



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ -
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ
ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΥΔΡΟΛΙΣΘΗΣΗΣ
– ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ

ΧΡΗΣΤΟΣ ΚΑΛΑΝΤΖΗΣ

Επιβλέπων:

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΨΑΡΙΑΝΟΣ, Καθηγητής ΕΜΠ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ
ΤΕΧΝΙΚΗΣ



Αθήνα, Οκτώβριος 2022



**NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF
ATHENS**
**SCHOOL OF RURAL, SURVEYING AND GEOINFORMATICS
ENGINEERING**
DEP. OF INFRASTRUCTURE AND RURAL DEVELOPMENT

HYDROPLANNING ANALYSIS – IMPACT OF CLIMATE CHANGE

CHRISTOS KALANTZIS

Supervisor:

BASIL PSARIANOS, NTUA Professor

**LABORATORY OF TRANSPORTATION
ENGINEERING**



Athens, October 2022



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ -
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ
ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ



ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΥΔΡΟΛΙΣΘΗΣΗΣ –
ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ

ΧΡΗΣΤΟΣ ΚΑΛΑΝΤΖΗΣ

Επιβλέπων:

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΨΑΡΙΑΝΟΣ, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2022

Τίτλος: Ανάλυση Φαινομένου Υδρολίστεσης – Επίδραση Κλιματικής Αλλαγής
Συντάκτης: Χρήστος Καλαντζής, Φοιτητής Σχολής Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών –
Μηχανικών Γεωπληροφορικής ΕΜΠ
Έτος: 2022

Δήλωση Πνευματικών Δικαιωμάτων – Άδεια Creative Commons



CC BY-ND: This license allows reusers to copy and distribute the material in any medium or format in unadapted form only, and only so long as attribution is given to the creator. The license allows for commercial use.

Δήλωση Συντάκτη

Δηλώνω ότι η διπλωματική αυτή εργασία αποτελεί στο σύνολο της δική μου εργασία, και κανένα τμήμα της δεν έχει χρησιμοποιηθεί για την κτήση άλλου τίτλου σπουδών. Όπου έχει χρησιμοποιηθεί υλικό από άλλες πηγές, αυτές έχουν αναφερθεί με ακρίβεια και πληρότητα

Χρήστος Καλαντζής

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'ΧΚ', written over a set of horizontal lines.

Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία αποτελεί ένα προσωπικό έργο, το οποίο δεν θα μπορούσε να έχει ολοκληρωθεί επιτυχώς χωρίς την υποστήριξη ορισμένων συντελεστών.

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον κύριο Βασίλειο Ψαριανό, Καθηγητή ΕΜΠ και επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, ο οποίος μέσω της καθοδήγησης και της συμβουλευτικής του σχετικά με το ευρύ φάσμα των τεχνικών θεμάτων αυτής, συνέβαλε καθοριστικά στην επιτυχή ολοκλήρωσή της.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω εκείνους τους συντελεστές της Σχολής που με συμβούλεψαν για θέματα εκτός του κλάδου της Συγκοινωνιακής Τεχνικής, τα οποία εμπεριέχονται στην εργασία, και ιδιαίτερα τον κύριο Ιωάννη Ναλμπάντη, του οποίου η συμβολή ήταν σημαντική επάνω στο υδρολογικό κομμάτι της μελέτης.

Τέλος, έχοντας φτάσει στο τέλος των προπτυχιακών σπουδών μου, θα ήθελα να αποδώσω ιδιαίτερες ευχαριστίες στην οικογένειά μου, που καθ' όλη την διάρκεια τους ήταν δίπλα μου, αλλά και στους φίλους μου, οι οποίοι φρόντισαν αυτό το διάστημα να είναι επιπλέον ευχάριστο.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αλλαγή του κλίματος είναι ένα φαινόμενο που έχει επιβεβαιωθεί επιστημονικά, τόσο για την ύπαρξή του, όσο και για την οριζόντια επίδρασή του στον ανθρώπινο πολιτισμό. Προβλέπεται να επιφέρει μεταβολές σε καιρικά φαινόμενα, όπως είναι οι βροχοπτώσεις, των οποίων η συμπεριφορά απασχολεί την παρούσα εργασία. Συγκεκριμένα, σκοπός αυτής της εργασίας είναι η ανάλυση του φαινομένου της υδρολίστεσης, συναρτήσει της ενδεχόμενης μεταβολής των βροχοπτώσεων, οι οποίες συμμετέχουν ως παράγοντας του. Η μεθοδολογία, ειδικότερα, υπολογίζει με χρήση μαθηματικών μοντέλων την ταχύτητα υδρολίστεσης για το παρόν και για το μέλλον, βάση μελετών και προβλέψεων αντίστοιχα. Εάν τα αποτελέσματα δείξουν μεταβολή στην ταχύτητα υδρολίστεσης, τότε ανάλογη μεταβολή εκτιμάται πως θα επιφέρει και η κλιματική αλλαγή. Παράλληλα, κατά την ανάλυση, παράγονται αποτελέσματα συναρτήσει και άλλων μεταβλητών περιβάλλοντος, οδοποιίας και οχήματος, ώστε να εξεταστεί η συμπεριφορά του φαινομένου της υδρολίστεσης για επιδράσεις πέραν αυτής της κλιματικής αλλαγής.

Λέξεις/Φράσεις Κλειδιά: Οδοποιία, Κλιματική Αλλαγή, Υδρολίστεση, Ταχύτητα Υδρολίστεσης

ABSTRACT

Climate change is a phenomenon that has been scientifically confirmed, both for its existence and for its horizontal effect on human civilization. It is expected to bring changes in weather phenomena, such as rainfall, the behavior of which concerns the present study. Specifically, the purpose of this study is the analysis of the phenomenon of hydroplaning, depending on the potential change in rainfall, which acts as a factor. The methodology, in particular, calculates using mathematical models the speed of hydroplaning for the present and for the future, based on studies of the present and future scenarios respectively. If the results show a change in the speed of hydroplaning, then a corresponding change is estimated to be caused by climate change. At the same time, during the analysis, results are produced as a function of other environmental, road planning and vehicle factors, in order to examine the behavior of the hydroplaning phenomenon for effects beyond those of climate change.

Key Words/Phrases: Road Planning, Climate Change, hydroplaning, hydroplaning Speed

Περιεχόμενα

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13
1.1	Η Σχέση μεταξύ Μεταφορών και Κλιματικής Αλλαγής.....	13
1.2	Οι Επιπτώσεις της Κλιματικής Αλλαγής στην Οδοποιία.....	14
2	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	16
3	ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	17
3.1	Η Αλλαγή του Κλίματος	17
3.2	Το Φαινόμενο της Υδρολίσθησης.....	17
3.3	Μοντέλα Υδρολίσθησης	19
3.3.1	Πάχος Ροής Νερού, Gallaway etc. (1979)	20
3.3.2	Πάχος Ροής Νερού, PAVDRN (1997-1998)	21
3.3.3	Πάχος Ροής Νερού, Ressel και Hermann (2008).....	21
3.3.4	Ταχύτητα Υδρολίσθησης, Gallaway etc. (1979)	21
3.3.5	Ταχύτητα Υδρολίσθησης, PAVDRN (1997-1998).....	22
3.3.6	Ταχύτητα Υδρολίσθησης, Ressel και Hermann (2008).....	22
3.4	Τυπικές Διατάξεις Προσαρμογής.....	24
3.5	Μεγέθη	26
3.5.1	Ένταση Βροχόπτωσης (i).....	26
3.5.2	Μήκος της ροής του νερού (Lf).....	27
3.5.3	Κλίση κατά μήκος της ροής του νερού (Sf)	28
3.5.4	Μέσο Βάθος Τραχύτητας Οδοστρώματος (MTD)	29
3.5.5	Spin Down Effect υδρολίσθησης (SD).....	30
3.5.6	Πίεση Ελαστικών (Pt).....	30
3.5.7	Βάθος Αυλακώσεων Ελαστικών (TD).....	30
3.5.8	Συντελεστής Manning.....	31
4	ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ	32
4.1	Μεθοδολογία	32
4.2	Εκτίμηση Παραμέτρων	32
4.2.1	Τυπικές Διατάξεις Προσαρμογής	32
4.2.2	Ένταση Βροχόπτωσης (i).....	33
4.2.3	Μήκος της ροής του νερού (Lf).....	37
4.2.4	Κλίση κατά Μήκος της Ροής του Νερού (Sf).....	39

4.2.5	Μέσο Βάθος Τραχύτητας Οδοστρώματος (MTD)	40
4.2.6	Μείωση της Ταχύτητας Περιστροφής του Ελαστικού κατά την Έναρξη της Υδρολίσθησης (SD).....	41
4.2.7	Πίεση Ελαστικών (Pt).....	41
4.2.8	Βάθος Αυλακώσεων ελαστικών (TD)	41
4.2.9	Συντελεστής Manning.....	41
4.3	Εφαρμογή μοντέλων	42
5	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	45
5.1	Μαθηματικά Μοντέλα Gallaway (1979)	46
5.2	Μαθηματικά Μοντέλα PAVDRN (1997 - 1998).....	47
5.3	Μαθηματικά Μοντέλα Ressel και Hermann (2008)	48
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	49
6.1	Σχολιασμός Αποτελεσμάτων	49
6.2	Επίδραση Κλιματικής Αλλαγής	50
7	ΠΡΟΤΑΣΗ ΜΕΤΡΩΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ	52
8	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΕΡΕΥΝΑΣ	55
9	ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	56
10	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι	58
11	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ.....	60
12	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ.....	63

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1. Παράγοντες φαινομένου υδρολίσησης.....	19
Πίνακας 2. Σύνθεση μοντέλων υδρολίσησης	20
Πίνακας 3. Εξαγωγή τιμών διαγράμματος HPS - WFT.....	24
Πίνακας 4. Περιπτώσεις γεωμετρίας οδικών αξόνων που θα μελετηθούν	26
Πίνακας 5. Τιμές περιόδου επαναφοράς και διάρκειας αναφορά της βροχόπτωσης	27
Πίνακας 6. Παράμετροι σεναρίου μεταβολής μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης	35
Πίνακας 7. Τιμές μέγιστων εντάσεων βροχόπτωσης για την υπάρχουσα κατάσταση και το μελλοντικό σενάριο κλιματικής αλλαγής	36
Πίνακας 8. Εξαγόμενα στοιχεία από σχεδιαστικό πρόγραμμα – Μήκη επιλεγμένων διαδρομών νερού	39
Πίνακας 9. Εξαγόμενα στοιχεία από σχεδιαστικό πρόγραμμα – Κλίσεις επιλεγμένων διαδρομών νερού	40
Πίνακας 10. Επιλεγμένες τιμές μέσου βάθους τραχύτητας οδοστρώματος	40
Πίνακας 11. Επιλεγμένες τιμές spindown, πίεσης ελαστικών και βάθους αυλακώσεων ελαστικών	41
Πίνακας 12. Τιμές κινηματικού ιξώδες νερού ανά θερμοκρασία.....	42
Πίνακας 13. Επιλεγμένη τιμή κινηματικού ιξώδους του νερού και οι προκύπτοντες αριθμός Reynolds και συντελεστής Manning	42
Πίνακας 14. Συνοπτική παρουσίαση των τιμών των παραγόντων υδρολίσησης που θα χρησιμοποιηθούν στο πλαίσιο της ανάλυσης που διεξάγεται στην παρούσα εργασία.....	43
Πίνακας 15. Παρουσίαση αποτελεσμάτων – Μοντέλα Gallaway (1979) για υπάρχουσα κατάσταση.....	46
Πίνακας 16. Παρουσίαση αποτελεσμάτων – Μοντέλα Gallaway (1979) για μελλοντικό σενάριο	46
Πίνακας 17. Παρουσίαση αποτελεσμάτων – Μοντέλα PAVDRN (1997 – 1998) για υπάρχουσα κατάσταση.....	47
Πίνακας 18. Παρουσίαση αποτελεσμάτων – Μοντέλα PAVDRN (1997 – 1998) για μελλοντικό σενάριο.....	47
Πίνακας 19. Παρουσίαση αποτελεσμάτων – Μοντέλα Ressel και Hermann (2008) για υπάρχουσα κατάσταση.....	48
Πίνακας 20. Παρουσίαση αποτελεσμάτων – Μοντέλα Ressel και Hermann (2008) για μελλοντικό σενάριο.....	48
Πίνακας 21. Μελέτη περίπτωσης σταθμού με μεγαλύτερη μεταβολή στην ένταση βροχόπτωσης – Σταθμός Λεόντιο ΥΠΕΚΑ.....	51
Πίνακας 22. Αναδρομικός υπολογισμός Πάχους Ροής Νερού – Χρήση διαγράμματος Ressel και Hermann Σχήματος 6.....	53
Πίνακας 23. Αναδρομικός υπολογισμός Μήκους Ροής Νερού – Χρήση Μαθηματικού Μοντέλου Ressel & Hermann	54

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1. Η αμφίδρομη σχέση επιρροής μεταξύ της κλιματικής αλλαγής και άλλων τομέων, όπως τα συστήματα μεταφορών.....	14
Σχήμα 2. Απεικόνιση του φαινομένου της δυναμικής υδρολίστεσης.....	18
Σχήμα 3. Απεικόνιση του φαινομένου της ιξώδους υδρολίστεσης.....	18
Σχήμα 4. Απεικόνιση του φαινομένου της υδρολίστεσης ανεστραμμένης κατάστασης ελαστικού.....	19
Σχήμα 5. Απεικόνιση του πάχους της στρώσης του νερού και του μέσου βάθους τραχύτητας οδοστρώματος.....	20
Σχήμα 6. Διάγραμμα προσδιορισμού ταχύτητας υδρολίστεσης (Ressel και Hermann 2008).....	23
Σχήμα 7. Απομόνωση επιλεγμένης καμπύλης προσδιορισμού ταχύτητας υδρολίστεσης από διάγραμμα του Σχήματος 6.....	23
Σχήμα 8. Διαγράμματα επίκλισης ανά τύπο προσαρμογής και διάταξη (Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων (ΟΜΟΕ) 2001).....	25
Σχήμα 9. Τυπικές Διατάξεις Προσαρμογής που θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα εργασία ...	26
Σχήμα 10. Ποιοτική αναπαράσταση όμβριας καμπύλης.....	27
Σχήμα 11. Παραδείγματα διαδρομών ροής νερού σε επιφάνεια οδοστρώματος.....	28
Σχήμα 12. Ποιοτική απεικόνιση μεταβολής της κλίσης μιας διαδρομής νερού.....	28
Σχήμα 13. Σχηματική επεξήγηση του μέσου βάθους και της μέσης συχνότητας τμήματος επιφάνειας οδοστρώματος.....	29
Σχήμα 14. Παραδείγματα τύπων γεωμετρίας του πορώδους του οδοστρώματος, διαφορετικής λειτουργικότητας.....	29
Σχήμα 15. Συνηθισμένα πρότυπα αυλακώσεων ελαστικών.....	30
Σχήμα 16. Διαστασιολόγηση διατομών.....	33
Σχήμα 17. Χάρτης απεικόνιση της θέσης του δικτύου των 14 σταθμών.....	35
Σχήμα 18. Διαγραμματική απεικόνιση της μεθοδολογίας προσδιορισμού των ζητούμενων εντάσεων βροχόπτωσης.....	37
Σχήμα 19. Αποσπάσματα από το σχεδιαστικό πρόγραμμα απεικόνιση του τρισδιάστατου μοντέλου και της επιλεγμένης διαδρομής νερού – Περίπτωση Διάταξης E-K-Kα.....	38
Σχήμα 20. Αποσπάσματα από το σχεδιαστικό πρόγραμμα απεικόνιση του τρισδιάστατου μοντέλου και της επιλεγμένης διαδρομής νερού – Περίπτωση Διάταξης Κα-K-K-κα.....	39
Σχήμα 21. Παρουσίαση των μεταβλητών του φαινομένου υδρολίστεσης, των μεταξύ τους σχέσεων και του πλήθους των τιμών.....	44
Σχήμα 22. Διαγραμματική απεικόνιση της ροής των εργασιών στο σχεδιαστικό πρόγραμμα.....	58
Σχήμα 23. Δοκιμές με το εργαλείο Water Drop και επισήμανση μεγαλύτερης διαδρομής.....	59
Σχήμα 24. Διαγραμματική απεικόνιση της μεταβολής του ύψους ανά απόσταση απορροής – Επισήμανση επιφάνειας πολυγώνου και λοιπόν γεωμετρικών στοιχείων της μεθοδολογίας.....	60
Σχήμα 25. Διαγραμματική απεικόνιση ισοδύναμου τριγώνου και επιφάνειας του – Επισήμανση λοιπόν γεωμετρικών στοιχείων της μεθοδολογίας.....	61
Σχήμα 26. Σκαρίφημα δομής υπολογιστικού εργαλείου.....	64
Σχήμα 27. Εξώφυλλο και εισαγωγικά στοιχεία υπολογιστικού εργαλείου.....	65
Σχήμα 28. Τμήμα επιλογής τιμών για τους παράγοντες οδοποιίας.....	66

Σχήμα 29. Τμήμα επιλογής τιμών για τους παράγοντες περιβάλλοντος και οχήματος – Επιλογή μαθηματικών μοντέλων και αποτελέσματα	67
Σχήμα 30. Τμήμα αναλυτικής παράθεσης αποτελεσμάτων	68

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Η Σχέση μεταξύ Μεταφορών και Κλιματικής Αλλαγής

Η έννοια της κλιματικής αλλαγής πλέον εστί ευρέως γνωστή, όπως είναι επίσης γνωστή η ανάγκη αντιμετώπισης της σε τοπικό, εθνικό και διεθνές επίπεδο σχεδιασμού και παρεμβάσεων. Μάλιστα, υπάρχουν και αρκετές ενδείξεις για την όξυνση του φαινομένου. Παραδείγματος χάριν, σύμφωνα με δημοσίευση του προγράμματος γεωσκόπησης της Ευρωπαϊκής Ένωσης «Copernicus», το 2019 ήταν το θερμότερο έτος στην ιστορία της Ευρώπης (Copernicus EU Programm 2020). Με μια πρώτη προσέγγιση δεν είναι απαραίτητα ανησυχητικό, καθώς θα μπορούσε να αποτελεί μια στατιστική εκτροπή. Δυστυχώς, όμως, δεν είναι και αυτό φαίνεται από το ότι τα 11 από τα 12 έτη με την υψηλότερη θερμοκρασία συνέβησαν από το 2000 και ύστερα, σύμφωνα με το ίδιο δημοσίευμα.

Οι αναγκαίες ενέργειες στην θεωρία και στην πράξη για την αντιμετώπιση του φαινομένου διαχωρίζονται, σύμφωνα με την βιβλιογραφία, σε δύο άξονες: τον περιορισμό και την προσαρμογή. Ο δεύτερος άξονας ο οποίος αφορά την προσαρμογή, είναι ένα μεγάλο κεφάλαιο άρρηκτα συνδεδεμένο με τις υποδομές κάθε σκοπού, που έχουν κατασκευαστεί και που θα κατασκευαστούν. Παράλληλα, η κλιματική αλλαγή είναι ένα φαινόμενο που ήδη συμβαίνει, επομένως το ζήτημα της προσαρμογής αποκτά καθοριστική σημασία στην αντιμετώπιση του φαινομένου.

Στην παραπάνω κατηγορία των υποδομών ανήκουν και αυτές των μεταφορών, σαν ένα σύστημα μάλιστα, υποδομών και υπηρεσιών. Υποδομών καθώς περιλαμβάνει κατασκευαστικά και σταθερά στοιχεία και υπηρεσιών καθώς περιλαμβάνει δραστηριότητες μεταφοράς αγαθών και ανθρώπων. Το συνολικό σύστημα επηρεάζεται από την αλλαγή του κλίματος με διάφορους τρόπους. Ωστόσο, σύμφωνα με πόρισμα έρευνας του τομέα Υποδομών – Μεταφορών της Οικονομικής Επιτροπής για την Ευρώπη του ΟΗΕ, οι ευρωπαϊκές χώρες μόλις πρόσφατα προχώρησαν σε παρεμβάσεις προσαρμογής των υποδομών μεταφορών και έως πρότινος συγκέντρωναν τις προσπάθειές τους στον περιορισμό του φαινομένου (UNECE 2020).

Όσον αφορά τις επιπτώσεις της αλλαγής του κλίματος στις μεταφορές, διαπιστώνονται τα παρακάτω σύμφωνα με την βιβλιογραφία (Τράπεζα της Ελλάδος 2011):

1. Τα έργα μεταφορών τείνουν να διατρέχουν κίνδυνο τόσο λόγω της αυξητικής κλιματικής αλλαγής, όσο και λόγω των ακραίων φαινομένων (π.χ. κύματα θερμότητας, μεγάλης έντασης βροχοπτώσεις, ισχυροί άνεμοι και άνοδος της στάθμης της θάλασσας).
2. Τα έργα μεταφορών κινδυνεύουν ιδιαίτερα από ακραία καιρικά φαινόμενα των οποίων η εμφάνιση θεωρείται σχετικά απίθανη σε σύγκριση με την τυπική διακύμανση του καιρού. Στην υδρολογία αυτά χαρακτηρίζονται με μεγάλη περίοδο επαναφοράς (T).
3. Η συντήρηση, η κυκλοφορία και η ασφάλεια διατρέχουν γενικά μεγαλύτερο κίνδυνο από την αλλαγή του κλίματος από ότι τα υλικά έργα.

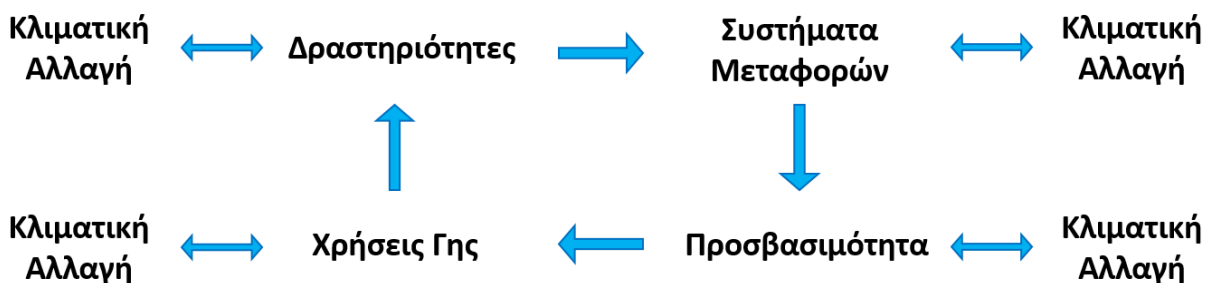
Από τα παραπάνω και σύμφωνα με σχετική μελέτη των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στον τομέα των μεταφορών (Τράπεζα της Ελλάδος 2011), οι άμεσες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στον τομέα των μεταφορών μπορούν κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

1. Επιπτώσεις στο σύστημα μεταφορών λόγω:

- α. φυσικών καταστροφών και ανάγκης ανακατασκευών και επιδιορθώσεων των υποδομών
 - β. ανάγκης προσαρμογής των υποδομών στην αλλαγή του κλίματος.
2. Επιπτώσεις στην συντήρηση των υποδομών των μεταφορών.
 3. Επιπτώσεις στην λειτουργία και αξιοπιστία του συστήματος μεταφορών (π.χ. λόγω καθυστερήσεων από ανακατανομές της κυκλοφορίας).

Επίσης, οι επιπτώσεις ποικίλουν ανάλογα με το δίκτυο μεταφοράς (οδικό, σιδηροδρομικό, θαλάσσιο κλπ.), το είδος των υπηρεσιών του δικτύου (επιβατικό ή εμπορευματικό), την εξεταζόμενη υποδομή (δρόμος, γέφυρα, τροχόδρομος κλπ.), την κατάσταση στην οποία βρίσκεται (τον αρχικό της σχεδιασμό, τυχόν φθορές κλπ.) και τέλος από την γεωγραφική θέση του δικτύου. Φυσικά, έχει σημασία και ο τρόπος επίπτωσης, δηλαδή το είδος της αναμενόμενης αλλαγής του κλίματος (π.χ. άνοδος της θερμοκρασίας) και την ένταση και συχνότητα των εναγουσών φαινομένων.

Ωστόσο, πρέπει να ληφθεί υπόψιν ότι, η σχέση μεταξύ κλιματικής αλλαγής και συστήματος μεταφορών είναι αμφίδρομη. Οι μεταφορές μπορούν και επηρεάζουν το κλίμα από το στάδιο της κατασκευής τους, στο στάδιο της λειτουργίας τους και μέχρι το στάδιο απομάκρυνσής τους. Παραδείγματος χάριν, σύμφωνα με στατιστικά της Ε.Ε. (Eurostat n.d.), το 2018 το 26% του συνόλου των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στην ατμόσφαιρα εντός της στην Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ε.Ε.) προήλθε από τον τομέα των οδικών μεταφορών, όταν το 1990 η τιμή αυτή ήταν στο 16%. Μάλιστα, σύμφωνα με την ίδια πηγή, στο διάστημα 1990 – 2018 οι συνολικές εκπομπές CO₂ στην ατμόσφαιρα στην Ε.Ε. μειώθηκαν κατά 16%, όταν στον τομέα των μεταφορών αυξήθηκαν κατά 24%. Κατόπιν επεξεργασίας της γνωστής σχέσης κλειστού βρόγχου μεταξύ μεταφορών, προσβασιμότητας, χρήσεων γης και δραστηριοτήτων (Wegener and Fuerst 2004), μπορούν τα παραπάνω λεγόμενα να προκύψουν και γραφικά. Στο *Σχήμα 1* μάλιστα, περιλαμβάνεται πληροφοριακά και η αμφίδρομη σχέση μεταξύ κλιματικής αλλαγής και των τριών άλλων τομέων.



