



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής

## Διπλωματική Εργασία

**Διερεύνηση επάρκειας ορατότητας στην περιοχή εισόδου  
οδικών σηράγγων σε τρισδιάστατο οδικό περιβάλλον**



**Μπενίσης Κωνσταντίνος**

**Επιβλέπων: Στέργιος Μαυρομάτης, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ**  
Αθήνα, Μάρτιος 2022



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Με την περάτωση της Διπλωματικής Εργασίας μου, θα ήθελα πρωτίστως να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Στέργιο Μαυρομάτη, επιβλέποντα καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., για την ανάθεση και την επίβλεψη της Διπλωματικής εργασίας, καθώς και για την άριστη συνεργασία και καθοδήγηση καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της. Επιπλέον, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον κ. Βασίλη Ματράγκο και τον κ. Παναγιώτη Πασιά για την άμεση ανταπόκριση τους σε οποιαδήποτε στιγμή τους ζητήθηκε και για τις χρήσιμες παρατηρήσεις και συμβουλές τους κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την υποστήριξη και την κατανόηση τους καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Αθήνα, Μάρτιος 2022  
Κωνσταντίνος Μπενίσης



## ΣΥΝΟΨΗ

Ο έλεγχος επάρκειας ορατότητας αποτελεί κρίσιμη παράμετρο διερεύνησης του επιπέδου της παρεχόμενης ασφάλειας ενός οδικού άξονα. Ενώ το συγκεκριμένο αντικείμενο έχει μελετηθεί εκτεταμένα τις τελευταίες δεκαετίες, δεν υπάρχουν ακόμα σαφείς οδηγίες μελέτης για το συνδυασμό οριζόντιας και κατακόρυφης χάραξης στην ορατότητα. Η υφιστάμενη βιβλιογραφία επικεντρώνεται σε διδιάστατες (2-D) προσεγγίσεις όσον αφορά την παροχή κατευθύνσεων για το σχεδιασμό, συνεπώς δε λαμβάνεται υπ' όψιν η προοπτική της τρισδιάστατης επιρροής του οδικού περιβάλλοντος στις συνθήκες ορατότητας. Η θεώρηση αυτή δύναται να οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα σχετικά με το διατιθέμενο μήκος ορατότητας. Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία εξετάζεται η επιρροή του οδικού περιβάλλοντος στην ορατότητα κατά την είσοδο σε οδική σήραγγα, στην περίπτωση ταυτόχρονης αριστερής καμπύλης οριζοντιογραφίας και κυρτής καμπύλης μηκοτομής. Σκοπός της Εργασίας είναι να διερευνηθεί το επίπεδο επάρκειας των διδιάστατων προσεγγίσεων από άποψη ορατότητας σε σύνθετη χάραξη στο χώρο και να παρουσιαστούν συγκεκριμένες οδηγίες για τις ελάχιστες επιτρεπόμενες ακτίνες σχεδιασμού R στην είσοδο σήραγγας, για συνδυασμούς πρότυπων διατομών σύμφωνα με τους Γερμανικούς κανονισμούς RAA-2008. Συμπληρωματικά, αναπτύχθηκε μια αναλυτική μέθοδος καθορισμού της επιρροής του διαχωριστικού κυκλοφορίας στην ορατότητα, η οποία επιτυγχάνεται μέσω αλγορίθμου στο πρόγραμμα Oktave που συντάχθηκε με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Matlab.

Λέξεις κλειδιά: Μήκος Ορατότητας για Στάση, κυρτή μηκοτομή, οδική σήραγγα, ακτίνα σχεδιασμού

# ABSTRACT

Stopping sight distance (SSD) adequacy control is a critical parameter in investigating the level of safety provided by a road axis. While this object has been extensively studied in recent decades, there are still no clear study guidelines for combining horizontal and vertical alignment regarding SSD. The existing literature focuses on two-dimensional (2-D) approaches to providing design guidance, so the perspective of the three-dimensional influence of the road environment on visibility conditions is not taken into account. This view may lead to erroneous conclusions about the length of available SSD. This Thesis examines the influence of the road environment on visibility when entering a road tunnel, in the case of simultaneous horizontal left curvature and crest vertical curve. The purpose of this study is to investigate the level of adequacy of two-dimensional approaches in terms of visibility in complex spatial layout and to present specific instructions for the minimum allowable design radii  $R$  at the tunnel entrance, for combinations of standard cross sections according to German regulations RAA-2008. Additionally, an analytical method was developed to determine the effect of the traffic divider on visibility, which is achieved through an algorithm in the Oktave program compiled using the Matlab programming language.

Key words: Stopping sight distance (SSD), crest vertical curve, road tunnel, design radii

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	3
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
1.1 Αντικείμενο.....	7
1.2 Στόχος-Μεθοδολογία .....	8
1.3 Δομή .....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ .....	11
2.1 Γενικά.....	11
2.2 Διδιάστατη προσέγγιση.....	11
2.3 Τρισδιάστατη προσέγγιση.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΟΡΑΤΟΤΗΤΑ .....	16
3.1 Γενικά.....	16
3.2 Μήκος ορατότητας για Στάση .....	16
3.2.1 Ελληνικοί κανονισμοί σχεδιασμού .....	19
3.2.2 Γερμανικοί κανονισμοί σχεδιασμού.....	21
3.2.3 Αμερικάνικοι κανονισμοί σχεδιασμού .....	24
3.3 Δομικά εμπόδια.....	26
3.3.1 Διαχωριστικό κυκλοφορίας .....	28
3.3.2 Σήραγγες .....	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΔΙΑΧΩΡΙΣΤΙΚΟΥ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ.....	32
4.1 Εισαγωγή .....	32
4.2 Μεθοδολογία .....	32
4.2.1 Υπολογισμός απαιτούμενου μήκους ορατότητας για στάση .....	32
4.2.2 Υπολογισμός μήκους γραμμής όρασης.....	33
4.2.3 Υπολογισμός ύψους διαχωριστικού κυκλοφορίας και γραμμής όρασης σε κάθε χιλιομετρική θέση.....	35
4.3 Εφαρμογή επιρροής εντός κυρτής μηκοτομής .....	37
4.3.1 Παράδειγμα ανάλυσης .....	37
4.3.2 Σύνταξη κώδικα στο πρόγραμμα Oktave .....	38

4.3.3	Αλγόριθμος υπολογισμού SSD .....	39
4.3.4	Αλγόριθμος υπολογισμού υψομετρικής διαφοράς .....	41
4.3.5	Αλγόριθμος υπολογισμού ύψους σπηθαιού και ύψους γραμμής όρασης σε κάθε χιλιομετρική θέση .....	45
4.3.6	Αποτελέσματα ανάλυσης παραδείγματος .....	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΕΙΣΟΔΟ ΣΗΡΑΓΓΑΣ.....		48
5.1	Εισαγωγή .....	48
5.2	Μεθοδολογία ανάλυσης υπό σταθερή κατά μήκος κλίση .....	48
5.2.1	Πρότυπες διατομές.....	48
5.2.2	Γεωμετρική ανάλυση για σταθερό πλάτος λωρίδας .....	52
5.2.3	Γεωμετρική ανάλυση για μεταβλητό πλάτος λωρίδας .....	53
5.3	Μεθοδολογία ανάλυσης με χρήση του λογισμικού H14 .....	54
5.3.1	Εισαγωγή.....	54
5.3.2	Μόρφωση του γεωμετρικού μοντέλου .....	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ.....		60
6.1	Επάρκεια ορατότητας υπό σταθερή κλίση .....	60
6.1.1	Αποτελέσματα ανάλυσης .....	60
6.1.2	Μαθηματικό μοντέλο πρόβλεψης .....	67
6.1.3	Κριτήρια αποδοχής μοντέλου .....	67
6.1.4	Ανάλυση δεδομένων μέσω γραμμικής συσχέτισης .....	68
6.2	Εφαρμογή αποτελεσμάτων στην τρισδιάστατη προσέγγιση .....	69
6.2.1	Σκοπός της ανάλυσης .....	69
6.2.2	Ορισμός του μοντέλου ανάλυσης στο λογισμικό H14 .....	70
6.2.3	Διαδικασία και αποτελέσματα ανάλυσης .....	71
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....		76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		77
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....		80



## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

<b>Εικόνα 2.1:</b> Τρισδιάστατη προοπτική του οδικού άξονα από τη θέση του οδηγού (Sanchez, 1994) .....	12
<b>Εικόνα 2.2:</b> Απεικόνιση κυρτής καμπύλης μηκοτομής με χρήση πεπερασμένων στοιχείων (Hassan et. al., 1996) .....	13
<b>Εικόνα 2.3:</b> Απεικόνιση διατομών που προέκυψαν από τριδιάστατη σάρωση του οδικού περιβάλλοντος (Μαυρομάτης et al., 2009) .....	14
<b>Εικόνα 2.4:</b> Παρεμπόδιση ορατότητας λόγω διαχωριστικής νησίδας σε τμήμα αριστερής στροφής και κυρτού τόξου συναρμογής. ....	15
<b>Εικόνα 3.1:</b> Ορισμός περιβάλλουσας καμπύλης ορατότητας (Α. Αποστολέρης, «Οδοποιία Ι – Χαράξεις: Θεωρία και Πρακτική») .....	17
<b>Εικόνα 3.2:</b> Διερεύνηση συνθηκών ορατότητας σε κυρτή καμπύλη μηκοτομής (Σ. Μαυρομάτης, «Γεωμετρικός Σχεδιασμός Οδών») .....	17
<b>Εικόνα 3.3:</b> Διαδικασία ακινητοποίησης οχήματος .....	18
<b>Εικόνα 3.4:</b> Διάγραμμα υπολογισμού του απαιτούμενου ΜΟΣ Sh σε υγρό οδόστρωμα (ΟΜΟΕ-Χ, 2001).....	19
<b>Εικόνα 3.5:</b> Δυνατή πορεία των οπτικών ακτινών μεταξύ οφθαλμού και εμποδίου .....	21
<b>Εικόνα 3.6:</b> Διάγραμμα υπολογισμού ΜΟΣ για ζεύγη ταχύτητας σχεδιασμού V και κατά μήκος κλίσης s (RAA-2008) .....	23
<b>Εικόνα 3.7:</b> Γεωμετρικό μοντέλο υπολογισμού SSD σε αριστερή στροφή (RAA-2008).....	24
<b>Εικόνα 3.8:</b> Παρεμπόδιση ορατότητας σε δεξιά καμπύλη λόγω στηθαίου ασφαλείας .....	27
<b>Εικόνα 3.9:</b> Επιρροή του New Jersey στην ορατότητα σε αριστερή καμπύλη.....	28
<b>Εικόνα 3.10:</b> Περιοχή εισόδου σε οδική σήραγγα .....	29
<b>Εικόνα 3.11:</b> Διάγραμμα προσδιορισμού ελάχιστων ακτινών σχεδιασμού σηράγγων σε υγρό οδόστρωμα (ΟΜΟΕ-Χ, 2001) .....	30
<b>Εικόνα 3.12:</b> Διάγραμμα προσδιορισμού ελάχιστων ακτινών σχεδιασμού σηράγγων σε στεγνό οδόστρωμα (ΟΜΟΕ-Χ, 2001) .....	31
<b>Εικόνα 4.1:</b> Τυπικές διατομές στηθαίων New Jersey .....	34
<b>Εικόνα 4.2:</b> Γράφημα προσδιορισμού SSD σε αριστερή στροφή σταθερής διατομής.....	34
<b>Εικόνα 4.3:</b> Γράφημα κυρτής μηκοτομής .....	35

<b>Εικόνα 4.4:</b> Σχετική θέση οφθαλμού και στηθαίου New Jersey σε αριστερή στροφή .....	36
<b>Εικόνα 4.5:</b> Γεωμετρία και μεθοδολογία προσδιορισμού του ανεμπόδιστου μήκους ορατότητας Lx σε αριστερή στροφή .....	36
<b>Εικόνα 4.6:</b> Γράφημα διατομής αυτοκινητόδρομου για το παράδειγμα ανάλυσης .....	38
<b>Εικόνα 4.7:</b> Γεωμετρία και διαστάσεις στηθαίου New Jersey .....	38
<b>Εικόνα 4.8:</b> : Γεωμετρία κυρτού τόξου συναρμογής μηκοτομής (Σ. Μαυρομάτης, «Γεωμετρικός Σχεδιασμών Οδών»).....	39
<b>Εικόνα 4.9:</b> Αλγόριθμος Oktave: Εισαγωγή δεδομένων εισόδου και υπολογισμός αρχικής κατά μήκος κλίσης s1 .....	40
<b>Εικόνα 4.10:</b> Αλγόριθμος Oktave: Διαδικασία υπολογισμού του απαιτούμενου SSD .....	40
<b>Εικόνα 4.11:</b> Γεωμετρία υπολογισμού υψομετρικής διαφοράς (Περίπτωση 1).....	42
<b>Εικόνα 4.12:</b> Γεωμετρία υπολογισμού υψομετρικής διαφοράς (Περίπτωση 2).....	43
<b>Εικόνα 4.13:</b> Γεωμετρία υπολογισμού υψομετρικής διαφοράς (Περίπτωση 5).....	43
<b>Εικόνα 4.14:</b> Αλγόριθμος Oktave: Προσδιορισμός υψομετρικής διαφοράς σημείων αρχής και τέλους πορείας σε κυρτό μήκος συναρμογής .....	44
<b>Εικόνα 4.15:</b> Αλγόριθμος Oktave: Συσχέτιση του ύψους της εύθειας όρασης και του στηθαίου New Jersey για τον προσδιορισμό των συνθηκών ορατότητας .....	46
<b>Εικόνα 5.1:</b> Τυπικές διατομές αυτοκινητοδρόμων κατά RAA-2008.....	49
<b>Εικόνα 5.2:</b> Τυπικές διατομές οδικών σηράγγων κατά RAA-2008 .....	50
<b>Εικόνα 5.3:</b> Γραφική αναπαράσταση ανάλυσης ορατότητας για σταθερό πλάτος λωρίδας .....	52
<b>Εικόνα 5.4:</b> Γραφική αναπαράσταση ανάλυσης ορατότητας για μεταβλητό πλάτος λωρίδας... 53	
<b>Εικόνα 5.5:</b> Περιβάλλον εργασίας του λογισμικού H14.....	54
<b>Εικόνα 5.6:</b> Ψηφιακό εδαφικό μοντέλο και οριζοντιογραφία ανάλυσης στο λογισμικό H14.....	55
<b>Εικόνα 5.7:</b> Οδογραμμές σε διαχωρισμένη οδό δύο λωρίδων κυκλοφορίας ανά κατεύθυνση .56	
<b>Εικόνα 5.8:</b> Διάγραμμα κυρτής μηκοτομής ανάλυσης στο λογισμικό H14.....	57
<b>Εικόνα 5.9:</b> Γραφική αναπαράσταση γεωμετρικού μοντέλου (3-D) .....	58
<b>Εικόνα 5.10:</b> Υπόμνημα διαγράμματος ορατότητας του λογισμικού H14.....	59
<b>Εικόνα 5.11:</b> Διάγραμμα ορατότητας του λογισμικού H14.....	59

<b>Εικόνα 6.1:</b> Πλάτη λωρίδων κυκλοφορίας σε ανοιχτό αυτοκινητόδρομο και σήραγγα.....	60
<b>Εικόνα 6.2:</b> Διάγραμμα προσδιορισμού ελάχιστης επιτρεπόμενης ακτίνας σχεδιασμού για κάθε ζεύγος χάραξης ( $V=80$ km/h) .....	64
<b>Εικόνα 6.3:</b> Διάγραμμα προσδιορισμού ελάχιστης επιτρεπόμενης ακτίνας σχεδιασμού για κάθε ζεύγος χάραξης ( $V=90$ km/h) .....	65
<b>Εικόνα 6.4:</b> Διάγραμμα προσδιορισμού ελάχιστης επιτρεπόμενης ακτίνας σχεδιασμού για κάθε ζεύγος χάραξης ( $V=100$ km/h) .....	66
<b>Εικόνα 6.5:</b> Διατομές αυτοκινητόδρομου/σήραγγας στο λογισμικό H14 .....	70
<b>Εικόνα 6.6:</b> Γραφική απεικόνιση του «άλματος» ορατότητας λόγω εισόδου σε οδική σήραγγα από το λογισμικό H14 .....	73

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

<b>Πίνακας 3.1:</b> Τιμές του συντελεστή επιβράδυνσης $d$ για τον υπολογισμό του ΜΟΣ (ΟΜΟΕ-Χ, 2001).....	20
<b>Πίνακας 3.2:</b> ΜΟΣ για ζεύγη ταχύτητας σχεδιασμού $V$ και κατά μήκος κλίσης $s$ (RAA-2008) ....	22
<b>Πίνακας 3.3:</b> Μήκος ορατότητας για στάση SSD για ζεύγη ταχύτητας σχεδιασμού $V$ και κατά μήκος κλίσης $s$ (AASHTO, 2011) .....	25
<b>Πίνακας 3.4:</b> Βασικές τιμές ύψους οφθαλμού και εμποδίου για τον προσδιορισμό του διατιθέμενου ΜΟΣ (ΟΜΟΕ-Χ, 2001).....	27
<b>Πίνακας 4.1:</b> Αποτελέσματα απαιτούμενου μήκους SSD για κάθε θέση μελέτης .....	41
<b>Πίνακας 4.2:</b> Αποτελέσματα υψομετρικής διαφοράς σημείων αρχής και τέλους πορείας σε κυρτό μήκος συναρμογής .....	45
<b>Πίνακας 4.3:</b> Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων του παραδείγματος ανάλυσης εντός κυρτής μηκοτομής.....	47
<b>Πίνακας 5.1:</b> Επιτρεπόμενη σύνθεση διατομών αυτοκινητοδρόμου και οδικής σήραγγας κατά RAA-2008.....	51
<b>Πίνακας 5.2:</b> Επιτρεπόμενα ζεύγη χάραξης .....	51
<b>Πίνακας 5.3:</b> Απαιτήσεις σχεδιασμού μηκοτομής για κάθε κλάση σχεδιασμού (RAA-2008) .....	57

<b>Πίνακας 6.1:</b> Αποτελέσματα ζεύγους ανάλυσης RQ36 / 36t .....	61
<b>Πίνακας 6.2:</b> Αποτελέσματα ζεύγους ανάλυσης RQ36 / 36t .....	61
<b>Πίνακας 6.3:</b> Αποτελέσματα ζεύγους ανάλυσης RQ31 / 31t .....	62
<b>Πίνακας 6.4:</b> Αποτελέσματα ζεύγους ανάλυσης RQ31 / 31T.....	62
<b>Πίνακας 6.5:</b> Αποτελέσματα ζεύγους ανάλυσης RQ31 / 31T+.....	63
<b>Πίνακας 6.6:</b> Αποτελέσματα στατιστικής παλινδρόμησης μέσω ανάλυσης δεδομένων (Data Analysis).....	69
<b>Πίνακας 6.7:</b> Έλεγχος επάρκειας ορατότητας εντός σήραγγας σε κυρτή μηκοτομή με χρήση οριακών ακτινών R από τη διδιάστατη ανάλυση .....	72
<b>Πίνακας 6.8:</b> Οδηγίες τοποθέτησης του στομίου της σήραγγας για επάρκεια ορατότητας (RQ 28 / 31t).....	75
<b>Πίνακας 6.9:</b> Οδηγίες τοποθέτησης του στομίου της σήραγγας για επάρκεια ορατότητας (RQ 28 / 31T) .....	75

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Αντικείμενο

Το οδικό δίκτυο αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα τμήματα της συγκοινωνιακής υποδομής. Παράμετρο υψίστης σπουδαιότητας κατά το σχεδιασμό του αποτελεί η κατασκευή οδικών τμημάτων με στόχο την ασφαλή και αποδοτική μετακίνηση των χρηστών του. Είναι, συνεπώς, επιτακτική η ανάγκη σχεδίασης οδών και αυτοκινητόδρομων ικανοποιώντας ταυτόχρονα απαιτήσεις που αφορούν τόσο την οικονομική βελτιστοποίηση του κόστους κατασκευής όσο και την παροχή υψηλών επιπέδων οδικής ασφάλειας στους οδηγούς.

Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, ένα από τα σημαντικότερα κριτήρια επίτευξης οδικής ασφάλειας αποτελεί η συγκοινωνιακή χάραξη που προσφέρει επαρκή ορατότητα (π.χ. *Sanchez, 1994; Chou et al., 2010; Kim & Lovell, 2010*). Η ορατότητα είναι κρίσιμη για τον οδηγό καθώς μέσω αυτής λαμβάνονται οι απαραίτητες πληροφορίες για τη γρήγορη και σαφή κατανόηση των γεωμετρικών συνθηκών του οδικού δικτύου. Η ανάλυση των πληροφοριών αυτών αποτελεί την αιτία σύμφωνα με την οποία ο χρήστης προβαίνει σε διορθωτικές ενέργειες κατά την οδήγηση του, ώστε να κινηθεί με ασφάλεια εντός του δικτύου. Για το σωστό σχεδιασμό ενός οδικού άξονα θα πρέπει να εξασφαλίζονται οι απαιτούμενες περιοχές ορατότητας σε κάθε θέση του.

Στις υφιστάμενες πρακτικές σχεδιασμού οδοποιίας (*ΟΜΟΕ 2001; RAA 2008, AASHTO 2011*), η ανάλυση επάρκειας ορατότητας βασίζεται σε μια αποσπασματική διαδικασία μελέτης η οποία διαχωρίζει το οδικό περιβάλλον σε δύο διδιάστατα (2-D) επίπεδα, ένα οριζόντιο (οριζοντιογραφία) κι ένα κατακόρυφο (μηκοτομή). Η θεώρηση αυτή είναι ελλιπής και συνεπώς προβληματική, καθώς δε λαμβάνει υπόψη τις τρισδιάστατες (3-D) συνθήκες χάραξης και οδήγησης, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει εσφαλμένη αντίληψη της διατιθέμενης ορατότητας που προσφέρει το οδικό περιβάλλον στο χρήστη.

Πιο συγκεκριμένα, μέσω της διδιάστατης θεώρησης είναι πιθανή η άντληση αποτελεσμάτων επάρκειας πεδίου ορατότητας τόσο στο οριζόντιο όσο και στο κατακόρυφο επίπεδο, ενώ το πραγματικό πεδίο ορατότητας είναι μειωμένο λόγω τις σύνθεσης των παραπάνω αποσπασματικών θεωρήσεων χάραξης. Αποτέλεσμα της προσέγγισης αυτής είναι ο περιορισμός των οδηγιών σχεδιασμού σε εμπειρικές κατευθύνσεις και συστάσεις. Συνεπώς, δεν υφίσταται μια ολοκληρωμένη και λεπτομερής μεθοδολογία ανάλυσης που να λαμβάνει υπ' όψιν την πραγματική 3-D προοπτική του οδηγού, με αποτέλεσμα η επίτευξη ενός επιτυχημένου γεωμετρικού σχεδιασμού οδοποιίας να επαφίεται στην ικανότητα του μελετητή να προβλέψει τα αποτελέσματα του συνδυασμού δύο ασυσχέτιστων θεωρήσεων.

Είναι προφανές ότι το πρόβλημα αυτό εντείνεται σε σύνθετες και ιδιάζουσες περιπτώσεις σχεδιασμού, όπως στις περιοχές εισόδου οδικών σηράγγων αυτοκινητόδρομου. Στις περιπτώσεις αυτές εισάγονται οι παράγοντες αλλαγής της διατομής του οδικού άξονα, της ταχύτητας μελέτης, του φωτισμού και της ψυχολογίας του οδηγού (*Du et al. 2014a; Zheng et al., 2017*) που καθιστούν τις απαιτήσεις οδικής ασφάλειας ακόμα σημαντικότερες. Επιπλέον, η ύπαρξη τοιχίων στις σήραγγες αποτελεί ένα επιπλέον εμπόδιο ορατότητας, καθιστώντας την επάρκεια ορατότητας πιο δυσχερή και δημιουργώντας μεγαλύτερες απαιτήσεις στη γεωμετρική χάραξη σε περίπτωση καμπύλων οριζοντιογραφιών.

Πέραν του τοιχίου της οδικής σήραγγας, κατά την κίνηση εντός κυρτού τόξου συναρμογής της μηκοτομής δημιουργείται η πιθανότητα παρεμπόδισης του πεδίου ορατότητας του οδηγού λόγω πλευρικών διαμορφώσεων ορισμένου ύψους στην περιοχή εισόδου. Συγκεκριμένα, η ύπαρξη του διαχωριστικού κυκλοφορίας (New Jersey) κατά μήκος του άξονα του αυτοκινητοδρόμου αποτελεί κρίσιμη παράμετρο διακοπής της οπτικής ακτίνας για κίνηση εντός αριστερής στροφής.

Κρίνεται, λοιπόν, επιτακτική η ανάγκη λεπτομερούς διερεύνησης των συνθηκών ορατότητας κατά την κίνηση σε σύνθετη χάραξη στο χώρο και η εξέταση της κάθε παραμέτρου παρεμπόδισης του οπτικού πεδίου σε ένα συνολικό μοντέλο τριών διαστάσεων.

## 1.2 Στόχος-Μεθοδολογία

Στόχο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας αποτελεί η διερεύνηση του επιπέδου επάρκειας της χρήσης ανεξάρτητων διδιάστατων προσεγγίσεων για τον καθορισμό των συνθηκών ορατότητας στην είσοδο οδικής σήραγγας υπό συνδυασμό σύνθετης χάραξης οριζοντιογραφίας και μηκοτομής.

Αντικείμενο μελέτης αποτελεί η διερεύνηση επάρκειας μήκους ορατότητας για στάση σε αυτοκινητόδρομο για την περίπτωση αριστερής στροφής σε είσοδο σήραγγας. Για την περίπτωση αυτή εισάγονται δύο παράμετροι υπολογισμού των ελάχιστων ακτινών σχεδιασμού της αριστερής καμπύλης. Η πρώτη σχετίζεται με την επιρροή της πλευρικής τριβής στη δυναμική του οχήματος λόγω της κίνησης σε καμπύλη τροχιά. Η δεύτερη σχετίζεται με το συνδυασμό διαφορετικών πρότυπων διατομών μεταξύ αυτοκινητόδρομου και σήραγγας, σύμφωνα με τους Γερμανικούς κανονισμούς RAA-2008.

Το Μήκος Ορατότητας για Στάση SSD, όπως ορίστηκε από τους Αμερικανικούς κανονισμούς AASHTO το 1940 και αργότερα, αποτελεί την ελάχιστη απόσταση ορατότητας που επιτρέπει σε όχημα που κινείται με την ταχύτητα σχεδιασμού να μπορέσει να ακινητοποιηθεί λίγο πριν προσκρούσει σε κάποιο εμπόδιο εντός της τροχιάς του. Είναι ένα από τα πιο θεμελιώδη κριτήρια επιρροής του γεωμετρικού σχεδιασμού των οδών και των αυτοκινητοδρόμων, όσον αφορά την οδική ασφάλεια.

Η ανάλυση των συνθηκών ορατότητας κατά την είσοδο σε οδική σήραγγα θα πραγματοποιηθεί σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση θα θεωρηθεί χάραξη με αριστερή καμπύλη οριζοντιογραφίας και σταθερή κατά μήκος κλίση του οδικού άξονα. Μέσω του κατάλληλου ορισμού του γεωμετρικού προβλήματος και χρήση των εργαλείων του προγράμματος Excel, θα υπολογιστούν οι ελάχιστες απαιτούμενες ακτίνες σχεδιασμού ( $R_{min}$ ) σύμφωνα με τις οποίες επιτυγχάνεται επάρκεια ορατότητας στην καμπύλη τροχιά.

Στη δεύτερη φάση ανάλυσης θα αναπτυχθούν μοντέλα καμπύλης οριζοντιογραφίας και κυρτής μηκοτομής και θα μορφωθούν οι κατάλληλες γεωμετρικές διατάξεις για κάθε πιθανό ζεύγος πρότυπων διατομών μεταξύ ανοιχτού αυτοκινητόδρομου και οδικής σήραγγας. Στο περιβάλλον του λογισμικού «H14» θα οριστούν οι διαμορφώσεις του διαχωριστικού κυκλοφορίας (New Jersey) και του τοιχίου της σήραγγας και θα πραγματοποιηθεί ακριβής καθορισμός των απαιτήσεων ορατότητας σε κάθε χιλιομετρική θέση ανάλυσης εντός της σύνθετης αυτής χάραξης.

Συμπληρωματικά, θα πραγματοποιηθεί ανάλυση επάρκειας ορατότητας λόγω παρεμπόδισης του διαχωριστικού κυκλοφορίας, σε κίνηση εντός αριστερής στροφής και κυρτής μηκοτομής. Η ανάλυση αυτή θα γίνει μέσω σύνταξης αλγορίθμου στο πρόγραμμα Oktave (γλώσσα Matlab), με χρήση του οποίου θα υπολογίζεται το απαιτούμενο μήκος ορατότητας για στάση το οποίο θα πρέπει να διατίθεται για την ασφαλή πέδηση του οχήματος. Αφότου εντοπιστούν οι χιλιομετρικές θέσεις στις οποίες η οπτική επαφή μεταξύ οφθαλμών του οδηγού και εμποδίου διακόπτεται, θα υπολογίζεται η μέγιστη κατακόρυφη απόκρυψη της γραμμής όρασης του οδηγού από το New Jersey σε κάθε θέση ελέγχου.

### 1.3 Δομή

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από οκτώ κεφάλαια, συμπεριλαμβανομένου του παρόντος εισαγωγικού κεφαλαίου.

Το Κεφάλαιο 2 αποτελεί μια ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας όσον αφορά το αντικείμενο της διερεύνησης επάρκειας ορατότητας σε υφιστάμενους οδικούς άξονες. Η ανασκόπηση παρουσιάζεται σε δύο μέρη, με το πρώτο (Κεφάλαιο 2.2) να αφορά μελέτες οι οποίες ακολούθησαν την αποσπασματική διδιάστατη θεώρηση του οδικού περιβάλλοντος και το δεύτερο (Κεφάλαιο 2.3), στο οποίο οι μελετητές έλαβαν υπ' όψιν το συνδυασμό των επιμέρους οριζόντιων και κατακόρυφων χαράξεων και διερεύνησαν τις συνθήκες ορατότητας θεωρώντας το οδικό περιβάλλον στο χώρο.

Στο Κεφάλαιο 3 αναλύεται η έννοια της ορατότητας στο γεωμετρικό σχεδιασμό της οδοποιίας και παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο καθορισμού της επάρκειας ορατότητας, σύμφωνα με τις διεθνείς διατάξεις και οδηγίες. Επιπλέον, ορίζεται η σημασία των διαχωριστικών κυκλοφορίας και ο τρόπος επιρροής τους στη διατιθέμενη ορατότητα, καθώς και του στομίου σηράγγων ως εμπόδια ορατότητας, βάσει της διεθνούς βιβλιογραφίας.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται αναλυτικά η μεθοδολογία ανάλυσης επιρροής του διαχωριστικού κυκλοφορίας στην ορατότητα, κατά την κίνηση εντός σύνθετης χάραξης αριστερής καμπύλης οριζοντιογραφίας και κυρτού τόξου συναρμογής μηκοτομής. Μέσω σχημάτων και γραφικών αναπαραστάσεων γίνεται κατανοητή η γεωμετρία του προβλήματος, καθώς και η διαδικασία υπολογισμών των επιμέρους στοιχείων για τον καθορισμό της διατιθέμενης ορατότητας σε κάθε θέση μελέτης. Επιπλέον, ορίζεται παράδειγμα ανάλυσης με συγκεκριμένα γεωμετρικά δεδομένα και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης με τη χρήση του αλγορίθμου στο Matlab.

Το Κεφάλαιο 5 έχει ως θέμα τη διασαφήνιση του προβλήματος της διερεύνησης επάρκειας ορατότητας σε είσοδο σήραγγας. Παρουσιάζονται οι τυπικές διατάξεις των διατομών αυτοκινητοδρόμων και οδικών σηράγγων καθώς και οι επιτρεπόμενοι συνδυασμοί τους ανάλογα την ταχύτητα σχεδιασμού. Ορίζονται δύο διαφορετικά γεωμετρικά προβλήματα ανάλογα τα πλάτη των λωρίδων κυκλοφορίας μεταξύ των δύο διατομών και αναλύεται η διαδικασία υπολογισμών του απαιτούμενου Μήκους Ορατότητας για Στάση καθώς και των ελάχιστων επιτρεπόμενων ακτινών οριζοντιογραφίας. Σημειώνεται ότι στη συγκεκριμένη ανάλυση θεωρούμε σταθερή κατά μήκος κλίση στον οδικό άξονα (σταθερή μηκοτομή).

Στο υποκεφάλαιο 5.3 γίνεται λόγος για το λογισμικό H14 με χρήση του οποίου θα επιτευχθεί η ανάλυση των συνθηκών ορατότητας κατά την είσοδο σε σήραγγα βάσει της τρισδιάστατης προσέγγισης. Παρουσιάζεται η δομή του λογισμικού καθώς και η διαδικασία μόρφωσης του γεωμετρικού μοντέλου που απαιτείται για την ορθή δημιουργία των διαγραμμάτων ορατότητας και τη λήψη των απαραίτητων συμπερασμάτων.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μεθοδολογιών που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αρχικά, γίνεται η παρουσίαση των διαγραμμάτων-οδηγιών ελάχιστων απαιτούμενων ακτινών σχεδιασμού σε είσοδο σήραγγας υπό σταθερή κατά μήκος κλίση, για κάθε περίπτωση ζεύγους διατομών και ταχύτητας μελέτης. Βάσει αυτών καθορίζεται μια μαθηματική σχέση επιρροής της ακτίνας σχεδιασμού R από την ταχύτητα μελέτης, την κατά μήκος κλίση και το πλάτος της διατομής στο στόμιο της σήραγγας μέσω Ανάλυσης Δεδομένων στο Excel. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα της διδιάστατη προσέγγισης εφαρμόζονται στο τρισδιάστατο μοντέλο που δημιουργήθηκε στο περιβάλλον του λογισμικού Excel, με σκοπό την αποσαφήνιση του επιπέδου επάρκειας τους.

Στο Κεφάλαιο 7 εξάγονται τα συμπεράσματα που αντλήθηκαν από τις παραπάνω αναλύσεις, καθώς και από το σύνολο της έρευνας σχετικά με το θέμα της Διπλωματικής Εργασίας και δίδονται ορισμένες προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διαδικασία εκπόνησης της Διπλωματικής Εργασίας, καθώς και οι αντίστοιχες αναφορές εντός αυτής, παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 8.

Στο παράρτημα παρουσιάζεται ο κώδικας που αναπτύχθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού Matlab για τη διερεύνηση της επιρροής του διαχωριστικού κυκλοφορίας κατά την κίνηση σε κυρτό τόξο συναρμογής μηκοτομής.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

### 2.1 Γενικά

Η επάρκεια ορατότητας για στάση σε όλο το μήκος ενός οδικού άξονα αποτελεί αναμφισβήτητα ουσιώδη προϋπόθεση επίτευξης οδικής ασφάλειας. Ο προσδιορισμός τόσο του απαιτούμενου, όσο και το διαθέσιμου μήκους ορατότητας αποτελεί, συνεπώς, επιστημονικό πεδίο που χρήζει εκτεταμένης έρευνας.

### 2.2 Διδιάστατη προσέγγιση

Υπάρχει πλήθος μελετών στη διεθνή βιβλιογραφία που έχουν ως αντικείμενο την ανάλυση της αποτελεσματικότητας των εφαρμοζόμενων έως τώρα μεθόδων προσδιορισμού του επιπέδου οδικής ασφάλειας λόγω ορατότητας. Οι μελέτες αυτές εξετάζουν τις διδιάστατες θεωρήσεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως με στόχο την ακριβέστερη προσέγγιση του προβλήματος προσδιορισμού της ορατότητας σε σχέση με τις υφιστάμενες οδηγίες σχεδιασμού οδών.

Μέσω της ανάπτυξης αναλυτικών μοντέλων (Ταϊγανίδης, 1998) πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί του διατιθέμενου SSD σε κυρτή καμπύλη μηκοτομής, αφού προσδιορίστηκαν οι ακριβείς τιμές του σε οποιαδήποτε θέση του οχήματος κατά μήκος της καμπύλης. Οι αλλαγές στο διατιθέμενο SSD παρουσιάζονται γραφικά συναρτήσεως της θέσης του οχήματος εντός της κυρτής τροχιάς.

Σε δημοσιευμένη μελέτη (Nehate & Rys, 2006) παρουσιάστηκε μοντέλο προσδιορισμού του διατιθέμενου SSD μέσω χρήσης του Παγκόσμιου Συστήματος Εντοπισμού Θέσης (GPS). Η επιφάνεια της οδού καθώς και τα εμπόδια ορατότητας αναπαριστώνταν ως παραμετρικές καμπύλες (B-Spline) οι οποίες ορίζονταν κατά τμήματα. Μέσω αναλυτικής μεθόδου εξετάζονταν η οριζοντιογραφία και η μηκοτομή της οδού και εντοπίζονταν οι θέσεις ανεπάρκειας SSD. Στην οριζοντιογραφία το μήκος ορατότητας θεωρείται ότι περιορίζεται από τα πλευρικά εμπόδια, στις κυρτές καμπύλες της μηκοτομής το μήκος ορατότητας θεωρείται ότι περιορίζεται λόγω τομής της γραμμής όρασης με την οδό και, τέλος, στις κοίλες καμπύλες της μηκοτομής το μήκος ορατότητας θεωρείται ότι περιορίζεται κατά τη διάρκεια της νύκτας στην απόσταση που δεν καλύπτεται από τους προβολείς των οχημάτων.

Συνεπώς, σε κάθε επιθυμητό σημείο της οδού (όπως επιλέγεται από τον μελετητή), το μήκος ορατότητας υπολογίζεται μέσω της οριζοντιογραφίας και της μηκοτομής της οδού, όπου με έλεγχο των παραμέτρων που προαναφέρθηκαν, ως διατιθέμενο ΜΟΣ λαμβάνεται το ελάχιστο εκ των επιμέρους μηκών.

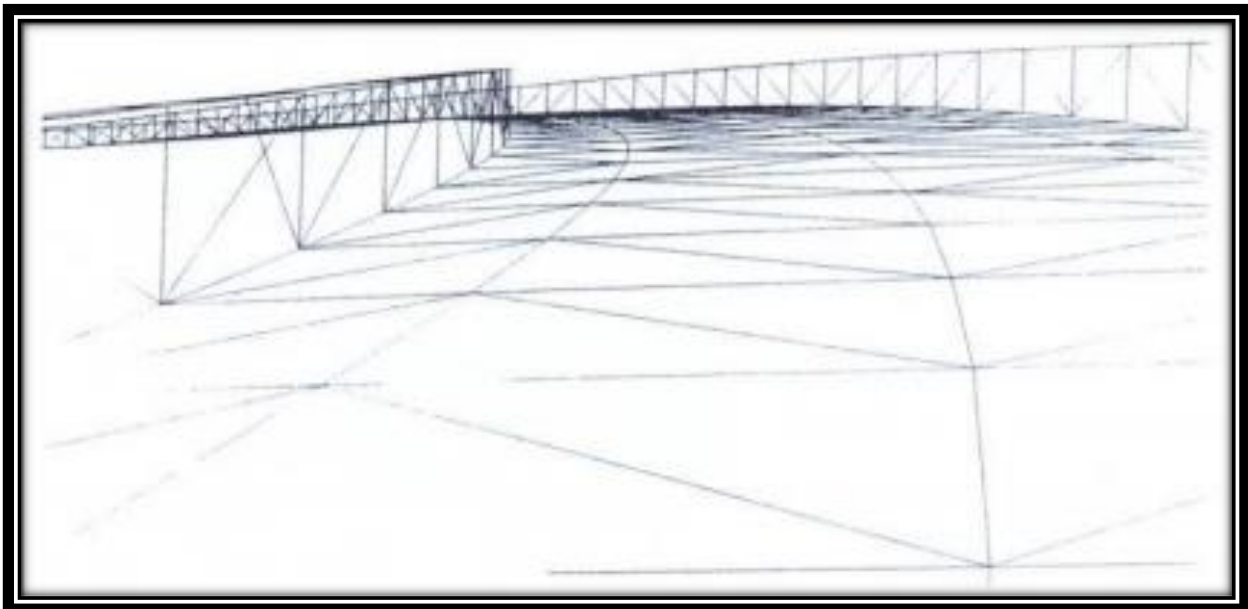
### 2.3 Τρισδιάστατη προσέγγιση

Ο εντοπισμός της ανεπάρκειας της διδιάστατη προσέγγισης ανάλυσης στη λήψη ορθών συμπερασμάτων για τις συνθήκες ορατότητας έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη πλήθους μοντέλων τρισδιάστατης θεώρησης οι οποίες λαμβάνουν υπ' όψιν την αλληλεπίδραση μεταξύ των στοιχείων της οριζοντιογραφίας και της μηκοτομής. Βάση των μεθόδων αυτών είναι η

ψηφιακή απεικόνιση της οδού και το παρόδιου χώρου σε περιβάλλον ηλεκτρονικού υπολογιστή και η εκτέλεση επαναληπτικών αλγορίθμων που έχουν συνταχθεί για το σκοπό αυτό.

