου.

Χρήστου, Ν. (2002). *Μητρώο Διαχείρισης Οδικού Περιβάλλοντος.* Υπουργείο Περιβάλλοντος Χωραταξίας και Δημοσίων Έργων, Διεύθυνση Μελετών Έργων Οδοποιίας, Αθήνα.

Ψαριανός, Β. (2001). *Σημειώσεις Οδοποιίας Ι, Τεύχος 2ο: Υπολογισμοί.* Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Αθήνα.

Ψαριανός, Β. (2006). *Εξισώσεις Κίνησης Επιβατηγού Οχήματος κατά την Ευθύγραμμη Κίνηση του υπό την Επήρεια Προωθητικής Ροπής και Ροπής Πέδησης.* Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εργαστήριο Συγκοινωνιακής Τεχνικής, Αθήνα.

Ψαριανός, Β. (2008). Οι Νέοι Γερμανικοί Κανονισμοί Μελετών Αυτοκινητοδρόμων RAA 2008. Μια Νέα Προσέγγιση και Φιλοσοφία στις Μελέτες Αυτοκινητοδρόμων. Εφαρμογή στο ΒΟΑΚ. *Ημερίδα Οδικής Ασφάλειας.* Ηράκλειο: Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Τμήμα Ανατολικής Κρήτης.

Ψαριανός, Β. (n.d.). *Γερμανικές Οδηγίες Μελετών Υπεραστικών Οδών RAL 2012.* Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εργαστήριο Συγκοινωνιακής Τεχνικής, Αθήνα.

Ψαριανός, Β., & Αντωνίου, Κ. (2012). Ο Ρόλος της Λειτουργικής Ταχύτητας στη Σύγχρονη Οδοποιία και οι Προοπτικές της. *3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Οδοποιίας.* Αθήνα: Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας.

Ψαριανός, Β., & Καλαμπόκης, Γ. (2011). *Γεωμετρικός Σχεδιασμός Οδών. Βασικά Γεωμετρικά Μεγέθη Καμπυλών Οδοποιίας.* Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εργαστήριο Συγκοινωνιακης Τεχνικής, Αθήνα.

Ο σχεδιασμός μιας οδού αποτελεί ένα ιδιαίτερα περίπλοκο πρόβλημα το οποίο μελετάται σε διαφορετικά επίπεδα. Η διαδικασία βασίζεται σε μια μέθοδο δοκιμής και λάθους η οποία υπόκειται σε μεγάλο πλήθος περιορισμών που απορρέουν από τις προδιαγραφές οδικού σχεδιασμού. Η συμβατική διαδικασία σχεδιασμού μιας χάραξης σύμφωνα με την υπάρχουσα πρακτική περιλαμβάνει σε μεγάλο βαθμό το στοιχείο της κριτικής. Για τον λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί αρκετά μαθηματικά πρότυπα βελτιστοποίησης με στόχο τη μείωση του χρόνου, του κόστους και των σφαλμάτων της διαδικασίας του συμβατικού οδικού σχεδιασμού. Η βελτιστοποίηση οδικών χαράξεων διαμορφώνεται ως το πρόβλημα εύρεσης μιας καμπύλης που συνδέει δύο σημεία με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους. Στην παρούσα εργασία εξετάζονται τα χαρακτηριστικά του προβλήματος της βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων και γίνεται εκτενής ανασκόπηση των υπαρχόντων προτύπων βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων. Επίσης, αναπτύσσεται ένα καινοτόμο πρότυπο βελτιστοποίησης οδικών χαράξεων, το οποίο ονομάζεται RoadEvolver και δομείται με τέτοιο τρόπο, ώστε να αποτυπώνει εκείνες τις αποφάσεις που καλείται να πάρει ένας μελετητής ως προς τη γεωμετρία της οδού και να σχεδιάζει αυτόματα ρεαλιστικές χαράξεις στον τρισδιάστατο χώρο.

Road planning and design is a very complex task which is analyzed at different levels. The design process is based on a trial and error method which is subject to a large number of restrictions related to road design specifications. The conventional design process based on current practice involves to a great extent reviewing of the proposed alignment. For this reason several optimization models have been developed in order to reduce time, cost and errors associated with the conventional procedure. Highway alignment optimization is defined as the problem of finding a curve connecting two end points in order to minimize costs. In the present thesis, the characteristics of the problem of optimizing highway alignments are examined, while an extensive review of existing optimization models has been conducted. Furthermore, a novel optimization model, named RoadEvolver, has been developed. The model is structured in such a way that it makes it able to reflect the decisions of a designer has to make concerning the road geometry and produces automatically realistic alignments in 3D space.