Σχήμα 1. Η αμφίδρομη σχέση επιρροής μεταξύ της κλιματικής αλλαγής και άλλων τομέων, όπως τα συστήματα μεταφορών

1.2 Οι Επιπτώσεις της Κλιματικής Αλλαγής στην Οδοποιία

Στις μεταφορές η οδοποιία αποτελεί ένα μεγάλο κεφάλαιο, ως η διαδικασία χάραξης και κατασκευής των οδικών αξόνων. Αντίστοιχα μεγάλο, είναι το κεφάλαιο που αφορά τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην οδοποιία, καθώς το φαινόμενο εκφράζεται με ποικίλους τρόπους επηρεάζοντας την ίδια την υποδομή, αλλά και τις δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα σε αυτήν. Συγκεκριμένα, τα ακραία καιρικά φαινόμενα μπορούν να επηρεάσουν την ίδια την υποδομή μέσω καταστροφών αλλά και την λειτουργία της, φέρνοντας

προβλήματα κυκλοφορίας. Η άνοδος της μέσης στάθμης της θάλασσας είναι επίσης ένας κίνδυνος για τους παραθαλάσσιους οδικούς άξονες σε χαμηλό υψόμετρο. Ένας άλλος παράγοντας με σημαντική επιρροή είναι τα κατακρημνίσματα.

Η κλιματική αλλαγή μπορεί να φέρει αλλαγές στις μέσες τιμές, αλλαγές στην ένταση, αλλαγές στην συχνότητα και αλλαγές στο είδος των ακραίων καιρικών φαινομένων. Οι παραπάνω μεταβολές ενδέχεται να έχουν άμεση επιρροή στο έργο και στην λειτουργία του, όπως μέσω της φθοράς των χωματουργικών έργων, του πλημμυρισμού του οδοστρώματος ή και του περιορισμού της ορατότητας και της πρόσφυσης, ή έμμεση επηρεάζοντας, αρχικά, τον περιβάλλοντα χώρο του. Παραδείγματα της δεύτερης περίπτωσης μπορεί να είναι η πρόσχωση σε περιπτώσεις που το οδικό δίκτυο εφάπτεται σε υδάτινα στοιχεία, ή η αύξηση των συμβατικών και λασπωδών κατολισθήσεων. Ένα γνωστό φαινόμενο που μπορεί να ακολουθήσει τις ακραίες έντασης βροχοπτώσεις, είναι το φαινόμενο της υδρολίσθησης, που θα απασχολήσει μάλιστα την παρούσα εργασία.

2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η βροχόπτωση είναι ένα ιδιαίτερα δυναμικό φαινόμενο και οι προβλέψεις γύρω από αυτό για μεγάλες περιόδους είναι αρκετά δύσκολες. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση της πρόβλεψης της αναμενόμενης μεταβολής των βροχοπτώσεων, εξαιτίας της αλλαγής του κλίματος, όπου στην βιβλιογραφία δεν υπάρχει ομοφωνία. Ωστόσο, η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC) του Οργανισμού Ηνωμένων Εθνών (ΟΗΕ), προσπαθώντας να δημιουργήσει ένα υπόβαθρο για την λήψη αποφάσεων, δημιούργησε σενάρια, μεταξύ άλλων και για την μεταβολή των βροχοπτώσεων, λαμβάνοντάς υπόψιν παράλληλα τις διάφορες απόψεις της επιστημονικής κοινότητας. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η εξέταση του φαινομένου της υδρολίστεσης ελαφρών οχημάτων, στην περίπτωση ενός εκ των παραπάνω σεναρίων της IPCC. Ακόμη, εφόσον ενδιαφέρει το φαινόμενο της υδρολίστεσης, το σενάριο θα αφορά την ένταση των ακραίων βροχοπτώσεων στον ελλαδικό χώρο.

Μάλιστα, στο πλαίσιο της εκπόνησης της εργασίας θα δημιουργηθεί ένα υπολογιστικό εργαλείο όπου ο χρήστης θα έχει την δυνατότητα να επιλέξει τις συνθήκες, τα μοντέλα και τις τιμές των επιμέρους παραμέτρων οχήματος και οδοποιίας για την εύρεση πλήθους αποτελεσμάτων, σε συνέχεια του πλήθους των διαθέσιμων συνδυασμών. Σε κάθε περίπτωση συνδυασμού παραμέτρων/συνθηκών, θα μπορεί να υπολογιστεί η ταχύτητα κατά την οποία η υδρολίστεση ξεκινά σε συγκεκριμένες οδικές χαράξεις.

Η χρήση του εργαλείου καθιστά εύκολο τον υπολογισμό της ταχύτητας υδρολίστεσης για πολυάριθμες περιπτώσεις και θα χρησιμεύσει με αυτόν τον τρόπο στην βαθιά κατανόηση του φαινομένου και της συμπεριφοράς του, κατά την μεταβολή των παραγόντων του. Αντικείμενο της εργασίας είναι η ανάλυση του φαινομένου της υδρολίστεσης για διάφορους συνδυασμούς τιμών των μεταβλητών που συμβάλλουν σε αυτό το φαινόμενο, συναρτήσει της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής μέσω της μεταβολής των βροχοπτώσεων. Τέλος, καθώς πραγματοποιείται έλεγχος ενός φαινομένου που ενδέχεται να προκαλέσει προβλήματα στην συντήρηση, στην κυκλοφορία και στην ασφάλεια, πρέπει να σημειωθεί πως στην μεθοδολογία σε αρκετά σημεία εφαρμόζεται το δυσμενέστερο σενάριο για την επιλογή ορισμένων τιμών των παραμέτρων.

3 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Σκοπός του κεφαλαίου είναι η παράθεση του απαραίτητου θεωρητικού υποβάθρου, αλλά και η τεκμηρίωση των επιλογών που πραγματοποιούνται στην μεθοδολογία. Συγκεκριμένα, θα απασχολήσει το φαινόμενο της υδρολίστεσης, τα μοντέλα που θα χρησιμοποιηθούν για την περιγραφή του και ο προσδιορισμός και η ανάλυση των απαραίτητων παραμέτρων για την χρήση τους.

3.1 Η Αλλαγή του Κλίματος

Σύμφωνα με τις προϋπάρχουσες προβλέψεις, πολλαπλές και ταυτόχρονες αλλαγές στο κλίμα έχουν γίνει εμφανέστερες, συμπεριλαμβανομένης της αύξησης της παγκόσμιας θερμοκρασίας, της απώλειας όγκου πάγου, της ανόδου της στάθμης της θάλασσας και των αλλαγών στα παγκόσμια πρότυπα κατακρημνισμάτων. Οι αλλαγές αυτές, που κυρίως εκφράζονται μέσω ακραίων γεγονότων, έχουν επηρεάσει δυσμενώς το ανθρωπογενές περιβάλλον, αλλά και τα οικοσυστήματα του φυσικού. Μελέτη για την άνοδο της στάθμης της θάλασσας στην περίπτωση της πόλης της Βενετίας στην Ιταλία, κατέληξε πως χωρίς την κατάλληλη προσαρμογή, ενδέχεται να προκύψουν οικονομικές ζημιές αξίας 7 έως 17 δισεκατομμυρίων ευρώ μέχρι το 2066 (Fontini and Caporin 2016).

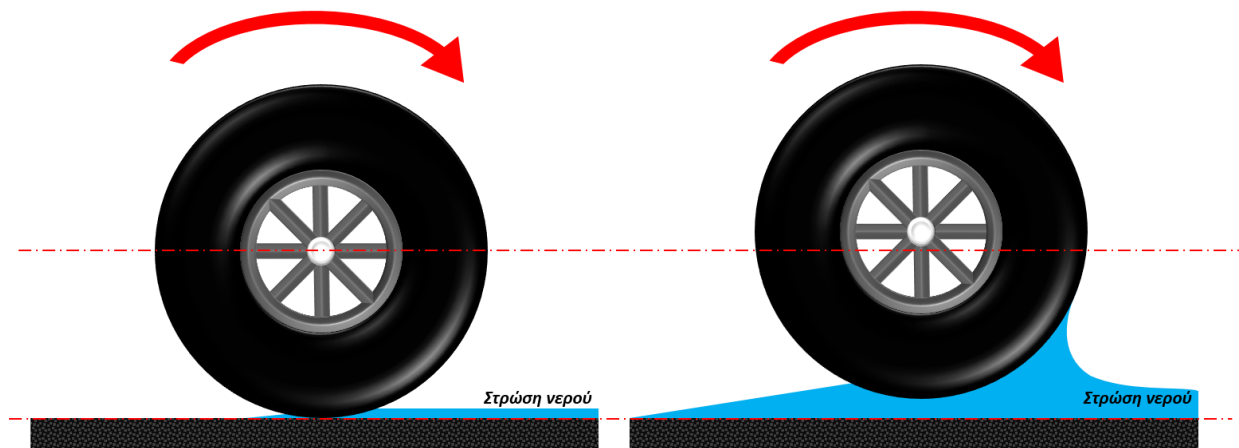
Ακόμη, προβλέπεται πως οι μεταβολές στον κύκλο του νερού και τα ακραία φαινόμενα θα εμφανίζονται ταχύτερα από τις μέσες μεταβολές άλλων μεγεθών σε όλα τα εκτιμώμενα σενάρια κλιματικής αλλαγής (Intergovernmental Panel on Climate change, Working Group II 2022). Οι ίδιες προβλέψεις αναφέρουν επίσης πως, με την αύξηση της μέσης θερμοκρασίας, οι βροχοπτώσεις μεγάλης έντασης αναμένονται συχνότερες και εντονότερες.

Η υδρολίστεση ως γεγονός συνδέεται άρρηκτα με το κλίμα μέσω των βροχοπτώσεων. Μπορεί να προκληθεί από βροχοπτώσεις μεγάλης έντασης και η αλλαγή του κλίματος είναι ένας παράγοντας που ενδέχεται να αυξήσει το ύψος βροχόπτωσης αυτών των φαινομένων, αλλά και την συχνότητά τους. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τον διαδικτυακό διαδραστικό Άτλα της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC), η μέση τιμή των μεγίστων υψών βροχόπτωσης σε διάστημα αναφοράς 24 ωρών, ενδέχεται να αυξηθεί στον Ελλαδικό χώρο έως και κατά 15% μεταξύ των χρονικών περιόδων 1995 – 2014 και 2041 – 2060 (Intergovernmental Panel on Climate Change 2021).

3.2 Το Φαινόμενο της Υδρολίστεσης

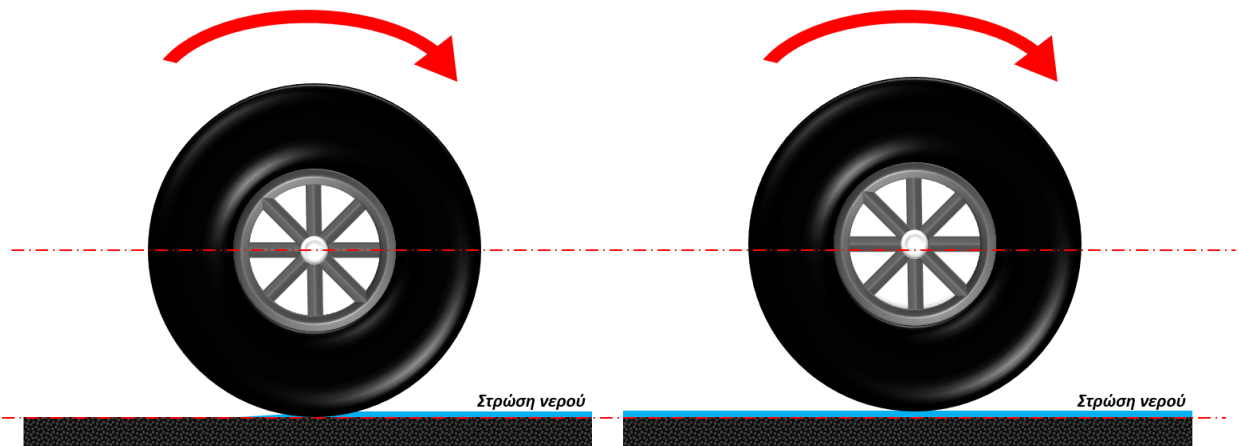
Υδρολίστεση είναι το φαινόμενο κατά το οποίο παρεμβάλλεται μια στρώση νερού στην διεπαφή ελαστικού και οδοστρώματος, διαχωρίζοντας τα πλήρως μεταξύ τους. Σύμφωνα με τον Walter B. Horne (Horne 1968), το φαινόμενο αυτό μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε τρεις τύπους.

Δυναμική Υδρολίστεση: Είναι ο πιο συχνός τύπος υδρολίστεσης που συναντάται σε οδοστρώματα. Εμφανίζεται όταν ένα κινούμενο ελαστικό περνά πάνω από ένα βρεγμένο οδόστρωμα με περισσότερο νερό από αυτό που μπορεί να απομακρύνει, ώστε τελικά να διαχωρίζεται τελείως από αυτό. Η δυναμική υδρολίστεση συμβαίνει συνήθως σε υψηλές ταχύτητες (συνήθως πάνω από 70 km/h) και είναι αυτή που θα απασχολήσει την παρούσα εργασία.



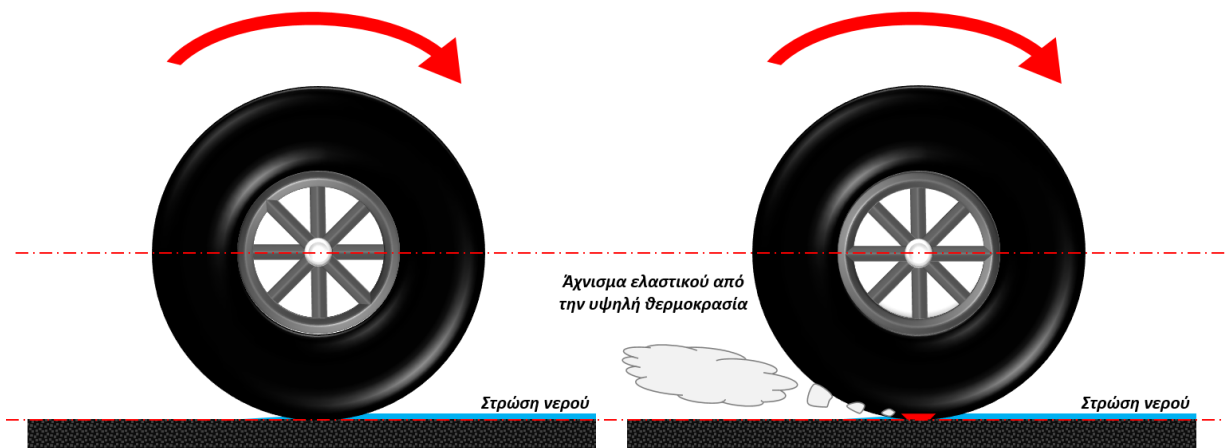
Σχήμα 2. Απεικόνιση του φαινομένου της δυναμικής υδρολίσθησης

Ιξώδης Υδρολίσθηση: Αυτό το φαινόμενο εμφανίζεται μόνο σε επιφανειακά οδοστρώματα με μικρή ή καθόλου τραχύτητα. Η ιξώδης υδρολίσθηση μπορεί επίσης να συμβεί σε οδοστρώματα που έχουν φθαρεί και εξομαλυνθεί από την κυκλοφορία. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, ακόμη και μια πολύ λεπτή στρώση νερού μπορεί να διαχωρίσει το κινούμενο ελαστικό από το οδόστρωμα προκαλώντας υδρολίσθηση. Αυτός ο τύπος υδρολίσθησης αφορά και μικρές ταχύτητες.



Σχήμα 3. Απεικόνιση του φαινομένου της ιξώδους υδρολίσθησης

Υδρολίσθηση ανεστραμμένης κατάστασης ελαστικού: Η περίπτωση αυτή συμβαίνει όταν η τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ ελαστικού και οδοστρώματος δημιουργεί αρκετή θερμότητα ώστε το λάστιχο να επανέλθει στην μη σκληρυνθείσα κατάστασή του, εξομαλύνοντας εν τέλει την επιφάνειά του. Αυτός ο τύπος υδρολίσθησης συνήθως δεν συμβαίνει σε συμβατικούς δρόμους, αλλά σε διαδρόμους με αεροσκάφη υψηλών ταχυτήτων.



Σχήμα 4. Απεικόνιση του φαινομένου της υδρολίσθησης ανεστραμμένης κατάστασης ελαστικού

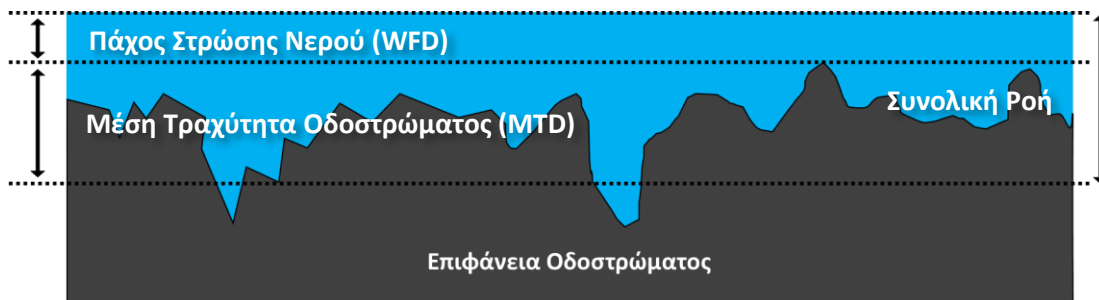
Το φαινόμενο της υδρολίσθησης σε γενικές γραμμές μπορεί να προκληθεί από βροχοπτώσεις μεγάλης έντασης και η αλλαγή του κλίματος είναι ένας παράγοντας που ενδέχεται να αυξήσει την συχνότητα τέτοιων φαινομένων. Το σύνολο των παραγόντων που δύναται να επηρεάσουν αυτό το φαινόμενο (Lee and Ayyala 2020), κατηγοριοποιημένοι, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 1. Παράγοντες φαινομένου υδρολίσθησης

Παράγοντες Οδοποιίας	Παράγοντες Περιβάλλοντος	Παράγοντες Οδηγού	Παράγοντες Οχήματος
<ul style="list-style-type: none"> • Επιφάνεια Οδοστρώματος • Τραχύτητα • Βάθος αυλακώσεων • Διαπερατότητα οδοστρώματος • Επίκλιση • Κατά μήκος κλίση • Πλάτος οδοστρώματος • Καμπυλότητα της οδού 	<ul style="list-style-type: none"> • Ένταση βροχόπτωσης • Διάρκεια βροχόπτωσης • Θερμοκρασία 	<ul style="list-style-type: none"> • Ταχύτητα • Επιτάχυνση και επιβράδυνση • Ελιγμοί 	<ul style="list-style-type: none"> • Σχεδιασμός αυλακώσεων ελαστικών • Βάθος αυλακώσεων ελαστικών • Πίεση ελαστικών • Τύπος οχήματος • Βάρος οχήματος

3.3 Μοντέλα Υδρολίσθησης

Η υδρολίσθηση είναι ένα πολύ σοβαρό ζήτημα για την ασφάλεια στις μετακινήσεις και για αυτό τον λόγο εδώ και δεκαετίες γίνονται προσπάθειες για την ακριβέστερη παραμετροποίηση και περιγραφή του, ώστε να προβλεφθεί και να προληφθεί. Σε αυτό το πλαίσιο έχουν προσδιοριστεί αρκετά μαθηματικά μοντέλα για τον προσδιορισμό της ταχύτητας κατά την οποία το όχημα ξεκινά να ολισθαίνει, δηλαδή την ταχύτητα υδρολίσθησης (HPS), ενώ αρκετοί ερευνητές έχουν δημιουργήσει και επιμέρους μοντέλα για το πάχος της ροής του νερού (WFD) που συσσωρεύεται στην επιφάνεια του οδοστρώματος κατά την διάρκεια μιας βροχόπτωσης. Μια υπολογισθείσα παράμετρος καθοριστικής σημασίας στην υδρολίσθηση των οχημάτων και που χρησιμοποιείται ύστερα σε αρκετά μαθηματικά μοντέλα για την ταχύτητα υδρολίσθησης.



Σχήμα 5. Απεικόνιση του πάχους της στρώσης του νερού και του μέσου βάθους τραχύτητας οδοστρώματος

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται τρία διαφορετικά μαθηματικά μοντέλα για τον υπολογισμό της ταχύτητας υδρολίστεσης, όπου και στις τρεις περιπτώσεις πρώτα υπολογίζεται το πάχος της ροής του νερού ως επιμέρους παράμετρος με αντίστοιχο μαθηματικό μοντέλο. Σημειώνεται ότι δόθηκε προσοχή να μην χρησιμοποιηθούν συμπληρωματικά μοντέλα για το πάχος της ροής του νερού και για την ταχύτητα υδρολίστεσης από διαφορετικούς ερευνητές, για την διασφάλιση της ακεραιότητας των παραδοχών και των συνθηκών από όπου προέκυψαν οι μαθηματικές σχέσεις. Στον Πίνακα 2 παρατίθενται οι τρεις συνδυασμοί, ή όπως θα ονομάζονται από δω και στο εξής, μοντέλα υδρολίστεσης, ενώ σε επόμενα εδάφια παρουσιάζονται αναλυτικά οι μαθηματικές σχέσεις, διατηρώντας τα γνωστά στην βιβλιογραφία σύμβολα.

Πίνακας 2. Σύνθεση μοντέλων υδρολίστεσης

Παράγοντες Οδοποιίας	Μοντέλο WFD	Μοντέλο HPS
Μοντέλο Υδρολίστεσης 1	Gallaway etc	Gallaway etc
Μοντέλο Υδρολίστεσης 1	PAVDRN (αναλυτικά)	PAVDRN
Μοντέλο Υδρολίστεσης 3	Ressel και Hermann	Ressel και Hermann

3.3.1 Πάχος Ροής Νερού, Gallaway etc. (1979)

Το συγκεκριμένο εμπειρικό μαθηματικό μοντέλο προέκυψε από την σχέση (Gallaway, και συν. 1979) που προσδιόρισε ο Gallaway και οι συνεργάτες του το 1979 στο Τέξας και μετά από την συμπλήρωσή της εργαστηριακά, με 1079 σημεία δεδομένων (Lee και Ayyala 2020). Συγκεκριμένα:

$$WFT = \frac{0,003726 \cdot MTD^{0,125} \cdot Lf^{0,519} \cdot i^{0,562}}{Sf^{0,364}} - MTD$$

όπου:

WFT	=	Πάχος ροής νερού (in)
MTD	=	Μέσο βάθος τραχύτητας Οδοστρώματος [in]
Lf	=	Μήκος ροής νερού (ft)
i	=	Ένταση βροχόπτωσης (in/h)
Sf	=	Κλίση κατά μήκος της ροής νερού (Αδιάστ.)

Το μοντέλο για το πάχος της ροής του νερού και για την ταχύτητα υδρολίστεσης του Gallaway και των συνεργατών του άφησε σημαντικό στίγμα στην βιβλιογραφία και πολλή μεταγενέστερη έρευνα βασίστηκε στην δουλειά τους.

3.3.2 Πάχος Ροής Νερού, PAVDRN (1997-1998)

Το μοντέλο αυτό αναπτύχθηκε αναλυτικά στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος «*National Cooperative Highway Research Programme (NCHRP)*», με τον μαθηματικό τύπο (Lee και Ayyala 2020) να ακολουθεί:

$$WFT = \left(\frac{n \cdot Lf \cdot i}{36,1 \cdot Sf^{0,5}} \right)^{0,6} - MT$$

όπου:

WFT	=	Πάχος ροής νερού (mm)
n	=	Συντελεστής Manning (Αδιάστ.)
MTD	=	Μέσο βάθος τραχύτητας Οδοστρώματος (mm)
Lf	=	Μήκος ροής νερού (m)
i	=	Ένταση βροχόπτωσης (mm/h)
Sf	=	Κλίση κατά μήκος της ροής νερού (Αδιάστ.)

3.3.3 Πάχος Ροής Νερού, Ressel και Hermann (2008)

Στο πλαίσιο έρευνας για το γερμανικό Ομοσπονδιακό Υπουργείο Μεταφορών, Κτιρίων και Αστικής Ανάπτυξης (Ressel και Hermann 2008), οι W. Ressel και S. Hermann προσδιόρισαν μια μαθηματική σχέση για τον προσδιορισμό του πάχους της ροής του νερού. Η μαθηματική σχέση αναπτύσσεται ως εξής:

$$WFT = 0,861 \cdot MTD^{0,4177} \cdot Q^{0,4158} \cdot S^{-0,3314}$$

όπου:

WFT	=	Πάχος ροής νερού (mm)
MTD	=	Μέσο βάθος τραχύτητας Οδοστρώματος (mm)
Q	=	Ρυθμός ροής νερού (m ³ /h)

$$Q = 0,0579 \cdot Lf \cdot i$$

Lf	=	Μήκος ροής νερού (m)
i	=	Ένταση βροχόπτωσης (mm/min)
Sf	=	Κλίση κατά μήκος της ροής νερού (Αδιάστ.)