Η πρώτη προσπάθεια τρισδιάστατης προσέγγισης πραγματοποιήθηκε για τον καθορισμό της αλληλεπίδρασης του SSD σε συνδετήριους κλάδους (ράμπες) και σε περιοχές κόμβων αυτοκινητόδρομων (Sanchez, 1994). Σύμφωνα με τον μελετητή, η ανεπάρκεια μήκους ορατότητας είναι σύνηθες φαινόμενο σε συνδετήριους κλάδους αυτοκινητόδρομων, καθώς χρησιμοποιούνται τα ελάχιστα μεγέθη σχεδιασμού στις οριζοντιογραφικές καμπύλες και μικρά πλάτη ερεισμάτων κατά μήκος στηθαίων από σκυρόδεμα, ενώ το πρόβλημα επιδεινώνεται με ταυτόχρονη ύπαρξη κυρτών καμπυλών μηκοτομής.

Με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή δημιουργήθηκε τρισδιάστατη προοπτική του οδικού περιβάλλοντος και έγινε συσχέτιση του με την ευθεία γραμμή όρασης του οδηγού για τον εντοπισμό πιθανών θέσεων διακοπής ορατότητας (Εικόνα 2.1).

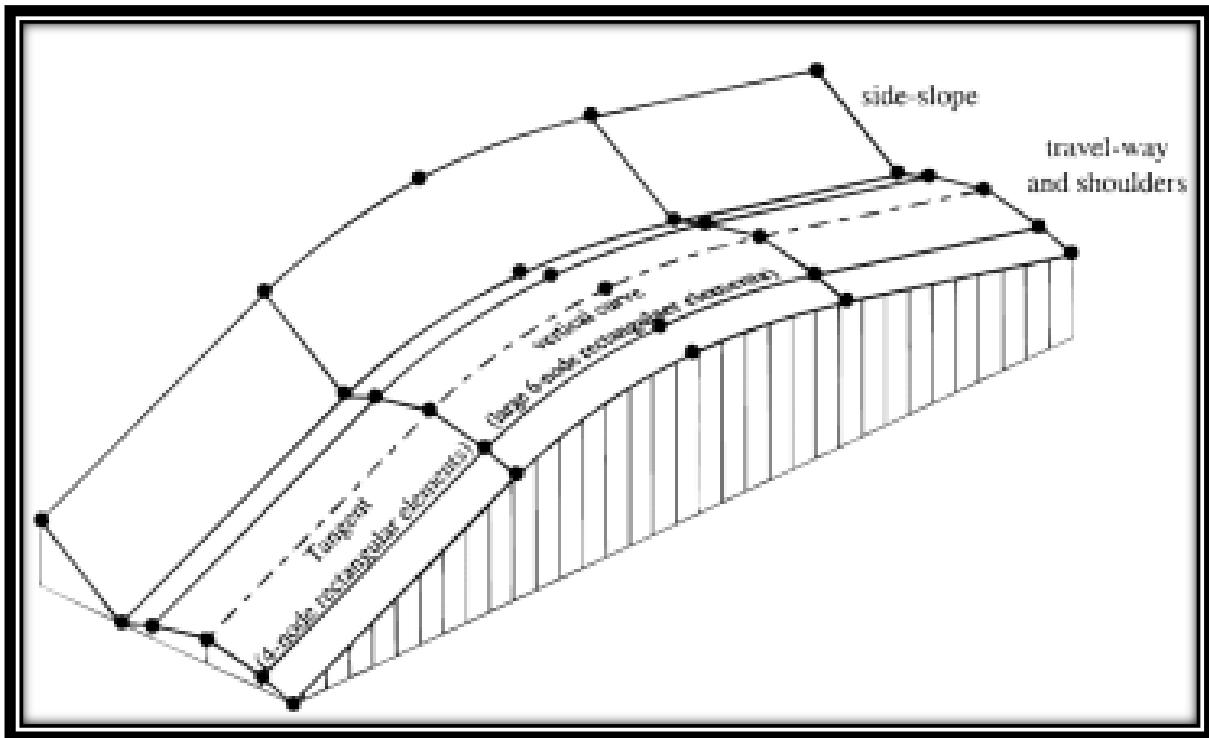


**Εικόνα 2.1:** Τρισδιάστατη προοπτική του οδικού άξονα από τη θέση του οδηγού (Sanchez, 1994)

Το σημαντικότερο συμπέρασμα από την ανάλυση με τη συγκεκριμένη μέθοδο είναι ότι τα αποτελέσματα δεν διαφέρουν σημαντικά από τα αντίστοιχα αποτελέσματα των συμβατικών διδιάστατων μεθόδων, οι εκτιμήσεις των οποίων ωστόσο είναι πιο συντηρητικές. Επιπλέον, στην πλειοψηφία των εξεταζόμενων περιπτώσεων, το στηθαίο από σκυρόδεμα είναι αυτό που περιορίζει το διατιθέμενο μήκος ορατότητας, δηλαδή η οριζοντιογραφία αποτελεί καθοριστικό παράγοντα όσον αφορά το επίπεδο επάρκειας ορατότητας. Συνεπώς, η απόσταση του στηθαίου από τη λωρίδα κυκλοφορίας, καθώς και η τιμή της επίκλισης επηρεάζουν σημαντικά τα διαθέσιμα μήκη ορατότητας.

Σε έρευνα (Hassan et al., 1996) παρουσιάστηκε μέθοδος συνδυαστικής απεικόνισης των στοιχείων οριζοντιογραφίας και μηκοτομής για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με το διατιθέμενο SSD, μέσω πεπερασμένων στοιχείων. Τα στοιχεία αυτά ορίζονται από πολυγωνικά

στοιχεία 3,4,6 ή 8 κόμβων στο χώρο που αναπαριστούν τις χαράξεις στο οδικό περιβάλλον και υπολογίζονται οι πιθανές θέσεις τομής της γραμμής όρασης με αυτά.

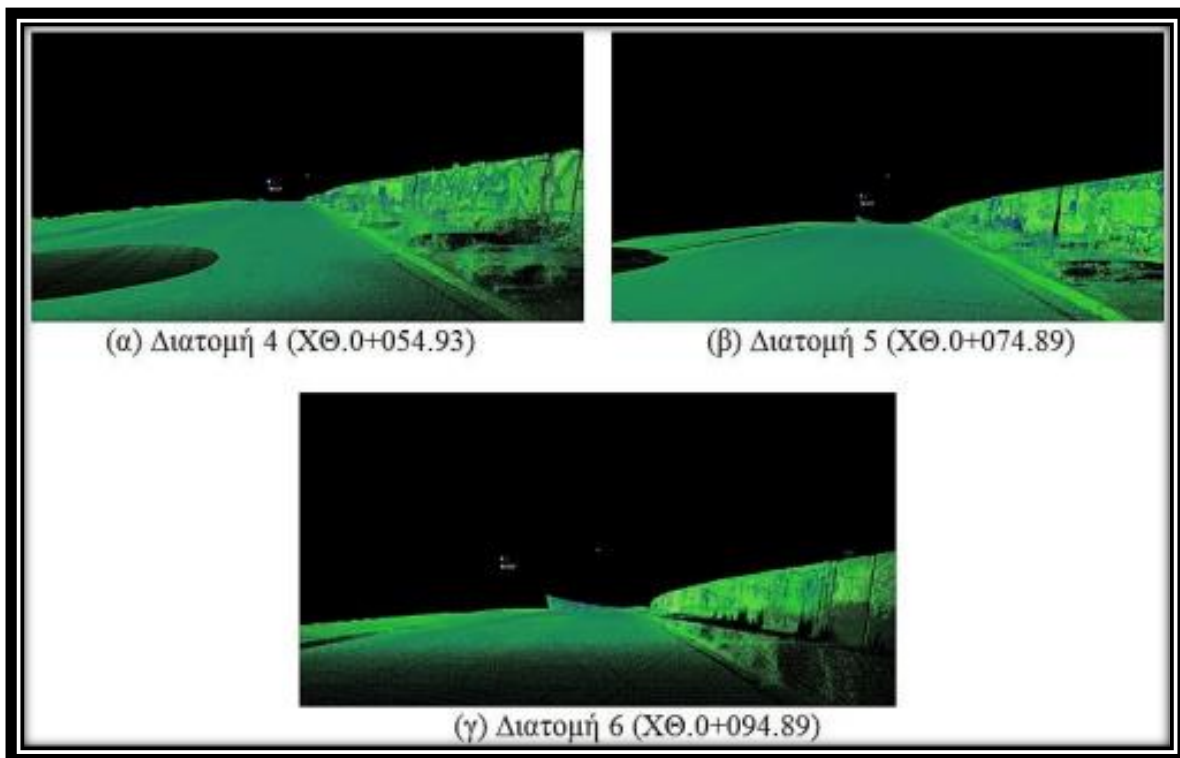


**Εικόνα 2.2:** Απεικόνιση κυρτής καμπύλης μηκοτομής με χρήση πεπερασμένων στοιχείων (Hassan et. al., 1996)

Σύμφωνα με την αρχική αυτή μέθοδο το μοντέλο επεκτάθηκε από τους συγγραφείς (Hassan et al. (1997)), ούτως ώστε να συμπεριληφθεί και το μήκος ορατότητας κατά τις νυκτερινές ώρες, το οποίο περιορίζεται στο εύρος των προβολών. Τονίστηκε ότι δεν έχει δοθεί αρκετή σημασία στο ζήτημα της ορατότητας τις νυκτερινές ώρες, ενώ θα έπρεπε, καθώς τα περισσότερα ατυχήματα παρατηρούνται κατά τη διάρκεια της νύκτας.

Σε παλαιότερη μελέτη (Μαυρομάτης et al., 2009) παρουσιάστηκε μία μέθοδος τρισδιάστατου προσδιορισμού του διατιθέμενου SSD σε υφιστάμενα οδικά τμήματα, λαμβάνοντας υπόψη τη χάραξη της οδού και του περιβάλλοντα χώρου. Αναφέρεται ότι μέχρι τότε δεν είχε γίνει καμία εφαρμογή των λογισμικών ανάλυσης σε υφιστάμενη οδό, ούτως ώστε να γίνει δυνατή η καταγραφή τυχόν ανεπάρκειας ορατότητας σε επιμέρους τμήματα του οδικού δικτύου. Η προτεινόμενη μέθοδος περιλαμβάνει τον σχεδιασμό και την πραγματοποίηση των σαρώσεων της οδού για τη συλλογή των πληροφοριών. Ακολουθεί η ενοποίηση των επιμέρους σαρώσεων και τη δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου της οδού, ούτως ώστε να προκύψει η δημιουργία διατομών από το οπτικό πεδίο του οδηγού (Εικόνα 2.3).

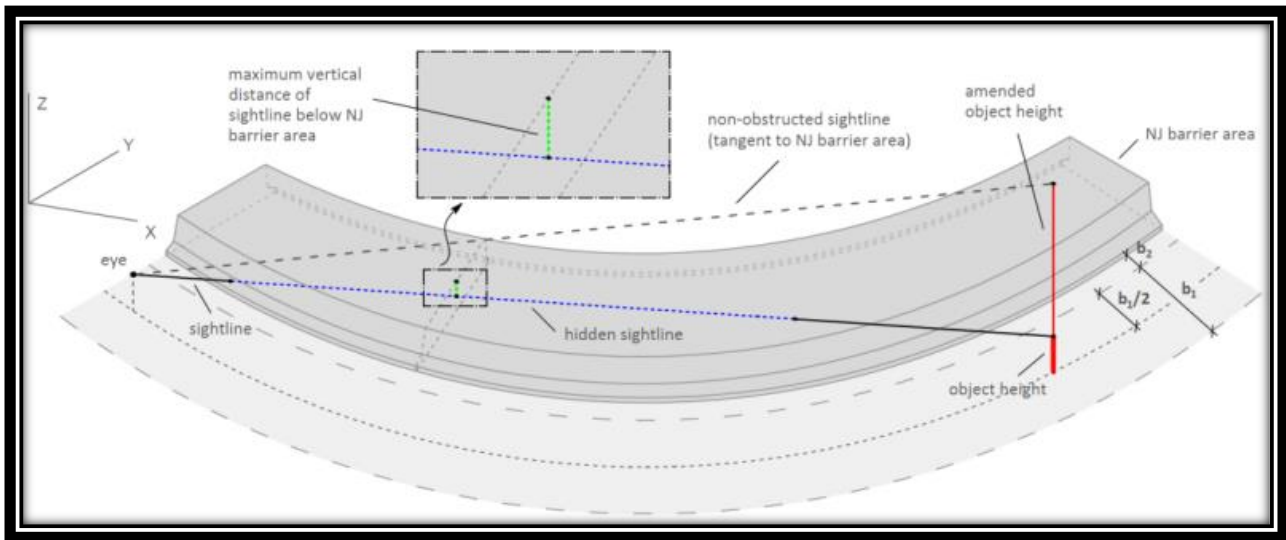
Η συγκεκριμένη μέθοδος προτείνεται για οδούς δύο λωρίδων κυκλοφορίας και το βασικό πλεονέκτημα της σε σχέση με όσες μελέτες έχουν προηγηθεί είναι η δυνατότητα εντοπισμού προβλημάτων ορατότητας σε μία υφιστάμενη οδό σε μικρό χρονικό διάστημα.



**Εικόνα 2.3:** Απεικόνιση διατομών που προέκυψαν από τρισδιάστατη σάρωση του οδικού περιβάλλοντος (Μαυρομάτης *et al.*, 2009)

Σε διδακτορική διατριβή (Μερτζάνης, 2015) αναπτύσσεται μια μέθοδος διερεύνησης της επάρκειας SSD, με ταυτόχρονη θεώρηση των παραγόντων επιρροής της παρεχόμενης ασφάλειας μιας οδού, δηλαδή των στοιχείων του γεωμετρικού σχεδιασμού της, του οχήματος και του ανθρώπινου παράγοντα (οδηγού). Επιπλέον, παρουσιάζεται το λογισμικό οδοποιίας «H14» για τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου εργαλείου ανάλυσης της ορατότητας με τη δυνατότητα της εισαγωγής των στοιχείων της οδού και του περιβάλλοντος οδικού χώρου ούτως ώστε, να είναι δυνατή η αξιολόγηση των επιπέδων ορατότητας σε οποιοδήποτε οδικό περιβάλλον. Τα πλεονεκτήματα του εργαλείου αυτού είναι η γρήγορη και εύκολη διερεύνηση των συνθηκών ορατότητας, καθώς και εναλλακτικών παραμέτρων για την εξασφάλιση της.

Πρόσφατη μελέτη (Μανρωματίς *et al.*, 2020) παρουσιάζει μια αναλυτική μέθοδο διερεύνησης της επιρροής του κεντρικού στηθαίου διαχωρισμού κυκλοφορίας σε αριστερή στροφή και κυρτή καμπύλη μηκοτομής. Λαμβάνοντας υπ' όψιν τα γεωμετρικά στοιχεία της χάραξης και τη δυναμική του οχήματος, υπολογίζεται το διατιθέμενο SSD για κάθε χιλιομετρική θέση κατά μήκος της συνδυασμένης τροχιάς κίνησης μέσω επαναληπτικού αλγορίθμου σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Λαμβάνονται αποτελέσματα για το ποσοστό του οδικού τμήματος στο οποίο υπάρχει παρεμπόδιση ορατότητας υπό συγκεκριμένες τιμές ακτινών οριζοντιογραφίας και τόξων συναρμογής (Εικόνα 2.4).



**Εικόνα 2.4:** Παρεμπόδιση ορατότητας λόγω διαχωριστικής νησίδας σε τμήμα αριστερής στροφής και κυρτού τόξου συναρμογής.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΟΡΑΤΟΤΗΤΑ

### 3.1 Γενικά

Το μήκος ορατότητας ορίζεται από το τμήμα της οδού που εκτίθεται στο οπτικό πεδίο του οδηγού σε κάθε χρονική στιγμή. Όσο μικρότερο είναι το μήκος ορατότητας, τόσο λιγότερη οπτική πληροφορία είναι διαθέσιμη για αξιολόγηση, με αποτέλεσμα ένας οδηγός να χρειάζεται πιο συχνά να ανανεώνει τις προβλέψεις του.

Η εξασφάλιση επαρκούς μήκους ορατότητας, δηλαδή της δυνατότητας του οδηγού να έχει ένα επαρκές και ελεύθερο εμπόδιων μήκος θέασης εμπρός του κατά τη διαδρομή, αποτελεί ένα από τα βασικότερα στοιχεία κυκλοφοριακής ασφάλειας κατά τη μελέτη ενός αυτοκινητόδρομου. Διακρίνονται δύο είδη μηκών ορατότητας, το απαιτούμενο μήκος ορατότητας για στάση και το αντίστοιχο για προσπέραση. Στην παρούσα εργασία το απαιτούμενο μήκος ορατότητας για προσπέραση δεν αποτελεί αντικείμενο μελέτης.

### 3.2 Μήκος ορατότητας για Στάση

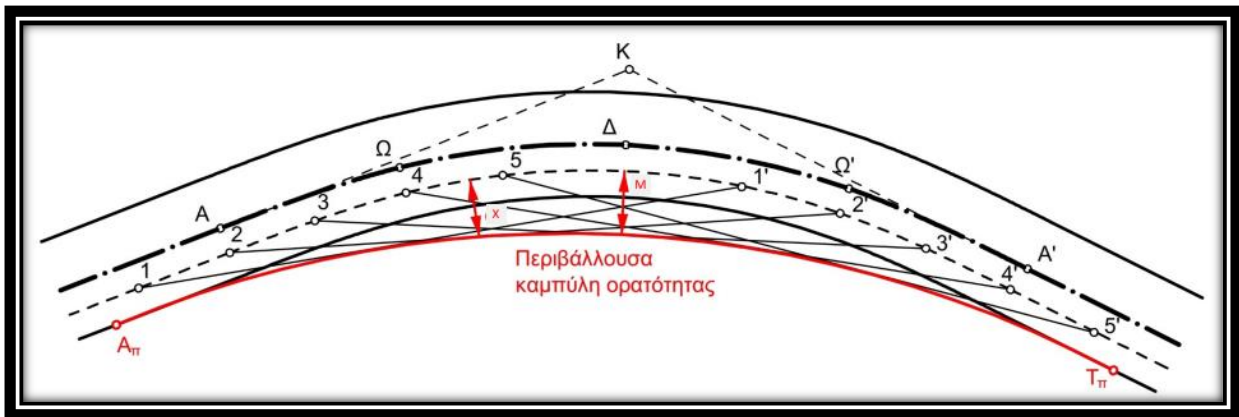
Το ελάχιστο μήκος ορατότητας, γνωστό ως μήκος ορατότητας για στάση (SSD) αποτελεί καθοριστικής σημασίας παράμετρο προκειμένου να αξιολογηθούν οι συνθήκες ορατότητας σε όλες τις κατηγορίες οδών. Αφορά στο ελάχιστο μήκος που πρέπει να υφίσταται προκειμένου όχημα κινούμενο με την επιτρεπόμενη ή λειτουργική ταχύτητα να δύναται να ακινητοποιηθεί πριν προσκρούσει σε απροσδόκητο σταθερό εμπόδιο. Το μήκος ορατότητας για στάση πρέπει να διατίθεται σε όλο το μήκος μιας οδού.

Η διερεύνηση επάρκειας μήκους ορατότητας για στάση SSD αποτελεί μια μαθηματικά ακριβή διαδικασία η οποία βασίζεται στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αυτοκινητόδρομου και τη δυναμική του οχήματος. Συνεπώς, λαμβάνεται υπ' όψιν η ακτίνα και η κατά μήκος κλίση του οδικού δικτύου καθώς και οι δυνάμεις τριβής που ενεργούν στο όχημα. Για να υπάρχει επάρκεια ορατότητας θα πρέπει το απαιτούμενο μήκος ορατότητας για στάση να είναι μικρότερο από το διαθέσιμο, ή με μαθηματική σχέση:

$$SSD_{\text{απαιτούμενο}} \leq SSD_{\text{διαθέσιμο}}$$

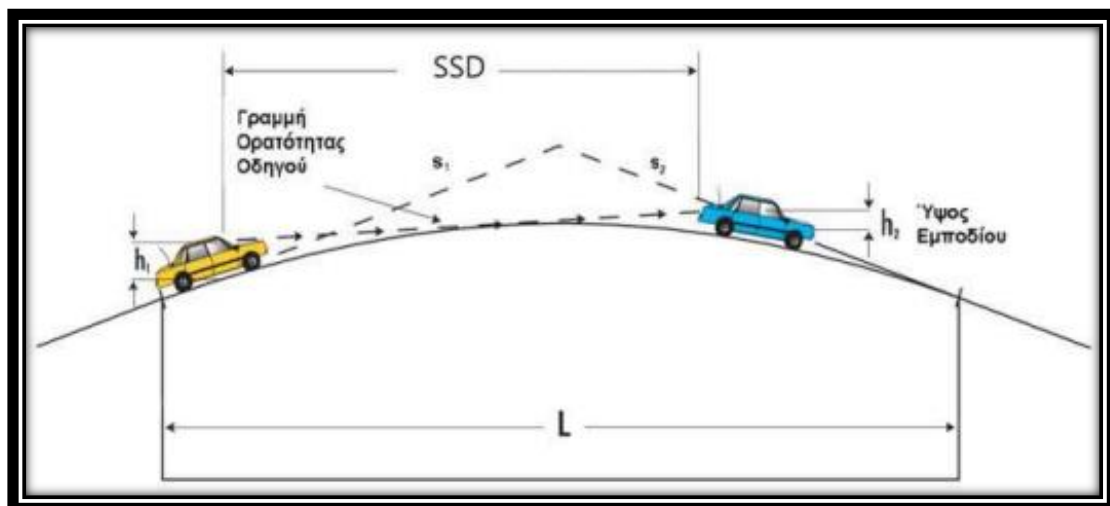
Ως  $SSD_{\text{διαθέσιμο}}$  σε καμπύλη ορίζεται το τόξο της τροχιάς κίνησης με χορδή το ευθύγραμμο τμήμα της γραμμής όρασης μεταξύ του ύψους οφθαλμού του οδηγού και του ύψους του εμποδίου. Εξαρτάται κυρίως από τους εξής παράγοντες:

- **Οριζοντιογραφία:** η ορατότητα επηρεάζεται κυρίως από την ακτίνα της καμπύλης. Σε περιπτώσεις μικρής ακτίνας η ορατότητα περιορίζεται σε μεγάλο βαθμό, δημιουργώντας την απαίτηση εξασφάλισης πρόσθετης παρόδιας περιοχής ελεύθερης εμποδίων. Ο προσδιορισμός του πεδίου αυτού επιτυγχάνεται μέσω της περιβάλλουσας καμπύλης ορατότητας, η οποία ορίζεται ως η καμπύλη που εφάπτεται σε χορδές που συνδέουν σημεία της προβλεπόμενης τροχιάς του οχήματος και έχουν μήκος ίσο με το απαιτούμενο Μήκος Ορατότητας για Στάση (Εικόνα 3.1).



**Εικόνα 3.1:** Ορισμός περιβάλλουσας καμπύλης ορατότητας (Α. Αποστολέρης, «Οδοποιία Ι – Χaráξεις: Θεωρία και Πρακτική»)

- Μηκοτομή:** Το διατιθέμενο μήκος ορατότητας εξαρτάται από τη γεωμετρία της κατακόρυφης χάραξης (κοίλα/κυρτά τόξα συναρμογής), καθώς και από το ύψος οφθαλμών και εμποδίου. Επιπλέον, υπάρχουν περιπτώσεις όπου ο συνδυασμός των στοιχείων της οριζοντιογραφίας και της μηκοτομής αποτελεί περιοριστικό παράγοντα της ορατότητας, ακόμη και αν τα επιμέρους στοιχεία χάραξης στην οριζοντιογραφία και στη μηκοτομή είναι σύμφωνα με τις αντίστοιχες διατάξεις των οδηγιών σχεδιασμού οδών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η επαλληλία οριζοντιογραφικής καμπύλης με κυρτή καμπύλη μηκοτομής, ιδιαίτερα όταν έπεται η πρώτη της δεύτερης, όπου κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις, υπάρχει πιθανότητα σημαντικού περιορισμού του διατιθέμενου μήκους ορατότητας (Μερτζάνης, 2015).



**Εικόνα 3.2:** Διερεύνηση συνθηκών ορατότητας σε κυρτή καμπύλη μηκοτομής (Σ. Μαυρομάτης, «Γεωμετρικός Σχεδιασμών Οδών»)

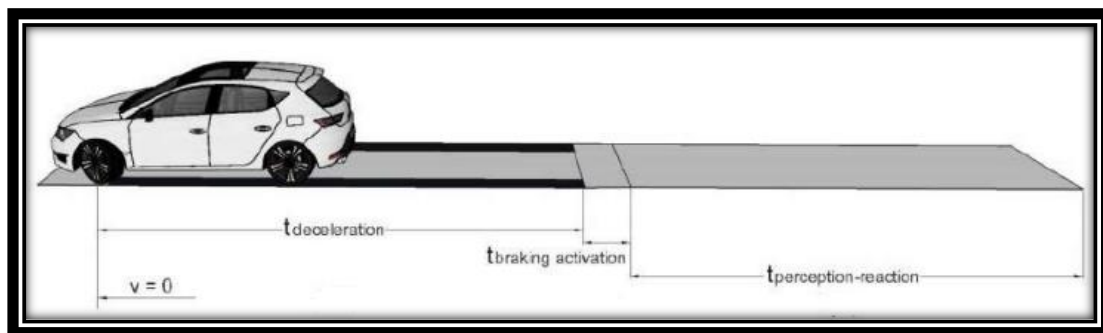
Αν και ο προσδιορισμός του SSD διαθέσιμου είναι ιδιαίτερα σημαντικός στην αξιολόγηση της παρεχόμενης ασφάλειας σε μια οδό, συγκεκριμένη μεθοδολογία προσδιορισμού συστήνεται μόνο σε απλές διατάξεις οριζοντιογραφικών καμπυλών και καμπυλών μηκοτομής. Έτσι, στην οριζοντιογραφία λαμβάνονται υπόψη πλευρικά εμπόδια (π.χ. πρηνή, στηθαία, δενδροφύτευση), ενώ στη μηκοτομή περιοριστικός παράγοντας του διατιθέμενου ΜΟΣ θεωρείται η επιφάνεια της οδού.

Η τιμή του  $SSD_{\text{απαιτούμενου}}$  σχετίζεται με την ικανότητα του οχήματος να ακινητοποιηθεί. Η παρούσα μελέτη λαμβάνει υπ' όψιν την κλασική δυναμική του οχήματος και τη γεωμετρία του αυτοκινητόδρομου, παρόλο που ορισμένες μελέτες απέδειξαν ότι το πραγματικό μήκος ορατότητας για στάση στο πεδίο επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες, όπως το Σύστημα Απεμπλοκής Τροχού του οχήματος (ABS) και η τραχύτητα της ασφαλτικής επιφάνειας (Bogdevičius, Vladimirov 2006; Greibe 2008; Mavromatis et al. 2005).

Ο υπολογισμός του απαιτούμενου μήκους ορατότητας για στάση ανάγεται στον υπολογισμό του αθροίσματος δύο μηκών: 1) του μήκους αντίδρασης ( $S_{\delta}$ ) και 2) του μήκους τροχοπέδησης ( $S_T$ ).

Ο χρόνος (μήκος) αντίδρασης του οδηγού ( $S_{\delta}$ ) μπορεί να αναλυθεί σε δύο βασικά μέρη:

- Χρόνος εγκεφαλικής διεργασίας: ο χρόνος που απαιτείται ώστε ο οδηγός να αντιληφθεί την ύπαρξη ενός γεγονότος και να αποφασίσει τον τρόπο αντίδρασης του, τη χρήση του φρένου στη συγκεκριμένη περίπτωση. Το μέρος αυτό εμφανίζεται και ως χρόνος αντίληψης στη διεθνή βιβλιογραφία.
- Χρόνος κίνησης: ο απαιτούμενος χρόνος ώστε ο οδηγός να αφήσει το γκάζι και να πατήσει το μοχλό πέδησης του οχήματος. Ο χρόνος αυτός καλείται και χρόνος αντίδρασης.



**Εικόνα 3.3:** Διαδικασία ακινητοποίησης οχήματος

Ο υπολογισμός του μήκους τροχοπέδησης ( $S_T$ ) πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπ' όψιν τις δυνάμεις τριβής που επενεργούν στο όχημα, ενώ γίνεται χρήση σχετικά μικρού ρυθμού επιβράδυνσης. Συνεπώς, υπάρχει κάποιο περιθώριο ασφαλείας κατά τον σχεδιασμό και έτσι επιτρέπεται στον μέσο οδηγό («below average driver» κατά AASHTO, 2011) να αποφύγει ενδεχόμενη σύγκρουση στις περισσότερες περιπτώσεις.

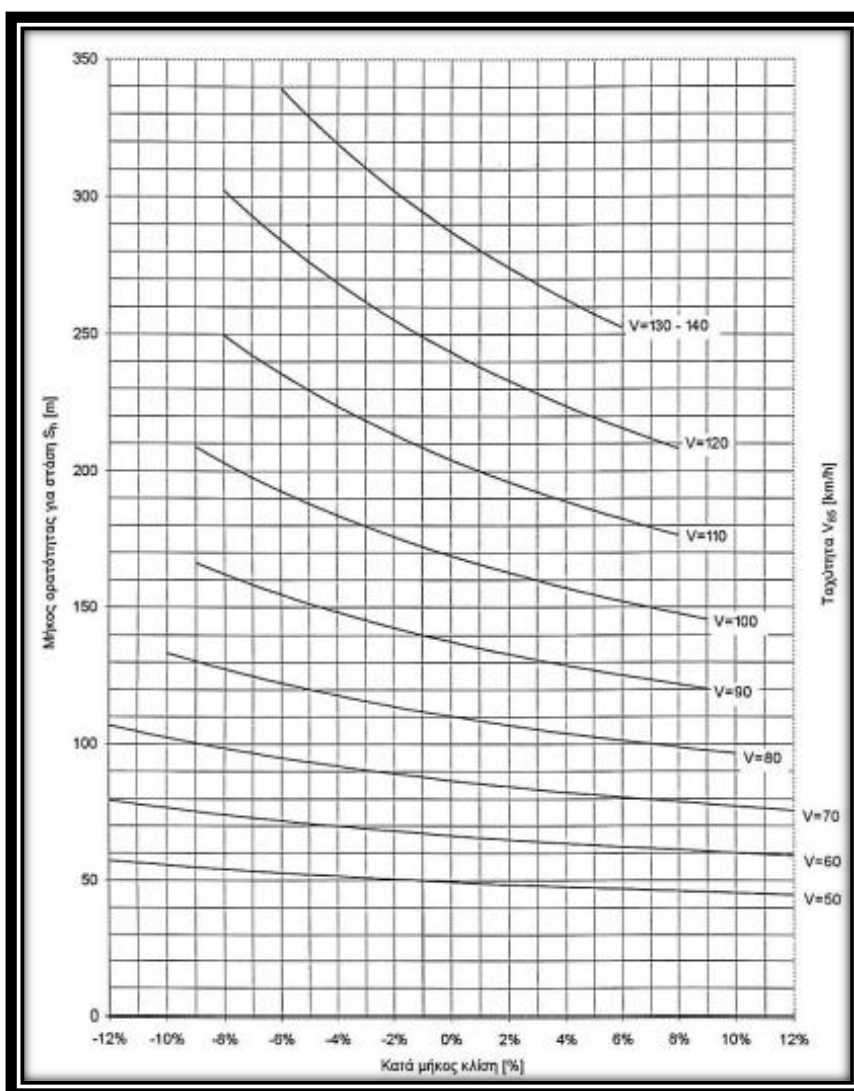
Με βάση το μήκος ορατότητας για στάση προσδιορίζονται οι κυρτές και κοίλες κατακόρυφες ακτίνες καμπυλότητας, το πλάτος του ελεύθερου οπτικών εμποδίων χώρου σε δεξιόστροφες καμπύλες (λόγω πρανών, στηθαίων, δενδροφύτευσης, κλπ.), καθώς και το πλάτος της εσωτερικής λωρίδας καθοδήγησης ή το εύρος της κεντρικής νησίδας σε αριστερόστροφες καμπύλες οδών με διαχωρισμένο οδόστρωμα, λαμβάνοντας υπόψη ότι δεν επιτρέπεται η οπτική ακτίνα μεταξύ οδηγού – εμποδίου να τέμνεται από τα οχήματα που κινούνται στην αντίθετη κατεύθυνση κυκλοφορίας.



### 3.2.1 Ελληνικοί κανονισμοί σχεδιασμού

Σύμφωνα με τις Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων (ΟΜΟΕ-Χ, 2001) του πρώην Υπουργείου Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων (νυν Υπουργείο Ανάπτυξης, Ανταγωνιστικότητας, Υποδομών, Μεταφορών και Δικτύων), η ασφάλεια της κυκλοφορίας και η ποιότητα της κυκλοφοριακής ροής απαιτούν την ύπαρξη ενός ελάχιστου Μήκους Ορατότητας για Στάση (ΜΟΣ), προκειμένου να είναι δυνατή η έγκαιρη ακινητοποίηση ενός οχήματος. Το απαιτούμενο ΜΟΣ είναι καθοριστικής σημασίας για την αξιολόγηση των συνθηκών ορατότητας σε όλες τις κατηγορίες των οδών.

Ως απαιτούμενο ΜΟΣ ( $S_h$ ) ορίζεται το μήκος που χρειάζεται ένας οδηγός κινούμενος με την ταχύτητα  $V_{85}$ , για να ακινητοποιήσει το όχημά του, πριν από ένα απροσδόκητο ακίνητο εμπόδιο στο οδόστρωμα. Το ΜΟΣ είναι το άθροισμα του μήκους που διανύει το όχημα κατά τη διάρκεια του χρόνου αντίληψης – αντίδρασης και του μήκους πέδησης. Το απαιτούμενο ΜΟΣ, λαμβάνεται από το διάγραμμα στην εικόνα 3.4, σε συνάρτηση με τη λειτουργική ταχύτητα  $V_{85}$  και την κατά μήκος κλίση της οδού  $s$ .



**Εικόνα 3.4:** Διάγραμμα υπολογισμού του απαιτούμενου ΜΟΣ  $S_h$  σε υγρό οδόστρωμα (ΟΜΟΕ-Χ, 2001)

Εναλλακτικά, το απαιτούμενο ΜΟΣ προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$S_h = S_\delta + S_T = V_{85} * t + \frac{V_{85}^2}{2(d + g * s)}$$

όπου:

$V_{85}$  = ταχύτητα μελέτης (m/s)

$t$  = χρόνος αντίδρασης (2 sec)

$g$  = επιτάχυνση της βαρύτητας

$s$  = κατά μήκος κλίση της οδού (%/100) [(+) για ανηφόρα, (-) για κατηφόρα]

$d$  = συντελεστής επιβράδυνσης, εξαρτώμενος από την ταχύτητα, ο οποίος λαμβάνεται από τον πίνακα 3.1

$V_{85}$	[km/h]	50	60	70	80	90	100	110	120	130
$d$	[m/s <sup>2</sup> ]	4,4	4,2	4,0	3,8	3,6	3,4	3,3	3,1	3,0

**Πίνακας 3.1:** Τιμές του συντελεστή επιβράδυνσης  $d$  για τον υπολογισμό του ΜΟΣ (ΟΜΟΕ-Χ, 2001)

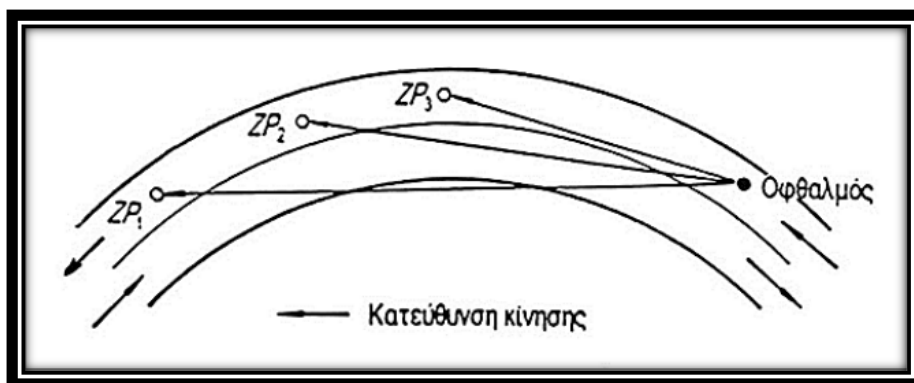
Οι ελάχιστες τιμές της ακτίνας οριζοντίων καμπυλών των χαράξεων υπολογίσθηκαν με βάση τη δυναμική της κίνησης των οχημάτων σε συνθήκες υγρού οδοστρώματος. Η χρήση αυτών των ελάχιστων τιμών των ακτινών υπόκειται και στον έλεγχο για επαρκή ορατότητα για στάση ενώπιον ακινήτου εμποδίου. Ο έλεγχος αυτός γίνεται για:

- τις εξωτερικές πλευρές των οδών, οπότε είτε επιβεβαιώνεται η ικανοποίηση της απαιτούμενης συνθήκης πλευρικού ελεύθερου οπτικών εμποδίων χώρου, είτε οδηγεί στην ανάγκη διεύρυνσης του πλευρικού χώρου.
- την πλευρά της κεντρικής νησίδας αυτοκινητόδρομου
- την εξωτερική πλευρά που τοποθετούνται επιχώματα, γέφυρες, βάθρα γεφυρών

Συνεπώς, η θέση των στηθαίων ασφαλείας πρέπει να ελέγχεται ότι αφήνει τον απαιτούμενο πλευρικό ελεύθερο χώρο για ασφαλή πέδηση και στάση.

Το διατιθέμενο ΜΟΣ υπολογίζεται σε σχέση με την οριζοντιογραφία, και τον περιβάλλοντα χώρο της οδού. Κατά τον προσδιορισμό του μήκους ορατότητας λαμβάνονται υπόψη όλα τα αντικείμενα που υπεισέρχονται στον οδικό και στον παρόδιο χώρο, όπως πινακίδες κυκλοφορίας κ.λπ., καθώς και οι υφιστάμενες και οι προβλεπόμενες φυτεύσεις. Ο προσδιορισμός πραγματοποιείται χωριστά για κάθε κατεύθυνση κυκλοφορίας.

Το ΜΟΣ περιγράφεται με τη βοήθεια μιας ακτίνας παρατήρησης, μεταξύ της θέσης του οφθαλμού και της θέσης του εμποδίου, όπως αναπαρίσταται στο Σχήμα. Ο οφθαλμός του οδηγού και το εμπόδιο θεωρείται ότι βρίσκονται στον άξονα της υπό εξέταση λωρίδας κυκλοφορίας.



**Εικόνα 3.5:** Δυνατή πορεία των οπτικών ακτινών μεταξύ οφθαλμού και εμπόδιου

Στην υφιστάμενη πρακτική η διερεύνηση της επάρκειας ορατότητας αναφέρεται σε επιβατηγά οχήματα. Σε περιπτώσεις κίνησης βαρέων οχημάτων, και ιδιαίτερα φορτηγών, χρειάζονται κατά κανόνα μεγαλύτερα μήκη επιβράδυνσης. Το γεγονός αυτό όμως αντισταθμίζεται γενικά από τη σημαντικά υψηλότερη θέση οδήγησης που έχουν τα φορτηγά οχήματα σε σχέση με τα επιβατηγά, με αποτέλεσμα να αυξάνεται το διατιθέμενο μήκος ορατότητας.

Στις περιπτώσεις κατά τις οποίες το πλεονέκτημα της υψηλότερης θέσης οδήγησης εξουδετερώνεται (π.χ. όταν η ορατότητα περιορίζεται από πλευρικά εμπόδια), προτείνεται να αυξάνονται οι διατιθέμενες αποστάσεις ορατότητας, ώστε να εξυπηρετούνται ασφαλώς και τα φορτηγά.