3.3.4 Ταχύτητα Υδρολίσθησης, Gallaway etc. (1979)

Παρατίθεται στην συνέχεια η μαθηματική σχέση, η οποία αναπτύχθηκε στην ίδια εργασία με αυτή για το πάχος της ροής του νερού.

$$HPS = SD^{0,04} \cdot Pt^{0,3} \cdot (1 + TD)^{0,06} \cdot A$$

όπου:

HPS	=	Ταχύτητα υδρολίσθησης (mph)
SD	=	Μείωση της ταχύτητας περιστροφής του ελαστικού κατά την έναρξη της υδρολίσθησης (%)
Pt	=	Πίεση ελαστικών (psi)
TD	=	Βάθος αυλακώσεων ελαστικών (in/32)

A = Συντελεστής όπου:

$$A = \text{MAX} \left[\left(\frac{10,409}{WFT^{0,06}} \right) + 3,507, \left(\left(\frac{28,952}{WFT^{0,06}} \right) - 7,817 \right) \cdot MTD^{0,14} \right]$$

WFT = Πάχος ροής νερού (in)

MTD = Μέσο βάθος τραχύτητας Οδοστρώματος (in)

3.3.5 Ταχύτητα Υδρολίσθησης, PAVDRN (1997-1998)

Το μαθηματικό μοντέλο σε αυτή την περίπτωση διακρίνεται σε δύο σχέσεις, ανάλογα με το πάχος της ροής του νερού. Συγκεκριμένα:

1. Εάν $WFT < 2,4$ mm (ή 0,094 in)

$$HPS = 26,04 \cdot WFT^{-0,259}$$

HPS = Ταχύτητα υδρολίσθησης (mph)

WFT = Πάχος ροής νερού (in)

2. Εάν $WFT \geq 2,4$ mm (ή 0,094 in)

$$HPS = 3,09 \cdot A$$

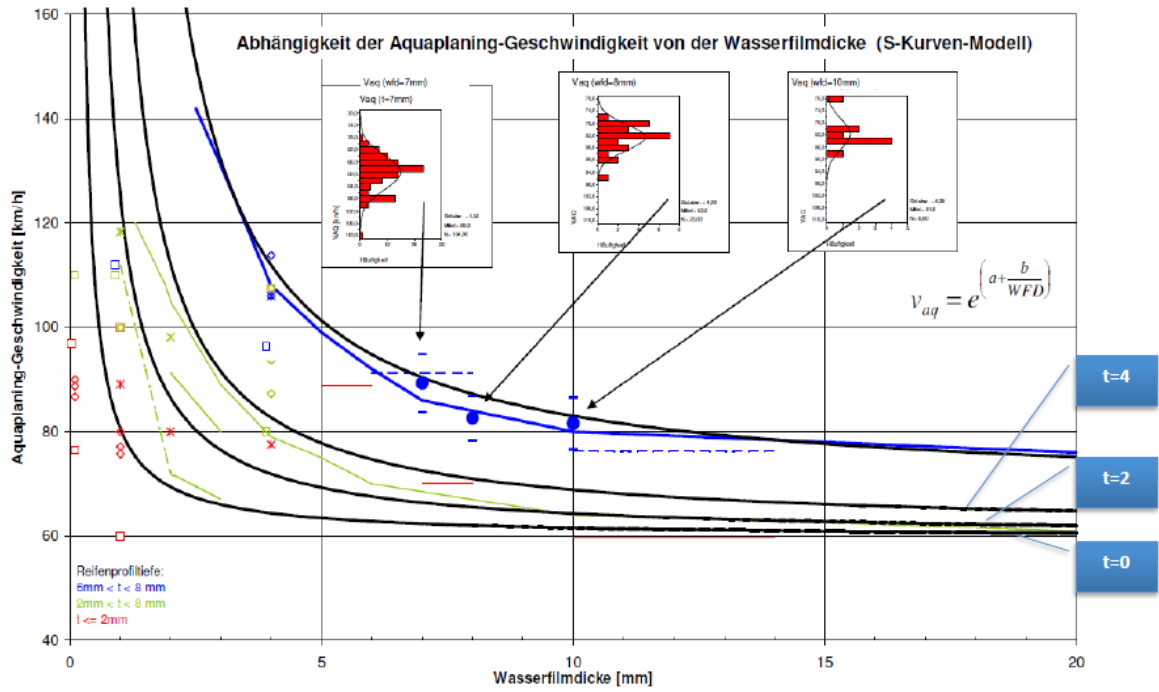
HPS = Ταχύτητα υδρολίσθησης (mph)

A = Ορίστηκε σε προηγούμενο εδάφιο

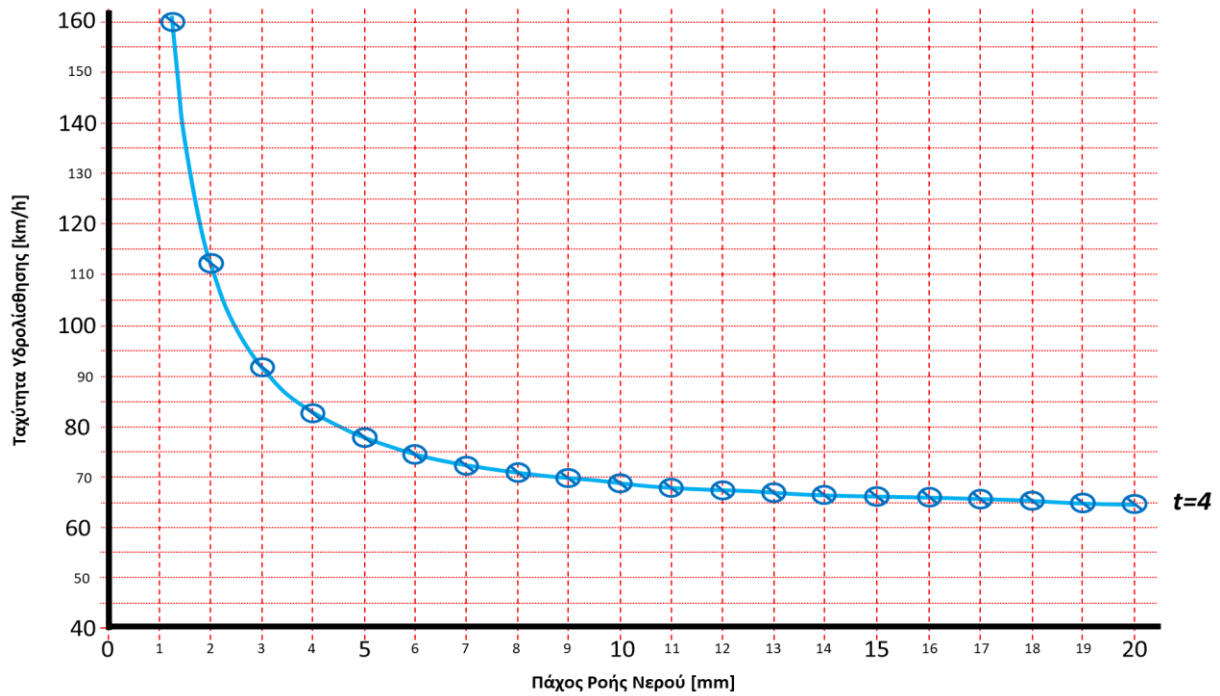
3.3.6 Ταχύτητα Υδρολίσθησης, Ressel και Hermann (2008)

Η ταχύτητα υδρολίσθησης προσδιορίζεται σε αυτήν την περίπτωση με βάση το πάχος της ροής του νερού και με χρήση του διαγράμματος του Σχήματος 6. Σημειώνεται ότι το διάγραμμα αυτό προσδιορίζει την σχέση ταχύτητας υδρολίσθησης – πάχος στρώσης ροής νερού, λαμβάνοντας υπόψιν μια χωρητικότητα αποθήκευσης νερού από την επιφάνεια του οδοστρώματος και τις αυλακώσεις των ελαστικών της τάξης των (t =) 4 mm. Η τιμή αυτή επιλέχθηκε λαμβάνοντας υπόψιν ένα βάθος αυλακώσεων 3 mm και μια τραχύτητα οδοστρώματος της τάξης του 1 mm, τιμές που όπως θα αναλυθεί αργότερα αρμόζουν για τον έλεγχο της παρούσας εργασίας.

Η επιλεγμένη καμπύλη του παραπάνω διαγράμματος παρουσιάζεται ξανά στο Σχήμα 7 για λόγους ευκρίνειας, ενώ στον Πίνακα 3 παρατίθενται οι τιμές που εξάχθηκαν από το διάγραμμα, επάνω στις οποίες θα εφαρμοστεί γραμμική παρεμβολή για τον προσδιορισμό της ταχύτητας υδρολίσθησης, ανά περίπτωση.



Σχήμα 6. Διάγραμμα προσδιορισμού ταχύτητας υδρολίσθησης (Ressel και Hermann 2008)



Σχήμα 7. Απομόνωση επιλεγμένης καμπύλης προσδιορισμού ταχύτητας υδρολίσθησης από διάγραμμα του Σχήματος 6

Πίνακας 3. Εξαγωγή τιμών διαγράμματος HPS - WFT

t [mm]	WFD [mm]	V [km/h]
4	1,25	160
4	2	112
4	3	92
4	4	83
4	5	78
4	6	75
4	7	73
4	8	71
4	9	70
4	10	69
4	11	68
4	12	67,5
4	13	67
4	14	66,7
4	15	66,5
4	16	66,3
4	17	66
4	18	65,5
4	19	65,2
4	20	65

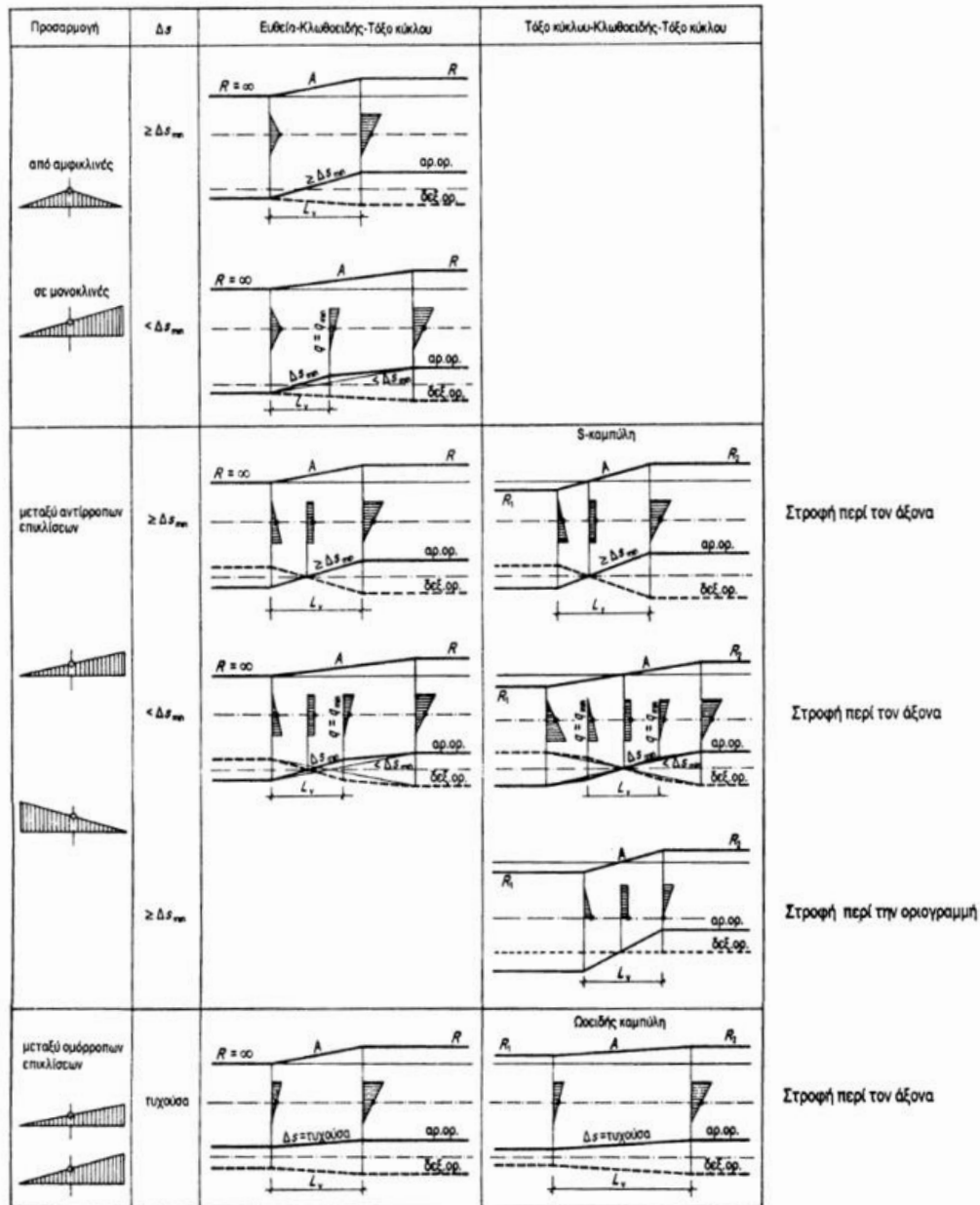
3.4 Τυπικές Διατάξεις Προσαρμογής

Για την μελέτη του φαινομένου της υδρολίστησης ως προς ορισμένες παραμέτρους, χωρίς να υπάρχει συγκεκριμένο αντικείμενο στην φυσική γήινη επιφάνεια προς μελέτη για το οποίο να έχουν συλλεχθεί δεδομένα στο πεδίο, πρέπει να επιλεγθούν και παραμετροποιηθούν συγκεκριμένες διαμορφώσεις γεωμετρίας οδών.

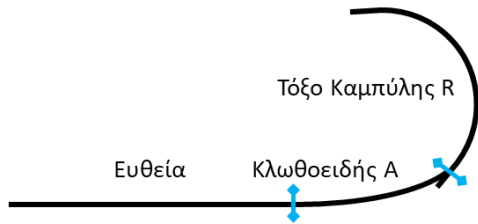
Αρχικά, δεδομένου πως το φαινόμενο της υδρολίστησης δεν εμφανίζεται σε μικρές ταχύτητες, η μελέτη πρέπει να μελετά οδικούς άξονες με υψηλά όρια ταχύτητας. Μάλιστα, εφόσον ο μεγαλύτερος κίνδυνος για τον οδηγό και τους επιβάτες βρίσκεται στις μεγαλύτερες ταχύτητες, για την παρούσα εργασία το επιθυμητό όριο είναι το μέγιστο για τους ελληνικούς κανονισμούς, αυτό των 130 km/h. Κατάλληλο προφίλ διαθέτουν οι αυτοκινητόδρομοι, ή διαφορετικά οι υπεραστικοί οδοί κατηγορίας ΑΙ σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση που εφαρμόζουν οι Οδηγίες μελετών Οδικών Έργων (ΟΜΟΕ). Επομένως, οι οδικές χαράξεις θα διαθέτουν ανά κατεύθυνση παραπάνω από μια λωρίδα κυκλοφορίας και διαχωριστική νησίδα.

Ρόλο καθοριστικής σημασίας για την απομάκρυνση των κατακρημνισμάτων από το οδόστρωμα στον σχεδιασμό, διαδραματίζει η κατά μήκος κλίση και η επίκλιση της οδού. Η δεύτερη είναι και ο κατευθύνων παράγοντας για την επιλογή των διατάξεων προσαρμογής της επίκλισης. Συγκεκριμένα, ο μεγαλύτερος κίνδυνος εμφανίζεται στην περίπτωση που η επίκλιση μηδενίζεται, όπου ενδέχεται να συσσωρευτούν λιμνάζοντα ύδατα. Μηδενισμός της επίκλισης συμβαίνει κατά

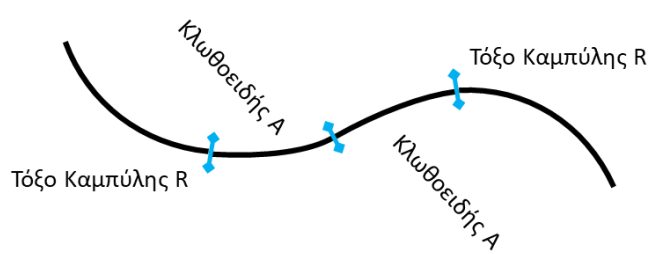
την προσαρμογή μεταξύ αντίρροπων επικλίσεων και κατά τις αλληλουχίες Ευθεία – Κλωθοειδής - Τόξο Κύκλου και Τόξο Κύκλου – Κλωθοειδής - Κλωθοειδής – Τόξο Κύκλου. Στην δεύτερη διάταξη προσαρμογής ανήκει και η Σιγμοειδής Καμπύλη ή Καμπύλη σχήματος S, όπως ονομάζεται εξαιτίας του σχήματος της. Σε αυτή, δύο κλάδοι κλωθοειδών συνδέουν δύο αντίρροπους κύκλους, και συχνά προκύπτουν ζητήματα υδρολίστεσης. Στο Σχήμα 8 με τα σχετικά διαγράμματα προσαρμογής της επίκλισης που έχει συνταχθεί στο τεύχος ΟΜΟΕ-Χ, φαίνεται ότι η επίκλιση μηδενίζεται στις προαναφερόμενες διατάξεις και όταν η προσαρμογή είναι μεταξύ αντίρροπων επικλίσεων, ενώ στο Σχήμα 9 παρουσιάζονται οι διατάξεις προσαρμογής και οριζοντιογραφικά.



Σχήμα 8. Διαγράμματα επίκλισης ανά τύπο προσαρμογής και διάταξη (Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων (ΟΜΟΕ) 2001)



Σχήμα (α): Οριζοντιογραφία Ευθείας - Κλωθοειδούς - Καμπύλης (Ε-Κ-Κα)



Σχήμα (β): Οριζοντιογραφία Καμπύλης - Κλωθοειδούς - Κλωθοειδούς - Καμπύλης (Κα-Κ-Κ-Κα)

Σχήμα 9. Τυπικές Διατάξεις Προσαρμογής που θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα εργασία

Εν κατακλείδι, όσον αφορά την γεωμετρία των οδικών αξόνων αυτοκινητόδρομου που θα μελετηθούν, επιλέγονται οι δύο διατάξεις προσαρμογής, αυτή της αλληλουχίας Ευθεία – Κλωθοειδής – Τόξο Κύκλου και αυτή της Τόξο Κύκλου – Κλωθοειδής – Κλωθοειδής – Τόξο Κύκλου, όπου και στις δύο περιπτώσεις η προσαρμογή εφαρμόζεται μεταξύ δύο αντίρροπων επικλίσεων.

Πίνακας 4. Περιπτώσεις γεωμετρίας οδικών αξόνων που θα μελετηθούν

Διάταξη Ευθεία – Κλωθοειδής – Τόξο κύκλου	Διάταξη Τόξο Κύκλου – Κλωθοειδής – Κλωθοειδής - Τόξο κύκλου
Αυτοκινητόδρομος με 2 Λωρίδες ανά κατεύθυνση	Αυτοκινητόδρομος με 2 Λωρίδες ανά κατεύθυνση
Αυτοκινητόδρομος με 3 Λωρίδες ανά κατεύθυνση	Αυτοκινητόδρομος με 3 Λωρίδες ανά κατεύθυνση

3.5 Μεγέθη

Οι μαθηματικές σχέσεις των μοντέλων υδρολίστησης περιλαμβάνουν διάφορα μεγέθη για να περιγράψουν το φαινόμενο αυτής και αφορούν ορισμένες συνθήκες του περιβάλλοντος, κάποιους παράγοντες οδοποιίας και κάποιους παράγοντες του οχήματος. Η επιτυχής χρήση των μοντέλων υδρολίστησης προϋποθέτει και την επιτυχή επιλογή των τιμών αυτών των μεγεθών, για αυτό το γνωστικό τους υπόβαθρο είναι απαραίτητο.

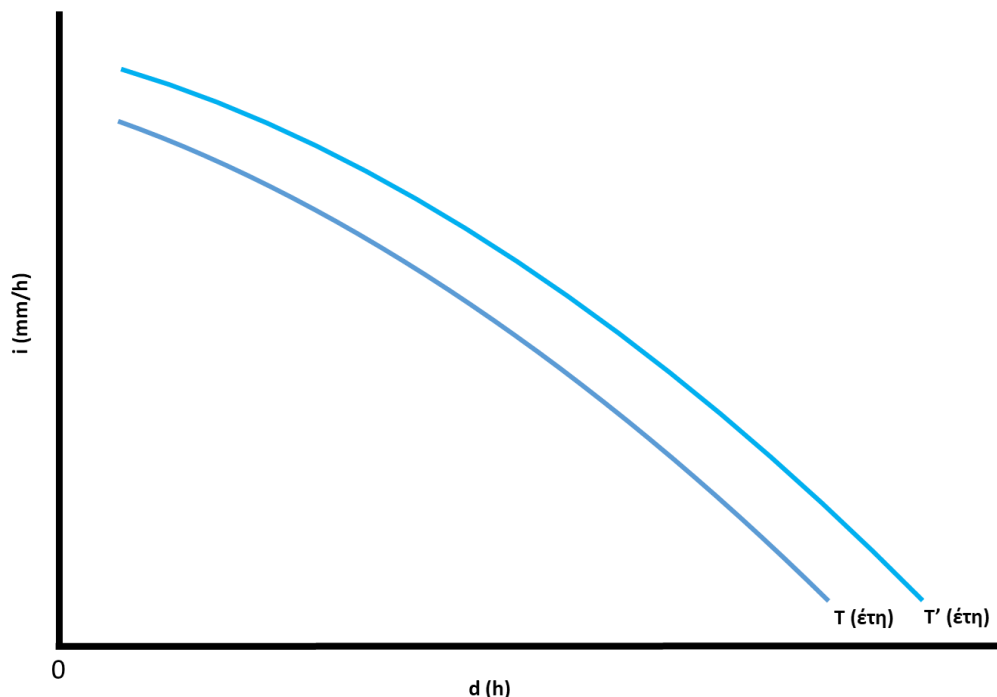
3.5.1 Ένταση Βροχόπτωσης (i)

Η ένταση της βροχόπτωσης ορίζεται ως ο ρυθμός της πτώσης της βροχής. Ορίζεται με το σύμβολο (i) και διαστασιοποιείται σε $[M/T]$ ανεξάρτητα από την διάρκεια της βροχόπτωσης στην οποία αναφέρεται. Για τον λόγο αυτό είναι σημαντικό να διευκρινίζεται η **διάρκεια αναφοράς (d)** της βροχόπτωσης σε κάθε περίπτωση. Όσον αφορά την τελευταία, η επιλογή της είναι σημαντική για τον σχεδιασμό. Η διάρκεια της βροχόπτωσης σχεδιασμού χρειάζεται να είναι τουλάχιστον ίση με τον χρόνο συρροής της λεκάνης. Σε αυτό το πλαίσιο, αποδείχθηκε πως οι 24ωρες βροχοπτώσεις είναι μια ικανοποιητική διάρκεια αναφοράς για τον σχεδιασμό στην οδοποιία (Οδηγίες μελετών Οδικών Έργων (ΟΜΟΕ) 2013), μια τιμή που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία.

Ένα ακόμη μέγεθος που συμμετέχει στον προσδιορισμό της έντασης βροχόπτωσης είναι η **περίοδος επαναφοράς (T)**, δηλαδή η συχνότητα στην οποία η βροχόπτωση με το δεδομένο, ή μεγαλύτερο, ύψος συμβαίνει. Η τιμή της περιόδου επαναφοράς επιλέγεται με βάση την

σπουδαιότητα του έργου και των ενδεχόμενων καταστροφών από μια δυνατή αστοχία, ενώ οι τιμές κυμαίνονται από 5 έτη (κατασκευή τάφρων αυτοκινητόδρομων) έως 10.000 έτη (σχεδιασμός υπερχειλιστών φραγμάτων) (Οδηγίες μελετών Οδικών Έργων (ΟΜΟΕ) 2013). Στην παρούσα εργασία επιλέγεται ως ικανοποιητική τιμή, τα 50 έτη.

Μετά την επιλογή της κατάλληλης περιόδου επαναφοράς και της κατάλληλης διάρκειας αναφοράς, μπορούν να υπολογιστούν οι όμβριες καμπύλες (βλέπε Σχήμα 10) από τα δεδομένα βροχόπτωσης, δηλαδή οι μέγιστες εντάσεις βροχόπτωσης για δεδομένη περίοδο επαναφοράς και διάρκεια αναφοράς.



Σχήμα 10. Ποιοτική αναπαράσταση όμβριας καμπύλης

Ως προς από τα μαθηματικά μοντέλα για το πάχος της ροής του νερού, με την αύξηση της έντασης βροχόπτωσης αυξάνεται και το πάχος της στρώσης του νερού. Ένας παράγοντας κεντρικής σημασίας για τον καθορισμό της ταχύτητας υδρολίστεσης.

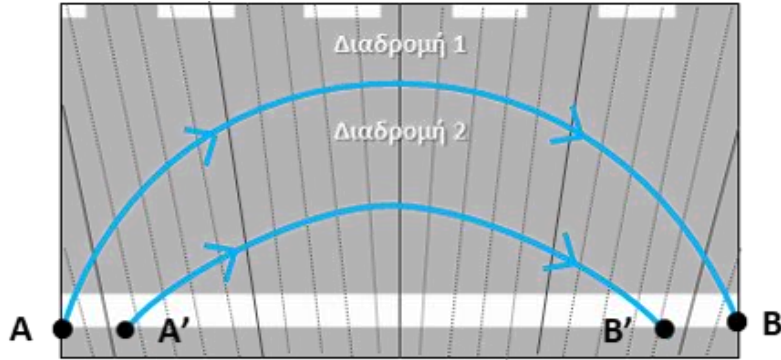
Πίνακας 5. Τιμές περιόδου επαναφοράς και διάρκειας αναφορά της βροχόπτωσης

Περίοδος επαναφοράς (T)	Διάρκεια Αναφοράς (d)
50 έτη	24 h

3.5.2 Μήκος της ροής του νερού (Lf)

Το μήκος της ροής του νερού ορίζεται ως η απόσταση που διανύει μια μονάδα ποσότητας νερού από την στιγμή που πέσει στο οδόστρωμα ως κατακρήμνισμα στο σημείο Α, μέχρι να φτάσει στο σημείο Β όπου θα λιμνάσει ή θα κάνει έξοδο από το οδόστρωμα. Αυτή την διαδρομή ακολουθεί και όποια ποσότητα νερού βρεθεί σε ενδιάμεσα σημεία της, επομένως είναι κατανοητό πως όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η ποσότητα του νερού που θα συσσωρευτεί στο εκάστοτε σημείο Β. Ακολούθως, το κρισιμότερο σημείο για υδρολίστεση θα είναι εκείνο όπου το νερό συσσωρεύεται έχοντας διανύσει το μεγαλύτερο μήκος.

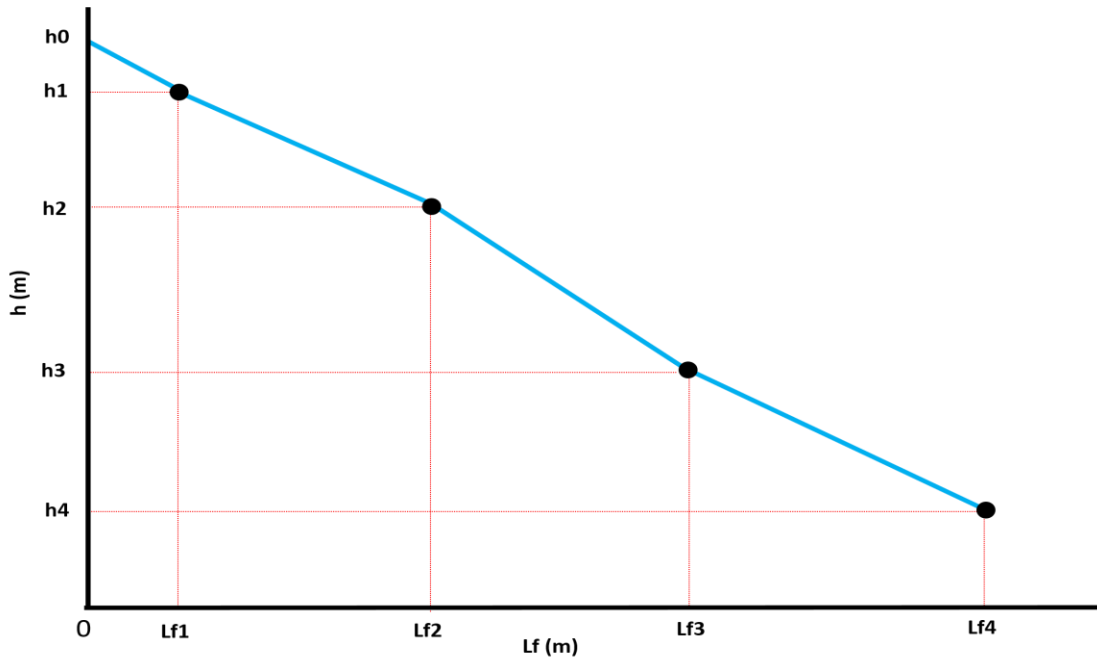
Συμβολίζεται στην μεθοδολογία ως L_f και διαστασιολογείται ως απόσταση [M], ενώ σημειώνεται ότι ενδιαφέρει το μήκος στον χώρο των τριών διαστάσεων. Στο Σχήμα 11 παρατίθεται μια εικονική αναπαράσταση διαφορετικών διαδρομών ροής του νερού, με την βοήθεια της προβολής υψομετρικών καμπυλών στο οδόστρωμα.



Σχήμα 11. Παραδείγματα διαδρομών ροής νερού σε επιφάνεια οδοστρώματος

3.5.3 Κλίση κατά μήκος της ροής του νερού (S_f)

Η ροή του νερού εξαιτίας της βαρύτητας κατευθύνεται κατηφορικά, σημειώνοντας μάλιστα την ταχύτερη κάθοδο. Η κλίση της διαδρομής που ακολουθεί η ροή του νερού, ζητείται ως παράμετρος στα περισσότερα μαθηματικά μοντέλα για τον υπολογισμό του πάχους της στρώσης του νερού. Πράγματι, όπως φαίνεται και στις μαθηματικές σχέσεις των μοντέλων, όσο μεγαλύτερη είναι η κλίση, τόσο μικρότερο είναι το πάχος του νερού. Αυτό συμβαίνει διότι με μεγάλες κλίσεις το νερό ρέει ταχύτερα και δεν προλαβαίνει να συσσωρευτεί και να σχηματίσει παχιές στρώσεις. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι είναι σχεδόν απίθανο η κλίση να είναι ενιαία, καθώς αλλάζει κατά το μήκος που διανύει, όπως φαίνεται ποιοτικά και στο Σχήμα 12.

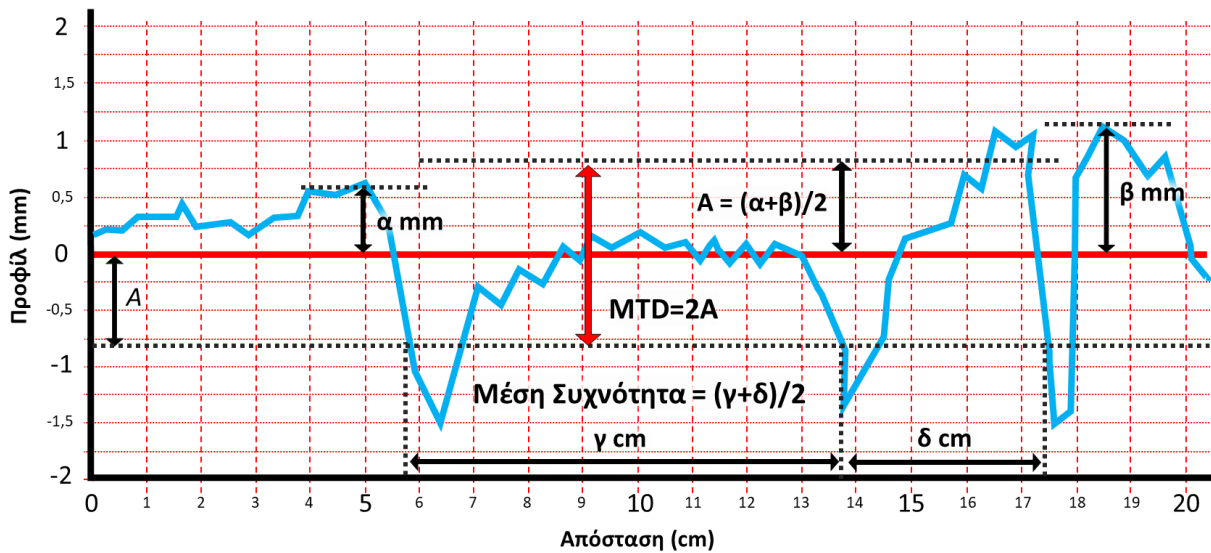


Σχήμα 12. Ποιοτική απεικόνιση μεταβολής της κλίσης μιας διαδρομής νερού

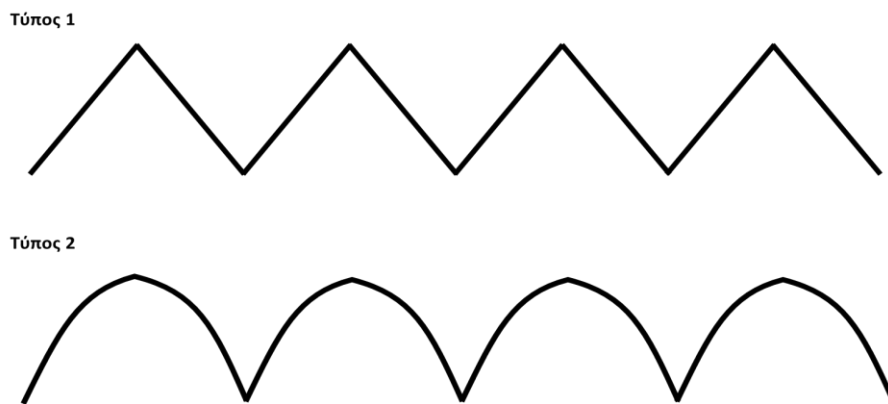
3.5.4 Μέσο Βάθος Τραχύτητας Οδοστρώματος (MTD)

Η τραχύτητα του οδοστρώματος διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην πρόσφυση του ελαστικού με την επιφάνεια της οδού, αποτελώντας μια σημαντική παράμετρο σε φαινόμενα ολίσθησης. Όλες οι αντιολισθηρές ασφαλτικές στρώσεις που πλέον χρησιμοποιούνται ευρέως στην οδοποιία είναι πορώδεις για την επίτευξη της επιθυμητής τραχύτητας.

Η τραχύτητα του σκυροδέματος μπορεί να περιγραφεί από τρία χαρακτηριστικά: το βάθος, την συχνότητα και την λειτουργικότητα (Rasmussen 2022). Το βάθος αναφέρεται στο (μέσο) βάθος του πορώδους και η συχνότητα στη (μέση) συχνότητα όπου εμφανίζονται. Όσον αφορά την λειτουργικότητα, αυτή αφορά την γεωμετρία των πόρων, ή καλύτερα των αδρανών υλικών που συμμετέχουν στο ασφαλτικό μείγμα, συναρτήσει της πρόσφυσης που είναι ικανή να επιτύχει. Τα επόμενα σχήματα στοχεύουν στην καλύτερη κατανόηση των παραπάνω χαρακτηριστικών.



Σχήμα 13. Σχηματική επεξήγηση του μέσου βάθους και της μέσης συχνότητας τμήματος επιφάνειας οδοστρώματος



Σχήμα 14. Παραδείγματα τύπων γεωμετρίας του πορώδους του οδοστρώματος, διαφορετικής λειτουργικότητας

Στα εν χρήση μοντέλα υδρολίσησης, εκ των παραπάνω τριών συμμετέχει μόνο το μέσο βάθος της τραχύτητας, το οποίο διαστασιολογείται σε μονάδες μήκους [M] και συμβολίζεται ως MTD. Δεδομένου πως το φαινόμενο της υδρολίσησης συμβαίνει όταν χαθεί η επαφή του ελαστικού με

το οδόστρωμα εξαιτίας μιας παρεμβαλλόμενης στρώσης νερού, είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψιν, έστω προσεγγιστικά, η ποσότητα νερού που το οδόστρωμα είναι ικανό να αποθηκεύσει, κατά τον προσδιορισμό του πάχους της ροής του νερού.

3.5.5 Spin Down Effect υδρολίστεσης (SD)

Κατά την έναρξη της υδρολίστεσης εμφανίζεται μια μεταβολή στην ταχύτητα περιστροφής του ελαστικού, όπου μαθηματικά εκφράζεται ως εξής:

$$SD = \frac{\omega_d - \omega_w}{\omega_d} (100)$$

όπου:

SD	=	Spin Down Effect [%]
ω_d	=	Ταχύτητα περιστροφής ελαστικού σε ξηρή επιφάνεια
ω_w	=	Ταχύτητα περιστροφής ελαστικού μετά την παρεμβολή της στρώσης νερού

και

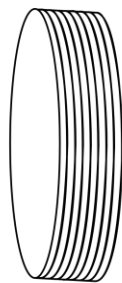
την απομάκρυνση του ελαστικού από το οδόστρωμα

3.5.6 Πίεση Ελαστικών (Pt)

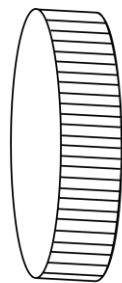
Η πίεση των ελαστικών ως ένας βασικός παράγοντας του οχήματος συμμετέχει και στην διαμόρφωση του φαινομένου της υδρολίστεσης. Συμβολίζεται ως Pt και διαστασιοποιείται σε [P].

3.5.7 Βάθος Αυλακώσεων Ελαστικών (TD)

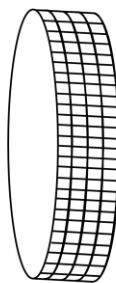
Τα ελαστικά των οχημάτων σχεδιάζονται με αυλακώσεις για να αυξηθεί η αντιολισθηρότητά τους. Κατά την επιλογή των αυλακώσεων επιλέγεται το πρότυπο και το βάθος τους. Όσον αφορά το πρότυπο, στην υδρολίστεση γίνεται ερευνητικά κυρίως λόγος για το εάν οι αυλακώσεις θα είναι εγκάρσιες, διαμήκεις ή ένας συνδυασμός σχηματίζοντας ένα μπλοκ. Σχετικά με το βάθος των αυλακώσεων, που εμφανίζεται και στα μαθηματικά μοντέλα για την υδρολίστεση, η έρευνα έχει δείξει πως με την αύξηση του, μπορούν να επιτευχθούν υψηλότερες ταχύτητες υδρολίστεσης (Kumar and Kumar 2009). Αυτό συμβαίνει καθώς η επιφάνεια του ελαστικού είναι ικανή να αποθηκεύσει περισσότερο νερό, αποτρέποντας έτσι να σχηματιστεί γρήγορα μια στρώση νερού μεταξύ του ελαστικού και της επιφάνειας του οδοστρώματος. Συμβολίζεται στην βιβλιογραφία ως TD και καθώς πρόκειται για βάθος, διαστασιοποιείται σε [M].



Σχήμα (α): Διαμήκεις αυλακώσεις



Σχήμα (β): Εγκάρσιες αυλακώσεις



Σχήμα (γ): Αυλακώσεις μπλοκ

Σχήμα 15. Συνηθισμένα πρότυπα αυλακώσεων ελαστικών

3.5.8 Συντελεστής Manning

Ο συντελεστής Manning είναι ένας συντελεστής τραχύτητας στην υδραυλική. Υπάρχουν αρκετές διαφορετικές μεθοδολογίες για τον προσδιορισμό του ανάλογα τις συνθήκες και τις απαιτήσεις της κάθε μελέτης. Η συμμετοχή του στην μαθηματική σχέση για τον υπολογισμό του πάχους της ροής του νερού, επιτρέπει στο αναλυτικό μοντέλο PAVDRN που τον περιλαμβάνει να εφαρμόζεται ικανοποιητικά και για ρηχές ροές.

4 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η ακριβής μεθοδολογία και η εφαρμογή των μαθηματικών μοντέλων για διαφορετικές συνθήκες. Το υπολογιστικό εργαλείο που αναπτύχθηκε είναι ικανό να παράγει αποτελέσματα για έναν μεγάλο αριθμό περιπτώσεων. Για την παρούσα εργασία η παραμετροποίηση περιορίζεται σε αυτή που αφορά κρίσιμες συνθήκες, ώστε να ελεγχθούν οι εν χρήσει τιμές των παραμέτρων στην οδοποιία για την ικανότητά τους να αντιμετωπίσουν το φαινόμενο της υδρολίστεσης στο παρόν και στο μέλλον, μετά την αλλαγή του κλίματος.

Η δομή και η οργάνωση του υπολογιστικού εργαλείου παρουσιάζεται αναλυτικά στο *Παράρτημα III*, όπου περιλαμβάνονται και οδηγίες για την χρήση του.

4.1 Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία περιλαμβάνει την εφαρμογή των διαθέσιμων μοντέλων για δύο περιπτώσεις. Η πρώτη περίπτωση αφορά το παρόν και η δεύτερη περίπτωση το μέλλον, αποσκοπώντας στην πρόβλεψη του φαινομένου μετά την αλλαγή του κλίματος. Για την πρώτη περίπτωση που αφορά το παρόν θα χρησιμοποιηθούν υπάρχουσες υπολογισθείσες τιμές για την ένταση της βροχόπτωσης, ενώ για την περίπτωση που θα αφορά το μέλλον θα εφαρμοστεί στις υπάρχουσες τιμές η επί τοις εκατό μεταβολή που προβλέπει το επιλεγμένο για την εργασία σενάριο της IPCC για την μεταβολή της βροχόπτωσης. Για την πλήρη κατανόηση του φαινομένου και της συμμετοχής των παραγόντων, σε κάθε μια από τις δύο περιπτώσεις θα εφαρμοστούν ορισμένοι συνδυασμοί των υπόλοιπων παραμέτρων, δημιουργώντας υποπεριπτώσεις. Ακόμη, για την πληρέστερη προσέγγιση του ζητήματος, χρησιμοποιούνται τρία μαθηματικά μοντέλα για την υδρολίστεση. Στην συνέχεια περιγράφεται αναλυτικά η επιλογή των τιμών, για κάθε παράγοντα.

4.2 Εκτίμηση Παραμέτρων

Στην συνέχεια παρατίθενται οι επιλεγμένες τιμές ανά παράμετρο που θα χρησιμοποιηθούν κατά την εφαρμογή των μοντέλων, παράλληλα με την διαδικασία προσδιορισμού τους. Ακόμη, περιγράφεται και η εκτίμηση των τυπικών διατάξεων προσαρμογής για την δημιουργία των τρισδιάστατων μοντέλων τους, επάνω στα οποία θα βασιστούν τα μαθηματικά μοντέλα.

4.2.1 Τυπικές Διατάξεις Προσαρμογής

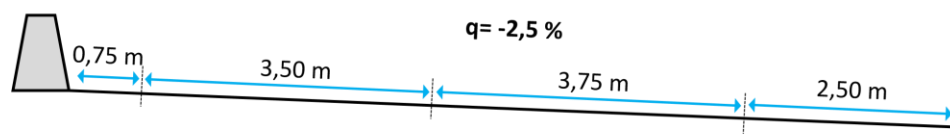
Σημαντικό βήμα στην παρούσα εργασία είναι ο προσδιορισμός των γεωμετριών των τυπικών διατάξεων, στις οποίες θα εφαρμοστούν τα μοντέλα για τους ζητούμενους ελέγχους. Συγκεκριμένα, χρειάζεται να επιλεγθούν τιμές για την κατά μήκος και κατά πλάτος κλίση, το πλάτος των οδικών τμημάτων και τα γεωμετρικά στοιχεία των κλωθοειδών και των τόξων προσαρμογής.

Όσον αφορά την κατά μήκος κλίση, σύμφωνα με τις ελληνικές οδηγίες οδικών μελετών (Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων (ΟΜΟΕ) 2001) για τις χαράξεις, σε οδούς ομάδων Α που δεν διαθέτουν κράσπεδα, στις περιοχές συναρμογής αντίρροπων επικλίσεων πρέπει να επιλέγεται ελάχιστη κατά μήκος κλίση $S_{\min} \geq 0,7\%$. Με βάση τους ίδιους κανόνες προσδιορίζεται και η ελάχιστη επίκλιση στο $q_{\min} = 2,5\%$ για κάθε τύπο χάραξης.

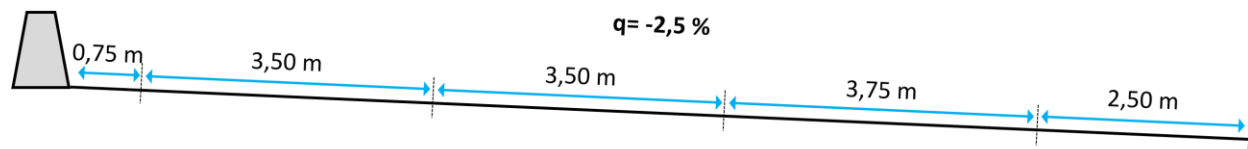
Με βάση αυτά τα στοιχεία και με χρήση διαγράμματος του τεύχους ΟΜΟΕ-Χ (Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων (ΟΜΟΕ) 2001), μπορεί να προσδιοριστεί η ακτίνα των καμπυλών (R) των κυκλικών τόξων που θα εφαρμοστούν στις διατάξεις προσαρμογής. Συγκεκριμένα, για επίκλιση 2,5% και ταχύτητα 130 km/h, προτείνεται $R = 3000\text{m}$. Ακόμη, εφόσον γίνεται λόγος για κρίσιμες

συνθήκες, η υπερύψωση θα είναι η μικρότερη δυνατή και ακολούθως, το μήκος της της προσαρμογής ($L_{κλωθ.}$) θα είναι το μεγαλύτερο δυνατό, δηλαδή $L_{κλωθ.} = R = 3000$ m. Με αυτά τα διαθέσιμα μεγέθη το εν χρήσει σχεδιαστικό πρόγραμμα, *Civil 3D Metric 2022*, διαθέτει ότι χρειάζεται για να σχεδιαστούν τρισδιάστατα οι διατάξεις, οριζοντιογραφικά και κατά μήκος.

Κατά πλάτος, η επίκλιση και η προσαρμογή της έχουν επιλεχθεί. Αυτό που δεν έχει ακόμη καθοριστεί είναι το ίδιο το πλάτος. Εφόσον γίνεται λόγος για αυτοκινητόδρομο το πλήθος, των λωρίδων δεν είναι πάντα συγκεκριμένο, για αυτό θα δημιουργηθούν μοντέλα για δύο περιπτώσεις/πλήθη λωρίδων. Στην πρώτη περίπτωση η κάθε κατεύθυνση θα αποτελείται από δύο λωρίδες κυκλοφορίας και στην δεύτερη από τρεις. Ακόμη, σε κάθε μια από τις δύο περιπτώσεις θα περιλαμβάνεται μια λωρίδα έκτακτης ανάγκης (ΛΕΑ) και ένα μικρό τμήμα μεταξύ της αριστερής λωρίδας και της διαχωριστικής νησίδας μήκους 0,75 m. Όσον αφορά τις υπόλοιπες διαστάσεις, για την ΛΕΑ επιλέγεται πλάτος 2,75 m, για την δεξιά εξωτερική λωρίδα κυκλοφορίας 3,75 m και για τις άλλες λωρίδες κυκλοφορίας 3,5 m, οι οποίες είναι τυπικές τιμές σύμφωνα με τις εθνικές οδηγίες μελετών οδικών έργων για τις χαράξεις. Επομένως στην πρώτη περίπτωση το συνολικό πλάτος που δύναται να συμβάλει στις απορροές ανέρχεται στα 10,5 m και στην δεύτερη στα 14 m. Στην συνέχεια παρουσιάζονται σχηματικά οι δύο διαφορετικές περιπτώσεις διατομών.



Σχήμα (α): Διατομή κατεύθυνσης κυκλοφορίας 2 λωρίδων κυκλοφορίας



Σχήμα (β): Διατομή κατεύθυνσης κυκλοφορίας 3 λωρίδων κυκλοφορίας

Σχήμα 16. Διαστασιολόγηση διατομών

Από τα παραπάνω, είναι εμφανές πώς χρειάζεται ο σχεδιασμός τεσσάρων διαφορετικών μοντέλων τυπικών προσαρμογών, καθώς υπάρχουν δύο διαφορετικές περιπτώσεις διατάξεων προσαρμογής και δύο διαφορετικές περιπτώσεις πλάτους οδοστρώματος που συμβάλλει στην ροή.

4.2.2 Ένταση Βροχόπτωσης (i)

Η ένταση της βροχόπτωσης ως ένα μέγεθος που αφορά το δυναμικό φαινόμενο της βροχόπτωσης, είναι δύσκολο να προσδιοριστεί. Για την εύρεση ικανοποιητικών τιμών χρησιμοποιούνται τα Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνου Πλημμύρας της Ειδικής Γραμματείας Υδάτων του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας, όπως συντάχθηκαν στο πλαίσιο της εφαρμογής της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 2007/60/ΕΚ για την αξιολόγηση και διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας στην Ελλάδα για το σύνολο των Υδατικών της Διαμερισμάτων (Υ.Δ.) το έτος 2017 (Σχέδια Διαχείρισης

Κινδύνων Πλημμύρας 2017). Προϊόντα των μελετών αυτών, μεταξύ άλλων, είναι και οι όμβριες καμπύλες για το διαθέσιμο δίκτυο βροχομετρικών και Βροχογραφικών σταθμών, οι οποίες για δεδομένη περίοδο επαναφοράς και διάρκεια αναφοράς δίνουν την ζητούμενη μέγιστη ένταση βροχόπτωσης ανά σταθμό.

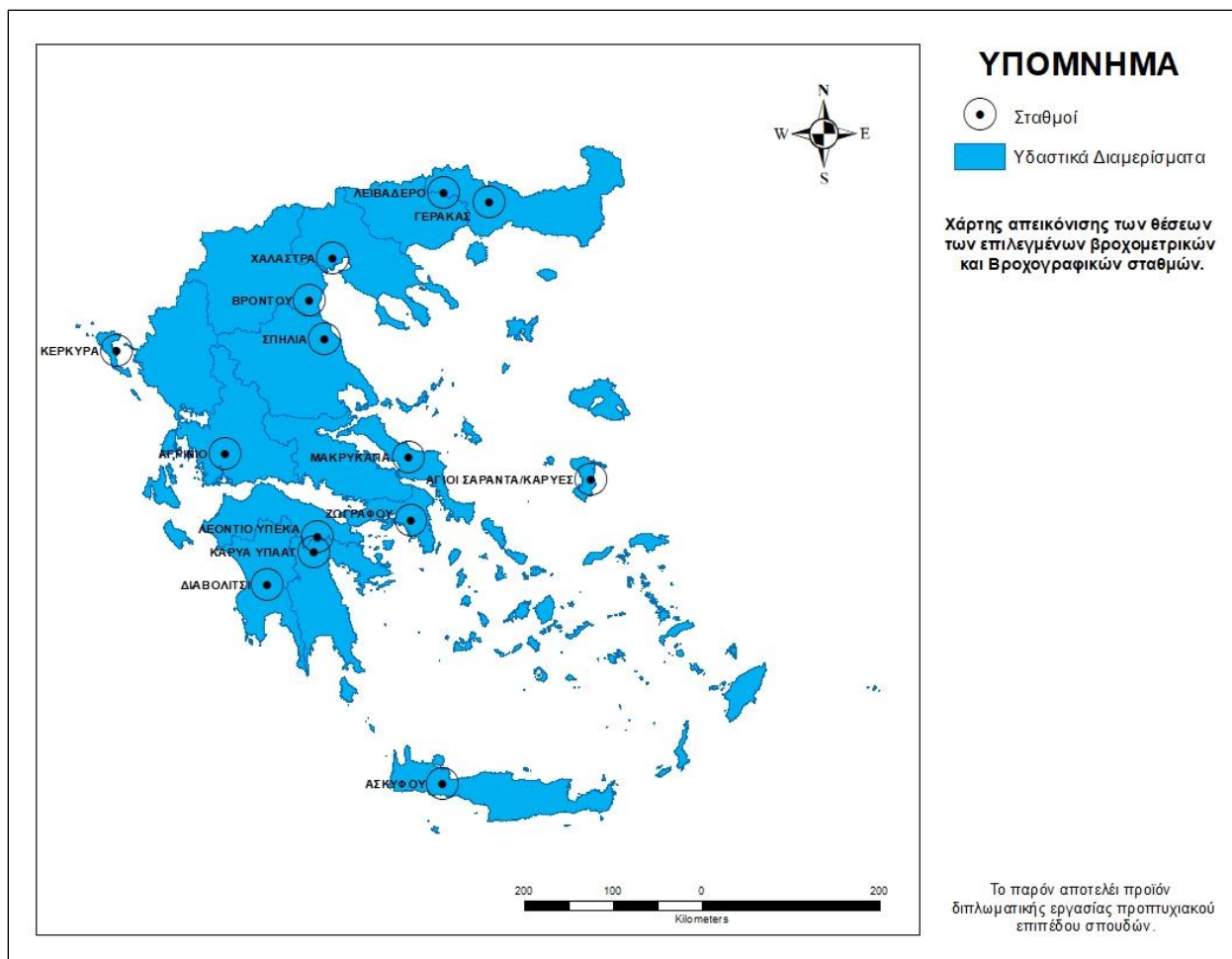
Η μεθοδολογία με την οποία προσδιορίστηκαν οι όμβριες καμπύλες παράγει αποτελέσματα για συγκεκριμένα σημεία και δεν είναι επιστημονικά τεκμηριωμένη η χρήση των αποτελεσμάτων για την εύρεση μιας αντιπροσωπευτικής τιμής έντασης βροχόπτωσης που να αφορά μια γεωγραφική έκταση, όπως είναι η χώρα ή ένα υδατικό διαμέρισμα. Η στατιστική τους επεξεργασία, δηλαδή, θα δώσει αποτελέσματα χωρίς φυσική σημασία.