Όταν συνεχώς το πεδίο ορατότητας του οδηγού περιορίζεται στις ελάχιστες τιμές της ορατότητας στάσης, τότε ο οδηγός βρίσκεται σε διαρκή ένταση που προκαλεί κόπωση. Για το λόγο αυτό κατά ΟΜΟΕ-Χ επιβάλλεται να εξασφαλίζονται συνολικά στο 70% της οδού μήκη ορατότητας κατά 30% μεγαλύτερα από τα ελάχιστα απαιτούμενα.

### 3.2.2 Γερμανικοί κανονισμοί σχεδιασμού

Σύμφωνα με τις Γερμανικές οδηγίες για τον γεωμετρικό σχεδιασμό των οδών (RAL-R1, 2012), καθώς και τις Γερμανικές οδηγίες για τον σχεδιασμό των αυτοκινητόδρομων (RAA-R1, 2008), οι αρχές οδικής ασφάλειας απαιτούν την ύπαρξη του απαιτούμενου ΜΟΣ, ώστε να παρέχεται στον χρήστη η δυνατότητα έγκαιρης ακινητοποίησης του οχήματός του πριν από εμπόδιο. Το απαιτούμενο ΜΟΣ σε σχέση με το διατιθέμενο ΜΟΣ αποτελεί το καθοριστικό κριτήριο αξιολόγησης των συνθηκών ορατότητας των οδών, διαχωρισμένης και ενιαίας επιφάνειας κυκλοφορίας.

Ως απαιτούμενο μήκος ορατότητας για στάση SSD ορίζεται η απόσταση την οποία χρειάζεται ένας οδηγός για να ακινητοποιήσει το όχημά του με ασφάλεια, πριν από ένα αιφνίδιο εμπόδιο, σε υγρό οδόστρωμα. Προκύπτει ως άθροισμα του μήκους που διανύει το όχημα κατά τη διάρκεια του χρόνου αντίληψης – αντίδρασης και του μήκους που διανύει κατά τη διάρκεια της πέδησης. Η τιμή αυτή ποικίλλει ανάλογα την ταχύτητα σχεδιασμού και την κατά μήκος κλίση και υπολογίζεται από τη μαθηματική σχέση:

$$SSD = S_{\delta} + S_T = V_o * t + \frac{V_o^2}{2g * (f_T + s)} , \quad f_T = \frac{a}{g}$$

όπου:

- $V_o$  = ταχύτητα μελέτης (m/s)
- $t$  = χρόνος αντίδρασης (**2 sec**)
- $f_T$  = συντελεστής εφαπτομενικής τριβής
- $g$  = επιτάχυνση της βαρύτητας
- $a$  = ρυθμός επιβράδυνσης οχήματος (**3,7 m/sec<sup>2</sup>**)
- $s$  = κατά μήκος κλίση της οδού (%/100) [(+) για ανηφόρα, (-) για κατηφόρα]

Σε αντιδιαστολή με τους Ελληνικούς κανονισμούς (ΟΜΟΕ-Χ 2001), για τον υπολογισμό του απαιτούμενου SSD χρησιμοποιείται σταθερή τιμή ρυθμού επιβράδυνσης του οχήματος ( $a=3,7 \text{ m/sec}^2$ ), η οποία είναι ανεξάρτητη της αρχικής ταχύτητας μελέτης.

Σε περίπτωση καμπύλης, πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν η απομείωση του συντελεστή της εφαπτομενικής τριβής λόγω πλευρικής τριβής. Συγκεκριμένα, με βάση τον κύκλο τριβής (*Krempel, 1965*), κατά την κίνηση οχήματος σε καμπύλη τροχιά, τα αποθέματα των συνιστωσών τριβής είναι δυνατόν να διατεθούν ταυτόχρονα και στις δύο διευθύνσεις. Ο νέος συντελεστής  $f'_T$  θα ισούται με:

$$f'_T = \sqrt{\left(\frac{a}{g}\right)^2 - \left(\frac{V^2}{g * R} - e\right)^2}$$

όπου:

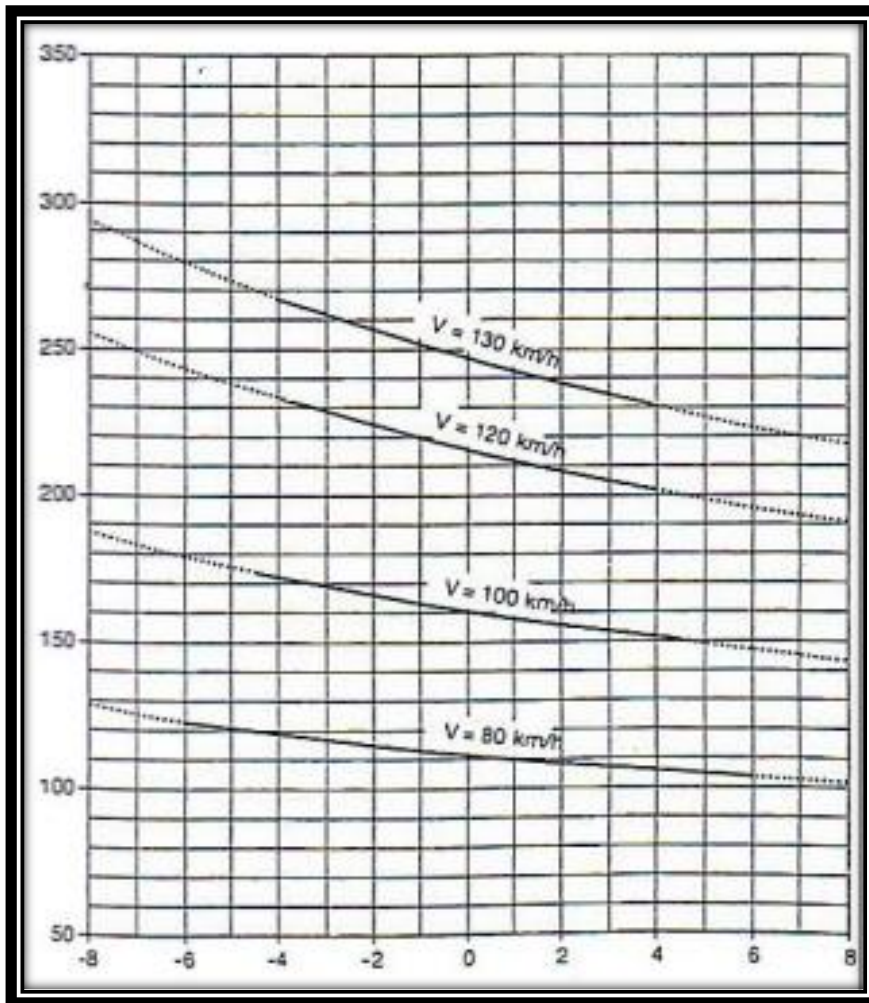
- $R$  = ακτίνα καμπύλης οριζοντιογραφίας
- $e$  = επίκλιση οδού (%/100)

Χρησιμοποιώντας την αρχική εξίσωση και παραλείποντας τη συνιστώσα της πλευρικής τριβής, προκύπτει ο πίνακας 3.2 με τα αποτελέσματα Μήκους Ορατότητας για Στάση SSD για δεδομένες κατά μήκος κλίσεις και ταχύτητες σχεδιασμού.

Ταχύτητα V (km/h)	Κατά μήκος κλίση s (%)								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
60	75	74	73	72	71	70	69	68	67
70	96	94	93	91	90	89	87	86	85
80	119	117	115	113	111	109	108	106	105
90	144	142	139	137	134	132	130	128	126
100	172	169	166	163	160	157	155	152	150
110	202	198	194	191	187	184	181	178	175
120	235	230	225	221	217	213	209	206	202
130	269	264	258	253	248	244	240	235	232

**Πίνακας 3.2:** ΜΟΣ για ζεύγη ταχύτητας σχεδιασμού V και κατά μήκος κλίσης s (RAA-2008)

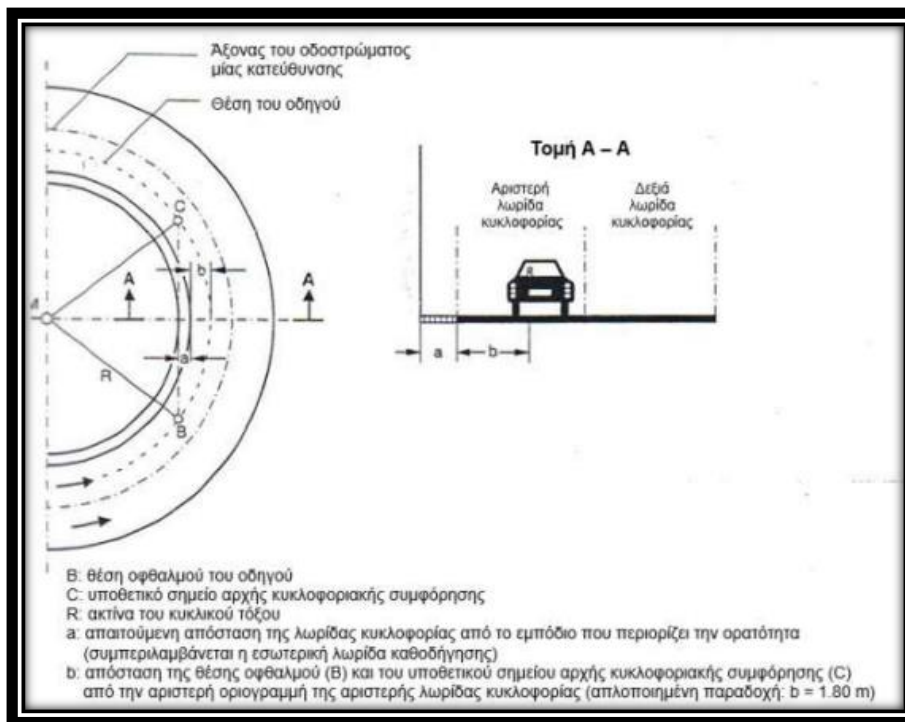
Παρόμοια αποτελέσματα μπορούν να εξαχθούν και με χρήση του διαγράμματος της εικόνας 3.6, για διάφορες καμπύλες ταχύτητας σχεδιασμού.



**Εικόνα 3.6:** Διάγραμμα υπολογισμού ΜΟΣ για ζεύγη ταχύτητας σχεδιασμού  $V$  και κατά μήκος κλίσης  $s$  (RAA-2008)

Η παροχή ικανού διατιθέμενου μήκους ορατότητας για στάση, ιδιαίτερα στις αριστερόστροφες καμπύλες αυτοκινητόδρομων με υψηλές ταχύτητες, αποτελεί κρίσιμο ζήτημα οδικής ασφάλειας, δεδομένου ότι πρέπει έγκαιρα οι οδηγοί να αντιληφθούν πιθανή κυκλοφοριακή συμφόρηση. Η εφαρμογή στηθαίων ασφαλείας στην κεντρική διαχωριστική νησίδα, ενώ συμβάλλει αποφασιστικά στη βελτίωση της παρεχόμενης ασφάλειας, είναι δυνατόν να λειτουργήσει υπό συγκεκριμένες συνθήκες ως περιοριστικός παράγοντας της ορατότητας του οδηγού.

Καθοριστική επιρροή στον περιορισμό του διατιθέμενου μήκους ορατότητας έχουν η οριζόντια ακτίνα καμπύλης  $R$ , η απόσταση  $a$  από την οριογραμμή της υπόψη λωρίδας κυκλοφορίας του εμποδίου που περιορίζει την ορατότητα, καθώς και το ύψος της κεντρικής νησίδας (εικόνα 3.7).



**Εικόνα 3.7:** Γεωμετρικό μοντέλο υπολογισμού SSD σε αριστερή στροφή (RAA-2008)

Η διερεύνηση επάρκειας μήκους ορατότητας για στάση πραγματοποιείται μέσω της συσχέτισης του διατιθέμενου SSD με το απαιτούμενο SSD σε όλο το μήκος της οδού, ώστε να διαπιστωθεί η επάρκειά του (RAA-R1, 2008). Το απαιτούμενο SSD είναι σταθερό για μεγάλα μήκη της οδού. Εάν μεταβάλλεται, θα πρέπει η μεταβολή αυτή να γίνεται ομαλά. Επίσης, συνίσταται η μεταβολή του διατιθέμενου ΜΟΣ να είναι αρμονική και προσαρμοσμένη στις επικρατούσες συνθήκες της οδού.

Τονίζεται ότι λόγω της μελέτης της οδού σε τρεις διακριτές φάσεις (οριζοντιογραφία, μηκοτομή και διατομή), η τελική της μορφή στον χώρο δεν είναι εύκολα αντιληπτή πάντοτε. Συνεπώς, είναι απαραίτητη η διενέργεια τρισδιάστατης ανάλυσης μέσω προοπτικών εικόνων κατά μήκος της οδού. Ωστόσο, ο έλεγχος της χάραξης κατ' αυτόν τον τρόπο είναι μόνο ποιοτικός.

### 3.2.3 Αμερικάνικοι κανονισμοί σχεδιασμού

Σύμφωνα με τις Αμερικανικές οδηγίες για τον γεωμετρικό σχεδιασμό των οδών, (AASHTO, 2011), για λόγους οδικής ασφάλειας κατά τον σχεδιασμό των οδών, πρέπει να εξασφαλίζεται η παροχή επαρκούς μήκους ορατότητας, ούτως ώστε ο οδηγός να μπορεί να ακινητοποιήσει το όχημά του, αποφεύγοντας την πρόσκρουση σε τυχόν απρόβλεπτο εμπόδιο, εντός της πορείας της οδού.

Ο υπολογισμός του απαιτούμενου μήκους ορατότητας για στάση SSD δίνεται από τη μαθηματική σχέση:

$$SSD = S_{\delta} + S_T = 0,278 * V_o * t + \frac{V_o^2}{254 \left( \frac{\alpha}{9,81} + G \right)}$$

όπου:

$V_0$  = ταχύτητα μελέτης (m/s)

$t$  = χρόνος αντίδρασης (2,5 sec)

$\alpha$  = ρυθμός επιβράδυνσης οχήματος (3,4 m/sec<sup>2</sup>)

$G$  = κατά μήκος κλίση της οδού (%/100) [(+) για ανηφόρα, (-) για κατηφόρα]

Για τον προσδιορισμό του χρόνου αντίδρασης του οδηγού και ρυθμού επιβράδυνσης οχήματος έγινε θεώρηση υιοθέτησης τιμών συντηρητικών για την πλειοψηφία των οδηγών.

Ο χρόνος αντίδρασης αποτελεί παράμετρο που μεταβάλλεται από ποικίλους παράγοντες. Πιο συγκεκριμένα, μεταβάλλεται ανάλογα με την απόσταση από το εμπόδιο, την ταχύτητα κίνησης, τις καιρικές και ατμοσφαιρικές συνθήκες και την πυκνότητα των πληροφοριών στο οδικό περιβάλλον. Επιπλέον είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την ηλικία του οδηγού, καθώς επηρεάζεται από την ικανότητα όρασης και την εγρήγορση των αντιδράσεων του. Συνεπώς, υιοθετήθηκε η τιμή των 2,5 sec ως χρόνου αντίδρασης, η οποία υπερβαίνει το χρόνο αντίδρασης που απαιτείται από το 90% του συνόλου των χρηστών του αυτοκινητόδρομου.

Παρόμοια θεώρηση έγινε για τον προσδιορισμό του ρυθμού επιβράδυνσης. Διαπιστώθηκε ότι το 90% όλων των οδηγών επιβραδύνει με ρυθμό μεγαλύτερο των 3,4 m/sec<sup>2</sup>, σε βρεγμένο οδόστρωμα, έχοντας την ικανότητα να διατηρήσει το όχημα του εντός πορείας. Ως αποτέλεσμα υιοθετήθηκε η συγκεκριμένη τιμή ως ρυθμός επιβράδυνσης.

Βάσει των παραπάνω, το απαιτούμενο μήκος ορατότητας για στάση SSD, αν συμπεριληφθεί η επιρροή της ταχύτητας σχεδιασμού και της κατά μήκος κλίσης του οδικού άξονα, παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.3.

Design speed (km/h)	Stopping sight distance (m)					
	Downgrades			Upgrades		
	3 %	6 %	9 %	3 %	6 %	9 %
20	20	20	20	19	18	18
30	32	35	35	31	30	29
40	50	50	53	45	44	43
50	66	70	74	61	59	58
60	87	92	97	80	77	75
70	110	116	124	100	97	93
80	136	144	154	123	118	114
90	164	174	187	148	141	136
100	194	207	223	174	167	160
110	227	243	262	203	194	186
120	263	281	304	234	223	214
130	302	323	350	267	254	243

**Πίνακας 3.3:** Μήκος ορατότητας για στάση SSD για ζεύγη ταχύτητας σχεδιασμού  $V$  και κατά μήκος κλίσης  $s$  (AASHTO, 2011)

Ο έλεγχος επάρκειας SSD πραγματοποιείται με τον προσδιορισμό γραφικά του διατιθέμενου SSD και τη σύγκρισή του με το αντίστοιχο απαιτούμενο SSD κατά μήκος της οδού. Καθορίζεται

ξεχωριστά στην οριζοντιογραφία και τη μηκοτομή της οδού, και σε κάθε θέση λαμβάνεται ως διαθέσιμο SSD η μικρότερη εκ των δύο τιμών που προσδιορίζονται.

Σε περιπτώσεις ανεπάρκειας προτείνεται η τροποποίηση των στοιχείων της χάραξης, και συγκεκριμένα ο υπολογισμός της ακτίνας της οριζόντιας καμπύλης ή την απόσταση των πλευρικών εμποδίων από τον άξονα της οδού, ή ο προσδιορισμός του ελάχιστου αποδεκτού μήκους της καμπύλης της μηκοτομής, προκειμένου να επιτευχθεί επάρκεια μηκών ορατότητας για στάση. Ωστόσο, δεν προσδιορίζεται με ακρίβεια η διαδικασία της προτεινόμενης μεθόδου και επιπλέον η ανεξάρτητη αντιμετώπιση οριζοντιογραφίας και μηκοτομής δεν λαμβάνει υπόψη την τρισδιάστατη χάραξη της οδού, οδηγώντας ενδεχομένως σε εσφαλμένη εκτίμηση του SSD.

Τέλος, στις Αμερικανικές Οδηγίες σχεδιασμού οδών τονίζεται η ανάγκη της ενιαίας αντιμετώπισης της χάραξης στις τρεις διαστάσεις για την εξασφάλιση επάρκειας στην ορατότητα, δεδομένου ότι τυχόν αλλαγές στην οριζοντιογραφία της οδού επηρεάζουν τη μηκοτομή και το αντίστροφο.

### **3.3 Δομικά εμπόδια**

Σημαντική παράμετρο μείωσης του επιπέδου οδικής ασφάλειας σε αυτοκινητόδρομους αποτελεί η ύπαρξη εμποδίων, φυσικών ή δομικών, τα οποία διακόπτουν τη γραμμή όρασης του οδηγού. Το γεγονός αυτό καθιστά το χρήστη ανήμπορο να αντιδράσει εγκαίρως σε οποιαδήποτε πιθανή απειλή μπορεί να συναντήσει στο επερχόμενο τμήμα οδού που καλείται να διασχίσει.

Τα στοιχεία που καθορίζουν το μήκος ορατότητας στη χάραξη των οδών είναι:

- Η θέση του οφθαλμού του οδηγού και το ύψος του από την επιφάνεια του οδοστρώματος.
- Το ύψος και η θέση των εμποδίων που παρεμβάλλονται στην πορεία του οχήματος ή στη γραμμή όρασης του οδηγού.

Σύμφωνα με τις ΟΜΟΕ - Χ το ύψος του οφθαλμού λαμβάνεται ίσο με 1,06 m για όλες τις εκδοχές του μήκους ορατότητας που χρησιμοποιούνται στη χάραξη των οδών. Αντίστοιχα οι Γερμανικοί κανονισμοί (RAS-L) αποδέχονται ύψος οφθαλμού οδηγού 1,00 m και οι Αμερικανικοί κανονισμοί 1,08 m.

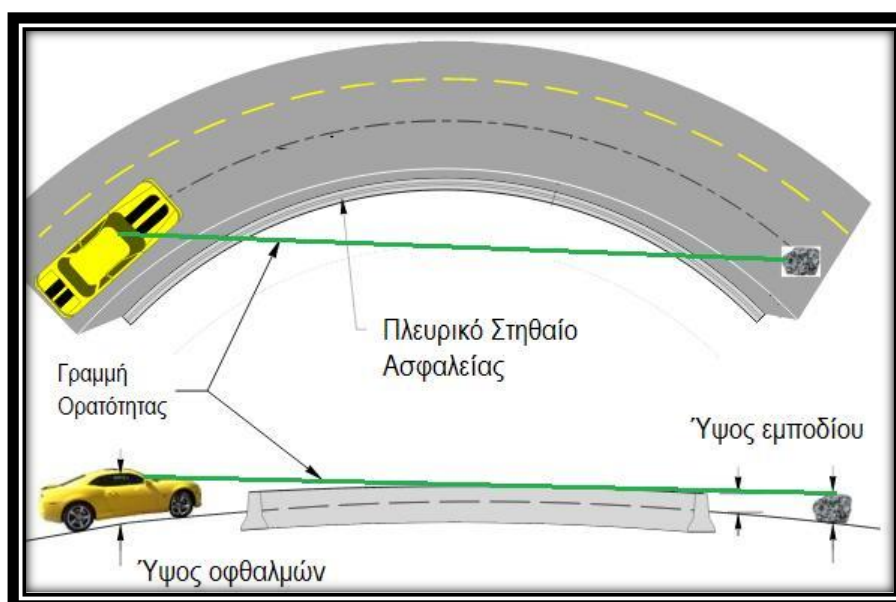
Το ύψος του αντικειμένου εξαρτάται από την εκδοχή του μήκους ορατότητας που εξετάζεται κάθε φορά. Για τους ΟΜΟΕ – Χ το ύψος αντικειμένου για τον προσδιορισμό του μήκους ορατότητας για στάση ορίζεται ανάλογα με τη λειτουργική ταχύτητα  $V_{85}$  και κυμαίνεται από  $h_z = 0,05m$  για  $V_{85}=40km/h$  έως  $h_z = 0,49m$  για  $110km/h$ . Παρόμοιες είναι και οι τιμές για το ύψος του αντικειμένου που ορίζονται στους Γερμανικούς κανονισμούς (RAL) ενώ οι Αμερικανικοί κανονισμοί αποδέχονται ύψος αντικειμένου ίσο με 0,60m για όλες τις τιμές της ταχύτητας.



Τύπος ορατότητας	Οφθαλμός		Θέση εμποδίου	$V_{85}$ [km/h]	Ύψος εμποδίου $h_z$ [m]
	Θέση	Ύψος $h_A$ [m]			
1	2	3	4	5	6
Ορατότητα για στάση	στον άξονα της δικής του λωρίδας κυκλοφορίας	1,06	στον άξονα της δικής του λωρίδας κυκλοφορίας	40	0,05
				50	0,07
				60	0,10
				70	0,13
				80	0,16
				90	0,20
				100	0,25
				110	0,30
				120	0,35
				130	0,42
				140	0,49

**Πίνακας 3.4:** Βασικές τιμές ύψους οφθαλμού και εμποδίου για τον προσδιορισμό του διατιθέμενου ΜΟΣ (ΟΜΟΕ-Χ, 2001)

Παράδειγμα φυσικού εμποδίου αποτελεί η ύπαρξη δέντρων και φυλλωσιών παραπλεύρως του οδικού δικτύου ή στο διαχωριστικό κυκλοφορίας του αυτοκινητόδρομου. Όσον αφορά τα τεχνητά δομικά εμπόδια, συνήθη παραδείγματα αποτελούν οι οδικές πινακίδες και οι τοίχοι των σηράγγων. Σε περιπτώσεις καμπύλων οριζοντιογραφιών και κυρτών μηκοτομών, είναι πιθανό η κεντρική νησίδα διαχωρισμού κυκλοφορίας, το στηθαίο ασφαλείας ή ακόμα και το ίδιο το οδόστρωμα να αποτελέσουν εμπόδια ορατότητας.

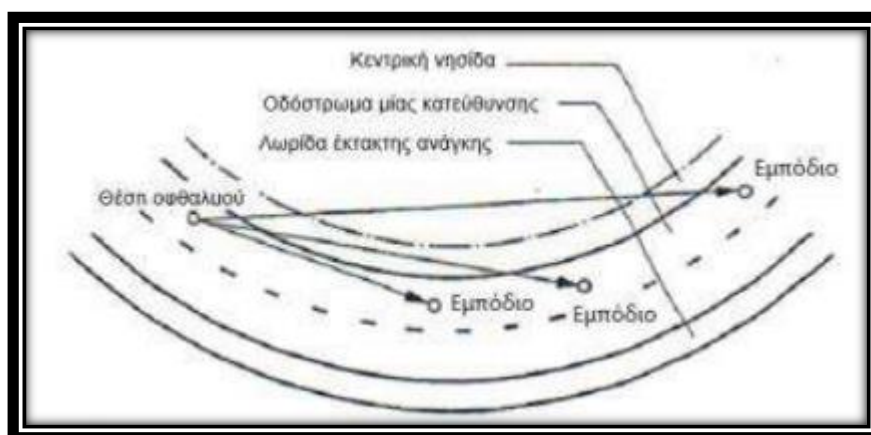


**Εικόνα 3.8:** Παρεμπόδιση ορατότητας σε δεξιά καμπύλη λόγω στηθαίου ασφαλείας

### 3.3.1 Διαχωριστικό κυκλοφορίας

Τα διαχωριστικά κυκλοφορίας (New Jersey) τοποθετούνται στο μέσον των λεωφόρων και των αυτοκινητόδρομων με σκοπό να επαναφέρουν στη λωρίδα κυκλοφορίας οχήματα που παρέκκλιναν από την πορεία τους και για να αποτρέψει πιθανή μετωπική σύγκρουση με οχήματα που κινούνται στην αντίθετη κατεύθυνση.

Το φαινόμενο της παρεμπόδισης ορατότητας λόγω των New Jersey λαμβάνει χώρο σε περιπτώσεις αριστερών καμπύλων και σταδιακής μείωσης της κατά μήκος κλίσης του αυτοκινητόδρομου, όπου το διαχωριστικό μπορεί να φτάσει σε ύψος μεγαλύτερο από το ύψος της γραμμής όρασης του οδηγού. Κρισιμότεροι παράγοντες όσον αφορά την επάρκεια ορατότητας είναι το ύψος του διαχωριστικού στηθαίου καθώς και το πλάτος της εσωτερικής λωρίδας καθοδήγησης.



Εικόνα 3.9: Επιρροή του New Jersey στην ορατότητα σε αριστερή καμπύλη

### 3.3.2 Σήραγγες

Ο σχεδιασμός των οδικών σηράγγων αποτελεί ουσιώδες στοιχείο στο γεωμετρικό σχεδιασμό των αυτοκινητόδρομων. Βασικό κίνητρο για την επιλογή της συγκεκριμένης εναλλακτικής λύσης αποτελεί η ανάγκη της κατασκευής οδικών αξόνων σε περιοχές φυσικών συνθηκών και τοπογραφίας που είναι δύσκολο να αντιμετωπιστούν διαφορετικά. Σε αντίθεση με το σύνηθες οδικό περιβάλλον, το τμήμα εισόδου σε σήραγγα χαρακτηρίζεται από περιορισμένη ορατότητα και μικρότερα διαθέσιμα πλάτη των λωρίδων κυκλοφορίας, κυρίως λόγω ανάγκης μείωσης του κόστους κατασκευής του έργου. Ο αυξημένος κίνδυνος ατυχήματος σχετίζεται με την απότομη μεταβολή των συνθηκών οδήγησης (Du et al. 2014).

Η είσοδος στη σήραγγα είναι ιδιαίτερα απαιτητική διεργασία για τους χρήστες των οδικών σηράγγων και οι πιθανότητες να προκληθεί ατύχημα είναι αυξημένες. Αποτελέσματα που προέκυψαν από σχετικές έρευνες αναφέρουν ότι η εγκεφαλική δραστηριότητα είναι πιο έντονη κατά την είσοδο στη σήραγγα (PIARC 2008). Ο χρήστης καλείται να ανταπεξέλθει σε μία σειρά από διεργασίες καθώς εισέρχεται στη σήραγγα. Όσον αφορά την οδήγηση, ο χρήστης πρέπει να ανάψει τα φώτα πορείας, να αφαιρέσει τα γυαλιά ηλίου αν φοράει, να προσαρμόσει την ταχύτητα κίνησης του οχήματος και την απόσταση από το προπορευόμενο όχημα. Επιπλέον απόδειξη του οδηγικού φόρτου του χρήστη, είναι η παρατήρηση ότι ορισμένοι οδηγοί απομακρύνονται από τον τοίχο της σήραγγας για κάποια μέτρα μόλις εισέλθουν στη σήραγγα

και αφού συνηθίσουν την ύπαρξη τοίχου επιστρέφουν στην κανονική θέση οδήγησης στο μέσον της λωρίδας κυκλοφορίας.

Παράλληλα, έχει γίνει εκτεταμένη έρευνα σχετικά με τον παράγοντα της έντονης διαφοράς φωτεινότητας εντός και εκτός της οδικής σήραγγας (Zheng et al. 2017). Η δραστηριότητα της οδήγησης επιβαρύνεται από τις συνθήκες φωτισμού, καθώς φαινόμενα όπως θάμβωση ή της «μαύρης τρύπας» δυσχεραίνουν την ορατότητα του οδηγού. Η απότομη αυτή αλλαγή των συνθηκών του περιβάλλοντος καθιστούν απαιτητική διεργασία την είσοδο στη σήραγγα.

Παρατηρείται ότι ποσοστό των χρηστών βιώνει έντονη ανησυχία και άγχος κατά τη διέλευση από σήραγγες. Χαρακτηριστικά αυτή η κατηγορία των χρηστών περιγράφει το περιβάλλον των σηράγγων ως σκοτεινό, περιορισμένο, στενό, θορυβώδες και πολύπλοκο (PIARC 2008). Επιπροσθέτως, ορισμένοι οδηγοί φοβούνται ότι θα συγκρουστούν με κάποιο αντικείμενο ή άλλο όχημα και θα εμπλακούν σε επικίνδυνες καταστάσεις που περιλαμβάνουν τον κίνδυνο φωτιάς (Beard & Carvel 2005).



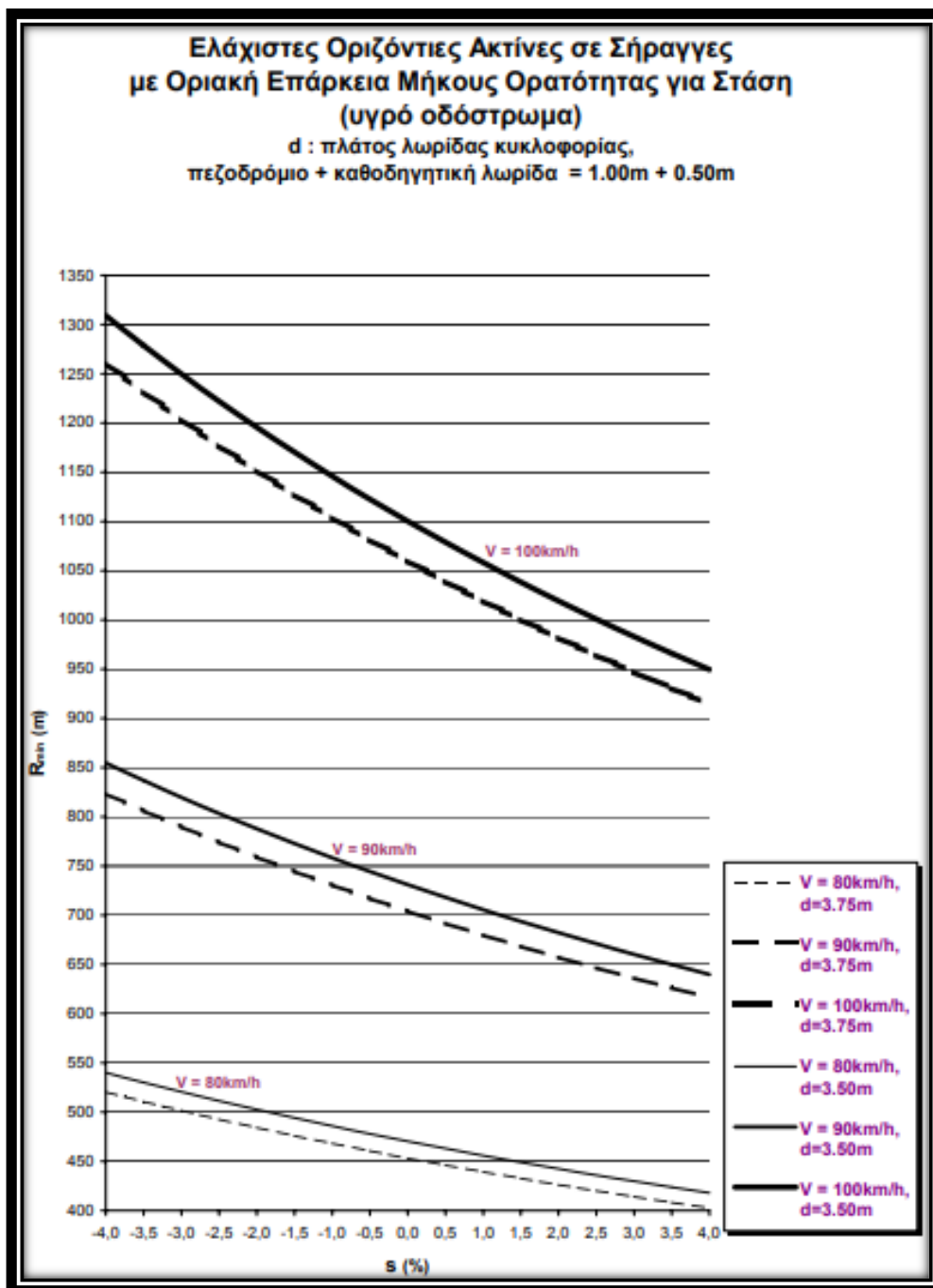
**Εικόνα 3.10:** Περιοχή εισόδου σε οδική σήραγγα

Μελέτες και στατιστικές δείχνουν μια αυξητική τάση στον αριθμό των οδικών ατυχημάτων σε εισόδους ή εξόδους σηράγγων (Yeung and Wong, 2014) η οποία βασίζεται στην αδυναμία έγκαιρης παρατήρησης και άρσης των κατάλληλων μέτρων διόρθωσης της οδικής συμπεριφοράς των οδηγών. Βάσει έρευνας (Pervez et al., 2020), παρατηρείται υψηλό ποσοστό προσκρούσεων μεταξύ του εμπρός και του πίσω άκρου των οχημάτων που οφείλεται κυρίως στην αδυναμία των οδηγών να διατηρήσουν μια ασφαλή απόσταση από το προπορευόμενο όχημα. Η κλίση του δρόμου επηρεάζει το οπτικό πεδίο των χρηστών, με αποτέλεσμα να μειώνουν ταχύτητα για να νιώθουν πιο ασφαλής (PIARC 2008b). Ωστόσο, οι απότομες επιβραδύνσεις αυξάνουν τον κίνδυνο νωτοπικών συγκρούσεων.

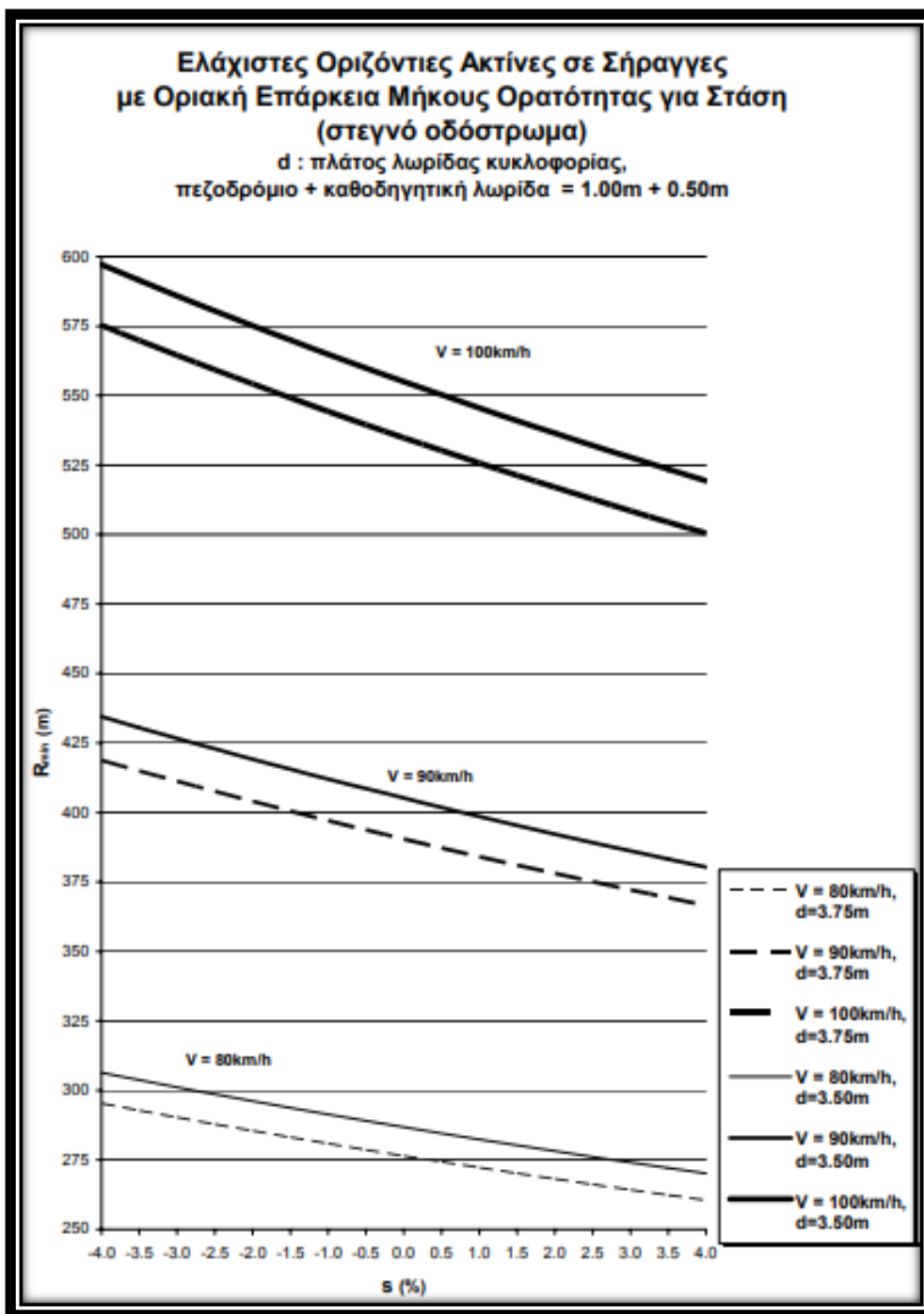
Η μελέτη χάραξης των οδικών σηράγγων πρέπει να εκπονείται σύμφωνα με τις Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων (ΟΜΟΕ-Χ, 2001). Η ταχύτητα μελέτης  $V_e$  πρέπει να εξισώνεται με το όριο ταχύτητας  $V_{επιτρ}$  και τη λειτουργική ταχύτητα  $V_{85}$ . Το όριο ταχύτητας σε σήραγγες κυμαίνεται από 80 έως 100 km/h. Για τον καθορισμό του ορίου ταχύτητας απαιτείται η ανάλυση του διατιθέμενου Μήκους Ορατότητας για Στάση σε κάθε θέση. Σημαντικό παράγοντα επιρροής της επάρκειας ορατότητας σε είσοδο σήραγγας αποτελεί η ακτίνα καμπυλότητας. Σχεδιασμός

με πολύ απότομες στροφές έχει ως συνέπεια την παρεμπόδιση της γραμμής όρασης από τους τοίχους αντιστήριξης της οδικής σήραγγας.

Στην Εικόνα 3.11 δίδονται οι προτεινόμενες κατά ΟΜΟΕ ελάχιστες οριζόντιες ακτίνες σε συνάρτηση με το διατιθέμενο ΜΟΣ οι οποίες αναφέρονται στα στόμια των σηράγγων (υγρό οδόστρωμα). Τα αποτελέσματα για στεγνό οδόστρωμα αποτυπώνονται στο Σχήμα.