Στο πλαίσιο της εργασίας, όπου απαιτείται η εύρεση αντιπροσωπευτικών τιμών για την εξέταση του φαινομένου σε όλη της έκταση της χώρας, υπολογίστηκε, αρχικά, η ένταση βροχόπτωσης με χρήση των όμβριων καμπυλών των μελετών της ειδικής Γραμματείας Υδάτων σε όλους τους σταθμούς της χώρας για τους οποίους καταρτίστηκαν όμβριες καμπύλες. Στην συνέχεια, επιλέχθηκε ανά υδατικό διαμέρισμα ο σταθμός με την μεγαλύτερη ένταση βροχόπτωσης, ώστε τελικά να δημιουργηθεί ένα δίκτυο με 14 σταθμούς για να περιγράψουν όλη την έκταση της χώρας.

Η επιλογή της μέγιστης έντασης βροχόπτωσης γίνεται στο πλαίσιο της εξέτασης του δυσμενέστερου σεναρίου υδρολίστεσης. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η ένταση βροχόπτωσης που επιλέγεται ανά υδατικό διαμέρισμα δεν είναι ικανή να το αντιπροσωπεύσει και αποτελεί μια τιμή ενδεικτική και επαρκή για την διεκπεραίωση της μελέτης, όπως συμβαίνει και με το δίκτυο των 14 σταθμών.

Συνεχίζοντας, πραγματοποιήθηκε έλεγχος της θέσης των 14 σταθμών για την ανίχνευση περιπτώσεων που δεν θα ενδιέφεραν την οδοποιία. Για παράδειγμα, εάν ένας σταθμός βρίσκεται σε κορυφογραμμή όπου δεν επρόκειτο να χαραχθεί αυτοκινητόδρομος, τότε αυτός ο σταθμός απορρίπτεται και επιλέγεται ο σταθμός με την αμέσως επόμενη μεγαλύτερη ένταση βροχόπτωσης. Η βροχόπτωση επηρεάζεται από το ανάγλυφο, επομένως δεν είναι επιθυμητή η ένταση βροχόπτωσης που χαρακτηρίζει βροχοπτώσεις οι οποίες ενδέχεται να διαμορφώνονται από περιπτώσεις αναγλύφου, που δεν ενδιαφέρουν τον κλάδο της οδοποιίας που ασχολείται με τους αυτοκινητόδρομους.

Οι 14 τιμές έντασης βροχόπτωσης περιλαμβάνονται στο υπολογιστικό εργαλείο ως προτεινόμενες τιμές, ωστόσο στο πλαίσιο της εργασίας επιλέγεται μόνο μια τιμή για την υπάρχουσα κατάσταση και μάλιστα, για χάριν του δυσμενέστερου σεναρίου, επιλέγεται η μεγαλύτερη, δηλαδή αυτή του σταθμού Ασκυφού στην Κρήτη. Στον Πίνακα 7 παρατίθενται οι μέγιστες εντάσεις βροχόπτωσης ανά σταθμό, όπως προσδιορίστηκαν με βάση την παραπάνω μεθοδολογία. Ακόμη, στο χάρτη του Σχήματος 17 παρουσιάζονται οι θέσεις των 14 σταθμών στην ελληνική έκταση.



Σχήμα 17. Χάρτης απεικόνιση της θέσης του δικτύου των 14 σταθμών

Για τον προσδιορισμό των τιμών βροχόπτωσης μετά την επιρροή της κλιματικής αλλαγής, χρησιμοποιήθηκε ο διαδραστικός Άτλας που δημιούργησε η Ομάδα Εργασίας I της IPCC στο πλαίσιο της σύνταξης της 6^{ης} Αναφοράς Αξιολόγησης που αφορά την φυσική υπόσταση του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής (Intergovernmental Panel on Climate Change 2021). Το διαδικτυακό αυτό εργαλείο επιτρέπει στον χρήστη την επιλογή του φαινομένου, αλλά και των μοντέλων με κάποιες βασικές παραμέτρους που χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψή του, δηλαδή την διαμόρφωση ενός σεναρίου. Στην παρούσα εργασία επιλέγεται το σενάριο που αφορά την μεταβολή της μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης και στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι παράμετροι που επιλέχθηκαν για την διαμόρφωση του, κατά την χρήση του Άτλα.

Πίνακας 6. Παράμετροι σεναρίου μεταβολής μέγιστης ημερήσιας βροχόπτωσης

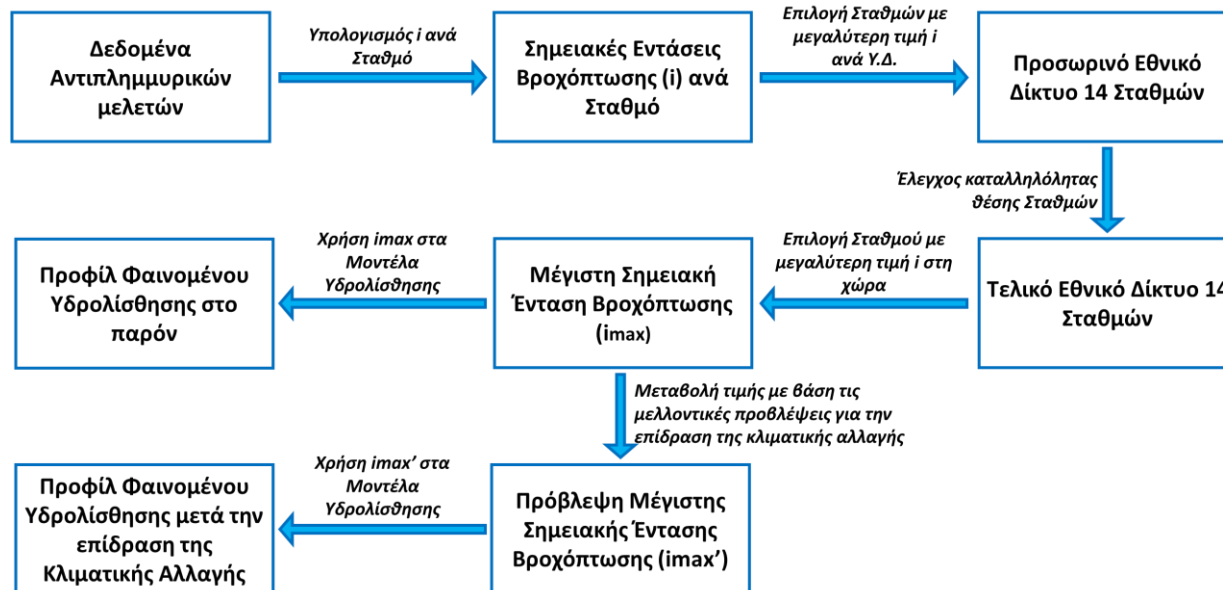
Σετ Δεδομένων	Μεταβλητή	Ποσότητα	Περίοδος	Σενάριο	Χρονική Βάση	Εποχή
Προβλέψεις CORDEX Europe	Ημερήσιο μέγιστο ύψος βροχόπτωσης	Επί τους εκατό μεταβολή	Μέση περίοδος: 2041-2060	RCP4.5	1995-2014	Ετήσια

Δεδομένου ότι η ένταση της βροχόπτωσης ορίζεται ως ο ρυθμός της βροχής, δηλαδή το ύψος της βροχόπτωσης ανά μονάδα χρόνου, για κοινή διάρκεια αναφοράς η μεταβολή στο ύψος της βροχής εφαρμόζεται ανάλογα στην ένταση της βροχόπτωσης. Επομένως, οι επί τοις εκατό μεταβολές που προσδιορίζονται για την μέγιστη 24ωρη βροχόπτωση μπορούν να εφαρμοστούν ανάλογα στις τιμές της έντασης βροχόπτωσης σχεδιασμού για τους επιλεγμένους σταθμούς, όπως και γίνεται στον Πίνακα 7.

Πίνακας 7. Τιμές μέγιστων εντάσεων βροχόπτωσης για την υπάρχουσα κατάσταση και το μελλοντικό σενάριο κλιματικής αλλαγής

Κωδικός	Υδατικό διαμέρισμα	Ένταση Βροχόπτωσης από μελέτες του έτους 2017		Επίδραση της Κλιματικής Αλλαγής	
		Σταθμός	i [mm/h]	Περίοδος 2041-2060	i [mm/h]
EL01	Δυτ. Πελοπόννησος	Διαβολίτσι	7,868	6,3%	8,364
EL02	Βόρ. Πελοπόννησος	Λεόντιο ΥΠΕΚΑ	9,430	13,7%	10,722
EL03	Ανατ. Πελοπόννησος	Καρυά ΥΠΑΑΤ	13,238	6,1%	14,046
EL04	Δυτ. Στερεά Ελλάδα	Αγρίνιο	13,335	5,5%	14,068
EL05	Ήπειρος	Κέρκυρα	16,241	5,9%	17,199
EL06	Αττική	Ζωγράφου	9,365	11,1%	10,405
EL07	Ανατ. Στερεά Ελλάδα	Μακρυκάπα	12,162	8,2%	13,159
EL08	Θεσσαλία	Σπηλιά	9,678	12,9%	10,927
EL09	Δυτ. Μακεδονία	Βρόντου	13,833	3,2%	14,275
EL10	Κεντρ. Μακεδονία	Χαλάστρα	6,893	4,5%	7,203
EL11	Ανατ. Μακεδονία	Λειβαδερό	6,914	7,3%	7,418
EL12	Θράκη	Γέρακας	11,507	4,0%	11,967
EL13	Κρήτη	Ασκυφού	20,687	0,1%	20,708
EL14	Νήσοι Αιγαίου	Άγιοι Σαράντα/Καρυές	11,373	6,0%	12,056

Τέλος, στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται συνοπτικά η παραπάνω μεθοδολογία για τον προσδιορισμό των ζητούμενων εντάσεων βροχόπτωσης, αλλά και η χρήση τους.

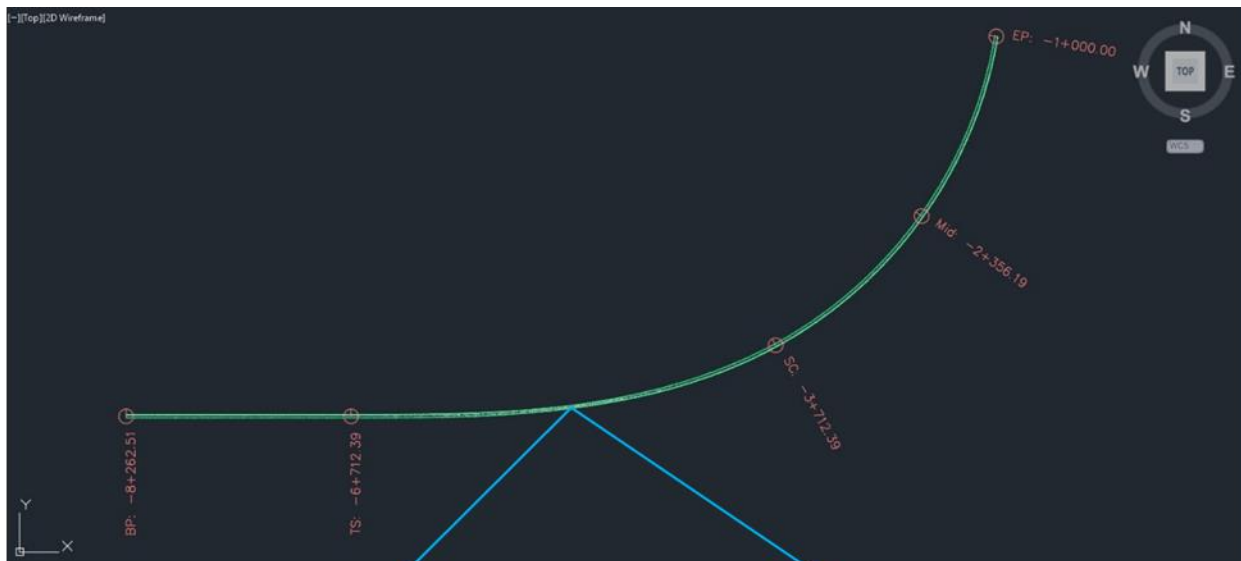


Σχήμα 18. Διαγραμματική απεικόνιση της μεθοδολογίας προσδιορισμού των ζητούμενων εντάσεων βροχόπτωσης

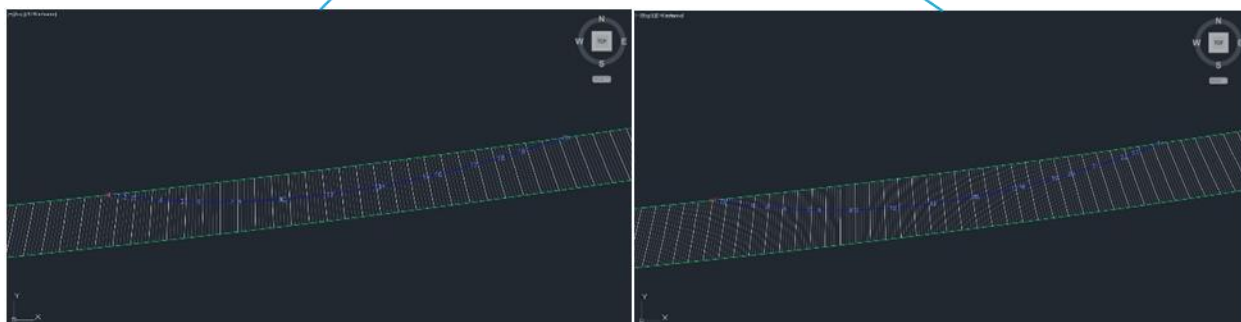
4.2.3 Μήκος της ροής του νερού (Lf)

Για τον προσδιορισμό του μήκους της ροής του νερού στην βιβλιογραφία χρησιμοποιούνται ευρέως δύο μεθοδολογίες. Η πρώτη υπολογίζει το μήκος της ροής αναλυτικά συναρτήσεως του πλάτους της οδού, της επίκλισης και της κατά μήκος κλίσης. Η δεύτερη, η οποία χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία, είναι η δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων σε σχεδιαστικό πρόγραμμα και η χρήση διαθέσιμων εργαλείων για τον προσδιορισμό της διαδρομής της ροής με το μεγαλύτερο μήκος στην επιφάνεια του οδοστρώματος (Langenbach 2013).

Το σχεδιαστικό πρόγραμμα που χρησιμοποιείται είναι η φοιτητική έκδοση του *Civil 3D Metric 2022*. Στο πλαίσιο των δυνατοτήτων του προγράμματος δημιουργήθηκαν τρισδιάστατες επιφάνειες αντιπροσωπεύοντας την επιφάνεια του οδοστρώματος και στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκε εντολή, όπου ο χρήστης επιλέγει ένα σημείο στην επιφάνεια και το πρόγραμμα δημιουργεί ως τρισδιάστατη πολυγωνική γραμμή την διαδρομή που θα ακολουθούσε μια σταγόνα νερού, εάν έπεφτε στο επιλεγμένο σημείο. Στο *Παράρτημα 1* παρατίθεται αναλυτικά η διαδικασία δημιουργίας των τρισδιάστατων μοντέλων. Ακολουθούν αντίστοιχα αποσπάσματα από το σχεδιαστικό πρόγραμμα, ενώ στον *Πίνακα 8* παρουσιάζονται συνοπτικά τα ζητούμενα μήκη ανά περίπτωση τυπικής προσαρμογής, όπως εξάχθηκαν από τα τρισδιάστατα μοντέλα.



Απόσπασμα (α): Οριζοντιογραφική απεικόνιση του τρισδιάστατου μοντέλου της διάταξης προσαρμογής E-K-Ka



Απόσπασμα (β): Οριζοντιογραφική απεικόνιση της μεγαλύτερης διαδρομής της ροής του νερού, περίπτωση 2 λωρίδων κυκλοφορίας ανά κατεύθυνση

Απόσπασμα (γ): Οριζοντιογραφική απεικόνιση της μεγαλύτερης διαδρομής της ροής του νερού, περίπτωση 3 λωρίδων κυκλοφορίας ανά κατεύθυνση

Σχήμα 19. Αποσπάσματα από το σχεδιαστικό πρόγραμμα απεικόνισης του τρισδιάστατου μοντέλου και της επιλεγμένης διαδρομής νερού – Περίπτωση Διάταξης E-K-Ka



Απόσπασμα (α): Οριζοντιογραφική απεικόνιση του τρισδιάστατου μοντέλου της διάταξης προσαρμογής Κα-Κ-Κ-Κα



Απόσπασμα (β): Οριζοντιογραφική απεικόνιση της μεγαλύτερης διαδρομής της ροής του νερού, περίπτωση 2 λωρίδων κυκλοφορίας ανά κατεύθυνση

Απόσπασμα (γ): Οριζοντιογραφική απεικόνιση της μεγαλύτερης διαδρομής της ροής του νερού, περίπτωση 3 λωρίδων κυκλοφορίας ανά κατεύθυνση

Σχήμα 20. Αποσπάσματα από το σχεδιαστικό πρόγραμμα απεικόνισης του τρισδιάστατου μοντέλου και της επιλεγμένης διαδρομής νερού – Περίπτωση Διάταξης Κα-Κ-Κ-κα

Πίνακας 8. Εξαγόμενα στοιχεία από σχεδιαστικό πρόγραμμα – Μήκη επιλεγμένων διαδρομών νερού

Μήκος Ροής Νερού L_f (m)		Διάταξη προσαρμογής	
		Ευθεία – Κλωθοειδής – Κυκλ. Τόξο	Κυκλ. Τόξο -Κλωθ. - Κλωθ. – Κυκλ. Τόξο
Λωρίδες	2	189,336 m	267,889 m
	3	219,521 m	309,614 m

4.2.4 Κλίση κατά Μήκος της Ροής του Νερού (Sf)

Ο προσδιορισμός της κλίσης του νερού δεν αποτελεί απλή διαδικασία, καθώς η επιφάνεια του οδοστρώματος και ειδικά η διαδρομή που ακολουθεί το νερό, δεν διατηρούν μια ενιαία κλίση.

Μια αναλυτική μέθοδος από την βιβλιογραφία είναι αυτή του ισοδύναμου τριγώνου (Langenbach 2013).

Σε αυτή τη μέθοδο, αρχικά, εξάγονται από το τρισδιάστατο μοντέλο που δημιουργήθηκε σε σχεδιαστικό πρόγραμμα τα γεωμετρικά στοιχεία των πολυγωνικών γραμμών που περιγράφουν την επιλεγμένη διαδρομή της ροής του νερού. Τα στοιχεία που ενδιαφέρουν είναι οι αποστάσεις μεταξύ των κορυφών και τα υψόμετρα κάθε κορυφής, με τα οποία θα δημιουργηθεί διάγραμμα. Γεωμετρικά από το διάγραμμα υπολογίζεται το εμβαδόν της συνολικής επιφάνειας και δημιουργείται ύστερα ένα ισοδύναμο τρίγωνο, ίδιου εμβαδού, του οποίου η υποτείνουσα θα ξεκινά από την πρώτη κορυφή της διαδρομής του νερού. Η κλίση της υποτείνουσας του ισοδύναμου τριγώνου, θα είναι η κλίση που ενδιαφέρει και θα χρησιμοποιηθεί στις μαθηματικές σχέσεις για τον υπολογισμό της στρώσης του νερού.

Στο Παράρτημα II παρουσιάζεται η διαδικασία αναλυτικά και σε επόμενο πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.

Πίνακας 9. Εξαγόμενα στοιχεία από σχεδιαστικό πρόγραμμα – Κλίσεις επιλεγμένων διαδρομών νερού

Κλίση Ροής Νερού S_f (%)		Διάταξη προσαρμογής	
		Ευθεία – Κλωθοειδής – Κυκλ. Τόξο	Κυκλ. Τόξο -Κλωθ. - Κλωθ. – Κυκλ. Τόξο
Λωρίδες	2	0,712%	0,706%
	3	0,716%	0,707%

4.2.5 Μέσο Βάθος Τραχύτητας Οδοστρώματος (MTD)

Κυρίαρχος τύπος αντιολισθηρής ασφαλτικής στρώσης στην κατασκευαστική οδοποιία είναι η αντιολισθηρή στρώση ασφαλτικού σκυροδέματος, η οποία διαχωρίζεται στον Τύπο I και στον Τύπο II. Ο Τύπος I είναι κλειστής σύνθεσης ώστε εκτός από αντιολισθηρότητα να επιτυγχάνει και στέγνωση για μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Ο Τύπος II επιτυγχάνει μεγαλύτερο βάθος επιφανειακής τραχύτητας για ακόμα μεγαλύτερη αντιολισθηρότητα, είναι όμως ανοιχτού τύπου και η διάρκεια ζωής του δεν είναι τόσο μεγάλη όσο με την κλειστή σύνθεση. Ο Τύπος I απαιτεί ελάχιστο μέσο βάθος τραχύτητας (MTD) τα 1,0 mm και ο Τύπος II απαιτεί τα 1,5 mm (ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΗ 2009).

Για τον έλεγχο της παρούσας εργασίας θα επιλεγθούν δύο τιμές μέσου βάθους τραχύτητας, μια μεγάλη και μια μικρή, για να διερευνηθεί παράλληλα και η συμπεριφορά του φαινομένου της υδρολίσθησης με την μεταβολή αυτού του παράγοντα. Ως μεγάλη θα χρησιμοποιηθεί η ελάχιστη τιμή που απαιτεί ο Τύπος II της ασφαλτικής στρώσης σκυροδέματος, τα 1,5 mm, ενώ ως μικρή θα χρησιμοποιηθούν τα 0,5 mm. Τα 0,5 mm αντιστοιχούν σε φθαρμένη επιφάνεια οδοστρώματος και υπάρχει ενδιαφέρον να εξεταστεί το φαινόμενο της υδρολίσθησης σε ένα τέτοιο οδόστρωμα, ενώ εφαρμόζεται παράλληλα και το σενάριο των δυσμενέστερων συνθηκών.

Πίνακας 10. Επιλεγμένες τιμές μέσου βάθους τραχύτητας οδοστρώματος

MTD Αντιολισθηρού Οδοστρώματος	MTD Φθαρμένου Οδοστρώματος
1,5 mm	0,5 mm

4.2.6 Μείωση της Ταχύτητας Περιστροφής του Ελαστικού κατά την Έναρξη της Υδρολίσθησης (SD)

Ένα αντιπροσωπευτικό ποσοστό Spin Down Effect, σύμφωνα με έρευνες (Gallaway, και συν. 1979), είναι το 10% για την εφαρμογή των μοντέλων υδρολίσθησης.

4.2.7 Πίεση Ελαστικών (Pt)

Μια συνηθισμένη τιμή πίεσης ελαστικών σε πολλά μοντέλα αυτοκινήτων στην Ευρώπη είναι τα 33 psi.

4.2.8 Βάθος Αυλακώσεων ελαστικών (TD)

Σύμφωνα με την Υπουργική Απόφαση 21682/1991 για την εναρμόνιση της Ελληνικής Νομοθεσίας προς τις διατάξεις της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 89/459/ΕΟΚ, τα ελαστικά πρέπει να έχουν πρωτεύουσες αυλακώσεις στο πέλμα τους, βάθους τουλάχιστον 1,6 mm, σε όλη τη διάρκεια χρήσης τους. Ωστόσο, σύμφωνα με έρευνες η τιμή αυτή δεν είναι ικανή να διασφαλίσει επαρκή αντιολισθηρότητα και προτείνεται αντί αυτής η τιμή των 3 mm, η οποία θα χρησιμοποιηθεί και στην παρούσα εργασία (The Royal Society for the Prevention of Accidents 2005).

Πίνακας 11. Επιλεγμένες τιμές spindown, πίεσης ελαστικών και βάθους αυλακώσεων ελαστικών

Spindown (SD)	Πίεση ελαστικών (Pt)	Βάθος Αυλακώσεων Ελαστικών (TD)
10 %	33 psi	3 mm

4.2.9 Συντελεστής Manning

Στην οδοποιία έχουν αναπτυχθεί ορισμένες σχέσεις για τον προσδιορισμό κατάλληλης τιμής του συντελεστή τραχύτητας. Συγκεκριμένα, για την περίπτωση ανοιχτού τύπου πορώδους ασφαλικής στρώσης ακολουθείται η παρακάτω μαθηματική προσέγγιση (Lee και Ayyala 2020):

$$n = \frac{1,490 \cdot Sf^{0,306}}{NR^{0,424}}$$

όπου:

- n = Συντελεστής Manning (Αδιάστ.)
- Sf = Κλίση κατά μήκος της ροής νερού (Αδιάστ.)
- NR = Αριθμός Reynold (Αδιάστ.) όπου

$$NR = \frac{Lf \cdot i}{u}$$

- Lf = Μήκος ροής νερού (m)
- i = Ένταση βροχόπτωσης (m/s)
- u = Κινηματικό ιξώδες νερού (m²/s)

Στους 20 °C το κινηματικό ιξώδες του νερού ανέρχεται περίπου στα 1 mm²/s (Omni Calculator 2022), μια τιμή σε συνθήκες αποδεκτές δεδομένου του μεσογειακού κλίματος της χώρας, η οποία και θα χρησιμοποιηθεί στο πλαίσιο του ελέγχου της διπλωματικής εργασίας. Ωστόσο, στον Πίνακα 12 παρατίθενται ενδεικτικά μερικές ακόμη περιπτώσεις θερμοκρασιών, οι οποίες διατίθενται προς χρήση στο υπολογιστικό εργαλείο, ενώ στο Πίνακα 13 παρατίθενται τα αποτελέσματα των πράξεων.

Πίνακας 12. Τιμές κινηματικού ιξώδους νερού ανά θερμοκρασία

Θερμοκρασία (T)	Κινηματικό Ιξώδες Νερού (u)
0 °C	1,7880 mm ² /s
10 °C	1,3063 mm ² /s
20 °C	1,0034 mm ² /s
30 °C	0,8007 mm ² /s

Πίνακας 13. Επιλεγμένη τιμή κινηματικού ιξώδους του νερού και οι προκύπτοντες αριθμός Reynolds και συντελεστής Manning

Κινηματικό Ιξώδες Νερού (u)	Αριθμός Reynolds (NR)	Συντελεστής Manning (n)
1,0037 mm ² /s	1088	0,017

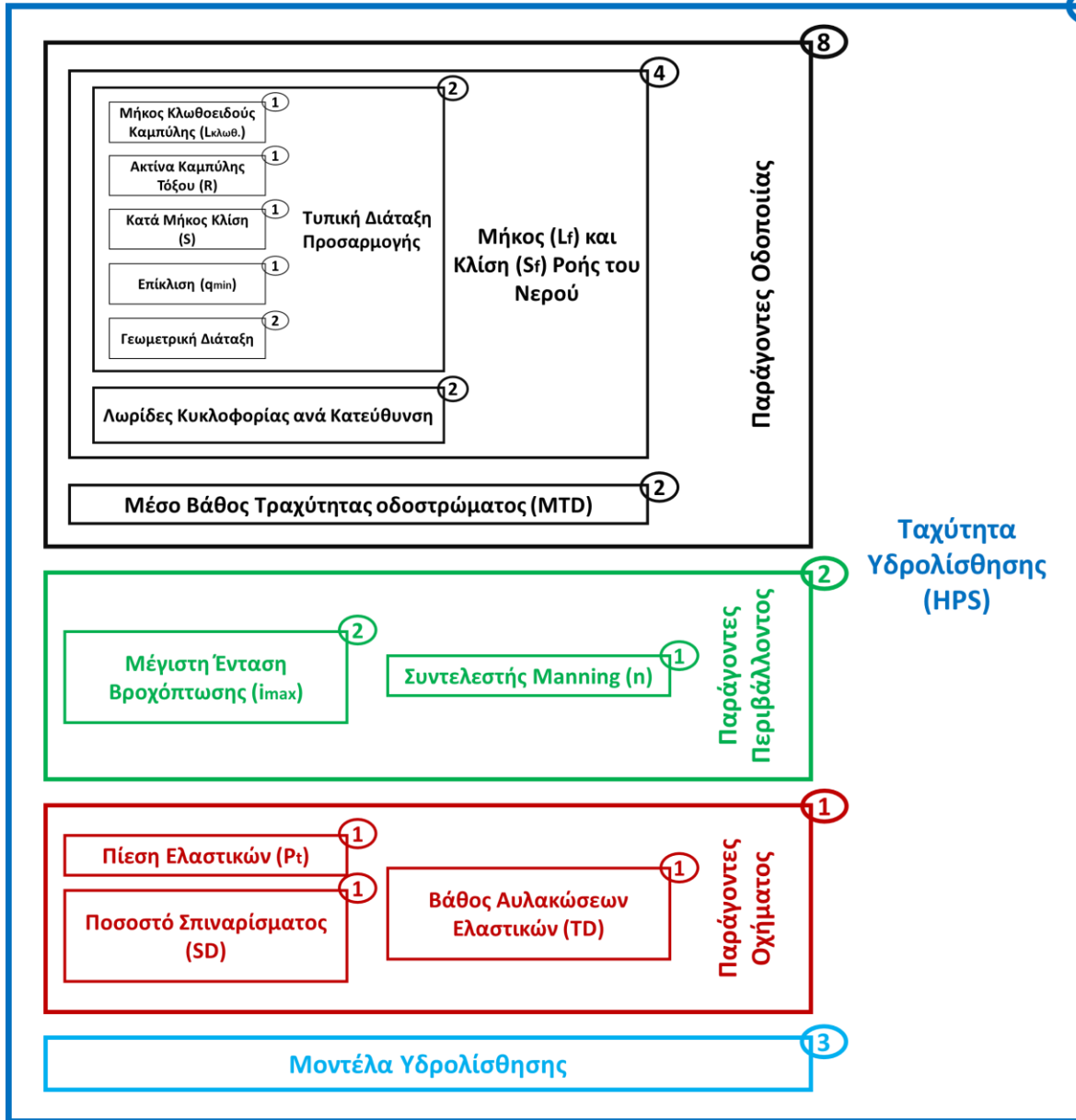
4.3 Εφαρμογή μοντέλων

Η μεθοδολογία περιλαμβάνει την εφαρμογή τριών διαφορετικών μοντέλων υδρολίστεσης για πολλαπλές περιπτώσεις παραμετροποίησής τους. Καθοριστικής σημασίας είναι ο ρόλος της μεταβλητής της έντασης βροχόπτωσης, η οποία ανάλογα με το εάν προκύπτει από δεδομένα προηγούμενων ετών ή εάν προκύπτει ως πρόβλεψη, καθορίζει αντίστοιχα εάν το προφίλ της υδρολίστεσης που θα προσδιοριστεί από τα ομώνυμα μοντέλα θα περιγράψει την υπάρχουσα κατάσταση ή εάν θα αποτελεί μελλοντικό σενάριο μετά την αλλαγή του κλίματος, όπως την προδιαγράφουν τα σχετικά μοντέλα. Εκτός από την ένταση βροχόπτωσης, που αποτελεί μεταβλητή του περιβάλλοντος, σημαντικές μεταβλητές στον έλεγχο είναι αυτές της οδοποιίας, οι τιμές των οποίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 14, όπως επιλέχθηκαν συγκεκριμένα για την ανάλυση του φαινομένου που θα πραγματοποιηθεί στην παρούσα εργασία. Επίσης, στον ίδιο πίνακα, παρατίθενται και οι τιμές των παραγόντων του περιβάλλοντος και του οχήματος.

Συνεχίζοντας, στο Σχήμα 21 παρουσιάζονται όλες οι μεταβλητές που συμμετέχουν στο υπό μελέτη φαινόμενο, συναρτήσει των οποίων προκύπτει η ζητούμενη ταχύτητα υδρολίστεσης. Μάλιστα, όπως προκύπτει πολλαπλασιάζοντας μεταξύ τους το πλήθος των τιμών που λαμβάνει η εκάστοτε μεταβλητή, προκύπτει ότι η παρούσα ανάλυση μπορεί να διαμορφώσει 48 διαφορετικές περιπτώσεις υδρολίστεσης. Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα των μοντέλων μας δίνουν αποτελέσματα για το πάχος της στρώσης της ροής του νερού που συμβάλλει στο φαινόμενο της υδρολίστεσης και για την ταχύτητα κατά την οποία το όχημα ξεκινά να ολισθαίνει. Αυτά τα δύο στοιχεία είναι και αυτά που διαμορφώνουν το προφίλ της υδρολίστεσης, ενώ στο πλαίσιο των μελετών υδρολίστεσης ενδιαφέρει κυρίως το δεύτερο στοιχείο, η ταχύτητα υδρολίστεσης.

Πίνακας 14. Συνοπτική παρουσίαση των τιμών των παραγόντων υδρολίθωσης που θα χρησιμοποιηθούν στο πλαίσιο της ανάλυσης που διεξάγεται στην παρούσα εργασία

Παράγοντες Οδοποιίας				Για Τραχύτητα Οδοστρώματος Μέσου Βάθους (MTD) 0,5 mm και 1,5 mm							
				Διάταξη Προσαρμογής Οδικού Τμήματος							
				Ευθεία – Κλωθοειδής – Κυκλ. Τόξο				Κυκλ. Τόξο – Κλωθοειδής – Κλωθοειδής – Κυκλ. Τόξο			
				R = L _{κλωθ.}		3.000 m		R = L _{κλωθ.}		3.000 m	
q _{min}	2,5 %	S	0,7 %	q _{min}	2,5 %	S	0,7 %				
Λοφίδες	2	Πλάτος	10,5 m	L _f	189,336 m	L _f	267,889 m				
				S _f	0,712 %	S _f	0,706 %				
	3		14,0 m	L _f	219,521 m	L _f	309,614 m				
				S _f	0,716 %	S _f	0,707 %				
Παράγοντες Περιβάλλοντος			Θερμοκρασία (T)	Κινηματικό Ιξώδες Νερού (u)	Συντελεστής Manning (n)						
Ένταση Βροχόπτωσης (i)	Υπάρχουσα Κατάσταση	20,687 mm/h	20 C°	1,0034 mm ² /s	0,017						
	Μελλοντικό Σενάριο	20,708 mm/h	20 C°	1,0034 mm ² /s	0,017						
Παράγοντες Οχήματος											
Βάθος Αυλακώσεων Ελαστικών (TD)		Πίεση Ελαστικών (Pt)		Spin Down Effect (SD)							
3 mm		33 psi		10 %							



Σχήμα 21. Παρουσίαση των μεταβλητών του φαινομένου υδρολίσησης, των μεταξύ τους σχέσεων και του πλήθους των τιμών

5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Χρησιμοποιώντας το υπολογιστικό εργαλείο προσδιορίστηκε η ταχύτητα υδρολίσθησης για 48 διαφορετικές περιπτώσεις, σύμφωνα με την μεθοδολογία. Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ανά συνδυασμό μεταβλητών, και συγκεκριμένα των μεταβλητών των οποίων οι τιμές είναι περισσότερες από μια, σύμφωνα με το κεφάλαιο *Εκτίμηση Παραμέτρων*. Ακόμα, πραγματοποιείται ομαδοποίηση των αποτελεσμάτων ανά μοντέλο υδρολίσθησης που χρησιμοποιείται και υποομαδοποίηση, σε πίνακες, ανάλογα με το εάν τα αποτελέσματα αναφέρονται στην υπάρχουσα κατάσταση ή εάν αναφέρονται στο επιλεγμένο μελλοντικό σενάριο.

Σημειώνεται πως, η υπάρχουσα κατάσταση αναφέρεται σε ένταση βροχόπτωσης, όπως αυτή προσδιορίστηκε στα τελικά παραδοτέα των αντιπλημμυρικών μελετών της Ειδικής Γραμματείας Υδάτων του Υπουργείου Περιβάλλοντος το 2017, και με δεδομένα βροχόπτωσης προηγούμενων δεκαετιών. Παράλληλα, το μελλοντικό σενάριο αναφέρεται στην μεταβολή που εφαρμόζεται στην παραπάνω ένταση βροχόπτωσης, εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής, και σύμφωνα με το επιλεγμένο σενάριο βροχόπτωσης του IPCC για το διάστημα 2041 – 2060.

5.1 Μαθηματικά Μοντέλα Gallaway (1979)

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την υδρολίσθηση που αφορούν την υπάρχουσα και την μελλοντική κατάσταση, αλλά έχουν υπολογιστεί με χρήση των μαθηματικών μοντέλων του Gallaway, Texas DOT method (1979).

Πίνακας 15. Παρουσίαση αποτελεσμάτων – Μοντέλα Gallaway (1979) για υπάρχουσα κατάσταση

Υπάρχουσα Κατάσταση $i = 20,687$ mm/h				
Τυπική Διάταξη Προσαρμογής	Λωρίδες Κυκλοφορίας ανά Κατεύθυνση	Μέσο Βάθος Τραχύτητας Οδοστρώματος (MTD)	Πάχος ροής Νερού (WFD)	Ταχύτητα Υδρολίσθησης (HPS)
E- K - Κα	2	0,5 mm	8,291 mm	75 (74) km/h
		1,5 mm	8,585 mm	80 (78) km/h
	3	0,5 mm	8,977 mm	75 (73) km/h
		1,5 mm	9,372 mm	80 (78) km/h
Κα - K - K - Κα	2	0,5 mm	10,061 mm	75 (73) km/h
		1,5 mm	10,616 mm	80 (77) km/h
	3	0,5mm	10,876 mm	75 (73) km/h
		1,5 mm	11,551 mm	80 (76) km/h

Πίνακας 16. Παρουσίαση αποτελεσμάτων – Μοντέλα Gallaway (1979) για μελλοντικό σενάριο

Μελλοντικό Σενάριο $i = 20,708$ mm/h				
Τυπική Διάταξη Προσαρμογής	Λωρίδες Κυκλοφορίας ανά Κατεύθυνση	Μέσο Βάθος Τραχύτητας Οδοστρώματος (MTD)	Πάχος ροής Νερού (WFD)	Ταχύτητα Υδρολίσθησης (HPS)
E- K - Κα	2	0,5 mm	8,296 mm	75 (74) km/h
		1,5 mm	8,590 mm	80 (78) km/h
	3	0,5mm	8,982 mm	75 (73) km/h
		1,5 mm	9,378 mm	80 (78) km/h
Κα - K - K - Κα	2	0,5 mm	10,067 mm	75 (73) km/h
		1,5 mm	10,622 mm	80 (77) km/h
	3	0,5 mm	10,883 mm	75 (73) km/h
		1,5 mm	11,558 mm	80 (76) km/h

5.2 Μαθηματικά Μοντέλα PAVDRN (1997 - 1998)

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την υδρολίσθηση που αφορούν την υπάρχουσα και την μελλοντική κατάσταση, αλλά έχουν υπολογιστεί με χρήση των μαθηματικών μοντέλων του PAVDRN (1997 – 1998).

Πίνακας 17. Παρουσίαση αποτελεσμάτων – Μοντέλα PAVDRN (1997 – 1998) για υπάρχουσα κατάσταση

Υπάρχουσα Κατάσταση $i = 20,687 \text{ mm/h}$				
Τυπική Διάταξη Προσαρμογής	Λωρίδες Κυκλοφορίας ανά Κατεύθυνση	Μέσο Βάθος Τραχύτητας Οδοστρώματος (MTD)	Πάχος ροής Νερού (WFD)	Ταχύτητα Υδρολίσθησης (HPS)
E- K - Kα	2	0,5 mm	5,853 mm	110 (107) km/h
		1,5 mm	4,853 mm	130 (127) km/h
	3	0,5 mm	6,182 mm	110 (107) km/h
		1,5 mm	5,182 mm	130 (126) km/h
Kα - K - K - Kα	2	0,5 mm	6,670 mm	110 (106) km/h
		1,5 mm	5,670 mm	130 (126) km/h
	3	0,5 mm	7,036 mm	110 (106) km/h
		1,5 mm	6,036 mm	125 (125) km/h

Πίνακας 18. Παρουσίαση αποτελεσμάτων – Μοντέλα PAVDRN (1997 – 1998) για μελλοντικό σενάριο

Μελλοντικό Σενάριο $i = 20,708 \text{ mm/h}$				
Τυπική Διάταξη Προσαρμογής	Λωρίδες Κυκλοφορίας ανά Κατεύθυνση	Μέσο Βάθος Τραχύτητας Οδοστρώματος (MTD)	Πάχος ροής Νερού (WFD)	Ταχύτητα Υδρολίσθησης (HPS)
E- K - Kα	2	0,5 mm	5,855 mm	110 (107) km/h
		1,5 mm	4,855 mm	130 (127) km/h
	3	0,5 mm	6,185 mm	110 (107) km/h
		1,5 mm	5,185 mm	130 (126) km/h
Kα - K - K - Kα	2	0,5 mm	6,672 mm	110 (106) km/h
		1,5 mm	5,672 mm	130 (126) km/h
	3	0,5 mm	7,039 mm	110 (106) km/h
		1,5 mm	6,039 mm	125 (125) km/h

5.3 Μαθηματικά Μοντέλα Ressel και Hermann (2008)

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την υδρολίση που αφορούν την υπάρχουσα και την μελλοντική κατάσταση, αλλά έχουν υπολογιστεί με χρήση των μαθηματικών μοντέλων των Ressel και Hermann (2008).

Πίνακας 19. Παρουσίαση αποτελεσμάτων – Μοντέλα Ressel και Hermann (2008) για υπάρχουσα κατάσταση

Υπάρχουσα Κατάσταση $i = 20,687$ mm/h				
Τυπική Διάταξη Προσαρμογής	Λωρίδες Κυκλοφορίας ανά Κατεύθυνση	Μέσο Βάθος Τραχύτητας Οδοστρώματος (MTD)	Πάχος ροής Νερού (WFD)	Ταχύτητα Υδρολίσης (HPS)
E- K - Κα	2	0,5 mm	5,767 mm	80 (76) km/h
		1,5 mm	9,126 mm	70 (70) km/h
	3	0,5 mm	6,124 mm	75 (75) km/h
		1,5 mm	9,690 mm	70 (69) km/h
Κα - K - K - Κα	2	0,5 mm	6,683 mm	75 (74) km/h
		1,5 mm	10,574 mm	70 (68) km/h
	3	0,5 mm	7,093 mm	75 (73) km/h
		1,5 mm	11,223 mm	70 (68) km/h

Πίνακας 20. Παρουσίαση αποτελεσμάτων – Μοντέλα Ressel και Hermann (2008) για μελλοντικό σενάριο

Μελλοντικό Σενάριο $i = 20,708$ mm/h				
Τυπική Διάταξη Προσαρμογής	Λωρίδες Κυκλοφορίας ανά Κατεύθυνση	Μέσο Βάθος Τραχύτητας Οδοστρώματος (MTD)	Πάχος ροής Νερού (WFD)	Ταχύτητα Υδρολίσης (HPS)
E- K - Κα	2	0,5 mm	5,770 mm	80 (76) km/h
		1,5 mm	9,129 mm	70 (70) km/h
	3	0,5 mm	6,126 mm	75 (75) km/h
		1,5 mm	9,694 mm	70 (69) km/h
Κα - K - K - Κα	2	0,5 mm	6,686 mm	75 (74) km/h
		1,5 mm	10,579 mm	70 (68) km/h
	3	0,5 mm	7,095 mm	75 (73) km/h
		1,5 mm	11,227 mm	70 (58) km/h

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κατόπιν εξέτασης των αποτελεσμάτων και της συμπεριφοράς αυτών ανά μοντέλο υδρολίσθησης, σενάριο και διαφορετικές τιμές των μεταβλητών, μπορούν να εξαχθούν αρκετά συμπεράσματα, παρατηρήσεις και θέματα προς συζήτηση.

6.1 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα, παρατηρείται μια ασυμφωνία στα αποτελέσματα των μοντέλων υδρολίσθησης. Συγκεκριμένα, ενώ η τάξη των ταχυτήτων υδρολίσθησης μεταξύ των μοντέλων του Gallaway και των Ressel & Hermann φαίνεται να μην διαφοροποιείται σημαντικά, στην περίπτωση των μοντέλων PAVDRN η τάξη είναι σαφώς μεγαλύτερη. Αυτό οφείλεται στις διαφορετικές εμπειρικές μεθοδολογίες, παραμετροποιήσεις και παραδοχές από όπου προέκυψε το κάθε μοντέλο μαθηματικά.

Βέβαια, όλα τα μοντέλα συμφωνούν στο ότι εμφανίζεται πρόβλημα υδρολίσθησης σε κάθε περίπτωση, καθώς και οι 48 τιμές ταχύτητας υδρολίσθησης είναι μικρότερες της ταχύτητας 130 km/h, με βάση την οποία έχουν σχεδιαστεί τα οδικά αυτά τμήματα. Μάλιστα, αξίζει να αναφερθεί πως, δεδομένης της διαδρομής του νερού σε κάθε περίπτωση, ο κίνδυνος εμφανίζεται στην λωρίδα έκτακτης ανάγκης, καθώς εντός αυτής βρίσκεται πάντα το σημείο εξόδου της ροής από το οδόστρωμα. Αυτό το πρόβλημα δεν είναι το μόνο σημείο στο οποίο τα μοντέλα συμφωνούν.

Παρατηρείται σε όλες τις περιπτώσεις πως μεγαλύτερο πλάτος οδοστρώματος, δηλαδή περισσότερες λωρίδες, σημαίνει μεγαλύτερη στρώση πάχους νερού και μικρότερη ταχύτητα υδρολίσθησης, πράγμα αναμενόμενο. Ακόμη, όλα τα μοντέλα έδειξαν πως η μεγαλύτερη ένταση βροχόπτωσης αυξάνει επίσης το πάχος της ροής του νερού. Επομένως, η παρούσα ανάλυση επιβεβαιώνει πως η αύξηση του πλάτους του οδοστρώματος και της έντασης της βροχόπτωσης επιδεινώνουν το φαινόμενο της υδρολίσθησης. Ωστόσο, φαίνεται πως οι παραπάνω μεταβολές στην ταχύτητα υδρολίσθησης εξαιτίας της μεταβολής του πλάτους είναι μικρές και εξαρτάται από την περίπτωση εάν θα είναι σημαντικές.

Ένα ακόμη σημείο στο οποίο συμφωνούν όλα τα αποτελέσματα, είναι πως η διάταξη Καμπύλη – Κλωθοειδής – Κλωθοειδής – Καμπύλη (Κα–Κ–Κ–Κα) επέφερε μεγαλύτερο πάχος της ροής του νερού. Καθοριστικός παράγοντας αυτού είναι πιθανόν τα μεγαλύτερα μήκη της ροής του νερού που προέκυψαν για αυτήν την διάταξη. Επομένως, φαίνεται πως η αλληλουχία Κα–Κ–Κ–Κα, με αντίρροπα κυκλικά τόξα και αντίρροπη μεταβολή της επίκλισης, είναι η πιο επικίνδυνη γεωμετρική διάταξη όσον αφορά την υδρολίσθηση.

Ένας ακόμη πολύ σημαντικός παράγοντας ο οποίος συμμετέχει στην διαμόρφωση του φαινομένου της υδρολίσθησης, είναι το βάθος της τραχύτητας του οδοστρώματος. Καθώς στόχος της τραχύτητας είναι να αποθηκεύει ποσότητες νερού αποτρέποντας, σε βαθμό που η χωρητικότητα της το επιτρέπει, την συσσώρευση νερού στην επιφάνεια του οδοστρώματος, αναμένεται πως η αύξηση του βάθους θα επιφέρει και μείωση του πάχους της ροής του νερού. Αυτό πράγματι συμβαίνει στην περίπτωση του μοντέλου PAVDRN, αλλά όχι στην περίπτωση Gallaway και Ressel & Hermann, όπου με την αύξηση του βάθους της τραχύτητας, το πάχος της ροής του νερού επίσης αυξάνεται.

Αυτή η αστοχία των δύο μοντέλων μπορεί να εξηγηθεί από τις μαθηματικές σχέσεις από όπου προκύπτει το πάχος της ροής του νερού στην περίπτωση του Gallaway και των Ressel & Hermann

στα εδάφια *Πάχος Ροής Νερού, Gallaway etc. (1979)* και *Πάχος Ροής Νερού, Ressel και Hermann (2008)* αντίστοιχα. Στις περιπτώσεις αυτές ο όρος MTD που αντιπροσωπεύει το μέσο βάθος της τραχύτητας του οδοστρώματος συμμετέχει στο αποτέλεσμα πολλαπλασιαστικά, υψωμένος σε μια θετική δύναμη μικρότερη της μονάδας. Η συμμετοχή ενός όρου σε μια μαθηματική σχέση πολλαπλασιαστικά σημαίνει πως η αύξηση της τιμής του όρου θα φέρει μεγαλύτερο αποτέλεσμα στο γινόμενο το οποίο συμμετέχει. Στην περίπτωση του Gallaway αυτό το γινόμενο είναι ο αριθμητής ενός κλάσματος από το οποίο ο όρος MTD στην συνέχεια αφαιρείται, ενώ στην περίπτωση των Ressel & Hermann το γινόμενο αποτελεί την συνολική σχέση. Επομένως, γίνεται αρχικά αντιληπτό πως η αύξηση της τιμής του όρου MTD θα φέρει μεγαλύτερες τιμές πάχους της ροής.

Τα δύο αυτά μοντέλα επομένως φαίνεται να εφαρμόζονται αμφισβητήσιμα σε οδοστρώματα, όταν εξετάζεται η μεταβολή της τραχύτητας. Ωστόσο, καθώς τα μοντέλα κατέληξαν στο ότι υπάρχει πρόβλημα υδρολίστεσης ανεξαρτήτως μεταβολής, αυτή η αδυναμία των μοντέλων του Gallaway και των Ressel & Hermann δεν αποτελεί μεγάλο πρόβλημα στην συνολική ανάλυση. Επηρεάζει, όμως, σημαντικά επιμέρους ζητήματα, όπως η εξέταση των αποτελεσμάτων ως προς την μεταβλητότητα του βάθους της τραχύτητας και η ταχύτητα υδρολίστεσης για φθαρμένα οδοστρώματα.