Εικόνα 3.11: Διάγραμμα προσδιορισμού ελάχιστων ακτινών σχεδιασμού σηράγγων σε υγρό οδόστρωμα (ΟΜΟΕ-Χ, 2001)



**Εικόνα 3.12:** Διάγραμμα προσδιορισμού ελάχιστων ακτινών σχεδιασμού σηράγγων σε στεγνό οδόστρωμα (ΟΜΟΕ-Χ, 2001)

Το διατιθέμενο ΜΟΣ προκύπτει ως συνάρτηση της ταχύτητας μελέτης  $V$ , της κατά μήκος κλίσης  $s$ , του πλάτους λωρίδας  $d$  και του αθροίσματος πλάτους πεζοδρομίου και λωρίδας καθοδήγησης  $a$ . Τα αποτελέσματα προκύπτουν για ταχύτητες μελέτης 80,90,100 km/h, οι οποίες αποτελούν όρια ταχύτητας σε σήραγγα κατά ΟΜΟΕ-Χ 2001.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΔΙΑΧΩΡΙΣΤΙΚΟΥ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ

### 4.1 Εισαγωγή

Η πλειοψηφία των υπάρχουσών πρακτικών μελέτης της επάρκειας του Μήκους Ορατότητας για Στάση (SSD), βασίζονται σε διδιάστατα (2D) μοντέλα ανάλυσης. Πιο συγκεκριμένα, βασίζεται σε δύο ανεξάρτητα στάδια ανάλυσης, στην οριζοντιογραφία και στο προφίλ της μηκοτομής.

Αυτή η προσπάθεια ανάλυσης έχει ως αποτέλεσμα μια ελλιπή και αποσπασματική προσέγγιση στο πρόβλημα και μπορεί να οδηγήσει σε υποεκτίμηση ή υπερεκτίμηση του διαθέσιμου μήκους ορατότητας. Επιπλέον, η ανεπάρκεια της διδιάστατης ανάλυσης μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις στο κόστος κατασκευής και την απόδοση του αυτοκινητόδρομου, καθώς σε περιπτώσεις μη επαρκούς διατιθέμενου μήκους ορατότητας, οι συνήθεις λύσεις επικεντρώνονται στην αύξηση του πλάτους της εσωτερικής λωρίδας καθοδήγησης ή στη μείωση της επιτρεπόμενης ταχύτητας. Η επιλογή της δεύτερης λύσης είναι η πιο συνήθης στην Ευρώπη, λόγω της έλλειψης της διαθέσιμης γης (*Hassan et al, 1997*).

Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό ότι η ανάλυση με τη θεώρηση μη αλληλεπίδρασης του συνδυασμού οριζοντιογραφικής καμπύλης και μεταβλητής κατά μήκος κλίσης, μπορεί να συντελέσει τόσο σε υπερκοστολογημένες κατασκευές όσο, κυρίως, σε παραβιάσεις της οδικής ασφάλειας. Το γεγονός αυτό συμβαίνει είτε λόγω της χρήσης της διευρυμένης εσωτερικής λωρίδας καθοδήγησης από οχήματα (κυρίως μοτοσυκλέτες), είτε λόγω της σημαντικής μείωσης της επιτρεπόμενης ταχύτητας μεταξύ αυτοκινητόδρομου και σήραγγας (*Mavromatis et al, 2020*).

Βάσει των ανωτέρω κρίνεται επιβεβλημένη η υιοθέτηση μιας μεθοδολογίας που θα δίνει τη δυνατότητα διερεύνησης της επάρκειας μηκών ορατότητας για στάση λαμβάνοντας υπ' όψιν το συνδυασμό των χαράξεων οριζοντιογραφίας και μηκοτομής και την ακριβή επιρροή των συνιστωσών της τριβής στη δυναμική του οχήματος. Στο παρών κεφάλαιο παρουσιάζεται λεπτομερώς η διαδικασία ακριβούς καθορισμού των συνθηκών ορατότητας κατά την κίνηση οχήματος εντός καμπύλης οριζοντιογραφίας και κυρτού τόξου συναρμογής μηκοτομής, στο υπολογιστικό περιβάλλον του προγράμματος Matlab.

### 4.2 Μεθοδολογία

#### 4.2.1 Υπολογισμός απαιτούμενου μήκους ορατότητας για στάση

Για τον ακριβή υπολογισμό του Μήκους Ορατότητας για Στάση (SSD) σε περίπτωση ταυτόχρονης αριστερής στροφής και κυρτής μηκοτομής απαιτείται μια επαναληπτική διαδικασία προσδιορισμού της θέσης και της ταχύτητας του οχήματος. Χρησιμοποιώντας τους Γερμανικούς κανονισμούς RAA-2008 για τις μαθηματικές σχέσεις υπολογισμού του SSD και του συντελεστή εφασπτομενικής τριβής  $f_T$  (απομειωμένου λόγω πλευρικής τριβής) και εφαρμόζοντας τους νόμους της δυναμικής, καταλήγουμε στις παρακάτω επαναληπτικές σχέσεις:

- $V_{i+1} = V_i - g * (f_T + s) * t$
- $BD_i = V_i * t - \frac{1}{2} * g * (f_T + s) * t^2$

όπου:

- $V_i$  = ταχύτητα οχήματος στη θέση  $i$
- $V_{i+1}$  = ταχύτητα οχήματος στη θέση  $i+1$
- $BD_i$  = διανυόμενη απόσταση οχήματος κατά την πέδηση
- $t$  = χρονικό βήμα υπολογισμού ( $t=0,01$  sec)
- $f_T$  = συντελεστής εφαστομενικής τριβής
- $g$  = επιτάχυνση της βαρύτητας
- $s$  = κατά μήκος κλίση της οδού (%/100) [(+) για ανηφόρα, (-) για κατηφόρα]

Με εφαρμογή των παραπάνω εξισώσεων καταλήγουμε σε μια θέση  $i=k$  της τροχιάς του οχήματος στην οποία η ταχύτητα του γίνεται μηδενική ( $V_k=0$ ). Είναι προφανές ότι το άθροισμα των υπολογισμένων διανυόμενων αποστάσεων του οχήματος έως τη θέση  $k$  θα ισούται με το συνολικό απαιτούμενο μήκος πέδησης του οχήματος.

$$V_k = 0 \Leftrightarrow SSD_{req} = S_\delta + S_T = V_0 * t + \sum_{i=1}^k BD_i$$

όπου:

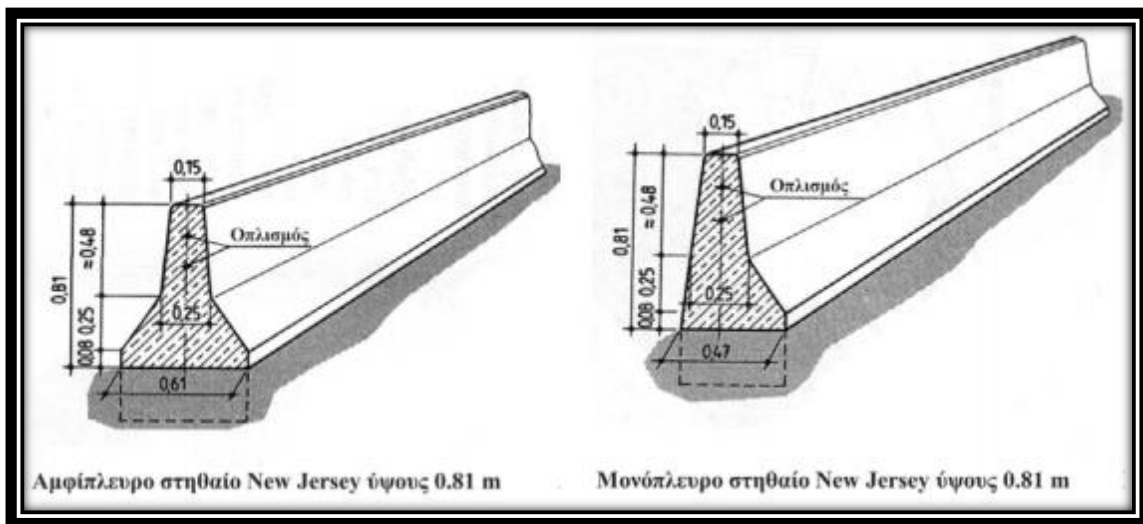
- $V_0$  = αρχική ταχύτητα οχήματος
- $t$  = χρόνος αντίδρασης οδηγού [ $t=2$  sec (RAA, 2008)]

Μέσω της διαδικασίας αυτής επιτυγχάνεται ο λεπτομερής υπολογισμός του ελάχιστου μήκους ορατότητας για στάση που απαιτείται σε κάθε χιλιομετρική θέση μελέτης, εφόσον είναι γνωστή η τρισδιάστατη (3-D) γεωμετρία του οδικού άξονα και η σχετική θέση της αρχής της τροχιάς του οχήματος εντός αυτής.

#### 4.2.2 Υπολογισμός μήκους γραμμής όρασης

Η γραμμή όρασης ορίζεται ως το ευθύγραμμο τμήμα μεταξύ του οφθαλμού του οδηγού και του προπορευόμενου οχήματος που βρίσκεται στην ίδια τροχιά με τον οδηγό. Όταν η γραμμή όρασης δεν παρεμποδίζεται από κάποιο άλλο φυσικό ή δομικό εμπόδιο, τότε αποτελεί τη χορδή του τόξου με μήκος όσο η απόσταση των δύο οχημάτων, που στην κρίσιμη περίπτωση ισούται με το απαιτούμενο μήκος ορατότητας για στάση SSD.

Σε περιπτώσεις κυρτού τόξου συναρμογής και αριστερής καμπύλης είναι πιθανή η διακοπή του μήκους ορατότητας από το διαχωριστικό κυκλοφορίας (New Jersey), κυρίως για οχήματα που χρησιμοποιούν την αριστερή λωρίδα ταχείας κυκλοφορίας. Λαμβάνοντας υπ' όψιν το ύψος της τυπικής διατομής του New Jersey σε 0,81m και του ύψους οφθαλμού του οδηγού σε 1m, είναι προφανές ότι το διαχωριστικό δεν αποτελεί εμπόδιο ορατότητας σε τμήματα αυτοκινητόδρομου σταθερής κατά μήκος κλίσης, καθώς η γραμμή όρασης θα βρίσκεται πάντα πάνω από το ύψος του διαχωριστικού.



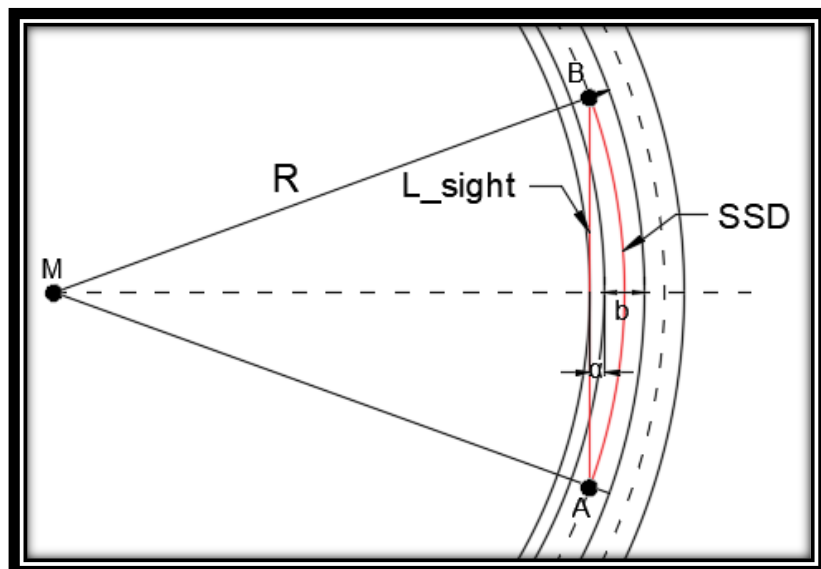
**Εικόνα 4.1:** Τυπικές διατομές στηθαίων New Jersey

Προκειμένου να επιτευχθεί ο υπολογισμός του μήκους της γραμμής όρασης, είναι ανάγκη να καθοριστεί η κλίση αυτής, η οποία εξαρτάται από την υψομετρική διαφορά μεταξύ των σημείων αρχής και τέλους της τροχιάς του οχήματος εντός της κυρτής κατακόρυφης χάραξης. Η υψομετρική αυτή διαφορά υπολογίζεται ως παράμετρος του απαιτούμενου μήκους ορατότητας για στάση, της ακτίνας του τόξου συναρμογής και της σχετικής θέσης του οχήματος ως προς την κορυφή της κυρτής καμπύλης.

Θεωρώντας γνωστή την ακτίνα καμπυλότητας, το μήκος SSD, καθώς και το πλάτος της λωρίδας κυκλοφορίας καθώς και της εσωτερικής λωρίδας καθοδήγησης, υπολογίζεται το μήκος της γραμμής όρασης στο οριζόντιο επίπεδο μέσω της παρακάτω μαθηματικής σχέσης:

$$L_{sight} = 2 * \sin\left(\frac{SSD}{2 * \left(R - \frac{b}{2}\right)}\right) * \left(R - \frac{b}{2}\right)$$

Η γεωμετρία του προβλήματος γίνεται περισσότερο κατανοητή στην εικόνα:



**Εικόνα 4.2:** Γράφημα προσδιορισμού SSD σε αριστερή στροφή σταθερής διατομής

όπου:

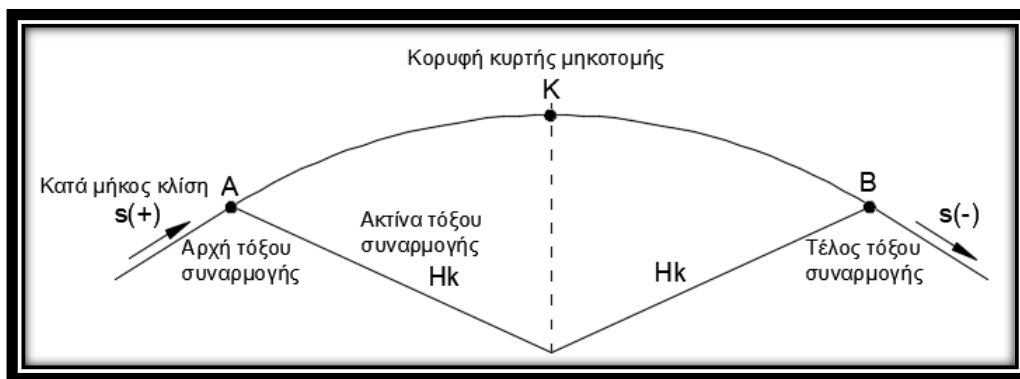


R	= ακτίνα της καμπυλότητας
b	= πλάτος λωρίδας κυκλοφορίας
$\alpha$	= πλάτος εσωτερικής λωρίδας καθοδήγησης
SSD	= μήκος ορατότητας για στάση
$L_{sight}$	= μήκος γραμμής όρασης
A	= Θέση οφθαλμού οδηγού
B	= Θέση εμποδίου
M	= κέντρο της αριστερής στροφής

Να σημειωθεί πως για την παραπάνω σχέση η ακτίνα καμπυλότητας R έχει οριστεί από το σημείο M έως τη δεξιά οριογραμμή της αριστερής λωρίδας κυκλοφορίας.

Για τον υπολογισμό της κλίσης της γραμμής όρασης  $S_{sight}$  σε τρισδιάστατες συνθήκες λόγω της ύπαρξης κυρτού τόξου συναρμογής απαιτείται ο υπολογισμός της υψομετρικής διαφοράς μεταξύ των θέσεων αρχής και τέλους της τροχιάς πάνω στη μεταβλητή κατακόρυφη χάραξη.

Έχοντας ως δεδομένα την κατά μήκος κλίση πριν και μετά το τόξο συναρμογής (θεώρηση συμμετρικής κλίσης), την ακτίνα του  $H_k$  και το χιλιομετρική απόσταση μεταξύ των σημείων αρχής και τέλους της καμπυλότητας, μπορεί να υπολογισθεί η υψομετρική διαφορά σε οποιαδήποτε θέση ελέγχου, εφόσον είναι γνωστό το απαιτούμενο μήκος ορατότητας για στάση SSD.



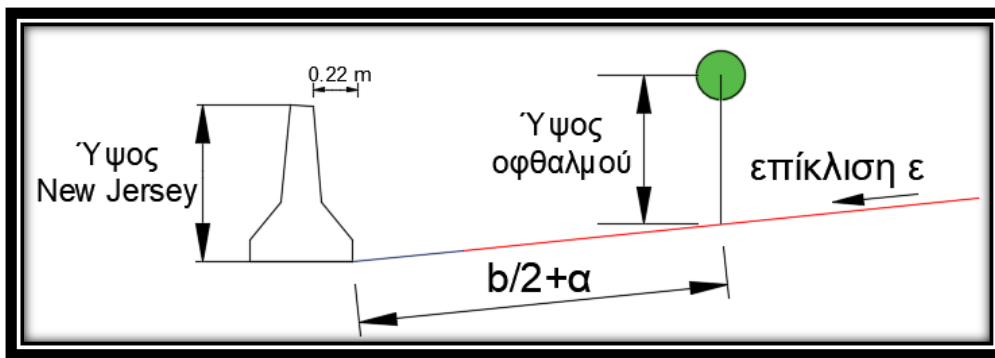
**Εικόνα 4.3:** Γράφημα κυρτής μηκοτομής

Η κλίση της γραμμής όρασης  $S_{sight}$  υπολογίζεται εύκολα διαιρώντας την παραπάνω υψομετρική διαφορά ( $Dy$ ) προς το μήκος της γραμμής όρασης  $L_{sight}$ .

#### 4.2.3 Υπολογισμός ύψους διαχωριστικού κυκλοφορίας και γραμμής όρασης σε κάθε χιλιομετρική θέση

Η ανάλυση επάρκειας ορατότητας αυτοκινητοδρόμου σε σύνθετη περίπτωση χάραξης με μεταβλητή κατά μήκος κλίση βασίζεται στον έλεγχο δύο μεγεθών, του ύψους του διαχωριστικού κυκλοφορίας (New Jersey) και του ύψους της γραμμής όρασης. Η σύγκριση των δύο παραπάνω παραμέτρων είναι κρίσιμη για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με το επίπεδο της οδικής ασφάλειας όσον αφορά την επάρκεια ορατότητας.

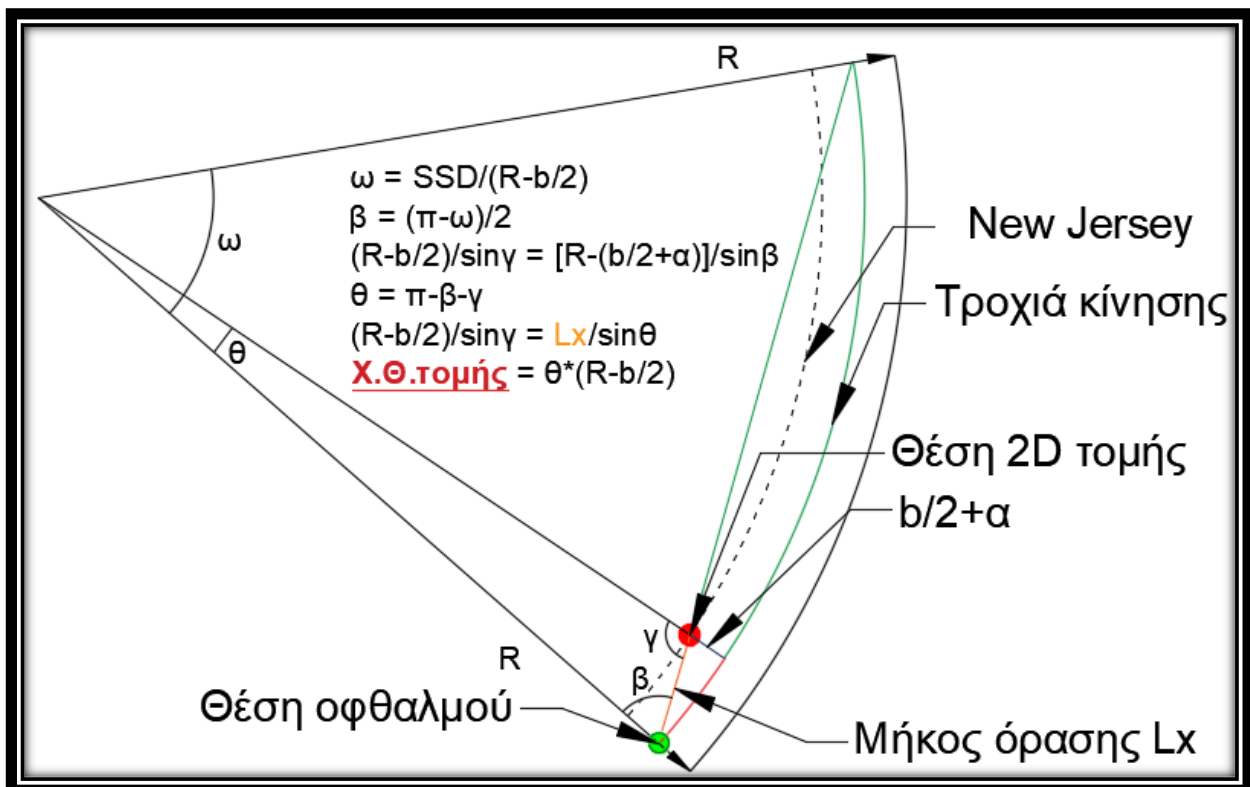
Για τον ακριβή υπολογισμό των σχετικών υψομέτρων είναι απαραίτητη η γνώση των διαστάσεων της διατομής του αυτοκινητόδρομου, καθώς και η επίκλιση του οδοστρώματος που απαιτείται για την αριστερή καμπύλη. Επιπλέον, πρέπει να οριστεί το ύψος οφθαλμών καθώς και το ύψος του New Jersey.



**Εικόνα 4.4:** Σχετική θέση οφθαλμού και στηθαίου New Jersey σε αριστερή στροφή

Για κάθε χιλιομετρική θέση ανάλυσης θα υπάρχει ένα ελάχιστο μήκος ορατότητας  $L_x$ , το οποίο ορίζει την απόσταση μεταξύ του οφθαλμού του οδηγού και του νοητού σημείου τομής (σε οριζόντιο επίπεδο) της γραμμής όρασης και του διαχωριστικού κυκλοφορίας New Jersey. Το τμήμα αυτό θα είναι πάντα ελεύθερο οπτικών εμποδίων συνεπώς δεν έχει νόημα η ακριβής ανάλυση και η σύγκριση μεταξύ των υψομέτρων των δύο μεγεθών εντός αυτού.

Στην εικόνα 4.5 παρουσιάζεται το εν λόγω τμήμα ανεμπόδισης ορατότητας καθώς και η διαδικασία υπολογισμού του μήκους  $L_x$  και της αντίστοιχης χιλιομετρικής θέσης τομής στην τροχιά κίνησης του οχήματος.



**Εικόνα 4.5:** Γεωμετρία και μεθοδολογία προσδιορισμού του ανεμπόδιστου μήκους ορατότητας  $L_x$  σε αριστερή στροφή

Για την ανάλυση στο υπόλοιπο τμήμα της γραμμής όρασης γίνεται ταυτόχρονος υπολογισμός του υψομέτρου της γραμμής όρασης και του υψομέτρου του διαχωριστικού κυκλοφορίας σε κάθε χιλιομετρική θέση μέσω επαναληπτικής μεθόδου με χωρικό βήμα υπολογισμού της τάξης των 0.01 m. Ορατότητα υπάρχει όσο επαληθεύεται η σχέση:

$$H_{sightline} \geq H_{new\ jersey}$$

Συνεπώς, η μέθοδος αυτή δίνει τη δυνατότητα ακριβούς καθορισμού της θέσης διακοπής ορατότητας καθώς και της μέγιστης υψομετρικής διαφοράς των δύο παραπάνω μεγεθών σε όλο το τμήμα ανάλυσης, σε οποιαδήποτε περίπτωση γεωμετρικής χάραξης με αριστερή στροφή και κυρτό τόξο συναρμογής.

### 4.3 Εφαρμογή επιρροής εντός κυρτής μηκοτομής

#### 4.3.1 Παράδειγμα ανάλυσης

Σύμφωνα με τις Γερμανικές οδηγίες σχεδιασμού RAA-2008, τίθενται συγκεκριμένες γεωμετρικές απαιτήσεις για κάθε κατηγορία αυτοκινητόδρομου. Συγκεκριμένα, για ταχύτητα μελέτης  $V=130$  km/h (κλάση σχεδιασμού EKA 1 A), το εύρος της επιτρεπόμενης κατά μήκος κλίσης  $s$  ορίζεται σε  $\pm 4\%$ .

Η ακτίνα του κατακόρυφου κυρτού τόξου συναρμογής  $H_k$  λαμβάνει ως ελάχιστη τιμή τα 13.000 m, ενώ η ακτίνα κυκλικής καμπύλης οριζοντιογραφίας  $R$  κυμαίνεται μεταξύ 900 και 3.000 m για επίκλιση  $\epsilon$  ίση με 6% και 2,5% αντίστοιχα.

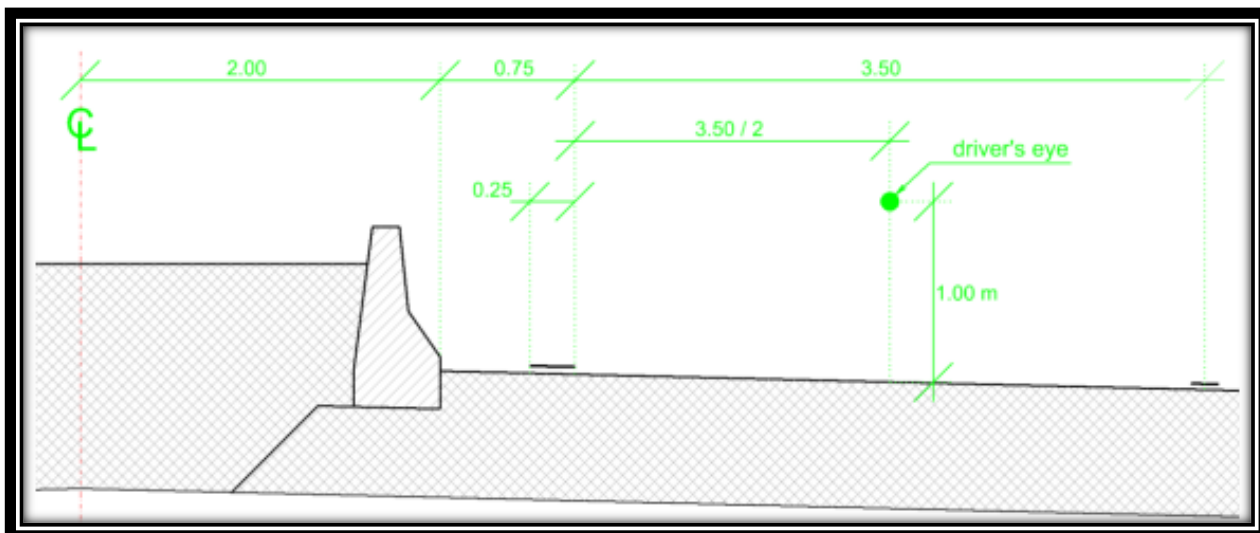
Για την ανάλυση επιλέχθηκε παράδειγμα μελέτης με τα εξής γεωμετρικά στοιχεία:

- $R=1.500$  m
- $H_k=13.000$  m
- $V=130$  km/h
- $S= +4\%$  (ανωφέρεια),  $-4\%$  (κατωφέρεια)
- $\epsilon=5\%$
- Χ.Θ αρχής τόξου συναρμογής: 1480 m
- Χ.Θ τέλους τόξου συναρμογής: 2520 m

Ως θέσεις ελέγχου επιλέχθηκαν οι χιλιομετρικές θέσεις 1200m έως 2500m με υπολογιστικό βήμα 100m. Σύμφωνα με τους Γερμανικούς κανονισμούς σχεδιασμού RAA-2008, επιλέγεται ρυθμός επιβράδυνσης οχήματος  $a=3,7$  m/sec<sup>2</sup> και χρόνος αντίδρασης οδηγού  $t=2$  sec.

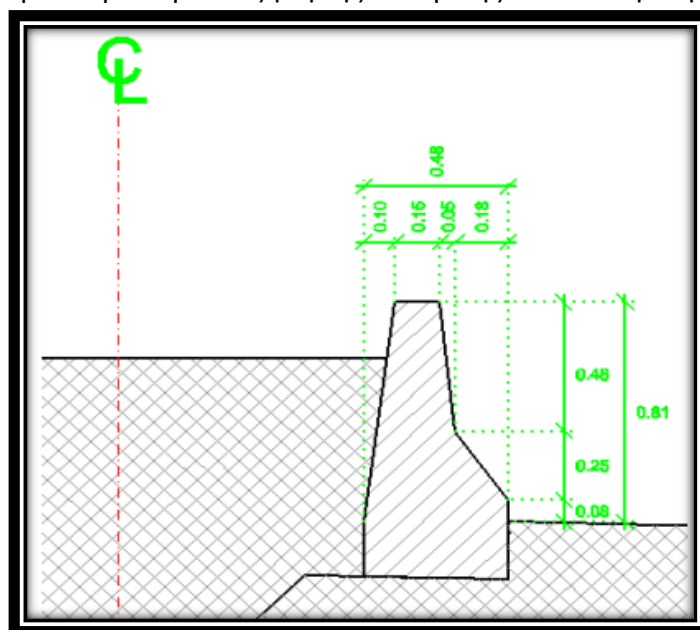
Η διατομή του υπό μελέτη αυτοκινητόδρομου αποτελείται από λωρίδα ταχείας κυκλοφορίας πλάτους 3,50m και πλευρική απόσταση μεταξύ της αριστερής οριογραμμής της λωρίδας κυκλοφορίας και της βάσης του διαχωριστικού κυκλοφορίας New Jersey ίση με 0,75m. Η πλευρική απόσταση τόσο του οδηγού όσο και του εμποδίου από την οριογραμμή της λωρίδας κυκλοφορίας θεωρήθηκε να ληφθεί ίση με το ήμισυ του πλάτους της (1,75m).

Το ύψος οφθαλμού και το ύψος εμποδίου θεωρήθηκαν κοινά και ίσα με 1,00m, τιμή που αποτελεί μια συντηρητική παραδοχή καθώς το μέσο ύψος οφθαλμού του οδηγού είναι υψηλότερο του ενός μέτρου, ανεξαρτητως φύλου ή μεγέθους οχήματος (Caraldo, 2012). Στην εικόνα παρουσιάζεται γραφική απεικόνιση της διατομής ελέγχου.



Εικόνα 4.6: Γράφημα διατομής αυτοκινητόδρομου για το παράδειγμα ανάλυσης

Για τον καθορισμό της επάρκειας ορατότητας λήφθηκε τιμή του ύψους του διαχωριστικού κυκλοφορίας New Jersey ίσο με 0,90m, το οποίο προκύπτει από το ύψος της τυπικής διατομής του (0,81m – AASHTO), προσαυξημένο κατά ένα περιθώριο ασφαλείας ώστε να συμπεριληφθούν πιθανές κατασκευαστικές αποκλίσεις ή ύπαρξη βλάστησης. Η γεωμετρία του στηθαίου δημιουργεί μια περαιτέρω αύξηση της πλευρικής απόστασης στην κορυφή κατά 0.23m.



Εικόνα 4.7: Γεωμετρία και διαστάσεις στηθαίου New Jersey

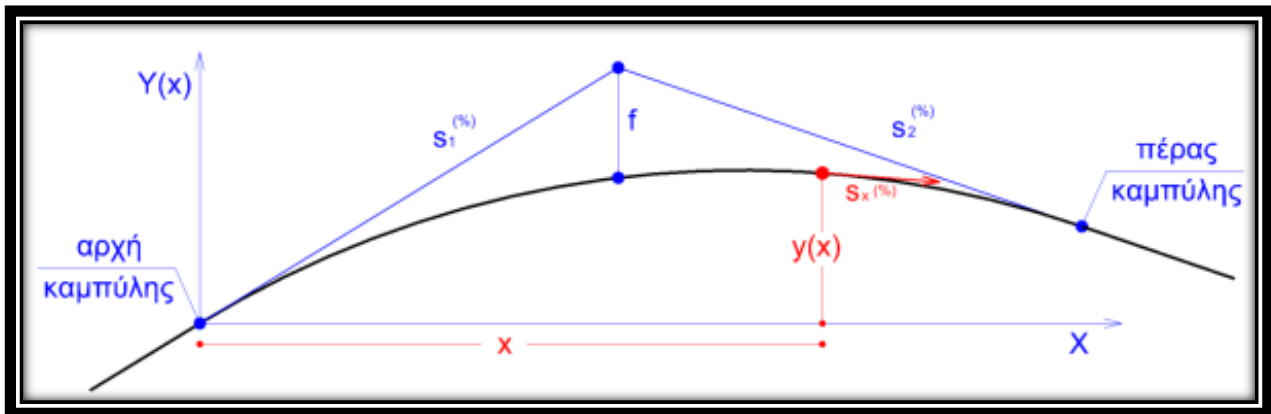
#### 4.3.2 Σύνταξη κώδικα στο πρόγραμμα Oktave

Η διαδικασία προσδιορισμού της κατάστασης ορατότητας για κάθε χιλιομετρική θέση του υπό μελέτη παραδείγματος, χωρίστηκε σε επιμέρους υπολογισμούς. Αρχικά, δημιουργήθηκε αλγόριθμος υπολογισμού του μήκους του οδικού τμήματος που απαιτείται ώστε ο χρήστης να ακινητοποιήσει πλήρως το όχημα του. Για τον υπολογισμό ακολουθήθηκε μια επαναληπτική μέθοδος καθορισμού της θέσης και της ταχύτητας του οχήματος εντός της σύνθετης χάραξης όσον αφορά την οριζοντιογραφία και τη μηκοτομή.

Με δεδομένο το απαιτούμενο Μήκος Ορατότητας για Στάση (SSD) σε κάθε θέση μελέτης, καθορίστηκε η υψομετρική διαφορά της θέσης αρχής και τέλους της τροχιάς του οχήματος εντός του κυρτού τόξου συναρμογής. Σε συνδυασμό με τον υπολογισμό του μήκους της ευθείας γραμμής όρασης, υπολογίστηκε η κατά μήκος κλίση της και έγινε σύγκριση μεταξύ του ύψους αυτής και του διαχωριστικού κυκλοφορίας σε όλο το μήκος πέδησης του οχήματος με χωρικό βήμα υπολογισμού 1cm.

#### 4.3.3 Αλγόριθμος υπολογισμού SSD

Οι θέσεις ελέγχου αποτελούν τις θέσεις στις οποίες ο οδηγός λαμβάνει την πληροφορία ύπαρξης εμποδίου στο τμήμα του αυτοκινητόδρομου στο οποίο καλείται να εισέλθει. Θέτοντας ως χρόνο αντίδρασης  $t=2$  sec (RAA) υπολογίζεται η χιλιομετρική θέση στην οποία εντέλει ξεκινά η πέδηση του οχήματος. Στη θέση αυτή το οδόστρωμα έχει μια αρχική κατά μήκος κλίση ( $s_1$ ) η οποία πρέπει να υπολογιστεί ώστε να εφαρμοστεί με ακρίβεια η παράμετρος επιρροής της τριβής στη δυναμική του οχήματος.



**Εικόνα 4.8:** : Γεωμετρία κυρτού τόξου συναρμογής μηκοτομής (Σ. Μαυρομάτης, «Γεωμετρικός Σχεδιασμών Οδών»)

Η κατά μήκος κλίση στη θέση αρχής της πέδησης ισούται με:

$$S_1 = S_{αρχ} - \frac{dx}{H_k}$$

Στην περίπτωση όπου η θέση εκκίνησης της διαδικασίας πέδησης βρίσκεται εκτός του τόξου συναρμογής, η κατά μήκος κλίση της οδού στη θέση αυτή θα ισούται με +4% ή -4%, αν βρισκόμαστε πριν ή μετά από αυτό αντίστοιχα. Ως μήκος  $dx$  ορίζεται η απόσταση μεταξύ της θέσης αρχής της κυρτής καμπύλης μηκοτομής και της θέσης εκκίνησης της διαδικασίας πέδησης.

```

1  % ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ SSD
2  clear; clc; close all;
3  a=3.7; % Επιβράδυνση κατά RAA σε m/sec^2
4  g=9.81; % Επιτάχυνση της βαρύτητας
5  Varx=130/3.6; % Ταχύτητα σχεδιασμού σε m/sec
6  V=Varx;
7  R=1500; % Ακτίνα Οριζοντιογραφίας
8  Hk=13000; % Τόξο συναρμογής
9  b=3.50/2; % Ημιπλάτος λωρίδας
10 s=0.04; % Αρχική κατά μήκος κλίση - 4% ανωφέρεια
11 e=0.05; % Επίκλιση
12 thesi= 2500 % Χιλιομετρική θέση υπο μελέτη
13 arxi_toksou= 1480 % Χιλιομετρική θέσης αρχής του τόξου στρογγύλευσης
14 dx=2*Varx % Διανυόμενη απόσταση λόγω καθυστέρησης αντίδρασης
15 diafora=arxi_toksou-(thesi+dx);
16 if diafora<0 % Υπολογισμός της αρχικής κατά μήκος κλίσης σε περίπτωση
17   s=s+diafora*cos(atan(s))/Hk; % που βρίσκομαι εντός του τόξου στρογγύλευσης
18 end
19 if s<-0.04
20   s=-0.04
21 end
22 s1=s

```

**Εικόνα 4.9:** Αλγόριθμος Oktave: Εισαγωγή δεδομένων εισόδου και υπολογισμός αρχικής κατά μήκος κλίσης  $s_1$

Για την αρχική ταχύτητα σχεδιασμού υπολογίζεται η επιρροή της εφαπτομενικής τριβής στο όχημα (απομειωμένης λόγω συνύπαρξης πλευρικής τριβής στην αριστερή καμπύλη). Μορφώνεται επαναληπτική συνάρτηση (μορφής “while”) που τερματίζεται τη στιγμή του μηδενισμού της ταχύτητας του οχήματος. Εντός αυτής υπολογίζεται η απόσταση που διανύει το όχημα σε κάθε χρονικό βήμα  $t=0,01$  sec, καθώς και η απομείωση της ταχύτητας και της εφαπτομενικής τριβής. Σε κάθε επανάληψη καθορίζεται η νέα θέση του οχήματος και η αντίστοιχη κατά μήκος κλίση της οδού στη θέση αυτή με τη διαδικασία που αναλύθηκε προηγουμένως.

Το απαιτούμενο Μήκος Ορατότητας για Στάση SSD υπολογίζεται ως το άθροισμα των διανυόμενων αποστάσεων εντός της κυρτής μηκοτομής και του μήκους αντίδρασης του οδηγού.

```

23 fT1=a/g % Υπολογισμός εφαπτομενικής τριβής fT
24 fT=sqrt((a/g)^2-(V^2/(g*R)-e)^2) % Απομείωση λόγω πλευρικής τριβής fR
25 sumBD=0;
26 t=0;
27 while V>0 % Η επανάληψη σταματάει όταν μηδενιστεί η ταχύτητα
28   t=t+0.01; % Χρονικό βήμα
29   V=V-g*(fT+s)*0.01; % Απομείωση της ταχύτητας
30   fT=sqrt((a/g)^2-(V^2/g/R-e)^2); % Υπολογισμός fT
31   BD=V.*0.01-0.5*g*(fT+s)*(0.01^2); % Διανυόμενη απόσταση
32   sumBD=sumBD+BD;
33   X=BD*cos(atan(s)); % Οριζόντια συνιστώσα της διανυόμενης απόστασης
34   xlm_thesi=thesi+dx+sumBD;
35   if xlm_thesi>arxi_toksou
36     s=s-X/Hk; % Αλλαγή κατά μήκος κλίσης σε χρονικό βήμα t=0,01 sec
37     if s<-0.04
38       s=-0.04; % Θέτω κάτω όριο της κατά μήκος κλίσης ίσο με s= -4%
39     end
40   end
41 end
42 t_antidrasis=2; % Χρόνος αντίδρασης κατά RAA σε sec
43 SSD=Varx*t_antidrasis+sumBD % Αποτέλεσμα SSD

```

**Εικόνα 4.10:** Αλγόριθμος Oktave: Διαδικασία υπολογισμού του απαιτούμενου SSD

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών απαιτούμενου μήκους ορατότητας SSD σε κάθε θέση μελέτης φαίνονται στον πίνακα 6.7. Είναι προφανές ότι λόγω της μείωσης της κατά μήκος κλίσης κατά τη διάρκεια κίνησης εντός της κυρτής καμπύλης μηκοτομής, το μήκος SSD αυξάνεται.