Συνεχίζοντας, μια ακόμη αναμενόμενη συμπεριφορά των αποτελεσμάτων είναι η μείωση της ταχύτητας υδρολίστεσης μετά την αύξηση του πάχους της ροής του νερού. Η συμπεριφορά αυτή παρατηρείται και στις τρεις περιπτώσεις των μοντέλων. Μάλιστα στην περίπτωση του PAVDRN αυτή η συμπεριφορά διακρίνεται ευκολότερα από τις τρεις περιπτώσεις, ενώ στην περίπτωση του Gallaway δυσκολότερα.

6.2 Επίδραση Κλιματικής Αλλαγής

Όσον αφορά την επίδραση της κλιματικής αλλαγής, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι δεν θα επιδράσει στο φαινόμενο της υδρολίστεσης. Η τιμή έντασης βροχόπτωσης που αφορά την υπάρχουσα κατάσταση με βάση μελέτες του 2017 και δεδομένα προηγούμενων δεκαετιών, και η τιμή έντασης βροχόπτωσης που αφορά την μελλοντική κατάσταση με βάση το επιλεγμένο σενάριο κλιματικής αλλαγής έδωσαν ίδια αποτελέσματα. Ειδικότερα, όπως προαναφέρθηκε, και οι 48 περιπτώσεις ταχύτητας υδρολίστεσης είναι μικρότερες της ταχύτητας των 130 km/h για την οποία σχεδιάστηκαν τα υπό μελέτη οδικά τμήματα. Παράλληλα, σε όλες τις περιπτώσεις η τιμή της ταχύτητας υδρολίστεσης δεν μεταβλήθηκε αξιοσημείωτα ή δυσμενέστερα με την χρήση της μελλοντικής τιμής για την ένταση βροχόπτωσης, διατηρώντας σταθερές τις τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων.

Παρόλα αυτά, η περίπτωση του σταθμού Ασκυφού που χρησιμοποιήθηκε δεν εμφανίζει σημαντική μεταβολή (αύξηση) της έντασης βροχόπτωσης σε σχέση με τους υπόλοιπους σταθμούς, ώστε να μπορεί να μελετηθεί η επίδραση της μεταβολής της έντασης βροχόπτωσης επαρκώς. Για τον λόγο αυτό θα εξεταστεί και η περίπτωση του σταθμού Λεόντιο ΥΠΕΚΑ, που εμφανίζει την μεγαλύτερη μεταβολή (*Βλέπε Πίνακα 7*), αλλά αυτή τη φορά θα χρησιμοποιηθούν οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων που σύμφωνα με τα αποτελέσματα ήταν δυσμενέστερες. Στον *Πίνακα 21* παρουσιάζεται η παραμετροποίηση, αλλά και τα αποτελέσματα συνοπτικά.

Σημειώνεται ότι επιλέγεται αρχικά ως μέσο βάθος τραχύτητας η τιμή 1,5 mm, λόγω της αστοχίας που εμφανίζουν τα μοντέλα του Gallaway και των Ressel & Hermann στην τιμή 0,5 mm, και στην συνέχεια εάν κριθεί σκόπιμο θα χρησιμοποιηθεί η τιμή 0,5 mm, αλλά μόνο στην περίπτωση του μοντέλου PAVDRN.

Οι υπόλοιπες παράμετροι που δεν περιλαμβάνονται στον παρακάτω πίνακα, λαμβάνουν ίδιες τιμές με την αρχική ανάλυση και σύμφωνα με το κεφάλαιο *Εκτίμηση Παραμέτρων*. Τέλος, οι υπολογισμοί υλοποιήθηκαν με χρήση του εργαλείου *Υπολογιστικό Εργαλείο Φαινομένου Υδρολίστεσης*.

Πίνακας 21. Μελέτη περίπτωσης σταθμού με μεγαλύτερη μεταβολή στην ένταση βροχόπτωσης – Σταθμός Λεόντιο ΥΠΕΚΑ

Μοντέλο Gallaway					
Μοντέλο Υδρολίστεσης	Τυπική Διάταξη Προσαρμογής	Λωρίδες Κυκλοφορίας	MTD	WFD	HPS
Υπάρχουσα Κατάσταση $i = 9,430\text{mm/h}$					
Gallaway	Κα - Κ - Κ - Κα	3	1,5 mm	6,893 mm	80 (79,7) km/h
PAVDRN (Αναλυτ.)				4,244 mm	130 (129) km/h
Ressel & Hermann				8,095 mm	75 (70,9) km/h
Μελλοντικό Σενάριο $i = 10,772\text{ mm/h}$ (Μεταβολή 13,7 %)					
Gallaway	Κα - Κ - Κ - Κα	3	1,5 mm	7,521 mm	80 (79) km/h
PAVDRN (Αναλυτ.)				4,505 mm	130 (128) km/h
Ressel & Hermann				8,539 mm	75 (70,5) km/h

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα είναι σαφές πως οι μεταβολές, ειδικά στο πάχος της ροής του νερού, είναι μεγαλύτερες από ότι στην περίπτωση του σταθμού Ασκυφού, όπως ήταν αναμενόμενο. Ωστόσο, συνεχίζουν να μην είναι αρκετά μεγάλες ώστε να μεταβάλλουν σημαντικά την ταχύτητα υδρολίστεσης και να επηρεάσουν τον σχεδιασμό. Στην τελευταία στήλη του Πίνακα 21 φαίνεται πως η μείωση της ταχύτητας υδρολίστεσης δεν είναι μεγαλύτερη από 1 km/h. Επομένως, ακόμα και στην περίπτωση μιας σημαντικής μεταβολής της έντασης βροχόπτωσης εξαιτίας της αλλαγής του κλίματος, το φαινόμενο της υδρολίστεσης δεν επηρεάζεται σημαντικά, δεδομένου πάντα των επιλεγμένων μοντέλων και συνθηκών.

7 ΠΡΟΤΑΣΗ ΜΕΤΡΩΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ

Το φαινόμενο της υδρολίστεσης επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, περισσότεροι από τους οποίους έχουν αναφερθεί στην παρούσα εργασία και συμπεριληφθεί στην ανάλυση που πραγματοποιήθηκε. Λόγω του μεγάλου πλήθους παραγόντων, υπάρχει και μεγάλο πλήθος προτάσεων περιορισμού του φαινομένου. Παρακάτω παρουσιάζονται πληροφοριακά οι συνήθεις παρεμβάσεις σε επίπεδο σχεδιασμού οδοποιίας, αλλά και νομοθεσίας.

1. Αύξηση του βάθους της τραχύτητας της επιφάνειας του οδοστρώματος
2. Αυλάκωση επιφάνειας οδοστρώματος
3. Μείωση πλάτους οδοστρώματος
4. Αύξηση της επίκλισης
5. Αλλαγή του μήκους προσαρμογής της επίκλισης
6. Αύξηση της κατά μήκος κλίσης
7. Μείωση ορίου ταχύτητας (κατά περίπτωση)
8. Κατασκευή εγκάρσιων υδρορροών/αυλακιών
9. Αλλαγή της χάραξης της οδού
10. Χρήση ελαστικών με μεγάλο βάθος αυλακώσεων

Η κάθε μία από τις παραπάνω παρεμβάσεις δεν είναι πάντα η βέλτιστη οικονομοτεχνική επιλογή. Ένα απλό παράδειγμα είναι οι αυλακώσεις οδοστρώματος ή και η κατασκευή εγκάρσιων υδρορροών, παρεμβάσεις που δεν μπορούν να εφαρμοστούν σε οδικούς άξονες όπου αναπτύσσονται μεγάλες ταχύτητες, όπως σε αυτοκινητόδρομους ή δρόμους ταχείας κυκλοφορίας.

Στην παρούσα περίπτωση αντικείμενο μελέτης είναι δύο χαράξεις τμημάτων αυτοκινητόδρομου μεγάλων ταχυτήτων, και οι προτάσεις αντιμετώπισης του φαινομένου πρέπει να είναι εφαρμόσιμες σε αυτές. Προτείνεται λοιπόν για τον περιορισμό της υδρολίστεσης στις συγκεκριμένες χαράξεις ένας συνδυασμός παρεμβάσεων, η μείωση του ορίου ταχύτητας, η αύξηση της επίκλισης και η χρήση αντιολισθηρής στρώσης οδοστρώματος.

Όπως επιβεβαίωσαν και τα αποτελέσματα της ανάλυσης, το πορώδες οδόστρωμα συμβάλλει σημαντικά στον περιορισμό της υδρολίστεσης. Επομένως προτείνεται για τέτοιες χαράξεις αυτοκινητόδρομων η αποκλειστική χρήση αντιολισθηρής ασφαλικής στρώσης και η άμεση ανακατασκευή της επιφάνειας του οδοστρώματος σε περίπτωση φθοράς του.

Συνεχίζοντας, προτείνεται σε αυτές τις χαράξεις το όριο ταχύτητας σε περίπτωση αντιολισθηρής ασφαλικής στρώσης τύπου I να καθοριστεί στα 110 km/h και σε περίπτωση τύπου II στα 120 km/h. Τιμές επαρκούς τάξεως για αυτοκινητόδρομους που δεν θα φέρουν προβλήματα στην κυκλοφορία, ενώ παράλληλα φαίνεται πως επιλύουν το πρόβλημα με βάση το μοντέλο υδρολίστεσης PAVDRN, όπως φαίνεται στον Πίνακα 17 και Πίνακα 18.

Στην περίπτωση, όμως, των αποτελεσμάτων των μοντέλων υδρολίστεσης του Gallaway και των Ressel & Hermann το πρόβλημα δεν επιλύεται, καθώς όπως φαίνεται στους αντίστοιχους πίνακες με τα αποτελέσματα για την ταχύτητα υδρολίστεσης, αυτή κυμαίνεται μεταξύ 70 km/h και 80 km/h. Για τον σκοπό αυτό προτείνεται η αύξηση της επίκλισης, ώστε στην περίπτωση αντιολισθηρής στρώσης τύπου I (MTD = 1,0 mm) η ταχύτητα υδρολίστεσης να είναι μεγαλύτερη των 110 km/h και στην περίπτωση του τύπου II (MTD = 1,5 mm) να είναι μεγαλύτερη των 120

km/h. Όσον αφορά τον προσδιορισμό της αύξησης της επίκλισης, επιλύεται η μεθοδολογία αντίστροφα:

1. Για επιθυμητή ταχύτητα υδρολίστεσης προσδιορίζεται το πάχος της ροής του νερού
2. Για επιθυμητό πάχος της ροής του νερού προσδιορίζεται το μήκος της ροής του νερού
3. Χρήση δοκιμαστικών τιμών επίκλισης στα τρισδιάστατα μοντέλα των οδικών χαράξεων, μέχρι να προκύψει το επιθυμητό μήκος ροής

Για τα παραπάνω βήματα χρησιμοποιείται το λογισμικό *Microsoft Excel 2013* για την διεκπεραίωση των απαιτούμενων υπολογισμών, ενώ η εφαρμογή των δοκιμαστικών τιμών επίκλισης πραγματοποιούνται εντός του σχεδιαστικού προγράμματος *Civil 3D – Metric 2022*.

Σύμφωνα με το μοντέλο υδρολίστεσης PAVDRN το πρόβλημα έχει επιλυθεί πριν την αύξηση της επίκλισης, επομένως για την αναδρομική διαδικασία εύρεσης αυτής της αύξησης ενδιαφέρουν μόνο τα μοντέλα του Gallaway και των Ressel & Hermann. Σκοπός είναι ο προσδιορισμός ενός συνδυασμού παρεμβάσεων που περιορίζει την υδρολίστεση στον επιθυμητό βαθμό και στις τρεις περιπτώσεις μοντέλων. Ωστόσο, η μαθηματική διατύπωση του μοντέλου του Gallaway δεν επιτρέπει την υλοποίηση του πρώτου βήματος, δηλαδή την εύρεση του πάχους της ροής του νερού για δεδομένη ταχύτητα υδρολίστεσης. Εντός της μαθηματικής σχέσης περιλαμβάνεται ο όρος A ο οποίος εμπεριέχει συνθήκη μέγιστης τιμής μεταξύ δύο περιπτώσεων, οι οποίες με την σειρά τους εξαρτώνται από την τιμή του πάχους της ροής του νερού. Επομένως, για την αναδρομική διαδικασία θα χρησιμοποιηθεί μόνο το μοντέλο των Ressel & Hermann.

Όσον αφορά τον παράγοντα της αλλαγής του κλίματος, θα χρησιμοποιηθεί η μελλοντική ένταση βροχόπτωσης $i = 20,708 \text{ mm/h}$ για να διασφαλιστεί πως, έστω τυπικά λαμβάνοντας υπόψιν το συμπέρασμα πως η αλλαγή του κλίματος δεν επιδρά σημαντικά, οι παρεμβάσεις θα έχουν ισχύ και σε περίπτωση του επιλεγμένου σεναρίου για την κλιματική αλλαγή.

Τέλος, εφόσον η αύξηση του πλάτους έχει επιβεβαιωθεί πως φέρει μικρότερες ταχύτητες υδρολίστεσης, επαρκεί μόνο η επιλογή 3 λωρίδων κυκλοφορίας ανά κατεύθυνση. Το αποτέλεσμα θα είναι ασφαλές και για την περίπτωση των 2 λωρίδων, ενώ έχει επίσης επιβεβαιωθεί πως η ταχύτητα υδρολίστεσης δεν μεταβάλλεται μεταξύ των δύο περιπτώσεων πλήθους λωρίδων τόσο σημαντικά, ώστε να προκύψει κάποια σημαντική διαφοροποίηση στον προσδιορισμό της αύξησης της επίκλισης και να προκύψει κάποιο οικονομοτεχνικό ζήτημα.

Πίνακας 22. Αναδρομικός υπολογισμός Πάχους Ροής Νερού – Χρήση διαγράμματος Ressel και Hermann Σχήματος 6

Ταχύτητα Υδρολίστεσης (HPS)	Πάχος Ροής Νερού (WFD)
111 km/h	2,15 mm
121 km/h	1,80 mm

Πίνακας 23. Αναδρομικός υπολογισμός Μήκους Ροής Νερού – Χρήση Μαθηματικού Μοντέλου Ressel & Hermann

Μέσο Βάθος Τραχύτητας Οδοστρώματος (MTD)	Ταχύτητα Υδρολίσθησης (HPS)	Πάχος Ροής Νερού (WFD)	Μήκος Ροής Νερού Lf
1,0 mm	111 km/h	2,15 mm	8,786 m
	121 km/h	1,80 mm	5,731 m
1,5 mm	111 km/h	2,15 mm	5,847 m
	121 km/h	1,80 mm	3,813 m

Το πάχος της ροής του νερού προέκυψε με χρήση του διαγράμματος του Σχήματος 6, ωστόσο τα μήκη της ροής που προέκυψαν στον Πίνακα 23, προέκυψαν επιλύοντας μαθηματικά την σχέση των Ressel & Hermann για το πάχος της ροής του νερού, όπως αναπτύσσεται στην συνέχεια.

$$WFT = 0,861 \cdot MTD^{0,4177} \cdot Q^{0,4158} \cdot S^{-0,3314} \quad \eta$$

$$WFT = 0,861 \cdot MTD^{0,4177} \cdot (0,0579 \cdot Lf \cdot i)^{0,4158} \cdot S^{-0,3314} \quad \eta$$

$$Lf = \frac{0,4158 \sqrt{\frac{WFT}{0,861 \cdot MTD^{0,4177} \cdot S^{-0,3314}}}}{0,0579 \cdot i}$$

WFT	=	Πάχος ροής νερού (mm)
MTD	=	Μέσο βάθος τραχύτητας Οδοστρώματος (mm)
Q	=	Ρυθμός ροής νερού (m ³ /h)

$$Q = 0,0579 \cdot Lf \cdot i$$

Lf	=	Μήκος ροής νερού (m)
i	=	Ένταση βροχόπτωσης (mm/min)
Sf	=	Κλίση κατά μήκος της ροής νερού (Αδιάστ.)

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα του Πίνακα 23 είναι φανερό πως δεν χρειάζεται να γίνουν δοκιμές για την εύρεση τιμής επίκλισης ή οποιασδήποτε παρέμβασης, καθώς το επιθυμητό αποτέλεσμα δεν είναι εφικτό. Συγκεκριμένα, όλα τα μήκη της ροής είναι μικρότερα της μικρότερης διάστασης της υπό μελέτη οδικής χάραξης, δηλαδή του πλάτους των 14 m. Αυτό σημαίνει πως ακόμα και εάν το νερό ακολουθούσε την συντομότερη διαδρομή για την έξοδό του από το οδόστρωμα, που είναι η εγκάρσια και θα απαιτούσε μηδενική κατά μήκος κλίση, κάθε ποσότητα νερού που θα έπεφτε στην αριστερή λωρίδα ταχείας κυκλοφορίας, και όχι μόνο, θα ακολουθούσε μια διαδρομή ροής μεγαλύτερου μήκους από το επιθυμητό.

Επομένως, με βάση την εφαρμογή του μοντέλου των Ressel & Hermann, δεν είναι δυνατή η επίτευξη των ζητούμενων ταχυτήτων υδρολίσθησης στις συγκεκριμένες χαράξεις και συνθήκες.

8 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η ανάλυση του φαινομένου της υδρολίσθησης που πραγματοποιήθηκε και τα αποτελέσματα αυτής, έδειξαν ότι υπάρχει αρκετός χώρος για περαιτέρω έρευνα σε ορισμένα θέματα. Παρατίθενται παρακάτω ορισμένες προτάσεις.

- Εφαρμογή του υπολογιστικού εργαλείου για το φαινόμενο της υδρολίσθησης, το οποίο δημιουργήθηκε στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας, για άλλες θέσεις στην ελληνική επικράτεια.
- Η επιστημονική κοινότητα δεν διαθέτει ομόφωνη άποψη για τις μελλοντικές προβλέψεις βροχοπτώσεων, λόγω της έλλειψης δεδομένων και της δυναμικής του φαινομένου. Υπάρχει επομένως αρκετός χώρος για βελτίωση των μεθόδων και τεχνικών πρόβλεψης των βροχοπτώσεων, μακροχρόνια, λαμβάνοντας υπόψιν, παράλληλα, την αλλαγή του κλίματος.
- Τα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται, αναπτύχθηκαν στο εξωτερικό, σε εργαστηριακές συνθήκες που ενδέχεται να διαφέρουν από τις ελληνικές. Προτείνεται η ανάπτυξη νέου μαθηματικού μοντέλου για τον προσδιορισμό της ταχύτητας υδρολίσθησης, εμπειρικά, σε ελληνικές συνθήκες.
- Η ανάλυση της υδρολίσθησης πραγματοποιήθηκε για ελαφριά οχήματα, και όχι για βαρέα. Δεδομένου πως ο μεγάλος όγκος και βάρος των βαρέων οχημάτων μπορούν να προκαλέσουν σοβαρά ζητήματα οδικής ασφάλειας σε περίπτωση υδρολίσθησης, παρουσιάζει μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον η ανάλυση του φαινομένου κατά την επίδραση της κλιματικής αλλαγής, για βαρέα οχήματα.
- Τα αποτελέσματα της εργασίας έδειξαν ότι οι συμβατικές μέθοδοι περιορισμού της υδρολίσθησης μπορεί, σε ορισμένες περιπτώσεις, να μην φέρουν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Προτείνεται η αναζήτηση καινοτόμων μεθόδων για τον περιορισμό του φαινομένου, οικονομοτεχνικά εφικτών.

9 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

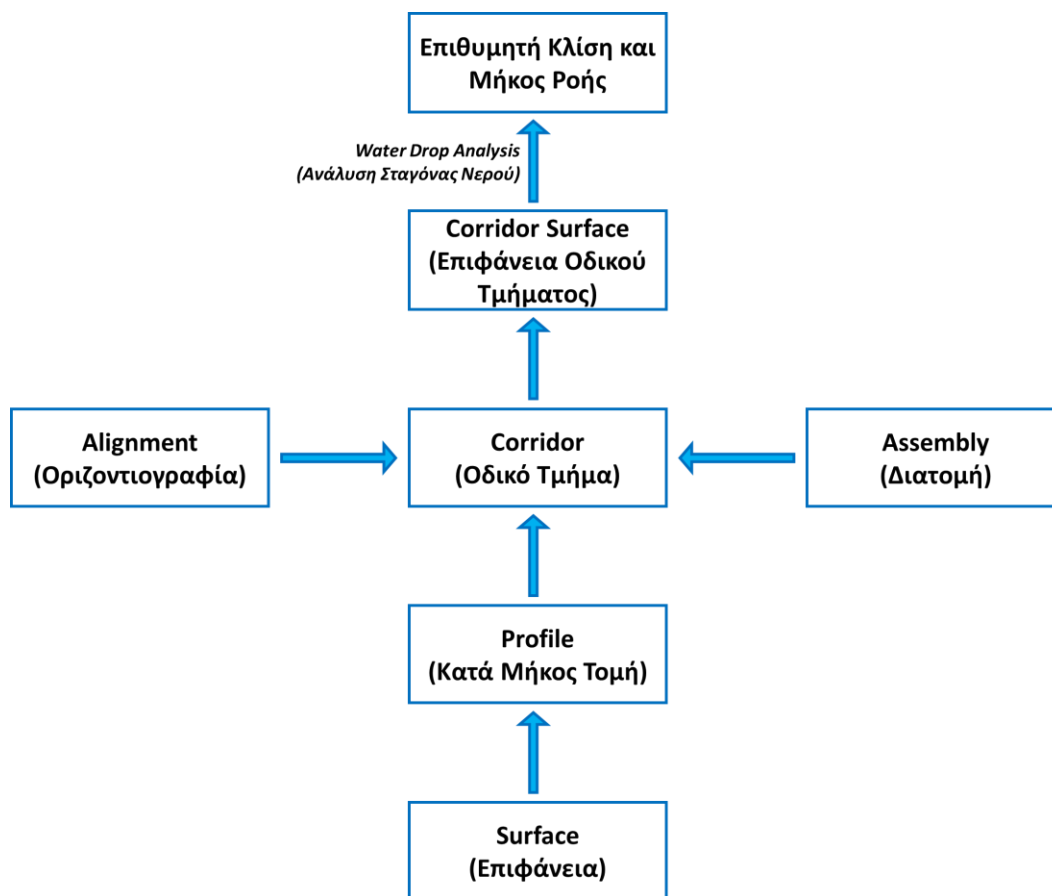
- ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΗ. "Αντιολισθηρή στρώση ασφαλτικού σκυροδέματος." 2009.
- Copernicus EU Programm. "OBSERVER: Climate Change: finding solutions through Copernicus data." *Copernicus.eu*. 07 02, 2020. <https://www.copernicus.eu/el/node/8752> (accessed June 2022).
- Eurostat. n.d. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ENV_AIR_GGE__custom_1300599/bookmark/table?lang=en&bookmarkId=e8f18fa5-e8ae-4a93-a708-b1d10a9988e7 (accessed June 2022).
- Fontini, Fulvio, and Massimiliano Caporin. "Damages Evaluation, Periodic Floods, and Local Sea Level Rise: The Case of Venice, Italy." *Handbook of Environmental and Sustainable Finance* (Academic Press), 2016.
- Gallaway, B. M., et al. *PAVEMENT AND GEOMETRIC DESIGN CRITERIA FOR MINIMIZING HYDROPLANNING*. Texas Transportation Institute, 1979.
- Horne, Walter B. "Tire Hydroplaning and its Effects on Tire Traction." NASA Langley Research Center, 1968.
- Intergovernmental Panel on Climate change, Working Group II. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. IPCC, 2022.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. 2021. <https://interactive-atlas.ipcc.ch/> (accessed June 2022).
- Kumar, Santosh S., and Anupam Kumar. "Analyzing Effect of Tire Groove Patterns on Hydroplaning Speed." (Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies) 2009.
- Langenbach, Zita. "Geometric Design Requirements to Improve Surface Drainage." 2013.
- Lee, Hyung S., and Dinesh Ayyala. *Enhanced Hydroplaning Prediction Tool - FINAL REPORT*. State of Florida Department of Transportation, 2020.
- Omni Calculator*. n.d. <https://www.omnicalculator.com/physics/water-viscosity> (accessed Αύγουστος 2022).
- Rasmussen, Robert Otto. "Pavement Surface Texture for Proving Grounds, Test Tracks, and Racetracks." 2022.
- Ressel, W., and S. Hermann. *Aquaplaning und Verkehrssicherheit in Verwindungsbereichen dreistreifiger Richtungsfahrbahnen. Berechnung der Wasserfilmdicke*. Vol. Heft 997 . Bonn: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2008.
- The Royal Society for the Prevention of Accidents. "Tyre Tread Depth and Stopping Distances." (The Royal Society for the Prevention of Accidents) 2005.

- UNECE. *Climate Change Impacts and Adaptation for Transport Networks and Nodes*. Geneva: United Nations Publications, 2020, 82.
- Wegener, Michael, and Franz Fuerst. "Land-Use Transport Interaction: State of the Art." *SSRN Electronic Journal*, October 2004.
- Οδηγίες Μελετών Οδικών Έργων (ΟΜΟΕ). *Τεύχος 3: Χαράξεις (ΟΜΟΕ-Χ)*. Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων, 2001.
- Οδηγίες μελετών Οδικών Έργων (ΟΜΟΕ). *Τεύχος 8: Αποχέτευση - Στράγγιση Υδραυλικά Έργα Οδών (ΟΜΟΕ - ΑΣΥΕΟ)*. Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων, 2013.
- Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας . n.d.
https://floods.ypeka.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=15&Itemid=507 (accessed 2022).
- Τράπεζα της Ελλάδος. "Οι Επιπτώσεις της Κλιματικής Αλλαγής στον Τομέα των Μεταφορών." Επιτροπή Μελέτης Επιπτώσεων Κλιματικής Αλλαγής, 2011, 2.