Χ.Θ (m)	SSD (m)
<b>1200</b>	231,5
<b>1300</b>	231,8
<b>1400</b>	233,7
<b>1500</b>	236,9
<b>1600</b>	240,1
<b>1700</b>	243,5
<b>1800</b>	247,1
<b>1900</b>	250,7
<b>2000</b>	254,6
<b>2100</b>	258,6
<b>2200</b>	262,8
<b>2300</b>	267,0
<b>2400</b>	269,3
<b>2500</b>	269,5

**Πίνακας 4.1:** Αποτελέσματα απαιτούμενου μήκους SSD για κάθε θέση μελέτης

#### 4.3.4 Αλγόριθμος υπολογισμού υψομετρικής διαφοράς

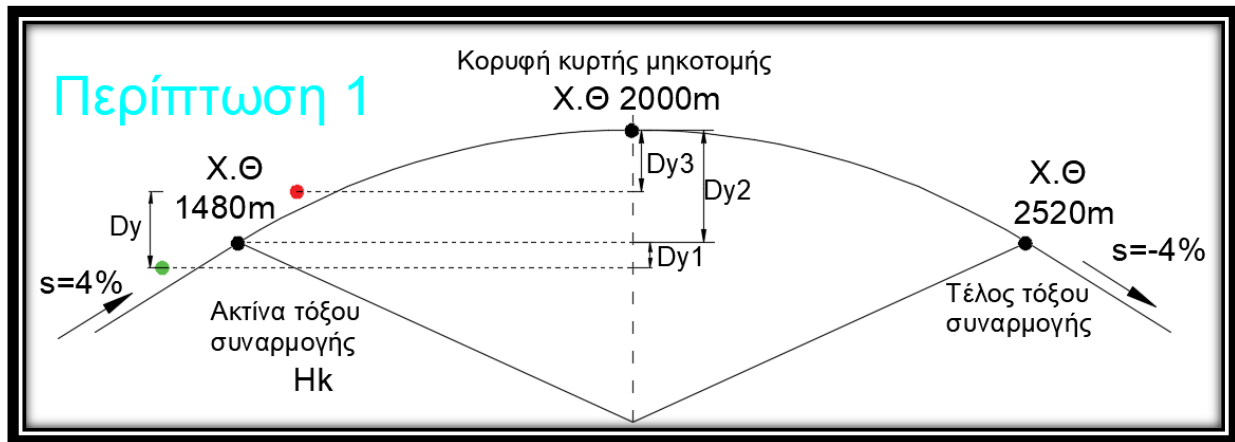
Η διαδικασία που έπεται του υπολογισμού του συνολικού διανυόμενου μήκους του οχήματος εντός της καμπύλης τροχιάς έως τον μηδενισμό της ταχύτητας του, είναι αυτή του καθορισμού της συνολικής υψομετρικής διαφοράς μεταξύ αρχής και τέλους της τροχιάς του οχήματος εντός της κυρτής μηκοτομής. Ο καθορισμός της παραμέτρου αυτής είναι απαραίτητος για τον υπολογισμό της κατά μήκος κλίσης της γραμμής όρασης και της μετέπειτα ανάλυσης της επάρκειας του μήκους ορατότητας για κάθε θέση μελέτης.

Έχοντας ορίσει τρεις θέσεις καθορισμού του κυρτού τόξου συναρμογής (σημαίες) στις θέσεις αρχής και τέλους του (Στ. 1480m έως 2520m), μπορεί να υπολογιστεί η θέση της κορυφής του εφόσον έχει θεωρηθεί συμμετρική κατά μήκος κλίση σε ανωφέρεια και κατωφέρεια ( $\pm 4\%$ ). Η χιλιομετρική θέση της κορυφής θα είναι στο μέσον του παραδείγματος ανάλυσης και συγκεκριμένα η θέση:

$$X. \theta_K = \frac{1480 + 2520}{2} = 2000m$$

Βάσει των τριών σημαιών διαχωρίζεται το πρόβλημα υπολογισμού της υψομετρικής διαφοράς  $Dy$  σε 5 περιπτώσεις, ανάλογα τη σχετική θέση της αρχής και του τέλους της τροχιάς του οχήματος ως προς τα τρία σημεία του τόξου συναρμογής.

Περίπτωση 1: Η θέση μελέτης βρίσκεται πριν τη χιλιομετρική θέση αρχής του τόξου συναρμογής ( $X_{\text{μελέτης}} < 1480\text{m}$ ). Στην περίπτωση αυτή ένα τμήμα του μήκους SSD βρίσκεται σε περιοχή σταθερής κατά μήκος κλίσης (ανωφέρεια 4%) και το υπόλοιπο βρίσκεται εντός του τόξου συναρμογής της κατακόρυφης χάραξης. Ο υπολογισμός της συνολικής υψομετρικής διαφοράς  $Dy$  ανάγεται στον καθορισμό τριών επιμέρους τμημάτων όπως φαίνεται στην εικόνα 6.9:



Εικόνα 4.11: Γεωμετρία υπολογισμού υψομετρικής διαφοράς (Περίπτωση 1)

Η υψομετρική διαφορά υπολογίζεται ως:

$$Dy = Dy1 + Dy2 - Dy3$$

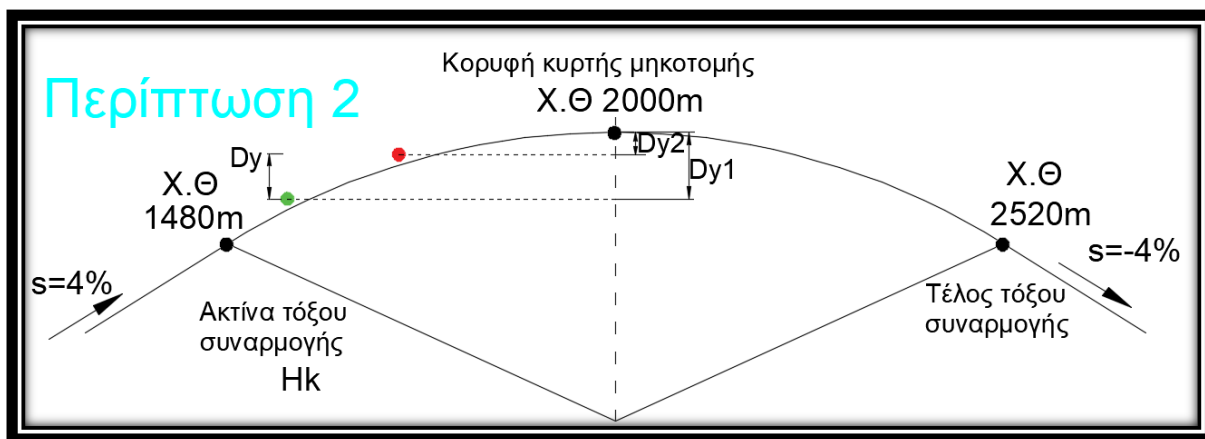
Στην περίπτωση αυτή εντάσσονται τρεις θέσεις ελέγχου (1200m-1300m-1400m) οι οποίες έχουν χιλιομετρική θέση μικρότερη από αυτή της αρχής του τόξου συναρμογής. Για τη θέση 1200m το μήκος κίνησης βρίσκεται εξ' ολοκλήρου εκτός του τόξου συναρμογής ( $1200 + \text{SSD} < 1480$ ), συνεπώς για τη συγκεκριμένη θέση η υψομετρική διαφορά  $Dy$  ισούται με το τμήμα  $Dy1$ .

Περίπτωση 2: Η θέση αρχής και τέλους της τροχιάς του οχήματος βρίσκονται μεταξύ της αρχής και της κορυφής του τόξου συναρμογής. Λαμβάνοντας ως σημείο αναφοράς την κορυφή της μηκοτομής ( $X_{\text{Θ}} = 2000\text{m}$ ) υπολογίζουμε δύο τμήματα υψομετρικής διαφοράς  $Dy1$  και  $Dy2$  από τη θέση αρχής και από τη θέση τέλους της κίνησης του οχήματος αντίστοιχα. Η υψομετρική διαφορά υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση και φαίνεται στην εικόνα 6.10:

$$Dy = Dy1 - Dy2$$

Η σχέση αυτή ανταποκρίνεται και στις περιπτώσεις 3 και 4.





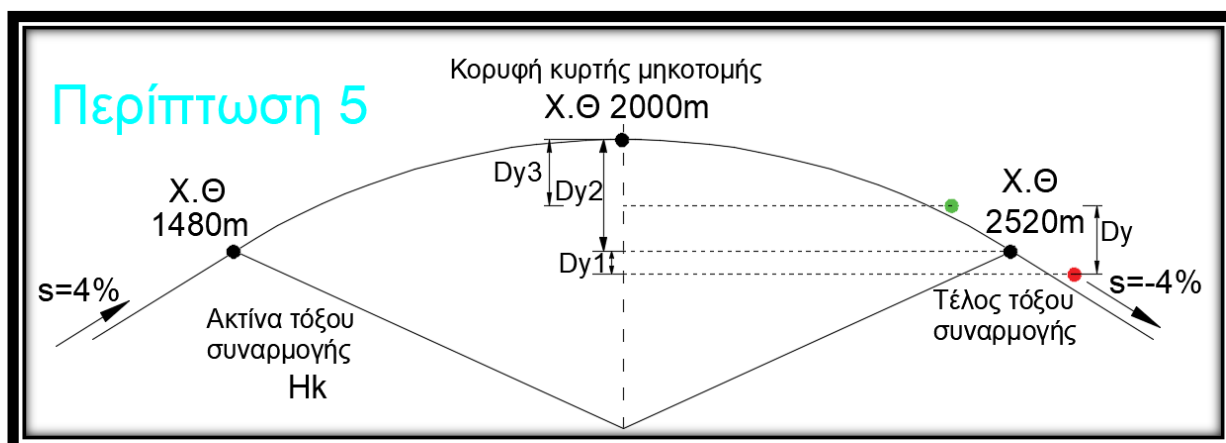
Εικόνα 4.12: Γεωμετρία υπολογισμού υψομετρικής διαφοράς (Περίπτωση 2)

Η περίπτωση 3 αφορά θέσεις μελέτης στις οποίες η αρχή της τροχιάς βρίσκεται πριν τη σημαία της Χ.Θ 2000, ενώ η θέση τέλους βρίσκεται μετά ( $X.Θ_{μελέτης} < 2000m$ ,  $X.Θ_{μελέτης} + SSD > 2000m$ ). Το πρόσημο της υψομετρικής διαφοράς  $Dy$  (άρα και της κλίσης της ευθείας γραμμής όρασης) εξαρτάται από το ποιο εκ των δύο επιμέρους τμημάτων  $Dy1, Dy2$  είναι μεγαλύτερο.

Η περίπτωση 4 σχετίζεται με θέσεις μελέτης στις οποίες ολόκληρη η τροχιά κίνησης του οχήματος βρίσκεται μεταξύ της κορυφής και του τέλους του τόξου συναρμογής. Ισχύει η ίδια μεθοδολογία με την περίπτωση 2 ( $Dy$  αρνητικό αφού  $Dy2 > Dy1$ ).

Περίπτωση 5: Οι θέσεις αρχής και τέλους της τροχιάς του οχήματος βρίσκονται εκατέρωθεν της Χ.Θ. 2520m. Όπως και στην περίπτωση 1, ο υπολογισμός ανάγεται στον καθορισμό τριών επιμέρους τμημάτων διαφοράς υψομέτρων, με το ένα εκ των τριών τμημάτων να αφορά κίνηση σε σταθερή κατά μήκος κλίση (κατωφέρεια 4%) Η συνολική υψομετρική διαφορά υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση και παρουσιάζεται στην εικόνα 6.11:

$$Dy = Dy - Dy2 - Dy1$$



Εικόνα 4.13: Γεωμετρία υπολογισμού υψομετρικής διαφοράς (Περίπτωση 5)

Βάσει της παραπάνω ανάλυσης γίνεται εφικτός ο υπολογισμός της υψομετρικής διαφοράς μεταξύ δύο οποιονδήποτε σημείων αρχής και τέλους της πορείας του οχήματος εντός της κυρτής καμπύλης μηκοτομής. Ο καθορισμός τους είναι αναγκαίος για τον υπολογισμό της κατά μήκος κλίσης της ευθείας όρασης του οδηγού και τη μετέπειτα συσχέτιση της με το ύψος του εμποδίου προς μελέτη, του στηθαίου New Jersey στην προκειμένη περίπτωση.

Ο αλγόριθμος υπολογισμών στο περιβάλλον του προγράμματος Oktave παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.14. Αφορά τον καθορισμό της υψομετρικής διαφοράς  $Dy$  μεταξύ των χιλιομετρικών θέσεων αρχής και τέλους της κίνησης του οχήματος κατά τη διάρκεια του χρόνου αντίληψης και πέδησης, εντός της κυρτής καμπύλης μηκοτομής του παραδείγματος, έχοντας ως δεδομένο το απαιτούμενο μήκος ορατότητας για στάση SSD σε κάθε θέση μελέτης.

```

18  % ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΔΙΑΦΟΡΑΣ ΑΡΧΗΣ ΚΑΙ ΤΕΛΟΥΣ ΤΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΕΝΤΟΣ ΤΗΣ
19  ΚΥΡΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ
20  simaia= (1480+2520)/2
21  if sl==0.04
22      periptwsi=1
23      if thesi+SSD>arxi_toksou
24          Dy1=(arxi_toksou-thesi)*sin(atan(sl))
25          Dy2=Hk-Hk*cos((simaia-arxi_toksou)/Hk)
26          Dy3=Hk-Hk*cos((simaia-(thesi+SSD))/Hk)
27      else
28          Dy1=sin(atan(sl))*SSD
29          Dy2=0
30          Dy3=0
31      end
32      Dy=Dy1+Dy2-Dy3
33  else
34      if thesi<simaia
35          Dy1=Hk-Hk*cos((simaia-thesi)/Hk)
36          if thesi+SSD>simaia
37              periptwsi=3
38              Dy2=Hk-Hk*cos((thesi+SSD-simaia)/Hk)
39          else
40              periptwsi=2
41              Dy2=Hk-Hk*cos((simaia-(thesi+SSD))/Hk)
42          end
43          Dy=Dy1-Dy2
44      else
45          if thesi+SSD<2520
46              periptwsi=4
47              Dy1=Hk-Hk*cos((thesi-simaia)/Hk)
48              Dy2=Hk-Hk*cos((thesi+SSD-simaia)/Hk)
49              Dy=Dy1-Dy2
50          else
51              periptwsi=5
52              Dy1=(thesi+SSD-2520)*sin(atan(0.04))
53              Dy2=Hk-Hk*cos((2520-simaia)/Hk)
54              Dy3=Hk-Hk*cos((thesi-simaia)/Hk)
55              Dy=Dy3-Dy2-Dy1
56          end
57      end
58  end

```

**Εικόνα 4.14:** Αλγόριθμος Oktave: Προσδιορισμός υψομετρικής διαφοράς σημείων αρχής και τέλους πορείας σε κυρτό μήκος συναρμογής

Τα αποτελέσματα των υψομετρικών διαφορών  $Dy$  για κάθε θέση μελέτης παρουσιάζονται στον πίνακα 4.2. Το πρόσημο των τιμών υποδηλώνει την κλίση της γραμμής όρασης [ (+) για ανοδική, (-) για καθοδική].

Χ.Θ (m)	Υψομετρική διαφορά αρχής-τέλους Dy (m)
<b>1200</b>	9,254
<b>1300</b>	9,162
<b>1400</b>	8,437
<b>1500</b>	6,951
<b>1600</b>	5,170
<b>1700</b>	3,339
<b>1800</b>	1,453
<b>1900</b>	-0,489
<b>2000</b>	-2,493
<b>2100</b>	-4,562
<b>2200</b>	-6,700
<b>2300</b>	-8,815
<b>2400</b>	-10,210
<b>2500</b>	-10,758

**Πίνακας 4.2:** Αποτελέσματα υψομετρικής διαφοράς σημείων αρχής και τέλους πορείας σε κυρτό μήκος συναρμογής

#### 4.3.5 Αλγόριθμος υπολογισμού ύψους στηθαίου και ύψους γραμμής όρασης σε κάθε χιλιομετρική θέση

Εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία που αναλύθηκε στην ενότητα 4.2.2 με δεδομένο το μήκος ορατότητας SSD και την υψομετρική διαφορά αρχής και τέλους της καμπύλης τροχιάς, υπολογίζεται το συνολικό μήκος της γραμμής όρασης καθώς και η κλίση της μέσω των παρακάτω σχέσεων:

- $L_{sightline} = 2 * \sin\left(\frac{SSD}{2*(R-\frac{b}{2})}\right) * (R - \frac{b}{2})$
- $S_{sightline} = D_y / L_{sightline}$

Εφόσον το ύψος οφθαλμού έχει οριστεί να είναι ίσο με το ύψος του εμποδίου, η παράμετρος Dy δε χρειάζεται κάποια διόρθωση. Δημιουργώντας επαναληπτική δομή με χωρικό υπολογιστικό βήμα 0.01m, υπολογίζουμε το μήκος της γραμμής όρασης dL που αντιστοιχεί σε κάθε υποτμήμα του απαιτούμενου μήκους ορατότητας SSD. Με αυτό τον τρόπο είναι εφικτός ο υπολογισμός του ύψους της γραμμής όρασης σε κάθε θέση της τροχιάς κίνησης του οχήματος, σύμφωνα με τη Σχέση:

$$H_{sightline} = dL * S_{sightline} + H_{οφθαλμού}$$

Ως ύψος οφθαλμού έχει οριστεί το 1.00m.

Παράλληλα με τον υπολογισμό του ύψους της γραμμής όρασης, καθορίζεται και το ύψος της κεντρικής νησίδας New Jersey λαμβάνοντας υπ' όψιν τη γεωμετρία της διατομής του αυτοκινητόδρομου και το ύψος του στηθαίου (0,90m), βάσει της εικόνας 4.4 (ενότητα 4.2.3). Για

πλάτος λωρίδας  $b=3.50\text{m}$  και εύρος εσωτερικής λωρίδας καθοδήγησης  $a=0.75\text{m}$ , το ύψος του διαχωριστικού κυκλοφορίας σε κάθε θέση υπολογίζεται από τη Σχέση:

$$H_{\text{jersey}} = H_{\text{λωρίδας}} - \left( \frac{3,50}{2} + 0,75 \right) * \sin[\tan^{-1}(e)] + 0,90$$

Ελέγχοντας τη συνθήκη  $H_{\text{sightline}} > H_{\text{jersey}}$  σε κάθε βήμα υπολογισμών, εντοπίζουμε την ακριβή χιλιομετρική θέση διακοπής ορατότητας, αν υπάρχει. Σε περίπτωση που η θέση διακοπής υπολογιστεί μικρότερη από την ελάχιστο μήκος ορατότητας  $L_x$  που είναι πάντοτε ελεύθερο εμποδίων (Ενότητα 4.2.3), τότε ως χιλιομετρική θέση διακοπής ορατότητας ορίζεται η χιλιομετρική θέση που αντιστοιχεί στο παραπάνω μήκος γραμμής όρασης  $L_x$ .

Για τις θέσεις μελέτης που υπάρχει διακοπή ορατότητας υπολογίζεται η κατακόρυφη απόκρυψη της γραμμής ορατότητας από το διαχωριστικό κυκλοφορίας. Μέσω της παραπάνω ανάλυσης υπολογίζεται η διαφορά των δύο υψών σε κάθε χιλιομετρική θέση και εμφανίζεται η τελική μέγιστη τιμή.

Ο αλγόριθμος υπολογισμού και σύγκρισης του ύψους γραμμής όρασης και του ύψους του διαχωριστικού κυκλοφορίας φαίνεται στην εικόνα 4.15:

```

1  % ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΥΨΟΥΣ ΣΤΗΘΑΙΟΥ ΚΑΙ ΥΨΟΥΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΟΡΑΣΗΣ ΣΕ ΚΑΘΕ ΧΙΛΙΟΜΕΤΡΙΚΗ ΘΕΣΗ
2  mikos_xordis=2*sin(SSD/(R-b)/2)*(R-b)
3  s_sightline=Dy/mikos_xordis;
4  H_lwridas_arxis=100;
5  H_ofthalmou=100+1;
6  diakopi=10000
7  max_apoklisi=0
8  for i=0.01:0.01:SSD
9      w=SSD/(R-b);
10     al=(pi-w)/2;
11     a2=i/(R-b);
12     a3=pi-a1-a2;
13     L_sightline=(R-b)*sin(a2)/sin(a3);
14     H_sightline=s_sightline*L_sightline+H_ofthalmou; % Υπολογισμός ύψους γραμμής όρασης
15     x=0.01*cos(atan(s));
16     if thesi+i>arxi_toksou
17         s=s-x/Hk;
18         if s<=-0.04
19             s=-0.04;
20         end
21     end
22     y=s*x;
23     H_lwridas_arxis=H_lwridas_arxis+y;
24     H_jersey=H_lwridas_arxis-2.5*sin(atan(e))+0.9; % Υπολογισμός ύψους στηθαίου
25     if H_sightline<H_jersey
26         if diakopi>i % Καθορισμός της θέσης στην οποία διακόπτεται για πρώτη φορά
27             diakopi=i; % η γραμμή όρασης
28         end
29         apoklisi=H_sightline-H_jersey;
30         if apoklisi<max_apoklisi % Καθορισμός της μέγιστης κατακόρυφης απόκλισης της
31             max_apoklisi=apoklisi; % γραμμής όρασης κάτω από την κορυφή του New Jersey
32         end
33     end
34 end
35 s1
36 diakopi
37 if diakopi<3000
38     thesi_diakopis=thesi+diakopi
39 else
40     disp('Δεν έχω παρεμπόδιση ορατότητας')
41 end
42 max_apoklisi

```

**Εικόνα 4.15:** Αλγόριθμος Octave: Συσχέτιση του ύψους της ευθείας όρασης και του στηθαίου New Jersey για τον προσδιορισμό των συνθηκών ορατότητας

#### 4.3.6 Αποτελέσματα ανάλυσης παραδείγματος

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται τα αποτελέσματα του μήκους ορατότητας SSD, το συνολικό μήκος της γραμμής όρασης, υψομετρικής διαφοράς Dy, της χιλιομετρικής θέσης μέχρι την οποία έχουμε ανεμπόδιστη ορατότητα Lx, της θέσης διακοπής ορατότητας καθώς και της μέγιστης υψομετρικής απόκλισης μεταξύ του ύψους γραμμής όρασης και του ύψους New Jersey.

Χ.Θ (m)	SSD (m)	Μήκος ευθείας όρασης (m)	Υψομετρική διαφορά αρχής-τέλους Dy (m)	Χ.Θ ελεύθερου μήκους ορατότητας Lx (m)	Χ.Θ διακοπής ορατότητας	Μέγιστη υψομετρική απόκλιση (m)
<b>1200</b>	231,5	231,30	9,25	43,48	-	-
<b>1300</b>	231,8	231,55	9,16	43,41	-	-
<b>1400</b>	233,7	233,49	8,44	42,83	1458,90	0,18
<b>1500</b>	236,9	236,60	6,95	41,95	1541,95	0,31
<b>1600</b>	240,1	239,85	5,17	41,07	1641,07	0,33
<b>1700</b>	243,5	243,24	3,34	40,21	1740,21	0,35
<b>1800</b>	247,1	246,77	1,45	39,36	1839,36	0,36
<b>1900</b>	250,7	250,45	-0,49	38,51	1938,51	0,38
<b>2000</b>	254,6	254,28	-2,49	37,68	2037,68	0,40
<b>2100</b>	258,6	258,30	-4,56	36,85	2136,85	0,42
<b>2200</b>	262,8	262,49	-6,70	36,03	2236,03	0,45
<b>2300</b>	267,0	266,64	-8,82	35,26	2335,26	0,42
<b>2400</b>	269,3	268,89	-10,21	34,86	2438,20	0,11
<b>2500</b>	269,5	269,17	-10,76	34,81	-	-

**Πίνακας 4.3:** Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων του παραδείγματος ανάλυσης εντός κυρτής μηκοτομής

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΝΑΛΥΣΗ ΟΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΕΙΣΟΔΟ ΣΗΡΑΓΓΑΣ

## 5.1 Εισαγωγή

Οι περιοχές εισόδου σε σήραγγα αποτελούν κρίσιμα σημεία ελέγχου οδικής ασφάλειας λόγω της γρήγορης και έντονης αλλαγής του οδικού περιβάλλοντος στο οποίο οι οδηγοί καλούνται να προσαρμοστούν. Συνεπώς, είναι σημαντικός ο σχεδιασμός της εισόδου με τις κατάλληλες γεωμετρικές συνθήκες ώστε να εξασφαλιστεί η διάθεση επαρκούς μήκους ορατότητας για στάση, με την ταυτόχρονη ικανότητα ανάπτυξης ταχυτήτων που θα προσφέρουν υψηλή αποδοτικότητα στον αυτοκινητόδρομο.

## 5.2 Μεθοδολογία ανάλυσης υπό σταθερή κατά μήκος κλίση

### 5.2.1 Πρότυπες διατομές

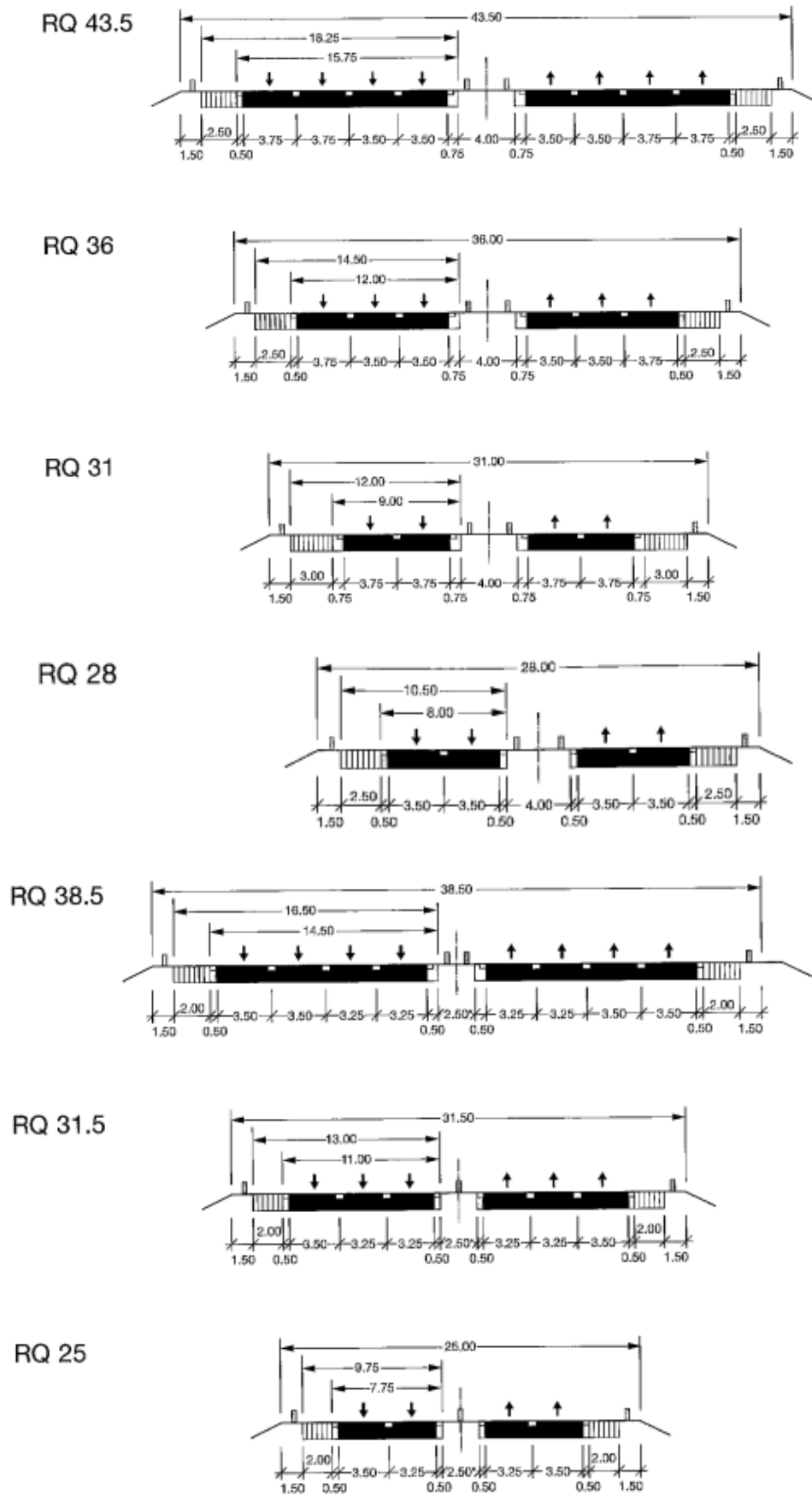
Σύμφωνα με τους Γερμανικούς κανονισμούς (RAA, 2008), οι τυπικές διατομές για τους αυτοκινητόδρομους κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες: EKA 1, EKA 2 και EKA 3. Κάθε κατηγορία αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη ταχύτητα σχεδιασμού  $V_{design}$  ως εξής:

- EKA 1 :  $V_{design} = 130$  km/h (ή 120 km/h)
- EKA 2 :  $V_{design} = 100$  km/h
- EKA 3 :  $V_{design} = 80$  km/h

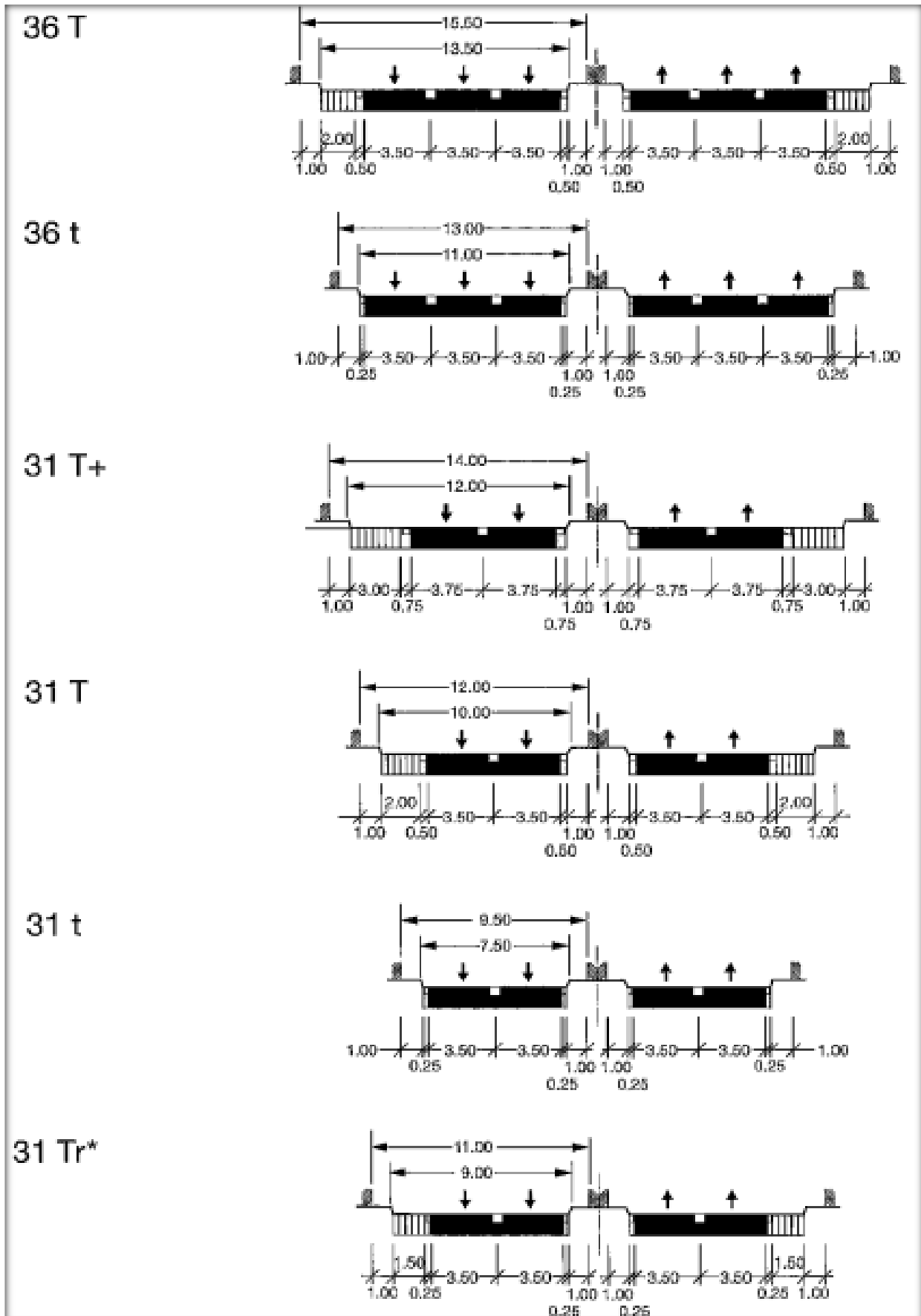
Σε κάθε κατηγορία αυτοκινητόδρομου αντιστοιχούν συγκεκριμένες πρότυπες διατομές σχεδιασμού. Η επιλογή διατομής από κάθε κατηγορία εξαρτάται από τον αριθμό Ετήσιας Μέσης Ημερήσιας Κυκλοφορίας (ΕΜΗΚ). Κατά της οδηγίες RAA-2008, για χρήση διατομής με 2, 3 ή 4 λωρίδες κυκλοφορίας απαιτούνται τιμές ΕΜΗΚ 20.000, 60.000 και 100.000 οχημάτων/24ώρο αντίστοιχα.

Η κατασκευή και η λειτουργία των σηράγγων κοστίζουν πολύ περισσότερο σε σχέση με τους ανοιχτούς αυτοκινητόδρομους. Η φύση του έργου απαιτεί συλλογή και ανάλυση δεδομένων για την καλύτερη κατανόηση των συνθηκών που θα προκύψουν κατά τη διάνοιξη. Επιπλέον, οι εργασίες απαιτούν τη χρήση εξειδικευμένων μηχανημάτων και περισσότερων ανθρώπινων πόρων. Για το λόγο αυτό, οι διαστάσεις των πρότυπων διατομών των οδικών σηράγγων είναι μικρότερες. Η απόσταση μεταξύ των οδοστρωμάτων αντίθετης κατεύθυνσης κυκλοφορίας βασίζεται σε κατασκευαστικές απαιτήσεις και για κάθε οδόστρωμα απαιτείται ξεχωριστή διάνοιξη.

Οι πρότυπες διατομές σχεδιασμού αυτοκινητόδρομου για κάθε κατηγορία παρουσιάζονται στην εικόνα 5.1. Οι πρότυπες διατομές οδικών σηράγγων κατά τις οδηγίες των Γερμανικών κανονισμών RAA-2008 φαίνονται στην εικόνα 5.2.



Εικόνα 5.1: Τυπικές διατομές αυτοκινητοδρόμων κατά RAA-2008



Εικόνα 5.2: Τυπικές διατομές οδικών σηράγγων κατά RAA-2008



Οι επιτρεπόμενες πρότυπες διατομές για σύνθεση αυτοκινητόδρομου και οδικής σήραγγας, καθώς και οι διαστάσεις της ταχείας λωρίδας κυκλοφορίας και της εσωτερικής λωρίδας καθοδήγησης, παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1 :

Τυπικές διατομές αυτ/δρομων	Λωρίδα ταχείας κυκλοφορίας	Τυπικές διατομές σηράγγων	Λωρίδα ταχείας κυκλοφορίας	Εσωτερική λωρίδα καθοδήγησης
Αποδεκτά ζεύγη σύνθεσης (RAA 2008)				
RQ 36	3,50 m	36t	3,50 m	1,00 + 0,25 m
RQ 31,5	3,25 m	36T	3,50 m	1,00 + 0,50 m
Αποδεκτά ζεύγη σύνθεσης (RAA 2008)				
RQ 25	3,25 m	31t	3,50 m	1,00 + 0,25 m
RQ 28	3,50 m	31T	3,50 m	1,00 + 0,50 m
RQ 31	3,75 m	31T+	3,75 m	1,00 + 0,75 m

**Πίνακας 5.1:** Επιτρεπόμενη σύνθεση διατομών αυτοκινητοδρόμου και οδικής σήραγγας κατά RAA-2008

Κατά τις Ελληνικές οδηγίες μελετών (ΟΜΟΕ-Τεύχος 8,2001) το όριο ταχύτητας κυμαίνεται μεταξύ 80 και 100 km/h όσον αφορά τις οδικές σήραγγες, η ανάλυση θα γίνει συνεπώς για ταχύτητες σχεδιασμού 80, 90 και 100 km/h. Εξαιτίας της απαίτησης για μείωση ή διατήρηση του πλάτους λωρίδας κυκλοφορίας για λόγους οικονομίας, τα πιθανά ζεύγη χάραξης είναι ακόμα πιο περιορισμένα. Συγκεκριμένα, τα ζεύγη που απομένουν παρουσιάζονται στον πίνακα 5.2 :

Ζεύγη διατομών	Πλάτη λωρίδας κυκλοφορίας	Πλάτος εσωτερικής λωρίδας καθοδήγησης
RQ 36 / 36t	b1=3,50 m / b2=3,50 m	1,00 + 0,25 m
RQ 36 / 36T	b1=3,50 m / b2=3,50 m	1,00 + 0,50 m
RQ 28 / 31t	b1=3,50 m / b2=3,50 m	1,00 + 0,25 m
RQ 28 / 31T	b1=3,50 m / b2=3,50 m	1,00 + 0,50 m
RQ 31 / 31t	b1=3,75 m / b2=3,50 m	1,00 + 0,25 m
RQ 31 / 31T	b1=3,75 m / b2=3,50 m	1,00 + 0,50 m
RQ 31 / 31T+	b1=3,75 m / b2=3,75 m	1,00 + 0,75 m

**Πίνακας 5.2:** Επιτρεπόμενα ζεύγη χάραξης

Οι συνδυασμοί των πρότυπων διατομών αυτοκινητόδρομου RQ 36 και RQ 28 παρουσιάζουν τις ίδιες γεωμετρικές απαιτήσεις, άρα αποτελούν κοινή περίπτωση και εξετάζονται μαζί. Από το συνδυασμό προκύπτουν ζεύγη διατομών στα οποία το πλάτος λωρίδας μειώνεται, ενώ στα υπόλοιπα το πλάτος διατηρείται σταθερό. Οι δύο αυτές περιπτώσεις δημιουργούν αποκλίσεις στη δομή του γεωμετρικού προβλήματος, συνεπώς απαιτείται ξεχωριστή μεθοδολογία επίλυσης για την εξαγωγή ορθών αποτελεσμάτων.

### 5.2.2 Γεωμετρική ανάλυση για σταθερό πλάτος λωρίδας

Για τον ακριβή υπολογισμό της ελάχιστης ακτίνας σχεδιασμού  $R_{\min}$  της αριστερής καμπύλης, κατά την οποία επαληθεύεται η οριακή απαίτηση επάρκειας του Μήκους Ορατότητας για Στάση (SSD), απαιτείται ο ορισμός του γεωμετρικού προβλήματος υπό επίλυση.

Στην περίπτωση επιλογής ζεύγους τυπικών διατομών για τις οποίες εφαρμόζονται ίσα πλάτη στη λωρίδα ταχείας κυκλοφορίας μεταξύ αυτοκινητόδρομου και σήραγγας, το γεωμετρικό πρόβλημα ανάγεται στην επίλυση του συστήματος των τριών παρακάτω εξισώσεων:

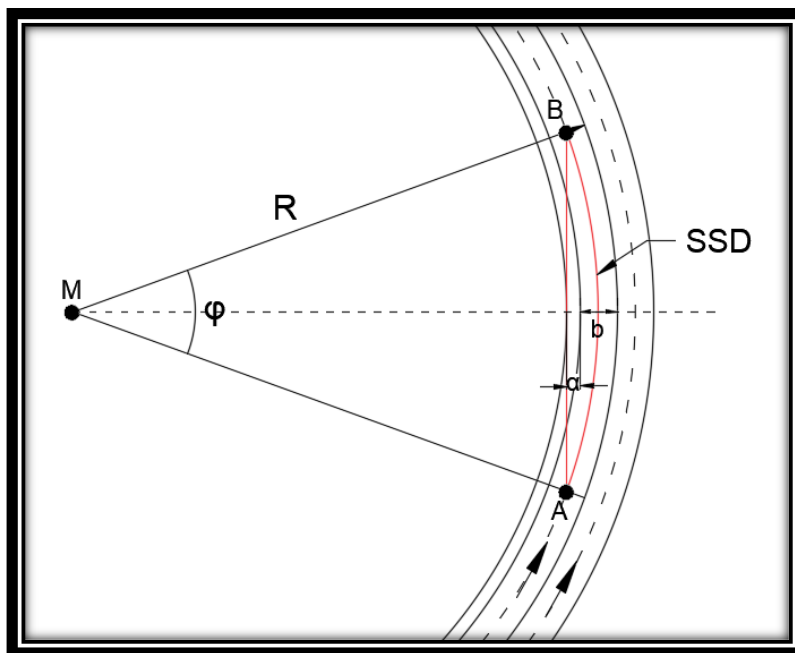
$$\bullet \quad SSD = V_o * t + \frac{V_o^2}{2g * \left( \sqrt{\left(\frac{a}{g}\right)^2 - \left(\frac{V^2}{g * R} - e\right)^2} + s \right)} \quad (5.1)$$

$$\bullet \quad \varphi = \frac{SSD}{\left(R - \frac{b}{2}\right)} \quad (5.2)$$

$$\bullet \quad R - b - a = \left(R - \frac{b}{2}\right) * \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad (5.3)$$

Η σχέση 5.1 έχει οριστεί στην ενότητα 2.2 για τον υπολογισμό του μήκους ορατότητας για στάση κατά τους Γερμανικούς κανονισμούς RAA-2008, αν ληφθεί υπόψη η επιρροή της πλευρικής τριβής. Οι σχέσεις 5.2, 5.3 προκύπτουν από τη γεωμετρία του προβλήματος μέσω τριγωνομετρίας. Η επίλυση του παραπάνω συστήματος δίνει μονοσήμαντη λύση για την τιμή της ελάχιστης ακτίνας σχεδιασμού  $R_{\min}$ , υπό δεδομένες διαστάσεις πλάτους λωρίδας  $b$  και απόστασης  $a$  από το τοιχίο της σήραγγας. Ως δεδομένα εισόδου λαμβάνονται επιπλέον η ταχύτητα σχεδιασμού ( $V$ ), η επίκλιση του οδοστρώματος λόγω αριστερής στροφής ( $\epsilon$ ) και η κατά μήκος κλίση του αυτοκινητόδρομου ( $s$ ).

Στην εικόνα παρατίθεται γραφική αναπαράσταση του προβλήματος για καλύτερη κατανόηση των γεωμετρικών στοιχείων:



Εικόνα 5.3: Γραφική αναπαράσταση ανάλυσης ορατότητας για σταθερό πλάτος λωρίδας

### 5.2.3 Γεωμετρική ανάλυση για μεταβλητό πλάτος λωρίδας

Σε περιπτώσεις σχεδιασμού εισόδου σήραγγας με μειωμένο πλάτος λωρίδας σε σχέση με τον αυτοκινητόδρομο, η διαδικασία υπολογισμού της ελάχιστης επιτρεπόμενης ακτίνας σχεδιασμού  $R_{min}$  για οριακή επάρκεια ορατότητας βασίζεται στην επίλυση διαφορετικού συστήματος εξισώσεων.

Ως θέση ελέγχου θα ληφθεί το στόμιο της σήραγγας, στην οποία απαιτείται η πλευρική απόσταση από τη δεξιά οριογραμμή της αριστερής λωρίδας ταχείας κυκλοφορίας έως το εσωτερικό τοίχιο της σήραγγας να ισούται με τα αντίστοιχα πλάτη της τυπικής διατομής της υπό μελέτη σήραγγας. Παράδειγμα σύνθεσης διατομών υπό τέτοιες γεωμετρικές συνθήκες αποτελεί το ζεύγος διατομών RQ 31 / 31t. Η ανάλυση γίνεται σύμφωνα με τις μαθηματικές σχέσεις:

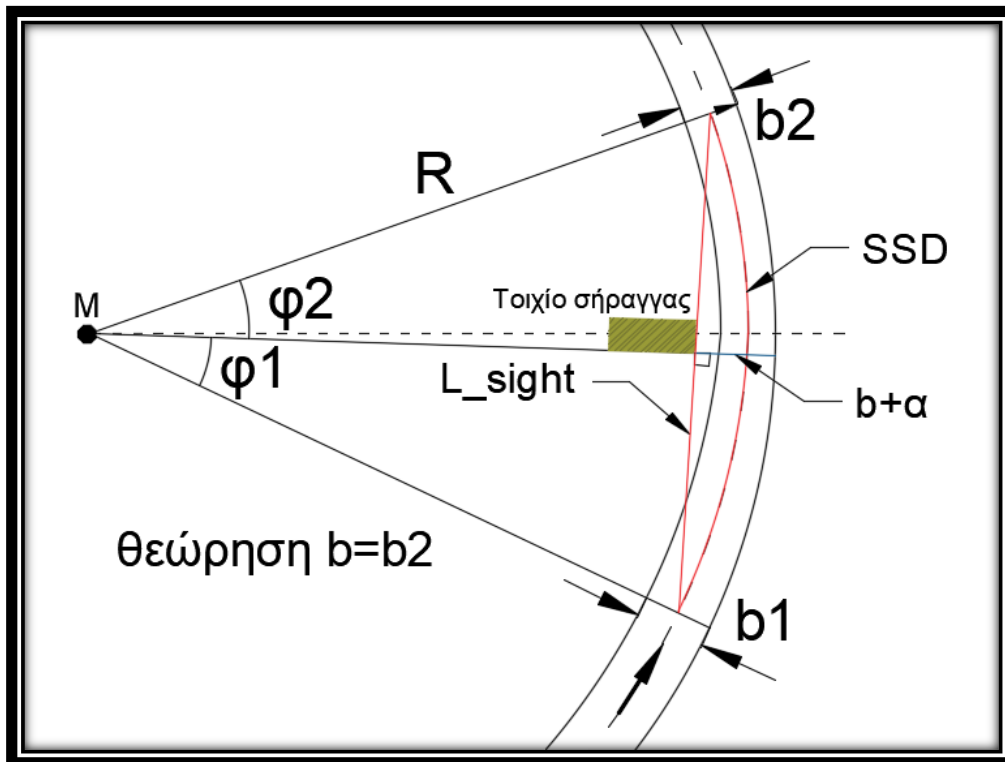
$$\bullet \quad SSD = V_o * t + \frac{V_o^2}{2g * \left( \sqrt{\left(\frac{a}{g}\right)^2 - \left(\frac{v^2}{g * R} - e\right)^2} + s \right)} \quad (5.1)$$

$$\bullet \quad R - \frac{b}{2} = \frac{SSD}{\varphi_1 + \varphi_2} \quad (5.4)$$

$$\bullet \quad R - b - a = \left( R - \frac{b_1}{2} \right) * \cos(\varphi_1) \quad (5.5)$$

$$\bullet \quad R - b - a = \left( R - \frac{b_2}{2} \right) * \cos(\varphi_2) \quad (5.6)$$

Ως πλάτος  $b$  θα θεωρηθεί το πλάτος της λωρίδας κυκλοφορίας για τη διατομή σήραγγας, δηλαδή  $b=b_2$ . Καλύτερη εποπτεία του γεωμετρικού προβλήματος παρουσιάζεται στην εικόνα:



Εικόνα 5.4: Γραφική αναπαράσταση ανάλυσης ορατότητας για μεταβλητό πλάτος λωρίδας

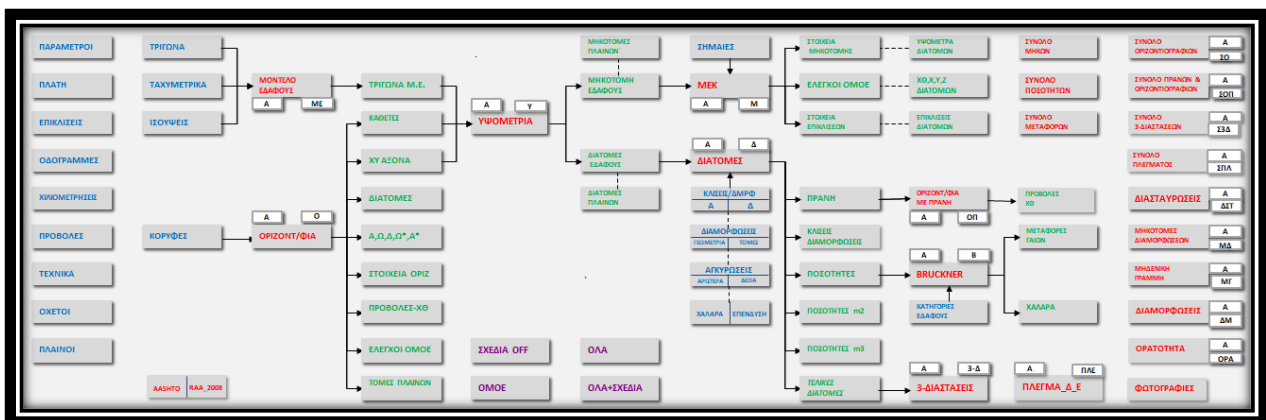
## 5.3 Μεθοδολογία ανάλυσης με χρήση του λογισμικού H14

### 5.3.1 Εισαγωγή

Το λογισμικό «H14» αποτελεί ένα πακέτο προγραμμάτων που αναπτύχθηκε από τον καθηγητή Φώτη Μερτζάνη και παρέχει τη δυνατότητα εκτέλεσης εργασιών σχετικά με το γεωμετρικό σχεδιασμό των οδών.

Μέσω του περιβάλλοντος του προγράμματος «Excel» γίνεται εφικτή η εισαγωγή των απαιτούμενων δεδομένων εισόδου που αφορούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της οδού και η πραγματοποίηση αναλύσεων για πλήθος ζητημάτων οδοποιίας. Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα γίνει πλήρης καθορισμός της οριζοντιογραφίας, της μηκοτομής και των διατομών ενός οδικού άξονα και θα κατασκευαστούν τα αντίστοιχα διαγράμματα ορατότητας. Τα υλοποιημένα σχέδια και διαγράμματα θα εξαχθούν σε μορφή .dxf, γεγονός που θα τα καθιστά διαχειρίσιμα από το σχεδιαστικό λογισμικό του Autocad.

Το λογισμικό «H14» έχει συνταχθεί με τρόπο τέτοιο ώστε να παρουσιάζεται υπό τη μορφή διαγράμματος ροής. Βασικό πλεονέκτημα της παραπάνω μορφής παρουσίασης αποτελεί η δυνατότητα που δίνει στο μελετητή να έχει μια καλύτερη εποπτεία του λογισμικού και να γίνεται σαφής η αλληλουχία των επιμέρους σταδίων που απαιτούνται για τη σύνθεση της μελέτης μιας οδού.



Εικόνα 5.5: Περιβάλλον εργασίας του λογισμικού H14

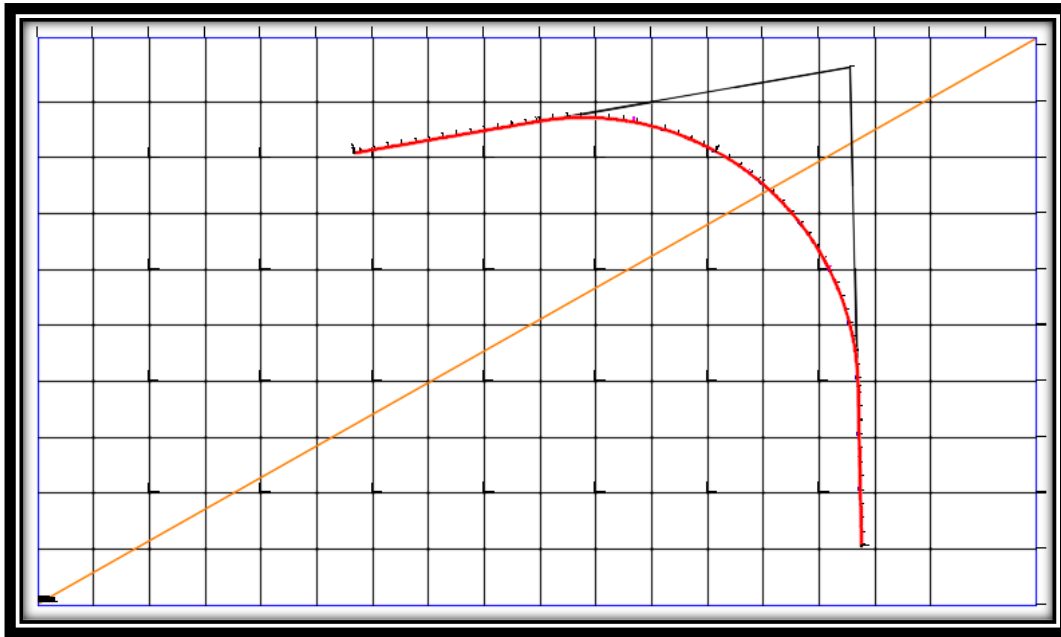
### 5.3.2 Μόρφωση του γεωμετρικού μοντέλου

Για να προσδιοριστεί το πλήρες γεωμετρικό μοντέλο της σύνθετης χάραξης στο χώρο απαιτείται η δημιουργία ενός εδαφικού προφίλ, το οποίο θα αποτελέσει τη βάση πάνω στην οποία θα υλοποιηθεί ο σχεδιασμός της οριζοντιογραφίας και της μηκοτομής του οδικού άξονα.

Το εδαφικό προφίλ, ή αλλιώς ψηφιακό μοντέλο εδάφους, δημιουργείται με χρήση της μεθόδου τριγωνισμού. Η μέθοδος βασίζεται στη δημιουργία ενός δικτύου τριγώνων επί του εδάφους, σύμφωνα με τις συντεταγμένες τυχαίων σημείων του. Μέσω του τριγωνισμού δημιουργείται ένα μοναδικό σύνολο τριγώνων που έχει στόχο τη διαμόρφωση των μορφολογικών στοιχείων του εδάφους. Στην προκειμένη περίπτωση δεν πραγματοποιείται ανάλυση υφιστάμενης σήραγγας ούτε περιοχής μελέτης συγκεκριμένων τοπογραφικών συνθηκών, συνεπώς θα δημιουργηθεί μία επίπεδη οριζόντια επιφάνεια που θα καθορίζεται από

δύο τρίγωνα, με συντεταγμένες που θα ληφθούν από το λογισμικό του Autocad. Εντός του εδαφικού αυτού μοντέλου θα καταρτιστεί η οριζοντιογραφία του υπό μελέτη οδικού άξονα.

Εφόσον η ανάλυση ορατότητας σε είσοδο σήραγγας πραγματοποιείται κίνηση του οδηγού σε αριστερή καμπύλη τροχιά, η οριζοντιογραφία του οδικού άξονα θα σχεδιαστεί υπό αυτή την παράμετρο. Για τον καθορισμό της γεωμετρίας της οριζοντιογραφικής χάραξης πρέπει να εισαχθούν οι συντεταγμένες των κορυφών της πολυγωνικής και να επιλεχθεί η κατάλληλη ακτίνα σχεδιασμού R. Η επιλογή των συντεταγμένων των τριών κορυφών της οριζοντιογραφίας έγινε σε συνάρτηση με το εδαφικό μοντέλο που δημιουργήθηκε, ούτως ώστε όλο το μήκος του αυτοκινητόδρομου να είναι εντός αυτού και να είναι εφικτή η ανάλυση ορατότητας στο περιβάλλον του λογισμικού H14.



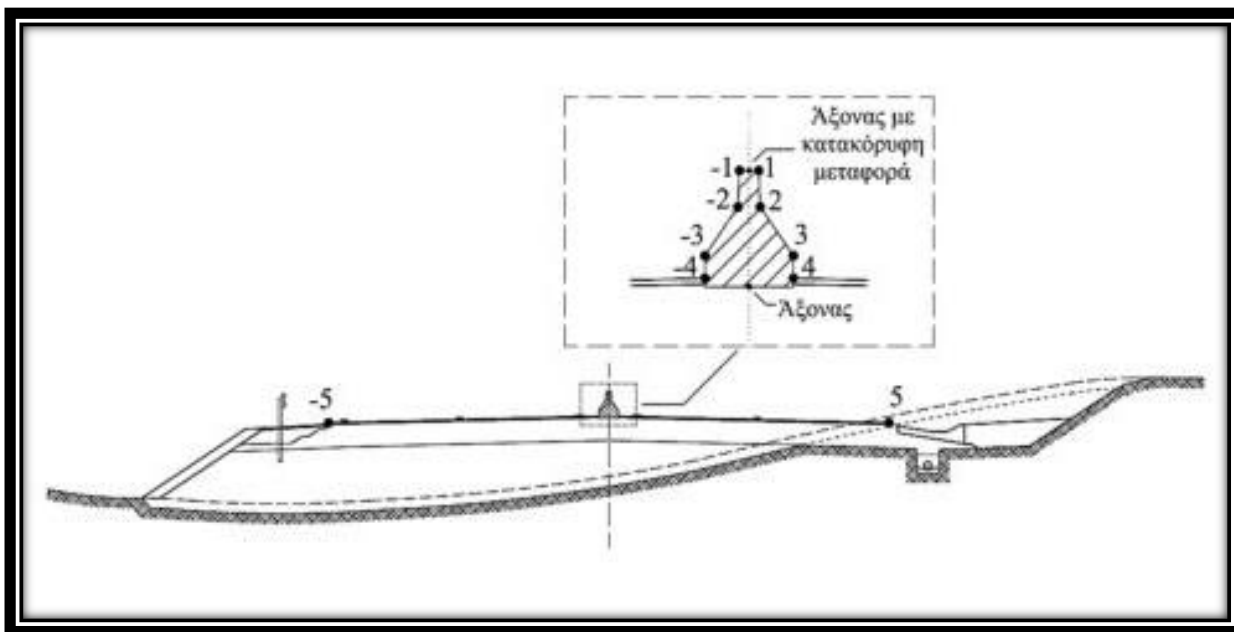
**Εικόνα 5.6:** Ψηφιακό εδαφικό μοντέλο και οριζοντιογραφία ανάλυσης στο λογισμικό H14

Εφόσον η ανάλυση ορατότητας σε είσοδο σήραγγας πραγματοποιείται κίνηση του οδηγού σε αριστερή καμπύλη τροχιά, η οριζοντιογραφία του οδικού άξονα θα σχεδιαστεί υπό αυτή την παράμετρο. Για τον καθορισμό της γεωμετρίας της οριζοντιογραφικής χάραξης πρέπει να εισαχθούν οι συντεταγμένες των κορυφών της πολυγωνικής και να επιλεχθεί η κατάλληλη ακτίνα σχεδιασμού R. Η επιλογή των συντεταγμένων των τριών κορυφών της οριζοντιογραφίας έγινε σε συνάρτηση με το εδαφικό μοντέλο που δημιουργήθηκε, ούτως ώστε όλο το μήκος του αυτοκινητόδρομου να είναι εντός αυτού και να είναι εφικτή η ανάλυση ορατότητας στο περιβάλλον του λογισμικού H12.

Απαραίτητη προϋπόθεση για την ακριβή ανάλυση των συνθηκών ορατότητας αποτελεί η σωστή μόρφωση των διατομών του αυτοκινητόδρομου σε κάθε χιλιομετρική θέση. Η διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται στο λογισμικό H12 μέσω της κατάλληλης επιλογής των διαστάσεων και των επικλίσεων των λωρίδων κυκλοφορίας και των πλευρικών διαμορφώσεων του οδικού άξονα. Η διαμόρφωση αυτή πραγματοποιείται μέσω των οδογραμμών. Οι οδογραμμές ορίζονται ως γραμμές οι οποίες διατρέχουν την οδό παράλληλα κατά τη διαμήκη έννοια και χωρίζουν τη διατομή της σε υποτμήματα. Μέσω αυτών είναι δυνατή η τοποθέτηση του οφθαλμού του οδηγού στην κατάλληλη πλευρική απόσταση από τον άξονα της τυπικής διατομής, καθώς και ο

ορισμός των πλατών των λωρίδων κυκλοφορίας, των εσωτερικών λωρίδων καθοδήγησης και των αντίστοιχων επικλίσεων τους.

Η λειτουργία αυτή δίνει τη δυνατότητα να περιγραφεί με ακρίβεια οποιοδήποτε στοιχείο της διατομής ή του παρόδιου χώρου και να ληφθεί υπόψη η ύπαρξη κατασκευαστικών στοιχείων και εξοπλισμού της οδού που αποτελούν εν δυνάμει εμπόδια όρασης. Οι οδογραμμές λαμβάνουν ακέραιες τιμές σε αύξουσα σειρά κατά απόλυτη τιμή όσο απομακρυνόμαστε από τον άξονα της διατομής. Οι τιμές αυτές έχουν θετικό πρόσημο για διαμορφώσεις δεξιά του άξονα και αρνητικό για όσες βρίσκονται αριστερά του.



**Εικόνα 5.7:** Οδογραμμές σε διαχωρισμένη οδό δύο λωρίδων κυκλοφορίας ανά κατεύθυνση

Επόμενο στάδιο της μόρφωσης του γεωμετρικού μοντέλου αποτελεί ο σχεδιασμός της μηκοτομής της ερυθράς της οδού. Για την ανάλυση ορατότητας εντός κυρτής μηκοτομής απαιτείται ο καθορισμός της κατά μήκος κλίσης ανωφέρειας και κατωφέρειας του αυτοκινητόδρομου καθώς και η ακτίνα του τόξου συναρμογής της κυρτής καμπύλης. Είναι προφανές ότι ο υπό μελέτη αυτοκινητόδρομος θα βρίσκεται σε επίχωμα σε όλο το μήκος του, εφόσον έχει οριστεί επίπεδο εδαφικό μοντέλο και γίνεται ανάλυση κυρτής μηκοτομής.

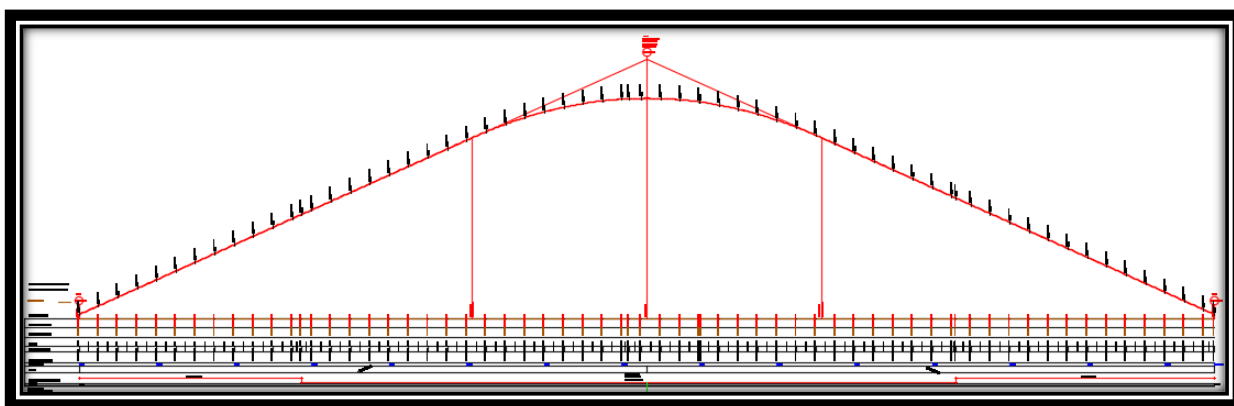
Σύμφωνα με τους Γερμανικούς κανονισμούς RAA, για κάθε κατηγορία αυτοκινητόδρομου αντιστοιχούν συγκεκριμένες γεωμετρικές απαιτήσεις χάραξης. Οι απαιτήσεις αυτές προκύπτουν βάσει της μέγιστης επιτρεπόμενης ταχύτητας σχεδιασμού για κάθε κατηγορία αυτοκινητοδρόμου, οι οποίες δεν ταυτίζονται κατά κανόνα με τις επιτρεπόμενες ταχύτητες σχεδιασμού οδικών σηράγγων βάσει των ελληνικών κανονισμών ΟΜΟΕ-Χ. Για παράδειγμα, για τις κατηγορίες σχεδιασμού ΕΚΑ 1 Α και ΕΚΑ 1 Β ως μέγιστη ταχύτητα σχεδιασμού ορίζονται τα 130 km/h και 120 km/h αντίστοιχα, ενώ σύμφωνα με τους ελληνικούς κανονισμούς χάραξης σηράγγων η μέγιστη ταχύτητα σχεδιασμού ορίζεται στα 100 km/h. Παρόλα αυτά, οι γεωμετρικές απαιτήσεις σχεδιασμού βάσει των γερμανικών κανονισμών RAA-2008 θα τηρηθούν ως έχουν.

Πιο συγκεκριμένα, στον πίνακα 5.3 παρουσιάζονται οι κανονισμοί μεγίστων κατά μήκος κλίσεων και ελαχίστων διαμέτρων τόξων συναρμογής για κάθε κατηγορία σχεδιασμού:

Κατηγορία σχεδιασμού	Μέγιστη κατά μήκος κλίση $s$ (%)	Ελάχιστη διάμετρος κυρτής μηκοτομής $H_k$ (m)
EKA 1 A	4,0	13000
EKA 1 B	4,5	10000
EKA 2	4,5	5000
EKA 3	6,0	3000

**Πίνακας 5.3:** Απαιτήσεις σχεδιασμού μηκοτομής για κάθε κλάση σχεδιασμού (RAA-2008)

Εφόσον οι υπό ανάλυση διατομές αντιστοιχούν σε κατηγορίες σχεδιασμού EKA 1 και EKA 2, θα σχεδιαστεί μηκοτομή με κατά μήκος κλίσεις  $\pm 4,5\%$  και ελάχιστη διάμετρο τόξου συναρμογής που θα εξαρτάται από κάθε τυπική διατομή. Για λόγους απλούστευσης η κορυφή της μηκοτομής (σημαία) θα τοποθετείται στο μέσον του συνολικού μήκους του οδικού άξονα. Παράδειγμα σχεδιασμού της κυρτής μηκοτομής σε επίχωμα παρουσιάζεται στην Εικόνα.



**Εικόνα 5.8:** Διάγραμμα κυρτής μηκοτομής ανάλυσης στο λογισμικό H14

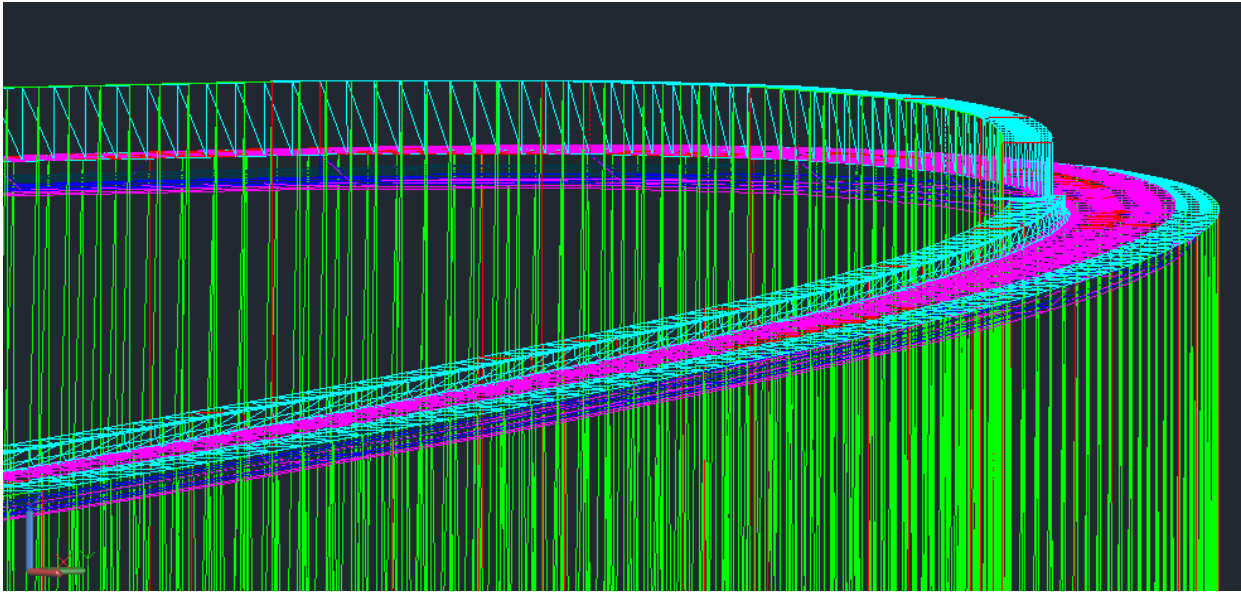
Έχοντας ορίσει τη γεωμετρική χάραξη όσον αφορά την οριζοντιογραφία και τη μηκοτομή του υπό μελέτη οδικού άξονα, επόμενο βήμα αποτελεί ο προσδιορισμός της τυπικής διατομής σε κάθε χιλιομετρική θέση του. Για το σκοπό αυτό απαιτείται η κατάλληλη δημιουργία των πλευρικών διαμορφώσεων της λωρίδας κυκλοφορίας.

Κατά την ανάλυση επάρκειας ορατότητας σε είσοδο σήραγγας κατά την κίνηση εντός αριστερής στροφής, ως εν δυνάμει εμπόδια όρασης θεωρούνται η κεντρική διαχωριστική νησίδα (New Jersey) καθώς και ο τοίχος αντιστήριξης στο στόμιο εισόδου της οδικής σήραγγας. Για την εισαγωγή των παραπάνω δομικών εμποδίων στο λογισμικό H12 είναι απαραίτητη η γνώση της γεωμετρίας τους, ούτως ώστε να σχεδιαστούν κατάλληλα και να προκύψουν σωστά αποτελέσματα κατά τον προσδιορισμό των συνθηκών ορατότητας. Συγκεκριμένα, λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία της τυπικής διατομής New Jersey και εισάγοντας τα δεδομένα  $\Delta X$  και  $\Delta Y$  κάθε ευθύγραμμου τμήματος που την απαρτίζει, δίδεται η απαραίτητη πληροφορία στο λογισμικό ώστε να πραγματοποιηθεί ο σωστός σχεδιασμός του δομικού στοιχείου σε κάθε διατομή της οδού και να ολοκληρωθεί επιτυχώς η ανάλυση καθορισμού της πιθανής παρεμπόδισης ορατότητας.

Η ίδια μεθοδολογία χρησιμοποιείται και για τη μόρφωση του τοίχου αντιστήριξης κατά μήκος της οδικής σήραγγας, σε πλευρική απόσταση που εξαρτάται από την εκάστοτε τυπική διατομή των Γερμανικών κανονισμών RAA που αναλύεται. Για τις ανάγκες της ανάλυσης θα θεωρηθεί ότι

η αλλαγή από τη διατομή ανοιχτού αυτοκινητόδρομου (τύπος RQ) στη διατομή οδικής σήραγγας (τύπος T) θα γίνεται απευθείας και όχι με σταδιακή μεταβολή των εκάστοτε διαστάσεων.

Με την ολοκλήρωση των διατομών πλέον καθίσταται εφικτή η δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου της υπό μελέτη οδού, μέσω της μεθόδου του τριγωνισμού που αναφέρθηκε προηγουμένως. Στο μοντέλο αυτό παρουσιάζονται με διαφορετικό χρώμα τα επίπεδα του εδάφους και των επιχωμάτων, τα επίπεδα του οδοστρώματος, καθώς και τα επίπεδα των πλευρικών διαμορφώσεων όπως τα ερείσματα, το κεντρικό διαχωριστικό New Jersey και ο τοίχος αντιστήριξης της οδικής σήραγγας.



*Εικόνα 5.9: Γραφική αναπαράσταση γεωμετρικού μοντέλου (3-D)*

Στο παρόν τρισδιάστατο μοντέλο του οδικού άξονα θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση ορατότητας. Για την ανάλυση θα πρέπει να οριστούν ως παράμετροι εισόδου τα στοιχεία που επηρεάζουν τον υπολογισμό του απαιτούμενου μήκους ορατότητας για στάση σε κάθε χιλιομετρική θέση της οδού. Συγκεκριμένα, στις παραμέτρους της ανάλυσης ορατότητας θα πρέπει να καθοριστεί η οδογραμμή στην οποία κινείται το όχημα και συνεπώς και ο οφθαλμός του οδηγού, καθώς επίσης και τα ύψη του οφθαλμού και του εμποδίου στην παραπάνω οδογραμμή.

Επιπλέον, πρέπει να καθοριστεί η λειτουργική ταχύτητα  $V_{85}$ , ο χρόνος αντίδρασης του οδηγού και ο ρυθμός επιβράδυνσης του οχήματος. Οι δύο τελευταίες παράμετροι βάσει των Γερμανικών κανονισμών RAA επιλέγονται ως 2 sec και  $3,7 \text{ m/sec}^2$  αντίστοιχα.

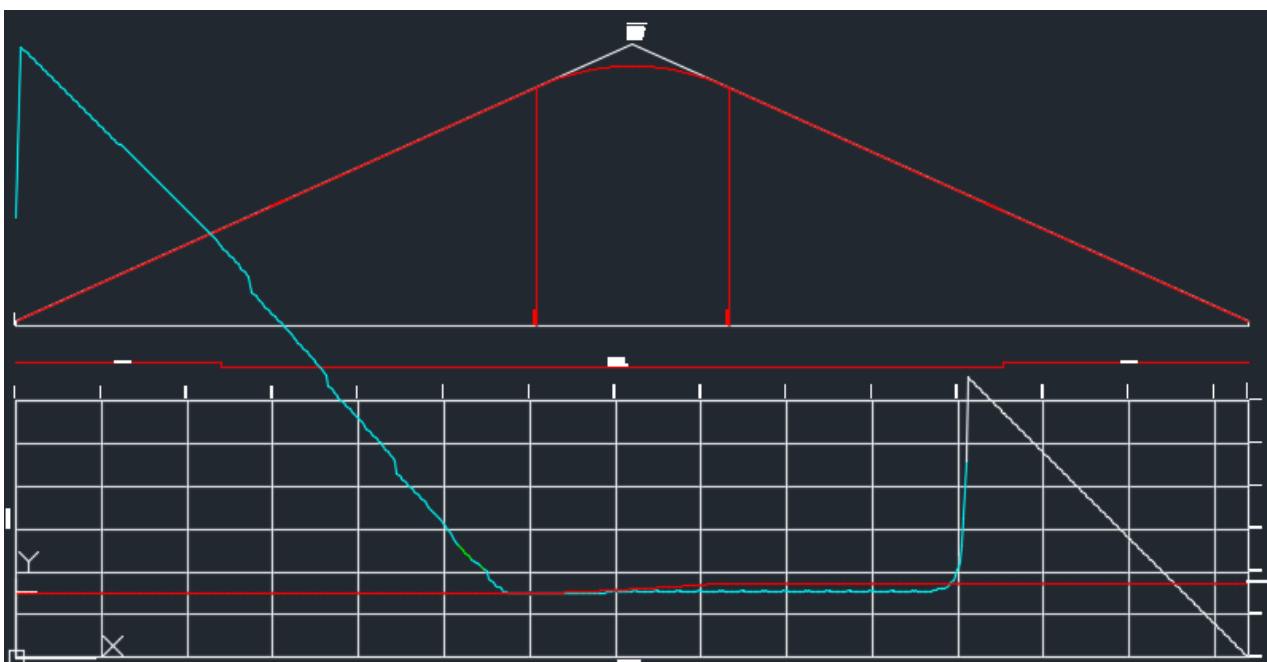


Ο/Γ Οφθαλμού = 1	Ορατότητα Μηκοτομής _____
Ο/Γ Εμποδίου = 1	Ορατότητα 3d-Έδαφος _____
Ύψος Οφθαλμού = 1.000m	Ορατότητα 3d - Κατάστρωμα _____
Ύψος Εμποδίου = 1.000m	Ορατότητα 3d - Διαμορφώσεις _____
Επιβράδυνση = 3.700 (m/sec/sec)	Ορατότητα 3d - Όρυγμα _____
Χρόνος Αντίδρασης = 2.000(sec)	Ορατότητα 3d - Επίχωμα _____
V85 = 100.000(km/hr)	Ορατότητα 3d - Τέλος _____

*Εικόνα 5.10: Υπόμνημα διαγράμματος ορατότητας του λογισμικού H14*

Στο διάγραμμα ορατότητας που θα παραχθεί δίνεται πλήρης εποπτεία των συνθηκών ορατότητας σε κάθε χιλιομετρική θέση του υπό μελέτη οδικού άξονα. Συγκεκριμένα, θα κατασκευαστούν τα γραφήματα απαιτούμενου Μήκους Ορατότητας για Στάση βάσει της δυναμικής του οχήματος και διαθέσιμου Μήκους Ορατότητας για Στάση βάσει της συσχέτισης μεταξύ της γραμμής όρασης του οδηγού και των πλευρικών διαμορφώσεων του υπό μελέτη άξονα.

Η σύγκριση των δύο γραφημάτων θα δώσει την πληροφορία επάρκειας ή ανεπάρκειας μήκους ορατότητας σε κάθε χιλιομετρική θέση ανάλυσης. Οι διαμορφώσεις που θα υπεισέρχονται στην ανάλυση ορατότητας θα είναι το διαχωριστικό κυκλοφορίας New Jersey και το τοίχιο της οδικής σήραγγας.



*Εικόνα 5.11: Διάγραμμα ορατότητας του λογισμικού H14*

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

### 6.1 Επάρκεια ορατότητας υπό σταθερή κλίση

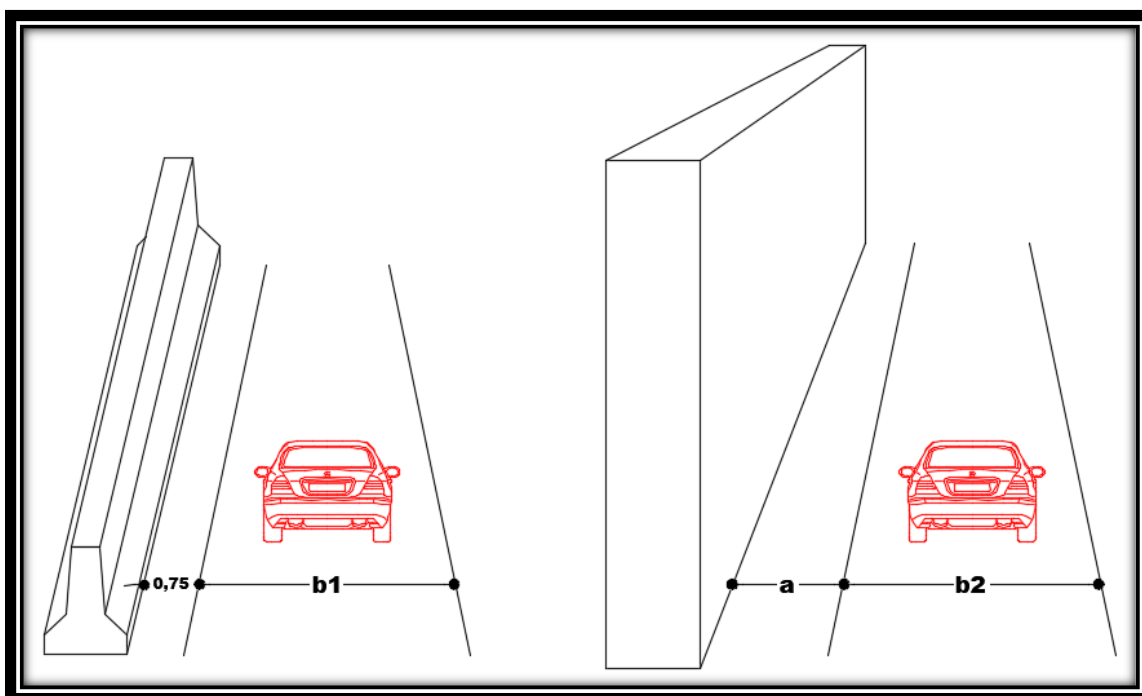
#### 6.1.1 Αποτελέσματα ανάλυσης

Αξιοποιώντας τη μεθοδολογία που αναλύθηκε λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 5 και με χρήση του εργαλείου «Επίλυση» του Excel (Solver), προέκυψαν τα αποτελέσματα απαίτησης γεωμετρικού σχεδιασμού της ακτίνας καμπυλότητας αριστερής στροφής για επάρκεια ορατότητας σε είσοδο σήραγγας. Οι αριθμητικές τιμές των αποτελεσμάτων παρουσιάζονται χωριστά για κάθε αποδεκτό ζεύγος διατομών, βάσει των Γερμανικών κανονισμών RAA-2008 και της απαίτησης διατήρησης ή μείωσης του πλάτους της λωρίδας κυκλοφορίας χάριν οικονομίας.

Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε για τα παρακάτω δεδομένα εισόδου:

- Ταχύτητα σχεδιασμού  $V$ : 80-90-100 km/h για ΕΚΑ 1, ΕΚΑ 2 (βάσει Ελληνικών οδηγιών ΟΜΟΕ-Χ-2001 για οδικές σήραγγες και Γερμανικών οδηγιών RAA-2008 για την κατηγοριοποίηση των διατομών),
- Κατά μήκος κλίση  $s$ :  $\pm 4.5\%$  (μέγιστη βάσει RAA) με υπολογιστικό βήμα 0.5%
- Επίκλιση  $\epsilon$ : 6% (μέγιστη βάσει RAA)

Τα πλάτη των λωρίδων κίνησης στον ανοιχτό αυτοκινητόδρομο και στην οδική σήραγγα ορίζονται ως  $b_1$  και  $b_2$ , αντίστοιχα. Γραφικά παρουσιάζονται στην εικόνα 6.1.



Εικόνα 6.1: Πλάτη λωρίδων κυκλοφορίας σε ανοιχτό αυτοκινητόδρομο και σήραγγα.

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης επάρκειας ορατότητας σε είσοδο σήραγγας για κάθε πιθανό ζεύγος χάραξης.

<u>ΖΕΥΓΟΣ</u>	Πλάτη b1/b2	Πλευρική Ανοχή
<b>RQ 36/36t</b>	3,50/3,50	1,25

**EKA 1**

V=80 km/h

s (%)	SSD	Rmin
-4,5	120,39	605
-4	119,28	594
-3,5	118,21	583
-3	117,16	573
-2,5	116,15	563
-2	115,17	554
-1,5	114,22	545
-1	113,29	536
-0,5	112,38	528
0	111,51	519
0,5	110,65	511
1	109,82	504
1,5	109,01	496
2	108,22	489
2,5	107,45	482
3	106,70	476
3,5	105,96	469
4	105,25	463
4,5	104,55	457

V=90 km/h

s (%)	SSD	Rmin
-4,5	145,96	889
-4	144,54	872
-3,5	143,18	855
-3	141,85	840
-2,5	140,56	824
-2	139,31	810
-1,5	138,09	796
-1	136,91	782
-0,5	135,76	769
0	134,64	757
0,5	133,55	744
1	132,49	733
1,5	131,45	721
2	130,45	710
2,5	129,47	700
3	128,51	689
3,5	127,58	679
4	126,67	670
4,5	125,78	660

V=100 km/h

s (%)	SSD	Rmin
-4,5	173,96	1262
-4	172,20	1237
-3,5	170,50	1213
-3	168,85	1189
-2,5	167,25	1167
-2	165,70	1145
-1,5	164,19	1124
-1	162,72	1104
-0,5	161,29	1085
0	159,90	1067
0,5	158,54	1049
1	157,23	1031
1,5	155,94	1015
2	154,69	998
2,5	153,48	983
3	152,29	968
3,5	151,13	953
4	150,00	939
4,5	148,90	925

**Πίνακας 6.1:** Αποτελέσματα ζεύγους ανάλυσης RQ36 / 36t

<u>ΖΕΥΓΟΣ</u>	Πλάτη b1/b2	Πλευρική Ανοχή
<b>RQ 36/36T</b>	3,50/3,50 m	1,50 m

**EKA 1**

V=80 km/h

s (%)	SSD	Rmin
-4,5	120,50	560
-4	119,40	549
-3,5	118,33	540
-3	117,29	530
-2,5	116,28	521
-2	115,31	513
-1,5	114,36	504
-1	113,43	496
-0,5	112,53	488
0	111,66	481
0,5	110,81	473
1	109,98	466
1,5	109,17	460
2	108,39	453
2,5	107,62	447
3	106,87	441
3,5	106,14	435
4	105,43	429
4,5	104,74	423

V=90 km/h

s (%)	SSD	Rmin
-4,5	146,02	821
-4	144,62	806
-3,5	143,25	791
-3	141,93	776
-2,5	140,65	762
-2	139,40	749
-1,5	138,19	736
-1	137,01	723
-0,5	135,87	711
0	134,75	700
0,5	133,67	688
1	132,61	678
1,5	131,58	667
2	130,58	657
2,5	129,60	647
3	128,65	638
3,5	127,72	629
4	126,82	620
4,5	125,93	611

V=100 km/h

s (%)	SSD	Rmin
-4,5	173,99	1165
-4	172,23	1142
-3,5	170,54	1120
-3	168,90	1098
-2,5	167,30	1078
-2	165,75	1058
-1,5	164,25	1039
-1	162,78	1020
-0,5	161,36	1003
0	159,97	985
0,5	158,62	969
1	157,31	953
1,5	156,03	938
2	154,79	923
2,5	153,58	908
3	152,39	894
3,5	151,24	881
4	150,11	868
4,5	149,02	855

**Πίνακας 6.2:** Αποτελέσματα ζεύγους ανάλυσης RQ36 / 36t

ΖΕΥΓΟΣ	Πλάτη b1/b2	Πλευρική Ανοχή
<b>RQ 31/31t</b>	3,75 / 3,50 m	1,25 m

**ΕΚΑ 1**

V=80 km/h

s (%)	SSD	Rmin
-4,5	120,36	614
-4	119,26	603
-3,5	118,18	592
-3	117,14	582
-2,5	116,13	572
-2	115,14	562
-1,5	114,19	553
-1	113,26	544
-0,5	112,36	535
0	111,48	527
0,5	110,62	518
1	109,79	511
1,5	108,98	503
2	108,19	496
2,5	107,41	489
3	106,66	482
3,5	105,93	475
4	105,21	469
4,5	104,52	463

V=90 km/h

s (%)	SSD	Rmin
-4,5	145,94	904
-4	144,53	887
-3,5	143,16	870
-3	141,83	854
-2,5	140,54	838
-2	139,29	823
-1,5	138,07	809
-1	136,89	795
-0,5	135,74	782
0	134,62	769
0,5	133,52	756
1	132,46	744
1,5	131,43	733
2	130,42	722
2,5	129,44	711
3	128,48	700
3,5	127,55	690
4	126,64	680
4,5	125,75	671

V=100 km/h

s (%)	SSD	Rmin
-4,5	173,95	1285
-4	172,20	1260
-3,5	170,50	1235
-3	168,85	1211
-2,5	167,24	1188
-2	165,69	1166
-1,5	164,18	1145
-1	162,70	1124
-0,5	161,27	1105
0	159,88	1086
0,5	158,53	1067
1	157,21	1050
1,5	155,93	1032
2	154,68	1016
2,5	153,46	1000
3	152,27	984
3,5	151,11	969
4	149,98	955
4,5	148,88	941

**Πίνακας 6.3:** Αποτελέσματα ζεύγους ανάλυσης RQ31 / 31t

ΖΕΥΓΟΣ	Πλάτη b1/b2	Πλευρική Ανοχή
<b>RQ 31/31T</b>	3,75 / 3,50 m	1,50 m

**ΕΚΑ 1**

V=80 km/h

s (%)	SSD	Rmin
-4,5	120,47	567
-4	119,37	556
-3,5	118,30	547
-3	117,26	537
-2,5	116,25	528
-2	115,28	519
-1,5	114,32	510
-1	113,40	502
-0,5	112,50	494
0	111,63	486
0,5	110,77	479
1	109,95	472
1,5	109,14	465
2	108,35	458
2,5	107,58	452
3	106,84	445
3,5	106,11	439
4	105,39	433
4,5	104,70	428

V=90 km/h

s (%)	SSD	Rmin
-4,5	146,00	834
-4	144,60	818
-3,5	143,23	802
-3	141,91	787
-2,5	140,63	773
-2	139,38	760
-1,5	138,17	746
-1	136,99	734
-0,5	135,84	721
0	134,72	710
0,5	133,64	698
1	132,58	687
1,5	131,55	676
2	130,55	666
2,5	129,57	656
3	128,62	646
3,5	127,69	637
4	126,78	628
4,5	125,90	619

V=100 km/h

s (%)	SSD	Rmin
-4,5	173,97	1185
-4	172,22	1161
-3,5	170,53	1138
-3	168,88	1116
-2,5	167,29	1095
-2	165,74	1075
-1,5	164,23	1055
-1	162,76	1037
-0,5	161,34	1019
0	159,95	1001
0,5	158,60	984
1	157,29	968
1,5	156,01	952
2	154,77	937
2,5	153,55	922
3	152,37	908
3,5	151,21	894
4	150,09	881
4,5	148,99	868

**Πίνακας 6.4:** Αποτελέσματα ζεύγους ανάλυσης RQ31 / 31T

ΖΕΥΓΟΣ	Πλάτη b1/b2	Πλευρική Ανοχή
<b>RQ 31/31T+</b>	3,75/3,75 m	1,75 m

### ΕΚΑ 1

V=80 km/h

s (%)	SSD	Rmin
-4,5	120,71	504
-4	119,62	495
-3,5	118,56	486
-3	117,53	478
-2,5	116,53	470
-2	115,56	462
-1,5	114,62	454
-1	113,70	447
-0,5	112,81	440
0	111,94	433
0,5	111,10	427
1	110,28	421
1,5	109,48	415
2	108,70	409
2,5	107,93	403
3	107,19	397
3,5	106,47	392
4	105,76	387
4,5	105,07	382

V=90 km/h

s (%)	SSD	Rmin
-4,5	146,17	738
-4	144,78	724
-3,5	143,42	711
-3	142,11	698
-2,5	140,83	685
-2	139,59	673
-1,5	138,39	662
-1	137,22	651
-0,5	136,08	640
0	134,98	629
0,5	133,90	620
1	132,85	610
1,5	131,83	601
2	130,83	592
2,5	129,86	583
3	128,92	574
3,5	127,99	566
4	127,09	558
4,5	126,21	551

V=100 km/h

s (%)	SSD	Rmin
-4,5	174,06	1046
-4	172,33	1025
-3,5	170,64	1005
-3	169,01	986
-2,5	167,42	968
-2	165,88	950
-1,5	164,38	933
-1	162,93	917
-0,5	161,51	901
0	160,14	886
0,5	158,80	871
1	157,49	857
1,5	156,22	843
2	154,98	830
2,5	153,78	817
3	152,60	804
3,5	151,46	792
4	150,34	781
4,5	149,24	769

**Πίνακας 6.5:** Αποτελέσματα ζεύγους ανάλυσης RQ31 / 31T+

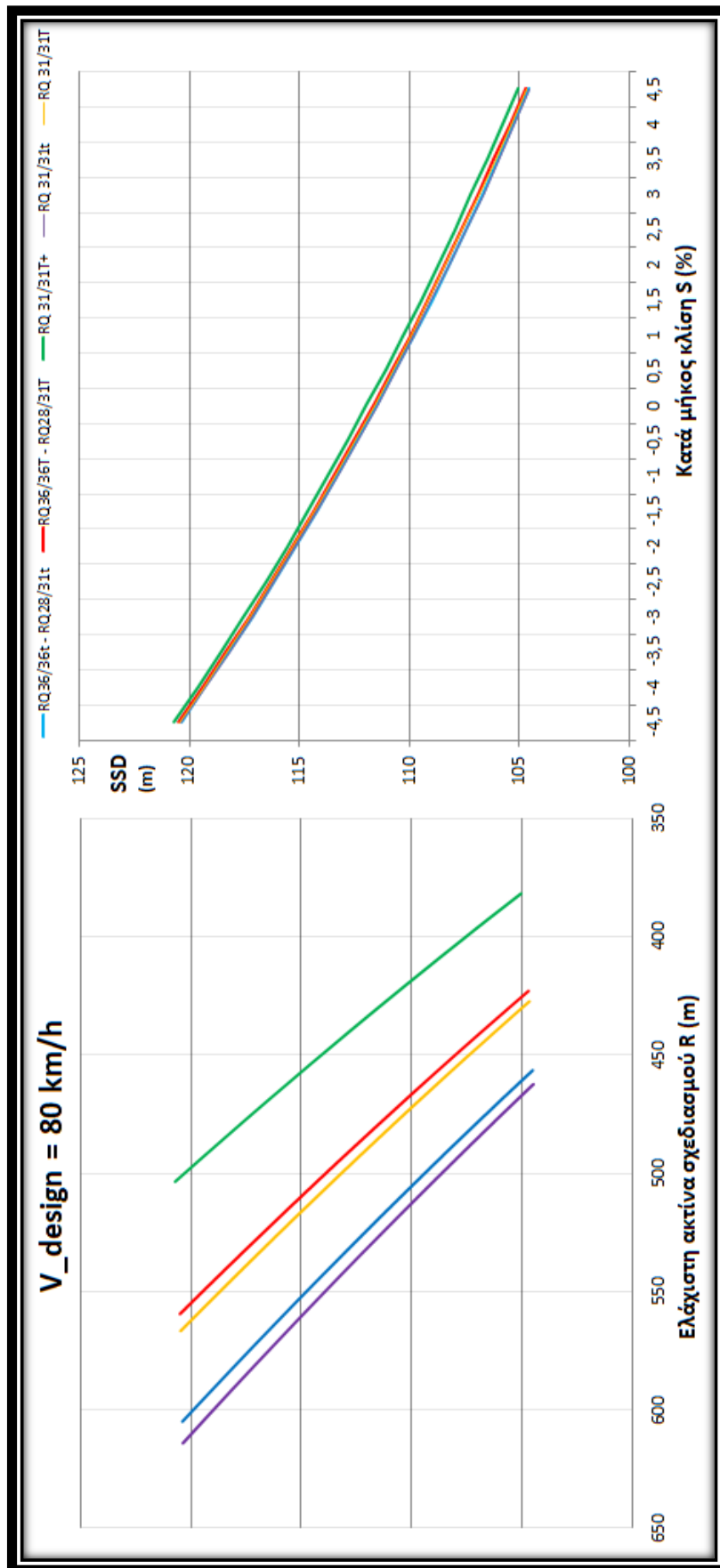
Τα αποτελέσματα απαίτησης μήκους ορατότητας για στάση και ακτίνας σχεδιασμού των διατομών RQ 28 / 31t και RQ 28 / 31T ταυτίζονται με τα ζεύγη RQ36 / 36t και RQ36 / 36T αντίστοιχα.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα εξάγεται εύκολα το συμπέρασμα ότι η απαίτηση της ακτίνας σχεδιασμού R σε αριστερή καμπύλη αυξάνεται με ταυτόχρονη αύξηση της ταχύτητας σχεδιασμού V<sub>design</sub> και μείωση του πλάτους της πλευρικής ανοχής α.

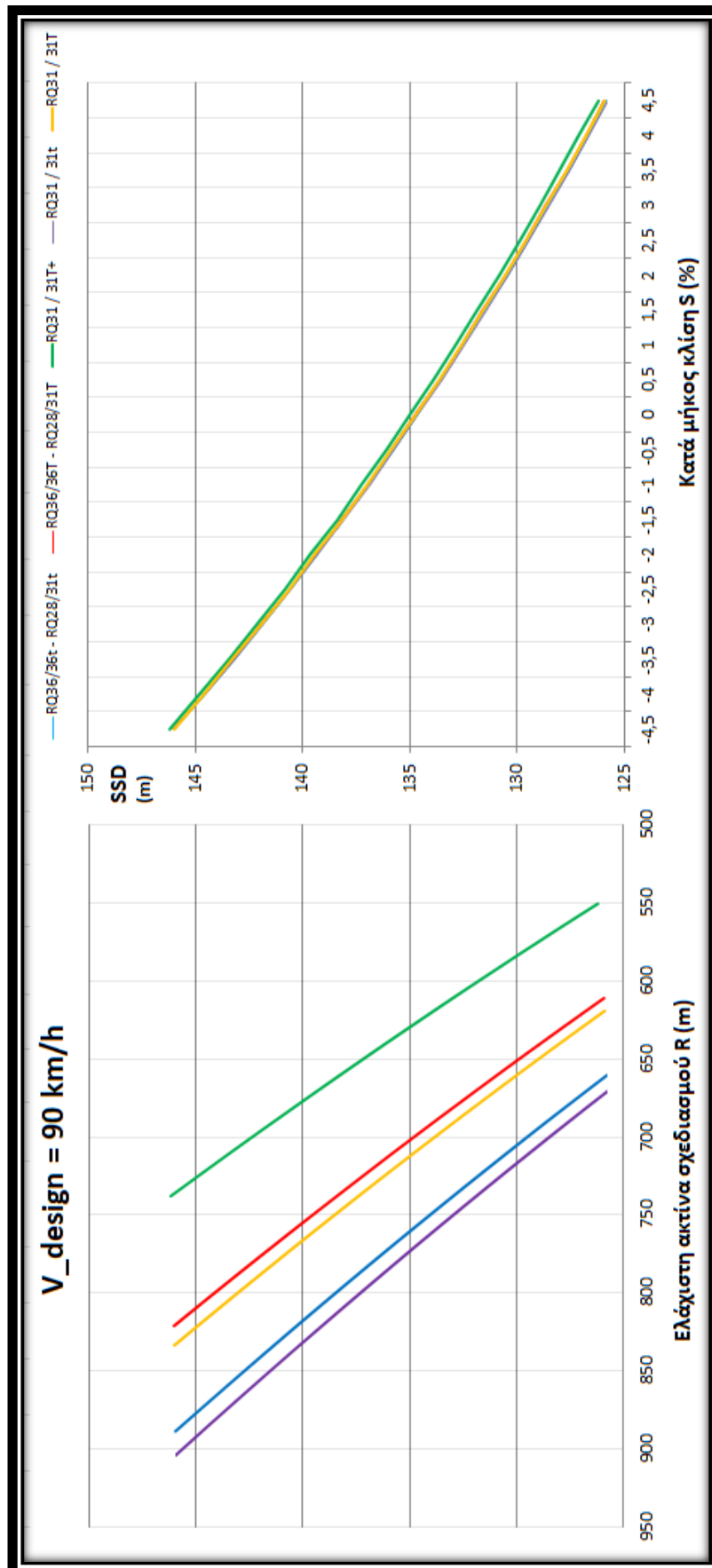
Στα παρακάτω διαγράμματα γίνεται εμφανής η απαίτηση διαφορετικών ελάχιστων ακτινών σχεδιασμού R<sub>min</sub> για την ασφαλή πέδηση των οχημάτων στο τμήμα της εισόδου σήραγγας. Είναι σημαντική η παρατήρηση ότι διαφορετικά ζεύγη διατομών δημιουργούν μικρότερες ή μεγαλύτερες απαιτήσεις ελάχιστης ακτίνας R<sub>min</sub>, παρά το γεγονός ότι το απαιτούμενο Μήκος Ορατότητας για Στάση μπορεί να είναι κοινό.

Η παρατήρηση αυτή υπογραμμίζει τη σημασία της επιρροής τόσο του πλάτους της λωρίδας κυκλοφορίας όσο, κυρίως, της πλευρικής απόστασης της τροχιάς κίνησης του οδηγού από το εσωτερικό τοίχωμα της σήραγγας στις απαιτήσεις γεωμετρικού σχεδιασμού αριστερής στροφής στην επάρκεια ορατότητας.

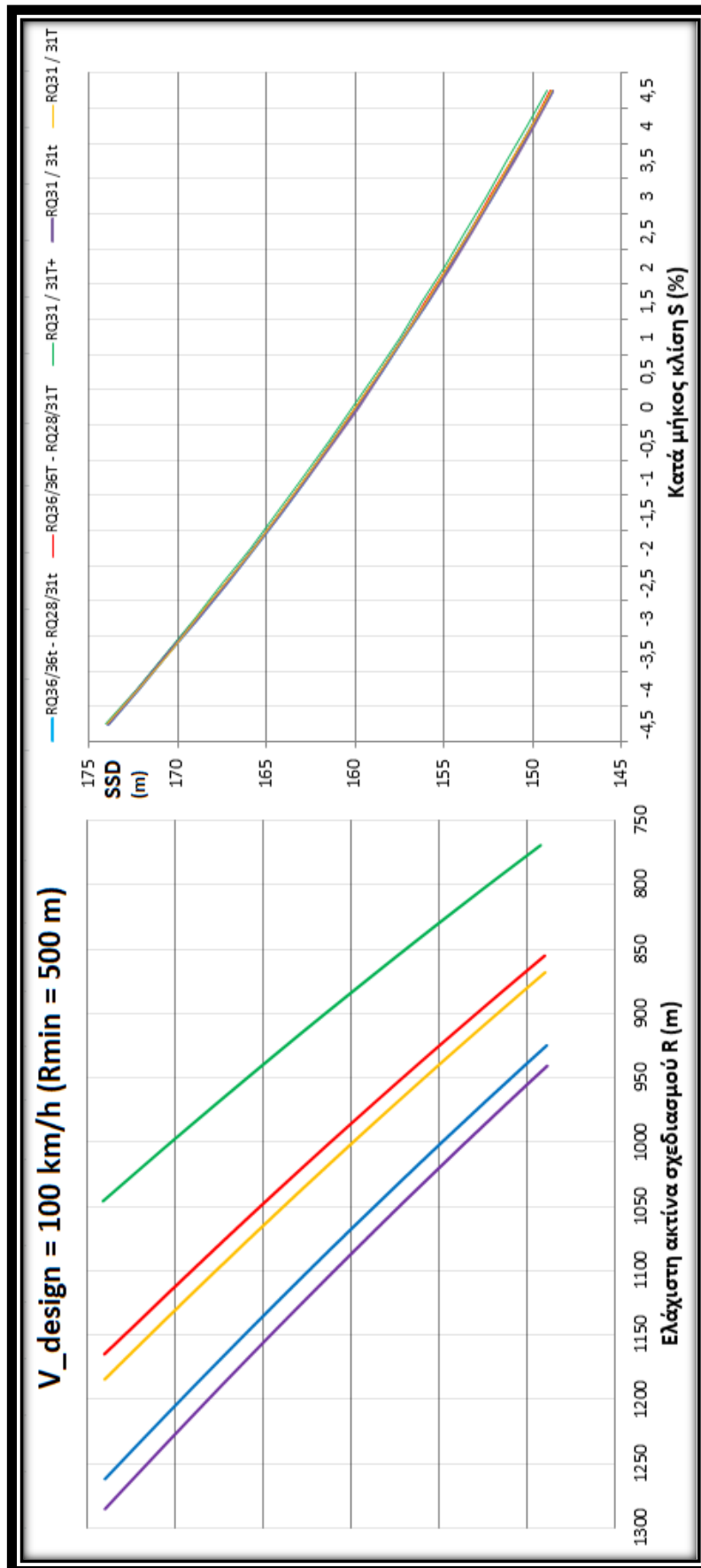
Εικόνα 6.2: Διάγραμμα προσδιορισμού ελάχιστης επιτρεπόμενης ακτίνας σχεδιασμού για κάθε ζεύγος χάραξης ( $V=80$  km/h)



Εικόνα 6.3: Διάγραμμα προσδιορισμού ελάχιστης επιτρεπόμενης ακτίνας σχεδιασμού για κάθε ζεύγος χάραξης ( $V=90 \text{ km/h}$ )



Εικόνα 6.4: Διάγραμμα προσδιορισμού ελάχιστης επιτρεπόμενης ακτίνας σχεδιασμού για κάθε ζεύγος χάραξης ( $V=100 \text{ km/h}$ )





### 6.1.2 Μαθηματικό μοντέλο πρόβλεψης

Σε διάφορα προβλήματα της Στατιστικής το ενδιαφέρον εστιάζεται στην ταυτόχρονη μελέτη δύο ή περισσότερων μεταβλητών, για να προσδιοριστεί ο τρόπος με τον οποίο συσχετίζονται αυτές οι μεταβλητές μεταξύ τους. Ο κλάδος της στατιστικής που εξετάζει τη σχέση μεταξύ δύο ή περισσότερων μεταβλητών με απώτερο σκοπό την πρόβλεψη μιας από αυτές μέσω των άλλων λέγεται **ανάλυση της παλινδρόμησης (regression analysis)**. Στην απλή παλινδρόμηση χρησιμοποιείται μόνο μία ανεξάρτητη μεταβλητή  $X$ , η οποία μπορεί να εκφράσει ικανοποιητικά την εξαρτημένη μεταβλητή  $Y$ . Η παλινδρόμηση στην οποία υπάρχουν περισσότερες από μία ανεξάρτητες μεταβλητές, καλείται πολλαπλή παλινδρόμηση.

Η γραμμική παλινδρόμηση αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες και σημαντικές μορφές πολλαπλής παλινδρόμησης, όπου η τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής είναι ένας γραμμικός συνδυασμός μιας ή περισσότερων ανεξαρτήτων μεταβλητών. Η γενική μορφή αυτού του γραμμικού μοντέλου είναι η εξής:

$$Y = \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \dots + \beta_0 + \varepsilon,$$

Όπου  $\beta_i$  οι συντελεστές και  $X_i$  οι ανεξάρτητες μεταβλητές. Ένα μοντέλο πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης συλλαμβάνει το γεγονός ότι κάθε ανεξάρτητη μεταβλητή επηρεάζει και συνεισφέρει στην αναμενόμενη τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής με κάποιο συντελεστή  $\beta$ , και η συνεισφορά των ανεξαρτήτων μεταβλητών είναι αθροιστική. Οι συντελεστές  $\beta$  καθορίζουν το πόσο συνεισφέρει κάθε ανεξάρτητη μεταβλητή.

### 6.1.3 Κριτήρια αποδοχής μοντέλου

Τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση και τη αποδοχή ενός μοντέλου μετά τη δημιουργία του είναι τα πρόσημα και οι τιμές των συντελεστών  $\beta_i$  ( $b_i$ ) της εξίσωσης, η στατιστική σημαντικότητα, την ποιότητα του μοντέλου και τα κριτήρια προσαρμογής.

Οι συντελεστές της εξίσωσης στη γραμμική παλινδρόμηση εκτιμώνται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων κι όσον αφορά τα πρόσημά τους, αυτά ερμηνεύονται λογικά. Το θετικό πρόσημο του συντελεστή δηλώνει αύξηση της εξαρτημένης μεταβλητής με την αύξηση της ανεξάρτητης. Αντίθετα, αρνητικό πρόσημο δηλώνει μείωση της εξαρτημένης μεταβλητής με την αύξηση της ανεξάρτητης.

Το επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας ενός μαθηματικού μοντέλου καθορίζεται μέσω της τιμής **p-value (probability value)**. Το p-value είναι εργαλείο που συναντάται σε όλες τις στατιστικές αναλύσεις και τα αποτελέσματα των ελέγχων. Για να θεωρηθεί στατιστικά σημαντική η ανάλυση ενός μαθηματικού μοντέλου πρόβλεψης, θα πρέπει η τιμή της πιθανότητας  $p$  να είναι μικρότερη ή ίση του επιπέδου σημαντικότητας  $\alpha$ , το οποίο ορίζει το αποδεκτό όριο σφάλματος. Για στατιστική σημαντικότητα με διάστημα εμπιστοσύνης 95% έχουμε  $\alpha=0.05$  και συνεπώς πρέπει  $p \leq 0.05$  για να γίνει αποδεκτό το μοντέλο πρόβλεψης.

Η ποιότητα του μοντέλου καθορίζεται από την τιμή του  $R^2$ , το οποίο χρησιμοποιείται ως κριτήριο καλής προσαρμογής των δεδομένων στο μοντέλο. Το **προσαρμοσμένο (adjusted)  $R^2$**  αποτελεί συντελεστή που λαμβάνει τιμές από 0 έως 1 και ορίζει το ποσοστό της μεταβλητής απόκρισης που εξηγείται από ένα γραμμικό μοντέλο. Όσο πιο κοντά βρίσκεται η τιμή του  $R^2$

στη μονάδα, τόσο πιο ισχυρή γίνεται η γραμμική σχέση εξάρτησης μεταξύ των μεταβλητών  $Y$  και  $X$ . Δηλαδή, όσο υψηλότερο είναι το  $R^2$  τόσο καλύτερα εκφράζει το μοντέλο την εξαρτημένη μεταβλητή.

Κριτήριο προσαρμογής αποτελεί η τιμή του **Student's t-test** ή **t-test**, η οποία εκφράζει την επιρροή μιας ανεξάρτητης μεταβλητής στο τελικό αποτέλεσμα. Όσο αυξάνεται η τιμή του συντελεστή της μεταβλητής, τόσο αυξάνεται κι η επιρροή της μεταβλητής αυτής. Το  $t$  μπορεί να πάρει αρνητικές και θετικές τιμές, αφού αυτό εξαρτάται από το πρόσημο του συντελεστή ( $\beta$ ). Μεγάλη τιμή του  $t$  κατά απόλυτη τιμή υποδεικνύει ισχυρή στατιστική σημαντικότητα. Συγκεκριμένα, για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, το  $t$  είναι ίσο με 1,96. Επομένως, για να κριθεί μια μεταβλητή αξιόλογη και στατιστικά σημαντική και να συμπεριληφθεί στο μοντέλο, θα πρέπει το  $t$ -test να έχει μια τιμή μεγαλύτερη από 1,96.

#### 6.1.4 Ανάλυση δεδομένων μέσω γραμμικής συσχέτισης

Χρησιμοποιώντας ως δεδομένα τα αποτελέσματα της επίλυσης των γεωμετρικών προβλημάτων που ορίστηκαν προηγουμένως, επιχειρήθηκε η μόρφωση γραμμικής μαθηματικής σχέσης παλινδρόμησης των μεγεθών που επηρεάζουν την ελάχιστη απαιτούμενη ακτίνα σχεδιασμού για επάρκεια ορατότητας σε είσοδο σήραγγας.

Για τον καθορισμό της μαθηματικής σχέσης έγιναν δύο συσχετίσεις. Για την πρώτη λήφθηκαν τα δεδομένα της ταχύτητας σχεδιασμού υψωμένης στην 1<sup>η</sup> δύναμη ( $V$ ) και για τη δεύτερη θεωρήθηκε υψωμένη στο τετράγωνο ( $V^2$ ). Η δεύτερη θεώρηση έδωσε συσχέτιση με ελαφρώς μεγαλύτερο δείκτη προσαρμοσμένου  $R^2$  (98,26%), συνεπώς και επιλέχθηκε.

Θεωρώντας ως εξαρτημένη μεταβλητή  $Y$  την ακτίνα ( $R_{min}$ ) και ως ανεξάρτητες  $X_1$  την ταχύτητα σχεδιασμού υψωμένη στο τετράγωνο ( $V^2$ ), τη σταθερή κατά μήκος κλίση του αυτοκινητόδρομου ( $s$ ) και τις διαστάσεις της διατομής στο στόμιο της σήραγγας ( $c$ ), προέκυψε η μαθηματική σχέση παλινδρόμησης:

$$R_{min} = 0,141 * V^2 - 23,96 * s - 210,8 * c + 266,85$$

Η ταχύτητα εισάγεται σε χιλιόμετρα ανά ώρα (km/h), η κλίση επί τοις εκατό (%) ενώ η διάσταση  $c$  σε μέτρα (m), για την οποία ισχύει:

$$c = \frac{b}{2} + a$$

Ως  $b$  ορίζεται το πλάτος της λωρίδας ταχείας κυκλοφορίας και ως  $a$  το πλάτος της πλευρικής ανοχής. Για γραμμική συσχέτιση με την ανεξάρτητη μεταβλητή της ταχύτητας σχεδιασμού υψωμένη στο τετράγωνο, ο στατιστικός δείκτης του προσαρμοσμένου  $R^2$  ανέρχεται στο 98,3%.

Από την ανάγνωση της βαρύτητας κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής του μοντέλου εξάγεται το συμπέρασμα ότι σημαντικότερο παράμετρο επιρροής της τιμής της ελάχιστης επιτρεπόμενης ακτίνας σχεδιασμού αποτελεί η ταχύτητα σχεδιασμού  $V$ . Η εξαρτημένη μεταβλητή  $R_{min}$  αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας σχεδιασμού  $V$ , ενώ μειώνεται με την αύξηση της κατά μήκος κλίσης  $s$  του οδικού άξονα ή την αύξηση της πλευρικής ανοχής  $c$ .

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δεδομένων παρουσιάζονται στον πίνακα 6.6:

Στατιστικά παλινδρόμησης				
Πολλαπλό R		0,991395616		
R Τετράγωνο		0,982865267		
Προσαρμοσμένο R Τετράγωνο		<b>0,982557458</b>		
Τυπικό σφάλμα		29,92603912		
Μέγεθος δείγματος		171		

ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ				
	βαθμοί ελευθερίας	SS	MS	F
Παλινδρόμηση	3	8578899,93	2859633,31	3193,095212
Υπόλοιπο	167	149559,8255	895,5678176	
Σύνολο	170	8728459,756		

	Συντελεστές	Τυπικό σφάλμα	t	τιμή-P
Τεταγμένη επί την αρχή	<b>266,8479915</b>	32,04573462	8,327098587	2,86155E-14
s(%)	<b>-23,9587168</b>	0,835642563	-28,67101062	2,12091E-66
V <sup>2</sup> (m)	<b>0,140910181</b>	0,001556328	90,54017975	7,3661E-144
c (m)	<b>-210,7956856</b>	8,90985482	-23,6587116	3,29463E-55

**Πίνακας 6.6:** Αποτελέσματα στατιστικής παλινδρόμησης μέσω ανάλυσης δεδομένων (Data Analysis)

## 6.2 Εφαρμογή αποτελεσμάτων στην τρισδιάστατη προσέγγιση

### 6.2.1 Σκοπός της ανάλυσης

Για να εξεταστεί η επάρκεια άντλησης αποτελεσμάτων γεωμετρικής χάραξης υπό διδιάστατη ανάλυση και η μετέπειτα εφαρμογή τους σε ένα σύνθετο τρισδιάστατο μοντέλο, ορίστηκε το πρόβλημα επάρκειας ορατότητας σε κυρτή καμπύλη σε είσοδο σήραγγας στο λογισμικό H14.

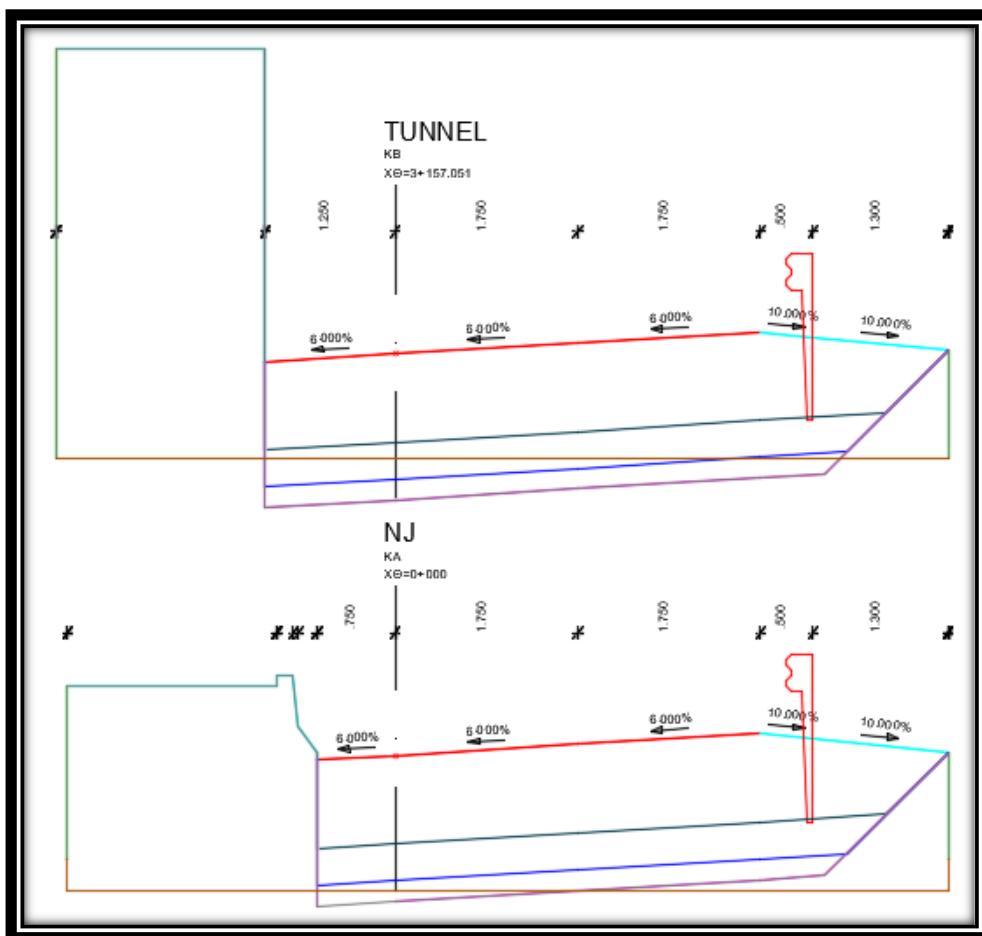
Τα αποτελέσματα ελάχιστων επιτρεπόμενων ακτινών σχεδιασμού αριστερής στροφής R<sub>min</sub> για κάθε ζεύγος διατομών, που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, τέθηκαν υπό εξέταση σε μηκοτομή μεταβαλλόμενης κλίσης αυτή τη φορά, ώστε να καθοριστεί αν ταυτόχρονα μεταβάλλεται και το επίπεδο της διατιθέμενης ορατότητας που παρέχουν. Πιο συγκεκριμένα, σχεδιάστηκε οδικός άξονας με σταθερή ακτίνα αριστερής στροφής ίση με την ελάχιστη επιτρεπόμενη για 0% κατά μήκος κλίση για κάθε ζεύγος διατομών, σε κυρτή μηκοτομή με 4,5% ανωφέρεια και 4,5% κατωφέρεια. Στη σύνθετη αυτή χάραξη εκτιμήθηκε αν πράγματι η χρήση της ελάχιστης ακτίνας σχεδιασμού R<sub>min</sub> για σταθερή κατά μήκος κλίση s=0% θα παρέχει στον οδηγό επαρκή ορατότητα μέχρι την κορυφή της κυρτής μηκοτομής.

### 6.2.2 Ορισμός του μοντέλου ανάλυσης στο λογισμικό H14

Πρώτο βήμα μόρφωσης του γεωμετρικού μοντέλου αποτελεί η κατασκευή των σωστών διατομών του οδικού άξονα στον ανοιχτό αυτοκινητόδρομο και στη σήραγγα, μέσω των οδογραμμών. Για τις ανάγκες της ανάλυσης ορίστηκε μία λωρίδα κυκλοφορίας και ως άξονας της οδού επιλέχθηκε η αριστερή οριογραμμή της. Αριστερά του άξονα αναφοράς ορίστηκε μία οδογραμμή (-1) σε απόσταση ίση με το πλάτος της εσωτερικής λωρίδας καθοδήγησης. Δεξιά του άξονα μορφώθηκαν δύο οδογραμμές, με την πρώτη (1) να ορίζει το μέσον της λωρίδας κυκλοφορίας και τη δεύτερη (2) τη δεξιά οριογραμμή της.

Η επίκλιση κάθε τμήματος ορίστηκε ίση με 6% βάσει των Γερμανικών κανονισμών RAA-2008. Εφόσον το όχημα θεωρείται ότι κινείται στο μέσον της λωρίδας κυκλοφορίας, επιλέχθηκε η οδογραμμή 1 ως η οδογραμμή στην οποία βρίσκεται ο οφθαλμός του οδηγού και το σημειακό εμπόδιο. Το ύψος των δύο αυτών παραμέτρων τέθηκε στο 1,00 m.

Τα δομικά εμπόδια ως προς τα οποία πραγματοποιείται η ανάλυση ορατότητας ορίστηκαν ως πλευρικές διαμορφώσεις. Συγκεκριμένα, για το διαχωριστικό κυκλοφορίας New Jersey ο σχεδιασμός έγινε βάσει της τυπικής διατομής του ενώ ο αριστερός τοίχος αντιστήριξης της οδικής σήραγγας θεωρήθηκε κατακόρυφος. Τα δεδομένα των ακριβών διαστάσεων των δομικών εμποδίων δίδονται στο λογισμικό H14 μέσω των αποστάσεων ΔΧ και ΔΥ των σημείων που ορίζουν τα ευθύγραμμα τμήματα που απαρτίζουν τη διατομή τους.



Εικόνα 6.5: Διατομές αυτοκινητόδρομου/σήραγγας στο λογισμικό H14

### 6.2.3 Διαδικασία και αποτελέσματα ανάλυσης

Έχοντας ολοκληρώσει το γεωμετρικό μοντέλο σύμφωνα με το οποίο θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση ορατότητας, είναι πλέον δυνατός ο καθορισμός των συνθηκών ορατότητας για οποιαδήποτε θέση τοποθέτησης του στομίου εισόδου της σήραγγας επιλεχθεί. Θεωρώντας την κορυφή της κυρτής μηκοτομής (σημαία) στο μέσον του υπό μελέτη άξονα, μπορούμε να γνωρίζουμε την ακριβή χιλιομετρική θέση της εισόδου στη σήραγγα για δεδομένες αποστάσεις της ως προς τη σημαία της μηκοτομής.

Θέτοντας ως υπολογιστικό βήμα τοποθέτησης του στομίου της σήραγγας τα 50m, μπορούμε να εντοπίσουμε τις χιλιομετρικές θέσεις διακοπής ορατότητας για κάθε ζεύγος διατομών και για κάθε συνδυασμό ακτίνας αριστερής στροφής R και ακτίνας κυρτού τόξου συναρμογής H. Στη συνέχεια, συγκρίνοντας τη χιλιομετρική θέση της αρχής της οδικής σήραγγας με τη χιλιομετρική θέση της διακοπής ορατότητας μπορούμε να εξαγάγουμε συμπέρασμα αν το εμπόδιο που προκάλεσε την απώλεια των απαιτούμενων συνθηκών ορατότητας είναι το διαχωριστικό κυκλοφορίας New Jersey ή ο τοίχος αντιστήριξης της σήραγγας.

Επιπλέον, έχοντας ως δεδομένη την αρχική κατά μήκος κλίση  $S_1$ , την ακτίνα του κυρτού τόξου συναρμογής H, το μήκος T και την απόσταση της ΧΘ διακοπής ορατότητας από τη σημαία της μηκοτομής dx, μπορούμε να υπολογίσουμε ποια είναι η σημειακή κατά μήκος κλίση  $S'$  (%) μέχρι την οποία έχω επαρκές μήκος ορατότητας για στάση. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται με χρήση της σχέσης:

$$S' = S_1 - \frac{T - dx}{H_k} * 100$$

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα. Είναι εμφανές ότι παρόλο που χρησιμοποιήθηκαν ακτίνες αριστερής στροφής οι οποίες ήταν οριακά επαρκείς από άποψη ορατότητας για οποιαδήποτε κλίση ανωφέρειας σύμφωνα με τη διδιάστατη ανάλυση, στην περίπτωση κυρτής μηκοτομής η ορατότητα χάνεται πριν φτάσουμε την κατά μήκος κλίση  $s=0\%$ .

Η διαπίστωση αυτή αποδεικνύει την ανεπάρκεια της προσέγγισης επάρκειας ορατότητας βάσει του οριζοντιογραφικού σχεδιασμού στις περιπτώσεις που αυτή συνδυάζεται με μηκοτομή μεταβλητής κατά μήκος κλίσης. Να σημειωθεί ότι οι ακτίνες R για σταθερή κατά μήκος κλίση  $s=0\%$  αντλήθηκαν από τα αποτελέσματα του υποκεφαλαίου 6.1.1, αφού πρώτα αφαιρέθηκε το πλάτος της λωρίδας κυκλοφορίας. Ο λόγος της διόρθωσης έγκειται στο γεγονός ότι η ανάλυση υπό σταθερή κατά μήκος κλίση s πραγματοποιήθηκε με άξονα αναφοράς τη δεξιά οριογραμμή της αριστερής λωρίδας κυκλοφορίας, ενώ στο λογισμικό H14 η ακτίνα R ορίστηκε στην αριστερή οριογραμμή. Η διαφορά μεταξύ των δύο ακτινών ισούται με το συνολικό πλάτος της λωρίδας κίνησης.

Για τα ζεύγη διατομών RQ 31 / 31t και RQ 31 / 31T έχουμε σύζευξη διατομών με διαφορετικό πλάτος λωρίδας. Στην περίπτωση αυτή οι αναλυτικές εξισώσεις υπολογισμού μεταβάλλονται για τους διάφορους άξονες αναφοράς που μπορεί να θεωρηθούν. Συνεπώς, υπό τη θεώρηση της αριστερής οριογραμμής ως σταθερό άξονα αναφοράς, τα αποτελέσματα της οριακής επιτρεπόμενης ακτίνας σχεδιασμού R δεν ταυτίζονται με αυτές του υποκεφαλαίου 6.1.1. Οι οριακές επιτρεπόμενες ακτίνες με το νέο υπολογισμό παρουσιάζονται με κόκκινο χρώμα.

V=100km/h			
Κλάση σχεδιασμού	Ζεύγος Διατομών	Κατά μήκος κλίση στη θέση διακοπής (%)	R για s=0% από διδιάστατη προσέγγιση (m)
<u>EKA 1</u>	RQ 36/36t	1,87	1064
	RQ 36/36T	1,88	982
	RQ 31/31t	1,89	1041
	RQ 31/31T	1,87	964
	RQ 31/31T+	0,00	883
<u>EKA 2</u>	RQ 28/31t	1,88	1064
	RQ 28/31T	1,86	982

V=90km/h			
Κλάση σχεδιασμού	Ζεύγος Διατομών	Κατά μήκος κλίση στη θέση διακοπής (%)	R για s=0% από διδιάστατη προσέγγιση (m)
<u>EKA 1</u>	RQ 36/36t	2,09	754
	RQ 36/36T	2,13	697
	RQ 31/31t	2,12	738
	RQ 31/31T	2,16	683
	RQ 31/31T+	2,17	626
<u>EKA 2</u>	RQ 28/31t	2,11	754
	RQ 28/31T	2,13	697

V=80km/h			
Κλάση σχεδιασμού	Ζεύγος Διατομών	Κατά μήκος κλίση στη θέση διακοπής (%)	R για s=0% από διδιάστατη προσέγγιση (m)
<u>EKA 1</u>	RQ 36/36t	0,73	516
	RQ 36/36T	0,77	478
	RQ 31/31t	0,70	505
	RQ 31/31T	0,75	468
	RQ 31/31T+	0,69	430
<u>EKA 2</u>	RQ 28/31t	0,73	516
	RQ 28/31T	0,77	478

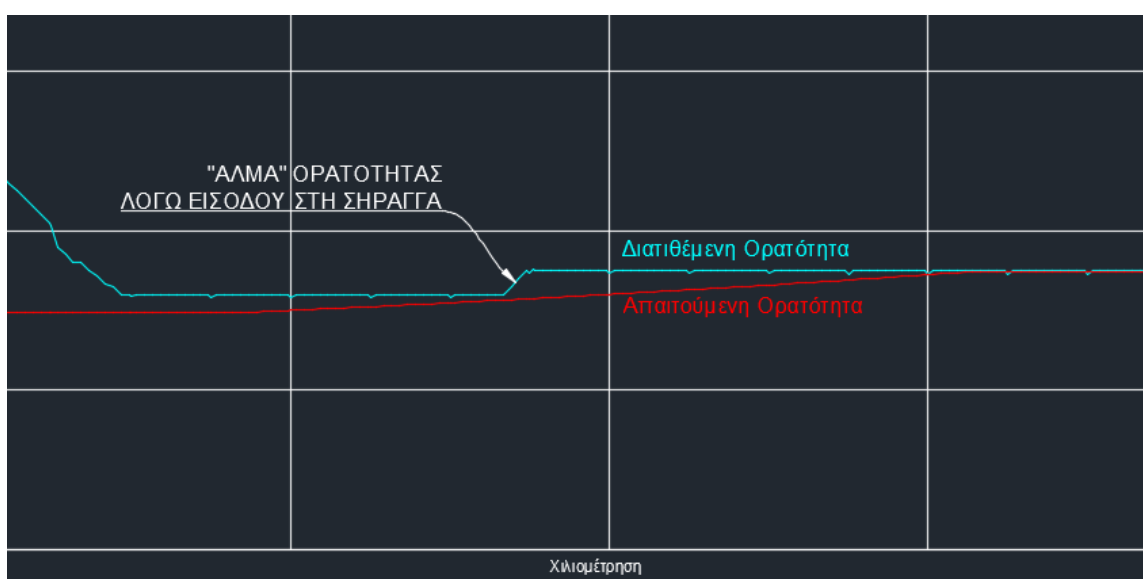
**Πίνακας 6.7:** Έλεγχος επάρκειας ορατότητας εντός σήραγγας σε κυρτή μηκοτομή με χρήση οριακών ακτινών R από τη διδιάστατη ανάλυση

Πρέπει να παρατηρηθεί ότι για το ζεύγος διατομών RQ 31 / 31T+ και για ταχύτητα σχεδιασμού V=100 km/h, η κατά μήκος κλίση στη θέση διακοπής ορατότητας βάσει της τρισδιάστατης ανάλυσης ταυτίζεται με αυτή της οριζοντιογραφικής, δηλαδή την s=0% (κόκκινο πλαίσιο). Πράγματι, λοιπόν, για τη συγκεκριμένη περίπτωση ο σχεδιασμός με την οριακή επιτρεπόμενη ακτίνα της 2-D προσέγγισης δίνει επάρκεια ορατότητας έως και την κορυφή της κυρτής μηκοτομής.

Κατά την ανάλυση των επιτρεπόμενων ζευγών τυπικών διατομών ανοιχτού αυτοκινητόδρομου και οδικής σήραγγας βάσει των οδηγιών RAA, παρατηρήθηκε ότι για εφαρμογή κυρτών τόξων συναρμογής ακτίνας  $H \geq 10.000\text{m}$ , το διατιθέμενο μήκος ορατότητας για στάση λόγω παρεμπόδισης του διαχωριστικού κυκλοφορίας New Jersey είναι μεγαλύτερο του απαιτούμενου. Συνεπώς η γραμμή ορατότητας του οδηγού διέρχεται πάνω από το διαχωριστικό όσο εκείνος κινείται στην ανοικτή οδό. Εφόσον η πλευρική απόσταση του New Jersey είναι σταθερή για κάθε τυπική διατομή αυτοκινητόδρομου και ίση με  $0,75\text{m}$ , το παραπάνω συμπέρασμα ισχύει για κάθε διατομή και για κάθε ταχύτητα ανάλυσης, ανεξαρτήτως κλάσης σχεδιασμού EKA 1 ή EKA 2.

Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι για τόξα συναρμογής με  $H < 10.000\text{m}$  και με χρήση των οριακών ακτινών αριστερής στροφής R για οριακή επάρκεια ορατότητας εντός της οδικής σήραγγας, τα διατιθέμενα μήκη ορατότητας για στάση εντός της σήραγγας είναι μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα στην ανοικτή οδό. Η σημασία της παρατήρησης αυτής είναι ότι το διαχωριστικό New Jersey αποτελεί κρισιμότερο εμπόδιο ορατότητας απ' ό,τι ο τοίχος αντιστήριξης της σήραγγας, συνεπώς θα πρέπει να εκτιμηθεί η σχετική θέση της οδού ως προς την κορυφή της μηκοτομής στην οποία θα πρέπει να έχει σχεδιαστεί η οδική σήραγγα ούτως ώστε να μην υπάρξει διακοπή της ορατότητας λόγω του New Jersey.

Στην εικόνα 6.6 παρουσιάζεται γραφικά η αύξηση της διατιθέμενης ορατότητας λόγω εισόδου στη σήραγγα. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται το γράφημα του απαιτούμενου μήκους ορατότητας για στάση σε κάθε θέση του οδικού άξονα που εξαρτάται από την ταχύτητα μελέτης και τις γεωμετρικές συνθήκες της οδού, ενώ με γαλάζιο χρώμα σχεδιάζεται το γράφημα του διατιθέμενου μήκους ορατότητας σε κάθε χιλιομετρική θέση που εξαρτάται από τη συσχέτιση της γραμμής όρασης με τα δομικά εμπόδια των πλευρικών διαμορφώσεων. Είναι εμφανές ότι εντός της κυρτής μηκοτομής παρουσιάζεται αύξηση του απαιτούμενου SSD με σταθερό ρυθμό ενώ η διατιθέμενη ορατότητα τόσο εκτός όσο και εντός της οδικής σήραγγας παραμένει σταθερή.



**Εικόνα 6.6:** Γραφική απεικόνιση του «άλματος» ορατότητας λόγω εισόδου σε οδική σήραγγα από το λογισμικό H14

Στη βάση των παραπάνω είναι δυνατή η σύνταξη συγκεκριμένων οδηγιών σχεδιασμού όσον αφορά την τοποθέτηση του στομίου εισόδου οδικής σήραγγας σε κυρτή μηκοτομή. Εφόσον η απαίτηση μήκους ορατότητας για στάση αυξάνεται κατά την κίνηση εντός του κυρτού τόξου και ο συνδυασμός ακτίνας οριζοντιογραφίας R και ακτίνας τόξου συναρμογής H προκαλεί τη διακοπή ορατότητας σε κάποια χιλιομετρική θέση της κυρτής καμπύλης, μπορεί να υπολογιστεί η οριακή χιλιομετρική θέση μέχρι την οποία η γραμμή όρασης δεν παρεμποδίζεται από το διαχωριστικό New Jersey. Η απόσταση της θέσης αυτής θα αποτελεί και την οριακή θέση μέχρι την οποία θα πρέπει να έχει τοποθετηθεί το στόμιο της σήραγγας ούτως ώστε να μην υπάρχει ανεπάρκεια ορατότητας σε κανένα σημείο του οδικού άξονα.

Σύμφωνα με τους γερμανικούς κανονισμούς RAA-2008, ακτίνες κυρτών τόξων συναρμογής  $H < 10.000$  m επιτρέπονται μόνο για κατηγορίες σχεδιασμού EKA 2 και EKA 3, συνεπώς η ανάλυση αυτή θα γίνει μόνο στις αντίστοιχες τυπικές διατομές. Τα μόνα επιτρεπόμενα ζεύγη διατομών που εμπίπτουν σε αυτή την κατηγορία είναι το RQ28 / 31t και το RQ28 / 31T που αντιστοιχούν σε κλάση EKA 2 με  $H_{min} = 5.000$  m.

Για τα δύο αυτά ζεύγη διατομών πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για τις ελάχιστες επιτρεπόμενες ακτίνες αριστερής στροφής R που υπολογίστηκαν από τη διδιάστατη ανάλυση. Για κάθε ακτίνα R κατασκευάστηκε μηκοτομή με τη μέγιστη κατωφέρεια που μπορεί να σχεδιαστεί για την ακτίνα αυτή και έγιναν αναλύσεις για ακτίνες τόξων συναρμογής  $H=5.000$  m,  $H=7000$  m και  $H=9.000$  m. Για τους παραπάνω συνδυασμούς εκτιμήθηκε η οριακή απόσταση από την κορυφή της μηκοτομής μέχρι την οποία πρέπει να έχει τοποθετηθεί το στόμιο εισόδου της οδικής σήραγγας.

Με πρόσημο (-) σημειώνονται οι αποστάσεις πριν την κορυφή και με πρόσημο (+) οι αποστάσεις μετά την κορυφή της μηκοτομής (σημαία). Η ανάλυση έγινε για τις επιτρεπόμενες ταχύτητες σχεδιασμού οδικής σήραγγας βάσει των ελληνικών κανονισμών ΟΜΟΕ-Χ, δηλαδή για 80, 90 και 100 km/h.

Για παράδειγμα, για ακτίνα σχεδιασμού αριστερής στροφής  $R=1200$ m, από τη διδιάστατη ανάλυση για το ζεύγος RQ28 / 31t και για ταχύτητα μελέτης  $V=100$ km/h προέκυψε μέγιστη επιτρεπόμενη κατά μήκος κλίση κατωφέρειας ίση με  $s = -3\%$  ( $R_{min} = 1189$ m  $< 1200$ m). Δημιουργήθηκε μοντέλο αυτοκινητόδρομου με ακτίνα αριστερής στροφής  $R=1200$ m, μηκοτομή με ανωφέρεια  $s_1=+4,5\%$  και κατωφέρεια  $s_2=-3\%$  και κυρτό τόξο συναρμογής ακτίνας  $H=5.000$ m.

Κατασκευάζοντας τις τυπικές διατομές RQ28 και 31t και τοποθετώντας το στόμιο της σήραγγας εκατέρωθεν της σημαίας της μηκοτομής με βήμα υπολογισμών  $dx=50$ m, καθορίστηκε η τελική θέση στην οποία πρέπει να έχει χωροθετηθεί το στόμιο της σήραγγας, ώστε να διατίθεται επαρκές μήκος ορατότητας για στάση σε κάθε θέση του οδικού δικτύου. Στην περίπτωση αυτή η οριακή θέση διακοπής ορατότητας λόγω του New Jersey υπολογίστηκε στο +150m, δηλαδή το στόμιο της σήραγγας πρέπει να έχει τοποθετηθεί το πολύ 150m μετά την κορυφή (σημαία) της μηκοτομής.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης για τα δύο ζεύγη διατομών κατηγορίας EKA 2 παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.



RQ28 / 31t	Στοιχεία διατομής			
	b1=3,50 m	b2=3,50 m	a=1,25 m	
Ακτίνα R αριστερής στροφής (m)	Οριακή επιτρεπόμενη κατά μήκος κλίση s (%) βάσει διδιάστατης προσέγγισης	Ακτίνα H τόξου συναρμογής (m)	Απόσταση (ως προς τη σημαία) στην οποία πρέπει να έχει τοποθετηθεί η σήραγγα (m)	Κατά μήκος κλίση στην οριακή θέση τοποθέτησης (%)
<b>V_design=100 km/h</b>				
1100	-1,00%	5000	50	0,75
		7000	50	1,04
		9000	100	0,64
1200	-3,00%	5000	150	-2,25
		7000	150	-1,39
		9000	200	-1,47
1300	-4,50%	5000	200	-4,00
		7000	200	-2,86
		9000	300	-3,33
<b>V_design=90 km/h</b>				
800	-1,50%	5000	50	0,50
		7000	-	-
900	-4,50%	5000	100	-2,00
		7000	200	-2,86
<b>V_design=80 km/h</b>				
600	-4,00%	5000	200	-3,75
		7000	-	-

**Πίνακας 6.8:** Οδηγίες τοποθέτησης του στομίου της σήραγγας για επάρκεια ορατότητας (RQ 28 / 31t)

RQ28 / 31T	Στοιχεία διατομής			
	b1=3,50 m	b2=3,50 m	a=1,50 m	
Ακτίνα R αριστερής στροφής (m)	Οριακή επιτρεπόμενη κατά μήκος κλίση s (%) βάσει διδιάστατης προσέγγισης	Ακτίνα H τόξου συναρμογής (m)	Απόσταση (ως προς τη σημαία) στην οποία πρέπει να έχει τοποθετηθεί η σήραγγα (m)	Κατά μήκος κλίση στην οριακή θέση τοποθέτησης (%)
<b>V_design=100 km/h</b>				
1000	-0,5%	5000	-100	4,00
		7000	-100	3,43
		9000	-	-
1100	-3,00%	5000	-100	2,75
		7000	-100	2,18
		9000	-50	1,31
1200	-4,50%	5000	100	-2,00
		7000	100	-1,43
		9000	100	-1,11
<b>V_design=90 km/h</b>				
700	0,00%	5000	-100	4,25
		7000	-	-
800	-3,50%	5000	-50	1,50
		7000	-	-
<b>Για V_design=80 km/h δεν υπάρχει περιορισμός</b>				

**Πίνακας 6.9:** Οδηγίες τοποθέτησης του στομίου της σήραγγας για επάρκεια ορατότητας (RQ 28 / 31T)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Το ζήτημα της διερεύνησης επάρκειας ορατότητας αποτελεί ουσιαστική παράμετρο για τη λήψη συμπερασμάτων όσον αφορά τον καθορισμό του επιπέδου ασφάλειας που παρέχει το οδικό περιβάλλον στο χρήστη. Όσο περισσότερο πολύπλοκη είναι η γεωμετρική χάραξη, τόσο πιο δυσχερής γίνεται η παραπάνω διερεύνηση.

Είναι προφανές από τα αποτελέσματα του κεφαλαίου 6 ότι η επιλογή γεωμετρικών τιμών σχεδιασμού βάσει οριζοντιογραφικής ανάλυσης για το σχεδιασμό μιας οδού μεταβαλλόμενης κατά μήκος κλίσης αποτελεί λανθασμένη τακτική. Στον πίνακα 6.7 παρατηρείται ότι ο σχεδιασμός βάσει την οριακής επιτρεπόμενης ακτίνας αριστερής στροφής  $R$  για σταθερή κατά μήκος κλίση  $s=0\%$ , δεν μας προσφέρει επάρκεια ορατότητας έως την κορυφή της κυρτής μηκοτομής. Αντιθέτως, η ορατότητα χάνεται ενώ ο χρήστης βρίσκεται ακόμα σε χιλιομετρικές θέσεις με ανωφέρεια (ανοδικές κλίσεις 1%, 2% κ.α.), προτού φτάσει σε σημειακή μηδενική κατά μήκος κλίση.

Τα συμπεράσματα της εργασίας αποδεικνύουν τη σπουδαιότητα της προσέγγισης του οδικού άξονα ως ένα τρισδιάστατο περιβάλλον στο χώρο, προκειμένου να καθοριστούν με ακρίβεια οι συνθήκες ορατότητας σε κάθε θέση του. Σε περιπτώσεις ταυτόχρονης ύπαρξης καμπύλων στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο, η προσπάθεια εκτίμησης των γεωμετρικών απαιτήσεων για ορατότητα βάσει των αποτελεσμάτων που εξάγονται από τις ανεξάρτητες διδιάστατες προσεγγίσεις, είναι ανεπαρκής. Το γεγονός αυτό καθιστά απαραίτητη τη χρήση λογισμικών που παρέχουν τη δυνατότητα μόρφωσης του πραγματικού μοντέλου του οδικού περιβάλλοντος, ώστε να επιτευχθεί με ακρίβεια ο υπολογισμός των απαιτούμενων και των διαθέσιμων μηκών ορατότητας για στάση σε όλο το μήκος του οδικού άξονα.

Είναι επιτακτική η ανάγκη περαιτέρω έρευνας στο συγκεκριμένο ζήτημα, καθώς αυτή τη στιγμή δεν υπάρχουν σαφείς οδηγίες σχεδιασμού που να έχουν αντληθεί από μελέτη στον τρισδιάστατο χώρο. Το θέμα της οδικής ασφάλειας είναι κεφαλαιώδες και πρέπει να αποτελεί παράμετρο ύψιστης σημασίας κατά το γεωμετρικό σχεδιασμό των οδών, συνεπώς η αποσπασματική προσέγγιση σύνθετων χαράξεων δεν είναι επιθυμητή. Είναι αποδεδειγμένο ότι η ταχύτητα αποτελεί τη βασική αιτία των περισσότερων δυστυχημάτων στην άσφαλτο, συνεπώς σε οδικούς άξονες αυξημένου κινδύνου όπως οι αυτοκινητόδρομοι και οι οδικές σήραγγες θα πρέπει να υπάρχουν σαφείς κατευθύνσεις σχεδιασμού ως προς την οδική ασφάλεια.

Μια ακόμα πρόταση έρευνας αφορά την κίνηση οχημάτων διαφορετικού τύπου (π.χ. βαρέα), στα οποία θα υπάρχει διαφοροποίηση των παραμέτρων υπολογισμού του επιπέδου ορατότητας, τόσο ως προς τη θεώρηση του ύψους οφθαλμού όσο και ως προς το ρυθμό επιβράδυνσης του οχήματος. Επιπλέον, είναι σημαντική η διερεύνηση επάρκειας ορατότητας κατά τις νυχτερινές ώρες, καθώς υπεισέρχεται και η παράμετρος περιορισμού του πεδίου ορατότητας λόγω του φωτισμού από τους προβολείς του οχήματος κατά την κίνηση του.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). A Policy 16 on Geometric Design of Highways and Streets, Fifth Edition. Washington, DC., 2011  
[https://www.academia.edu/33524500/AASHTO\\_Green\\_Book\\_2011\\_PDF](https://www.academia.edu/33524500/AASHTO_Green_Book_2011_PDF)
2. Ed. German Road and Transportation Research Association, Committee, Geometric Design 18 Standards. Guidelines for the Design of Roads, (RAA), Germany, 2008  
[https://www.fgsv-verlag.de/pub/media/pdf/202\\_E\\_PDF.v.pdf](https://www.fgsv-verlag.de/pub/media/pdf/202_E_PDF.v.pdf)
3. «Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων Τεύχος 3: Χαράξεις (ΟΜΟΕ – Χ)», Υπουργείο Ανάπτυξης, Ανταγωνιστικότητας, Υποδομών, Μεταφορών και Δικτύων, Ελληνική Δημοκρατία  
[http://www.ggde.gr/dmdocuments/omoe\\_3\\_x.pdf](http://www.ggde.gr/dmdocuments/omoe_3_x.pdf)
4. «Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων Τεύχος Σηράγγων (ΟΜΟΕ – Χ)», Υπουργείο Ανάπτυξης, Ανταγωνιστικότητας, Υποδομών, Μεταφορών και Δικτύων, Ελληνική Δημοκρατία  
[https://www.scribd.com/doc/65154924/OMOE-TOS?secret\\_password=1jp8m0yjncyvih0vhza0#fullscreen&from\\_embed](https://www.scribd.com/doc/65154924/OMOE-TOS?secret_password=1jp8m0yjncyvih0vhza0#fullscreen&from_embed)
5. Pasquale Colonna, Nicola Berloco, Paolo Intini, Vittorio Ranieri, *Geometric Design Issues and Safety Analysis of Two-way Rural Road Tunnels*, Transportation Research Procedia, 2<sup>nd</sup> International Congress on Transport Infrastructure and Systems in a changing world (2019, Rome)  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146520301101>
6. Du Zhigang, Zhanji Zheng, Miao Zheng, Bin Ran, Xin Zhao, *Drivers' visual comfort at highway tunnel portals: A quantitative analysis based on visual oscillation*, Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 31, August 2014  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920914000479?via%3Dihub#f0010>
7. Sánchez, E. (1994). *THREE-DIMENSIONAL ANALYSIS OF SIGHT DISTANCE ON INTERCHANGE CONNECTORS*. Transportation Research Record.  
<https://www.semanticscholar.org/paper/THREE-DIMENSIONAL-ANALYSIS-OF-SIGHT-DISTANCE-ON-S%C3%A1nchez/7eab21ca433c7695286262396c568c9a425ac428>
8. Chou, A.T., Pérez, V.F., García, A., & Rojas, M.A. (2010). *Optimal 3D Coordination to Maximize the Available Stopping Sight Distance in Two-Lane Roads*.  
<https://www.semanticscholar.org/paper/Optimal-3D-Coordination-to-Maximize-the-Available-Chou-P%C3%A9rez/c9dd140e0c6a7009e6dc412278fe9467aafaec8>

9. Kim, D. and D. Lovell. (2010). *A Procedure for 3-D Sight Distance Evaluation Using Thin Plate Splines*, Proceedings of the 4th International Symposium on Highway Geometric Design, TRB, Valencia, Spain  
<https://trid.trb.org/view/1100648>
10. Ταϊγανίδης, Ιωάννης (1998, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ)), *Συμβολή στη διερεύνηση της απόστασης ορατότητας για στάση σε κυρτές καμπύλες μηκοτομής οδών*  
<https://thesis.ekt.gr/thesisBookReader/id/10057#page/1/mode/2up>
11. Nehate, Girish. (2006). *3D Calculation of Stopping-Sight Distance from GPS Data*. Journal of Transportation Engineering, Vol. 132, Issue 9  
[https://www.researchgate.net/publication/34272939\\_3D\\_Calculation\\_of\\_Stopping-Sight\\_Distance\\_from\\_GPS\\_Data](https://www.researchgate.net/publication/34272939_3D_Calculation_of_Stopping-Sight_Distance_from_GPS_Data)
12. Hassan, Y., Easa, S. M., & Abd El Halim, A. O. (1996). *Analytical Model for Sight Distance Analysis on Three-Dimensional Highway Alignments*. Transportation Research Record, 1523(1), 1–10.  
<https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0361198196152300101>
13. Hassan, Y., Easa, S.M. and A.O. Abd El Halim. (1997). *Design Considerations for Combined Highway alignments*. Journal of Transportation Engineering, Vol 123, No.1  
[https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1997\)123:1\(60\)](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-947X(1997)123:1(60))
14. Mavromatis, S., Pagounis, V., Palaskas, S. and Maroudas D. (2009). *Stopping Sight Distance Assessment via 3-D 497 Road Scanning*. Proceedings of the 4th National Conference in Road Safety, Athens, Greece.
15. Psarianos, Basil & Mavromatis, Stergios & Mertzanis, Fotis & Vardaki, Sophia. (2015). *THREE-DIMENSIONAL STOPPING SIGHT DISTANCE CONTROL ON LEFT-TURN CURVES OF FREEWAYS OVERLAPPED WITH CREST VERTICAL CURVES*, Proceedings of the 95<sup>th</sup> Annual meeting of the Transportation Research Board, Washington  
[https://www.researchgate.net/publication/280132638\\_THREE-DIMENSIONAL\\_STOPPING\\_SIGHT\\_DISTANCE\\_CONTROL\\_ON\\_LEFT-TURN\\_CURVES\\_OF\\_FREEWAYS\\_OVERLAPPED\\_WITH\\_CREST\\_VERTICAL\\_CURVES/references](https://www.researchgate.net/publication/280132638_THREE-DIMENSIONAL_STOPPING_SIGHT_DISTANCE_CONTROL_ON_LEFT-TURN_CURVES_OF_FREEWAYS_OVERLAPPED_WITH_CREST_VERTICAL_CURVES/references)
16. S. Mavromatis, P. Pasiadis, V. Matragos, A. Dragomanovits, P. Papantoniou, G. Yannis (2020), *Design Considerations of Compound Alignments Resulting from Visibility Restrictions by Median Jersey Barriers*, 10<sup>th</sup> International congress on Transportation Research (ICTR)  
<https://www.nrso.ntua.gr/geyannis/wp-content/uploads/geyannis-pc420.pdf>
17. Μερτζάνης, Φώτιος (2015, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο), *Συμβολή στην διερεύνηση του μήκους ορατότητας για στάση στον τρισδιάστατο χώρο*  
<https://thesis.ekt.gr/thesisBookReader/id/43005#page/42/mode/2up>

18. Μαυρομάτης Σ., 2018, *Σημειώσεις για το μάθημα Γεωμετρικός Σχεδιασμός Οδών*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθηνά Ελλάδα.
19. Bogdevičius, M., & Vladimirov, O. (2006). *Efficiency of a braking process evaluating the roughness of road surface*. *Transport*, 21(1), 3-7.  
[https://www.researchgate.net/publication/26541150\\_Efficiency\\_of\\_a\\_braking\\_process\\_evaluating\\_the\\_roughness\\_of\\_road\\_surface/citations](https://www.researchgate.net/publication/26541150_Efficiency_of_a_braking_process_evaluating_the_roughness_of_road_surface/citations)
20. Greibe, Poul. "*DETERMINATION OF BRAKING DISTANCE AND DRIVER BEHAVIOUR BASED ON BRAKING TRIALS.*" (2008).  
<https://www.semanticscholar.org/paper/DETERMINATION-OF-BRAKING-DISTANCE-AND-DRIVER-BASED-Greibe/0c67124a9e3026b1d9f282c3a8f549216a019c51>
21. Krempel, G. (1965). *Experimenteller Beitrag zu Untersuchungen an Kraftfahrzeugreifen*. Dissertation. TU Karlsruhe
22. Zhang X, Hu J, Wang R, Gao X, He L. *The comprehensive efficiency analysis of tunnel lighting based on visual performance*. *Advances in Mechanical Engineering*, April 2017.  
<https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1687814017696449>
23. Technical Committee 3.3 Road Tunnel Operation-Risk Management. *Risk analysis for road tunnels (2008, PIARC)*.  
<https://www.piarc.org/en/order-library/5871-en-Risk%20analysis%20for%20road%20tunnels>
24. Carvel, Richard & Beard, Alan. (2005). *The Handbook of Tunnel Fire Safety*.  
[https://www.researchgate.net/publication/237090365\\_The\\_Handbook\\_of\\_Tunnel\\_Fire\\_Safety](https://www.researchgate.net/publication/237090365_The_Handbook_of_Tunnel_Fire_Safety)
25. Yeung JS, Wong YD (2014). *The effect of road tunnel environment on car following behavior*. *Accident Analysis and Prevention*, September 2014  
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24713218/>
26. Pervez, Amjad & Huang, Helai & Han, Chunyang & Wang, Jie & Li, Ye. (2020). *Revisiting freeway single tunnel crash characteristics analysis: A six-zone analytic approach*. *Accident Analysis & Prevention*, July 2020.  
[https://www.researchgate.net/publication/341562471\\_Revisiting\\_freeway\\_single\\_tunnel\\_crash\\_characteristics\\_analysis\\_A\\_six-zone\\_analytic\\_approach](https://www.researchgate.net/publication/341562471_Revisiting_freeway_single_tunnel_crash_characteristics_analysis_A_six-zone_analytic_approach)

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

## Αλγόριθμος στο πρόγραμμα Oktave (Γλώσσα Matlab)

```
1  % ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ SSD
2  clear; clc; close all;
3  a=3.7; % Επιβράδυνση κατά RAA σε m/sec^2
4  g=9.81; % Επιτάχυνση της βαρύτητας
5  Varx=130/3.6; % Ταχύτητα σχεδιασμού σε m/sec
6  V=Varx;
7  R=1500; % Ακτίνα Οριζοντιογραφίας
8  Hk=13000; % Τόξο συναρμογής
9  b=3.50/2; % Ημιπλάτος λωρίδας
10 s=0.04; % Αρχική κατά μήκος κλίση - 4% ανωφέρεια
11 e=0.05; % Επίκλιση
12 thesi= 1500 % Χιλιομετρική θέση υπό μελέτη
13 arxi_toksou= 1480 % Χιλιομετρική θέση αρχής του τόξου στρογγύλευσης
14 dx=2*Varx % Διανυόμενη απόσταση λόγω καθυστέρησης αντίδρασης
15 diafora=arxi_toksou-(thesi+dx);
16 if diafora<0 % Υπολογισμός της αρχικής κατά μήκος κλίσης σε περίπτωση
17     s=s+diafora*cos(atan(s))/Hk; % που βρίσκομαι εντός του τόξου στρογγύλευσης
18 end
19 if s<-0.04
20     s=-0.04
21 end
22 s1=s
23 fT1=a/g % Υπολογισμός εφαπτομενικής τριβής fT
24 fT=sqrt((a/g)^2-(V^2/(g*R)-e)^2) % Απομείωση λόγω πλευρικής τριβής fR
25 sumBD=0;
26 t=0;
27 while V>0 % Η επανάληψη σταματάει όταν μηδενιστεί η ταχύτητα
28     t=t+0.01; % Χρονικό βήμα
29     V=V-g*(fT+s)*0.01; % Απομείωση της ταχύτητας
30     fT=sqrt((a/g)^2-(V^2/g/R-e)^2); % Υπολογισμός fT
31     BD=V.*0.01-0.5*g*(fT+s)*(0.01^2); % Διανυόμενη απόσταση
32     sumBD=sumBD+BD;
33     X=BD*cos(atan(s)); % Οριζόντια συνιστώσα της διανυόμενης απόστασης
34     xlm_thesi=thesi+dx+sumBD; % Υπολογισμός της νέας X.θ του οχήματος
35     if xlm_thesi>arxi_toksou
36         s=s-X/Hk; % Αλλαγή κατά μήκος κλίσης σε χρονικό βήμα t=0,01 sec
37         if s<-0.04
38             s=-0.04; % Θέτω κάτω όριο της κατά μήκος κλίσης ίσο με s= -4%
39         end
40     end
41 end
42 t_antidraasis=2; % Χρόνος αντίδρασης κατά RAA σε sec
43 SSD=Varx*t_antidraasis+sumBD % Αποτέλεσμα απαιτούμενου μήκους ορατότητας για στάση SSD
44 s2=s % Κατά μήκος κλίση στη θέση ακινητοποίησης
```

## Αλγόριθμος στο πρόγραμμα Oktave (Γλώσσα Matlab)

```
1 clear; clc; close all;
2 a=3.7; % Επιβράδυνση κατά RAA σε m/sec^2
3 g=9.81; % Επιτάχυνση της βαρύτητας
4 Varx=130/3.6; % Ταχύτητα σχεδιασμού σε m/sec
5 V=Varx;
6 R=1500; % Ακτίνα Οριζοντιογραφίας
7 Hk=13000; % Τόξο συναρμογής
8 b=1.75; % Ημιπλάτος λαρίδας
9 s=0.04; % Αρχική κατά μήκος κλίση - 4% ανωφέρεια
10 e=0.05; % Επίκλιση
11 SSD=233.7; % Απαιτούμενο μήκος πέδησης
12 thesi= 1400; % Χιλιομετρική θέση υπο μελέτη
13 arxi_toksou= 1480; % Χιλιομετρική θέσης αρχής του τόξου στρογγύλευσης
14 if thesi>arxi_toksou
15     s=s+(arxi_toksou-thesi)*cos(atan(s))/Hk % Υπολογισμός αρχικής κατά μήκος κλίσης
16 end
17 s1=s
18 % ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΥΨΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΔΙΑΦΟΡΑΣ ΑΡΧΗΣ ΚΑΙ ΤΕΛΟΥΣ ΤΗΣ ΤΡΟΧΙΑΣ ΕΝΤΟΣ ΤΗΣ
    ΚΥΡΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ
19 simaia= (1480+2520)/2 % Υπολογισμός της θέσης κορυφής της συμμετρικής κυρτής μηκοτομής
20 if s1==0.04
21     periptwsi=1
22     if thesi+SSD>arxi_toksou
23         Dy1=(arxi_toksou-thesi)*sin(atan(s1))
24         Dy2=Hk-Hk*cos((simaia-arxi_toksou)/Hk)
25         Dy3=Hk-Hk*cos((simaia-(thesi+SSD))/Hk)
26     else
27         Dy1=sin(atan(s1))*SSD
28         Dy2=0
29         Dy3=0
30     end
31     Dy=Dy1+Dy2-Dy3
32 else
33     if thesi<simaia
34         Dy1=Hk-Hk*cos((simaia-thesi)/Hk)
35         if thesi+SSD>simaia
36             periptwsi=3
37             Dy2=Hk-Hk*cos((thesi+SSD-simaia)/Hk)
38         else
39             periptwsi=2
40             Dy2=Hk-Hk*cos((simaia-(thesi+SSD))/Hk)
41         end
42         Dy=Dy1-Dy2
43     else
44         if thesi+SSD<2520
45             periptwsi=4
46             Dy1=Hk-Hk*cos((thesi-simaia)/Hk)
47             Dy2=Hk-Hk*cos((thesi+SSD-simaia)/Hk)
48             Dy=Dy1-Dy2
49         else
50             periptwsi=5
51             Dy1=(thesi+SSD-2520)*sin(atan(0.04))
52             Dy2=Hk-Hk*cos((2520-simaia)/Hk)
53             Dy3=Hk-Hk*cos((thesi-simaia)/Hk)
54             Dy=Dy3-Dy2-Dy1
55         end
56     end
57 end
58 % ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΥΨΟΥΣ ΣΤΗΘΑΙΟΥ ΚΑΙ ΥΨΟΥΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΟΡΑΣΗΣ ΣΕ ΚΑΘΕ ΧΙΛΙΟΜΕΤΡΙΚΗ ΘΕΣΗ
59 mikos_xordis=2*sin(SSD/(R-b)/2)*(R-b) % Μήκος γραμμής όρασης
60 s_sightline=Dy/mikos_xordis; % Κατά μήκος κλίση γραμμής όρασης
61 H_lwridas_arxis=100; % Υψόμετρο ερυθράς
62 H_ofthalmou=100+1; % Υψόμετρο οφθαλμού
63 diakopi=10000
64 max_apoklisi=0
65 for i=0.01:0.01:SSD
66     w=SSD/(R-b);
67     a1=(pi-w)/2;
68     a2=i/(R-b);
69     a3=pi-a1-a2;
70     L_sightline=(R-b)*sin(a2)/sin(a3);
71     H_sightline=s_sightline*L_sightline+H_ofthalmou; % Υπολογισμός ύψους γραμμής όρασης
72     x=0.01*cos(atan(s));
73     if thesi+i>arxi_toksou
74         s=s-x/Hk;
```

```

75     if s<-0.04
76         s=-0.04;
77     end
78 end
79 y=s*x;
80 H_lwridas_arxis=H_lwridas_arxis+y;
81 H_jersey=H_lwridas_arxis-2.5*sin(atan(e))+0.9; % Υπολογισμός ύψους στηθαίου
82 if H_sightline<H_jersey
83     if diakopi>i           % Καθορισμός της θέσης στην οποία διακόπτεται για πρώτη φορά
84         diakopi=i;       % η γραμμή όρασης
85     end
86     apoklisi=H_sightline-H_jersey;
87     if apoklisi<max_apoklisi % Καθορισμός της μέγιστης κατακόρυφης απόκρυψης της
88         max_apoklisi=apoklisi; % γραμμής όρασης κάτω από την κορυφή του New Jersey
89     end
90 end
91 end
92 diakopi
93 if diakopi<3000
94     thesi_diakopis=thesi+diakopi
95 else
96     disp('Δεν έχω παρεμπόδιση ορατότητας')
97 end
98 max_apoklisi

```