10 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

Για την εύρεση του μεγαλύτερου μήκους ροής και της κλίσης αυτής της διαδρομής για κάθε χάραξη οδικού τμήματος που επιλέγεται στο πλαίσιο της εργασίας, δημιουργήθηκαν τρισδιάστατα μοντέλα σε σχεδιαστικό πρόγραμμα. Το εν λόγω πρόγραμμα είναι η φοιτητική έκδοση του *Civil 3D – Metric 2022*.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 4 σχεδιάστηκαν τρισδιάστατα τέσσερα διαφορετικά μοντέλα. Σε κάθε περίπτωση, η μεθοδολογία στο σχεδιαστικό πρόγραμμα ήταν η ίδια και άλλαζαν οι τιμές ορισμένων παραμέτρων, σύμφωνα με το κεφάλαιο *Εκτίμηση Παραμέτρων*. Μετά την δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου, εκτελέστηκε αλγόριθμος εντός των δυνατοτήτων του προγράμματος που επιτρέπει την ιχνηλάτηση των απορροών. Στο Σχήμα 22 παρουσιάζεται συνοπτικά η μεθοδολογία, και στην συνέχεια αναλυτικά συνοδεία αποσπασμάτων από το σχεδιαστικό πρόγραμμα.



Σχήμα 22. Διαγραμματική απεικόνιση της ροής των εργασιών στο σχεδιαστικό πρόγραμμα.

Αρχικά δημιουργείται μια τυχαία επιφάνεια, σκοπός της οποίας είναι να δημιουργηθεί διάγραμμα κατά μήκος τομής. Στην συνέχεια, σε αυτό το διάγραμμα, θα δημιουργηθεί νέα **κατά μήκος τομή**, η οποία θα χρησιμοποιηθεί και θα περιγραφεί από την επιθυμητή κατά μήκος κλίση.

Ύστερα, δημιουργείται η **διατομή**. Δηλαδή, προσδιορίζεται η επίκλιση, οι λωρίδες και τα πλάτη τους, εάν θα υπάρχει διαχωριστικό έρεισμα κ.α. Σημαντικό σε αυτό το βήμα, είναι να επιλεγεί

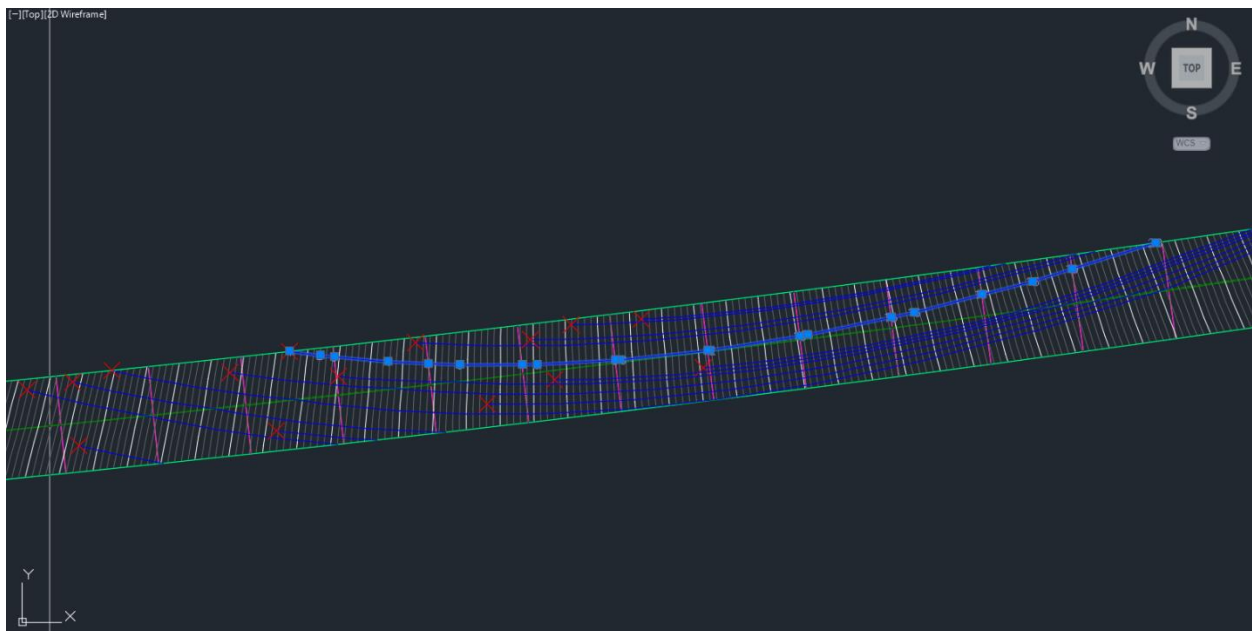
στις ιδιότητες της διατομής να είναι δυνατή η εφαρμογή υπερύψωσης οδοστρώματος, ώστε να μπορέσει να εφαρμοστεί στο οδικό τμήμα η προσαρμογή της επίκλισης όπως θα καθοριστεί στην συνέχεια.

Επόμενο βήμα είναι η δημιουργία της **οριζοντιογραφίας**, όπου προσδιορίζεται η διαμόρφωση της γεωμετρίας του οδικού τμήματος. Σε αυτό το βήμα, το πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα απόδοσης υπερύψωσης στην τυπική προσαρμογή. Σημειώνεται ότι η κατά μήκος τομή, η διατομή και η οριζοντιογραφία μπορούν να δημιουργηθούν με όποια σειρά είναι επιθυμητό.

Με τα τρία παραπάνω στοιχεία σχεδιασμένα, μπορεί να δημιουργηθεί ένα **οδικό τμήμα**, ή όπως το ονομάζει το πρόγραμμα, Corridor. Αυτό αποτελείται από την κατά μήκος τομή, την διατομή και την οριζοντιογραφία, έχοντας ιδιότητες και στις τρεις διαστάσεις, χωρίς όμως να αποτελεί επιφάνεια.

Η **επιφάνεια της οδού** δημιουργείται έπειτα, με βάση το οδικό αυτό τμήμα, στο πλαίσιο των δυνατοτήτων του προγράμματος. Σε αυτή την επιφάνεια είναι πλέον εφικτή η ανάλυση σταγόνας νερού (Water Drop Analysis). Το εργαλείο αυτό επιτρέπει την ανάλυση της απορροής και τον εντοπισμό της διαδρομής που θα ακολουθούσε μια σταγόνα νερού.

Μετά από χειροκίνητες δοκιμές (Βλέπε Σχήμα 23) ως προς την επιλογή των θέσεων που θα πέσει η σταγόνα, επιλέγεται η **μεγαλύτερη διαδρομή**, η οποία μάλιστα αναπαρίσταται με μια τρισδιάστατη πολυγωνική γραμμή (3D polyline). Η τελευταία εξάγεται με τις τρισδιάστατες συντεταγμένες κάθε κορυφής, στοιχεία που θα βοηθήσουν στον προσδιορισμό της κλίσης, ενώ το μήκος υπολογίζεται και παρατίθεται αυτομάτως από το σχεδιαστικό πρόγραμμα. Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως η διαδρομή που επιλέγεται διέρχεται μόνο από την μία κατεύθυνση του οδικού τμήματος, καθώς γίνεται λόγος για αυτοκινητόδρομο και, ακολούθως, για διαχωριστικό έρεισμα και υποδομή συλλογής των απορροών μετά την έξοδο τους από την επιφάνεια κυκλοφορίας.



Σχήμα 23. Δοκιμές με το εργαλείο Water Drop και επισήμανση μεγαλύτερης διαδρομής

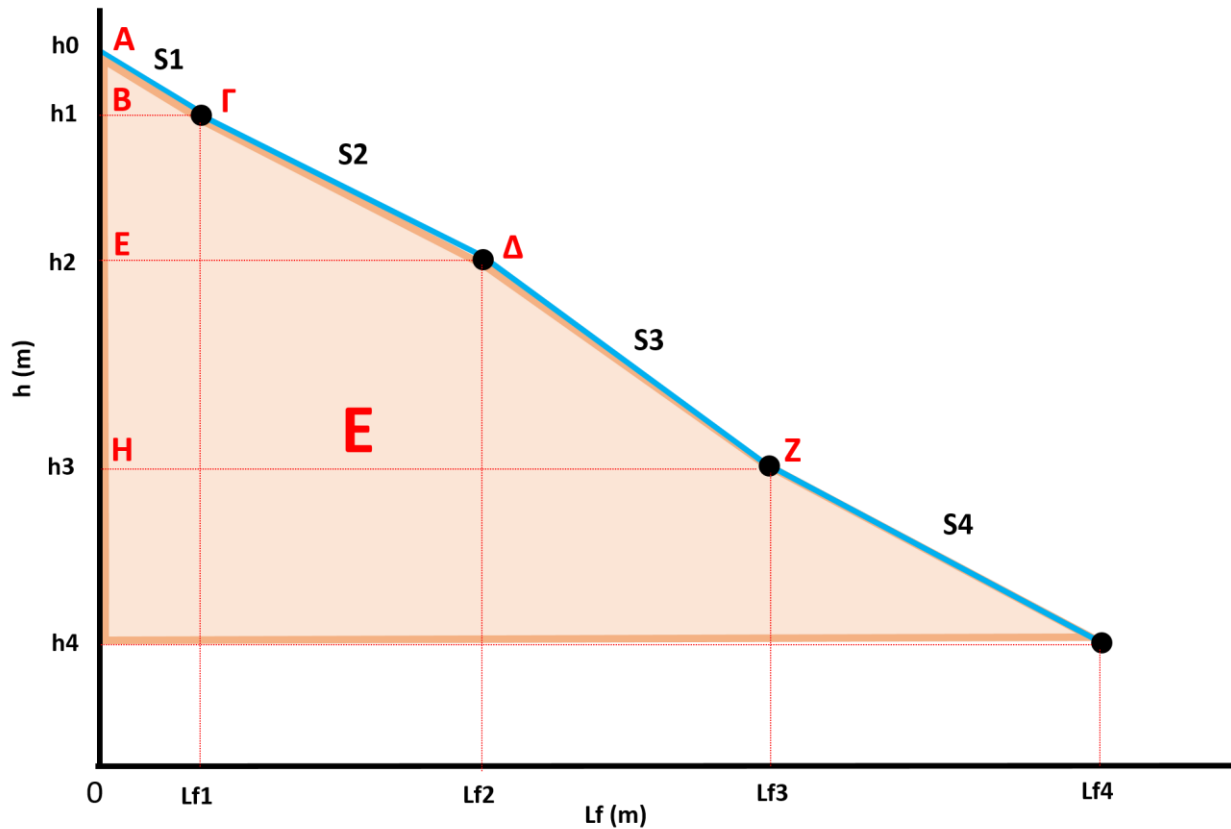
11 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

Τα μαθηματικά μοντέλα για τον προσδιορισμό του πάχους της στρώσης του νερού ζητούν την κλίση της επιλεγμένης διαδρομής νερού στο οδόστρωμα. Ωστόσο, καθότι η κλίση δεν είναι ενιαία, εφαρμόστηκε στο πλαίσιο της εργασίας μια μεθοδολογία (Langenbach 2013) για την εύρεση μιας ισοδύναμης κλίσης, η οποία υλοποιήθηκε σε υπολογιστικό φύλλο *Microsoft Excel 2013*.

Πρώτο βήμα, είναι η εξαγωγή των απαιτούμενων δεδομένων από το σχεδιαστικό πρόγραμμα. Συγκεκριμένα, χρειάζονται οι τρισδιάστατες συντεταγμένες των κορυφών της πολυγωνικής γραμμής που αναπαριστά την επιλεγμένη διαδρομή του νερού. Από αυτές μάλιστα υπολογίζονται οι διαφορές μεταξύ των διαδοχικών κορυφών, όπως και οι ενδιάμεσες αποστάσεις μεταξύ αυτών με τον αλγεβρικό τύπο:

$$\text{Μήκος} = \sqrt{(X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2 + (Z - Z_0)^2}$$

Οι ενδιάμεσες αποστάσεις χρησιμοποιούνται στην μεθοδολογία για τον υπολογισμό του εμβαδού της κόκκινης επιφάνειας (E) όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 24, δηλαδή του εμβαδού του πολυγώνου που σχηματίζεται λόγω της μεταβολής της κλίσης.



Σχήμα 24. Διαγραμματική απεικόνιση της μεταβολής του ύψους ανά απόσταση απορροής – Επισήμανση επιφάνειας πολυγώνου και λοιπών γεωμετρικών στοιχείων της μεθοδολογίας

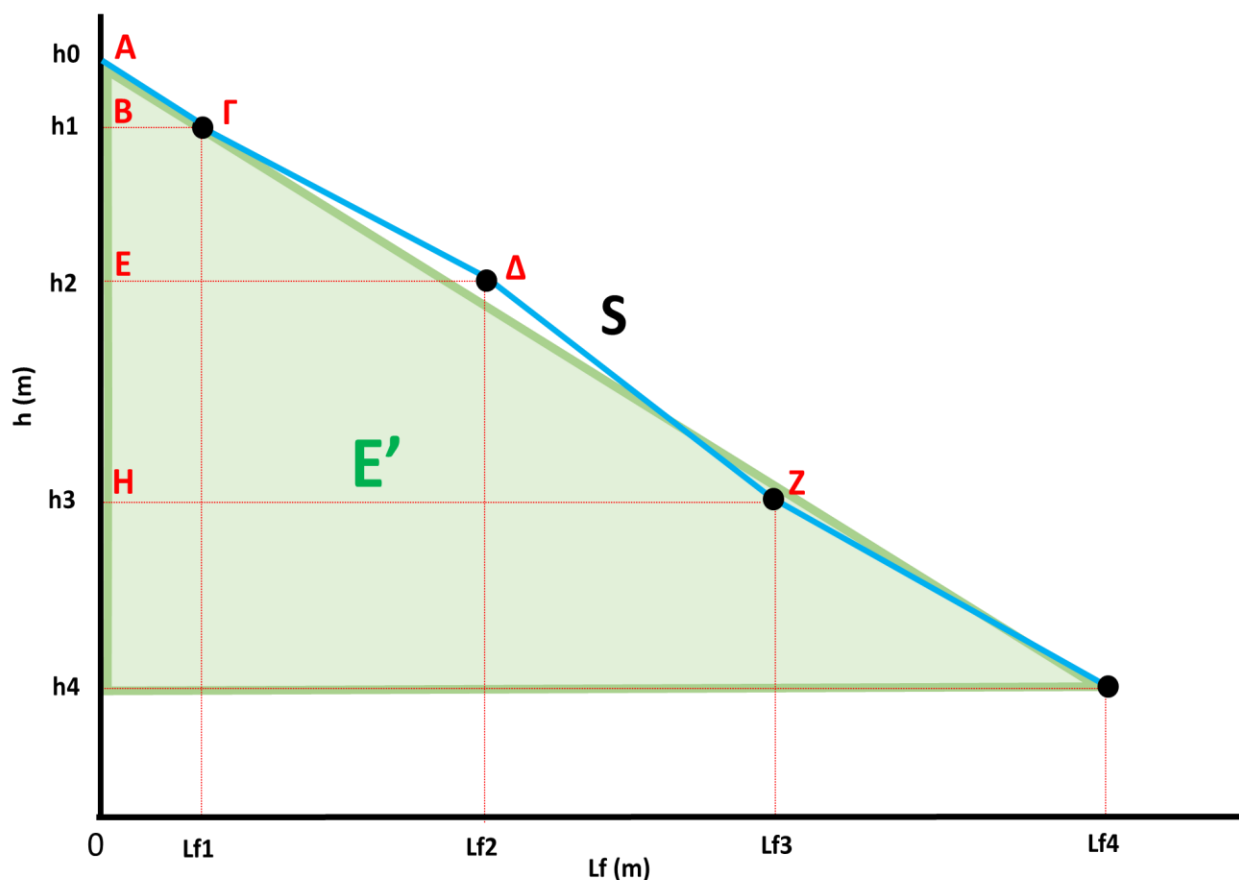
τραπέζιο ΒΓΔΕ, με χρήση των επόμενων τύπων.

$$E_{\text{ΑΒΔ}} = \frac{\text{ΑΒ} \cdot \text{ΒΓ}}{2} \quad E_{\text{ΒΓΔΕ}} = \frac{(\text{ΒΓ} + \text{ΕΔ}) \cdot \text{ΒΕ}}{2}$$

Με αυτό τον τρόπο μπορεί να υπολογιστεί το εμβαδό ΑΕΔΓ ως το άθροισμα αυτών των δύο. Στην συνέχεια, υπολογίζεται το εμβαδόν ΕΗΖΔ ως τραπέζιο και προσθέτοντας το γνωστό πλέον εμβαδόν ΑΕΔΓ μπορεί να βρεθεί το εμβαδόν του σχήματος ΑΗΖΔΓ. Η ίδια διαδικασία συνεχίζεται μέχρι τον υπολογισμό του συνολικού εμβαδού.

Με τον υπολογισμό του εμβαδού Ε, προσδιορίστηκε ουσιαστικά το ισοδύναμο εμβαδό Ε' του ισοδύναμου τριγώνου, όπως αυτό παρουσιάζεται στο Σχήμα 25. Οι ιδιότητες του ισοδύναμου τριγώνου είναι πως έχει ίδιο εμβαδό με το πολύγωνο του Σχήματος 24, ενώ έχουν κοινή κορυφή το σημείο Α, δηλαδή το σημείο όπου ξεκινάει η απορροή. Ακόμη, επιλέγεται να διατηρηθεί κοινή βάση, η οποία είναι το μήκος απορροής. Επομένως μπορεί να υπολογιστεί το ύψος του ισοδύναμου τριγώνου ως εξής:

$$\text{Εμβαδόν Τριγώνου} = \frac{\text{Ύψος Τριγώνου} \cdot \text{Βάση τριγώνου}}{2} \quad \text{ή} \quad \text{Ύψος Τριγώνου} = \frac{\text{Εμβαδόν Τριγώνου} \cdot 2}{\text{Βάση Τριγώνου}}$$



Σχήμα 25. Διαγραμματική απεικόνιση ισοδύναμου τριγώνου και επιφάνειας του – Επισήμανση λοιπόν γεωμετρικών στοιχείων της μεθοδολογίας

Με το ύψος του ισοδύναμου τριγώνου γνωστό, μπορεί να υπολογιστεί η ζητούμενη η ισοδύναμη κλίση με την επόμενη μαθηματική σχέση:

$$\text{Ισοδύναμη Κλίση} = \frac{\text{Ισοδύναμο Ύψος Τριγώνου}}{\text{Μήκος Απορροής}}$$

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 9 σε εδάφιο του κεφαλαίου *Εκτίμηση Παραμέτρων*, ενώ είναι αξιοσημείωτο το ότι με την συγκεκριμένη μεθοδολογία υπολογίζονται όλα τα μεγέθη για βήμα την κάθε κορυφή. Αποτελέσματα που ίσως να μην απαιτούνται, αλλά χρησιμεύουν στον έλεγχο της μεθοδολογίας.

12 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ

Στο πλαίσιο της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας δημιουργήθηκε υπολογιστικό εργαλείο σε λογιστικό φύλλο Microsoft Excel έκδοσης 2013 με όνομα *Υπολογιστικό Εργαλείο Φαινομένου Υδρολίσθησης*, για την διεκπεραίωση των μαθηματικών υπολογισμών. Μάλιστα, το εργαλείο αυτό είναι ικανό να υπολογίσει μεγαλύτερο αριθμό περιπτώσεων υδρολίσθησης από ότι απαιτείται στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας. Συγκεκριμένα, όπως προκύπτει από τις αναλύσεις του κεφαλαίου *Εκτίμηση Παραμέτρων* ζητείται ο προσδιορισμός 48 διαφορετικών περιπτώσεων υδρολίσθησης (βλέπε *Σχήμα 21*), όπως προκύπτουν από διαφορετικούς συνδυασμούς των τιμών των παραμέτρων, ενώ το υπολογιστικό εργαλείο είναι ικανό να προσδιορίσει 60480 περιπτώσεις.

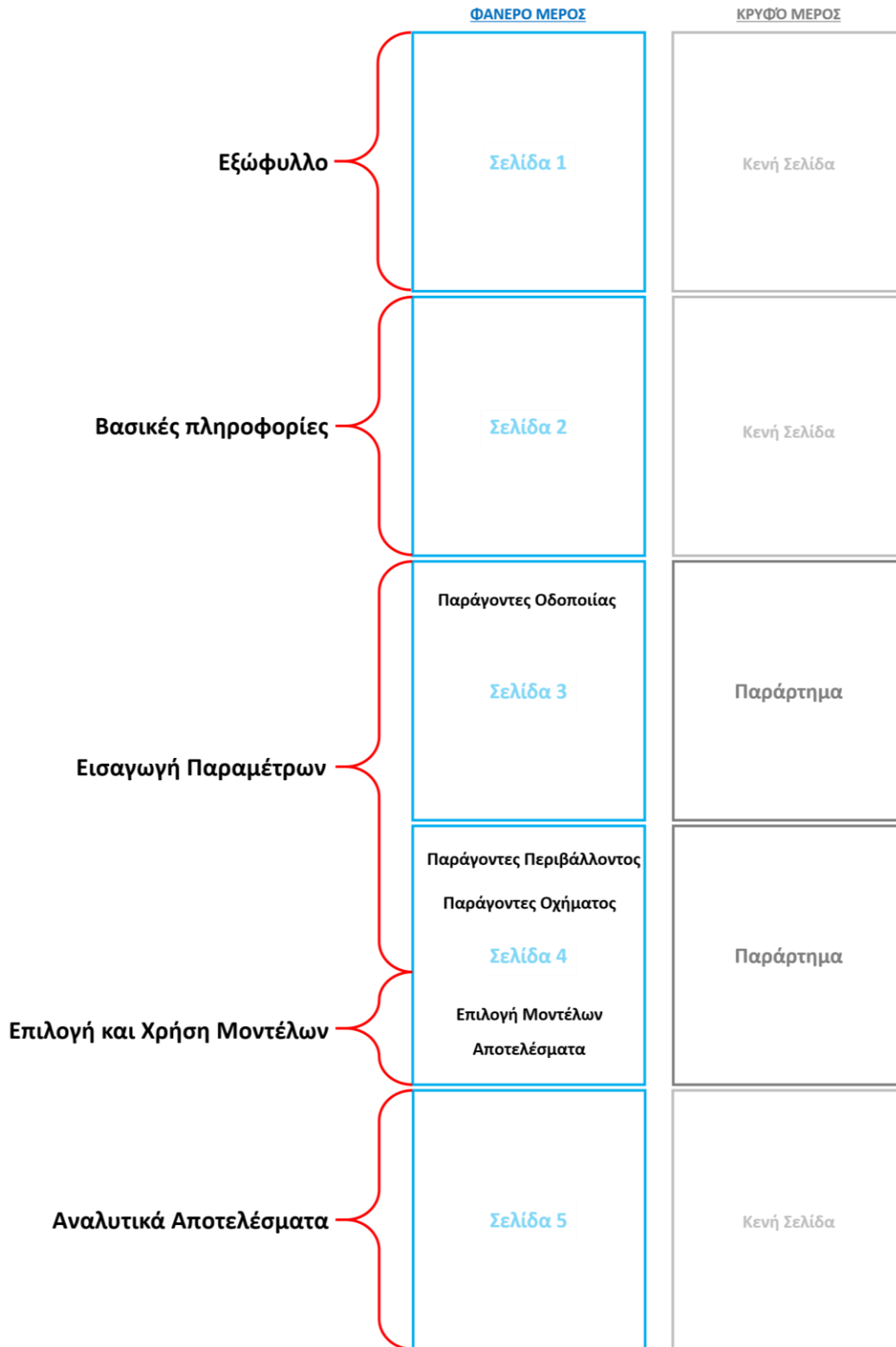
Η ανάλυση του φαινομένου γίνεται συναρτήσει των παραμέτρων που το διαμορφώνουν, σύμφωνα με το εκάστοτε μαθηματικό μοντέλο, και συναρτήσει του χρόνου. Εξετάζονται παράγοντες οδοποιίας, περιβάλλοντος και οχήματος. Η παράμετρος του χρόνου συμμετέχει μέσω μιας μεταβλητής περιβάλλοντος, της έντασης βροχόπτωσης. Αυτή, όπως περιγράφεται στο εδάφιο *Ένταση βροχόπτωσης (i)*, λαμβάνει τιμές που αφορούν την υπάρχουσα κατάσταση, όπως έχει προκύψει με μελέτες του 2017 και από δεδομένα προγενέστερων ετών, και το μελλοντικό σενάριο για το διάστημα 2041 – 2060 που περιλαμβάνει την επίδραση της κλιματικής αλλαγής, όπως έχει προκύψει από εργασίες του Διακυβερνητικού Πάνελ για την Κλιματική Αλλαγή του ΟΗΕ, IPCC.

Η δομή του εργαλείου μπορεί να χωριστεί σε δύο βασικά μέρη, ένα φανερό προς τον χρήστη και ένα κρυφό. Στο φανερό δίνεται η δυνατότητα παραμετροποίησης με βάση διαθέσιμες τιμές και η εμφάνιση των αποτελεσμάτων. Από την άλλη, στο κρυφό μέρος περιλαμβάνονται ορισμένα στοιχεία και διεργασίες που είναι απαραίτητες για την λειτουργία του φανερού μέρους. Σημειώνεται ότι εφόσον κάποιος επιθυμεί να χρησιμοποιήσει τιμές για τις μεταβλητές εκτός των διαθέσιμων, πιθανόν θα χρειαστεί να εμφανίσει το κρυφό μέρος και να επεξεργαστεί τα περιεχόμενά του. Ορισμένες περιγραφές και δείκτες συνδέουν το κρυφό με το φανερό μέρος, ωστόσο η όποια επεξεργασία του ενδέχεται να προκαλέσει αστοχίες στην λειτουργία του φανερού. Στο *Σχήμα 26* παρουσιάζεται συνοπτικά οι δομή του εργαλείου, πριν την αναλυτική παρουσίαση στην συνέχεια.

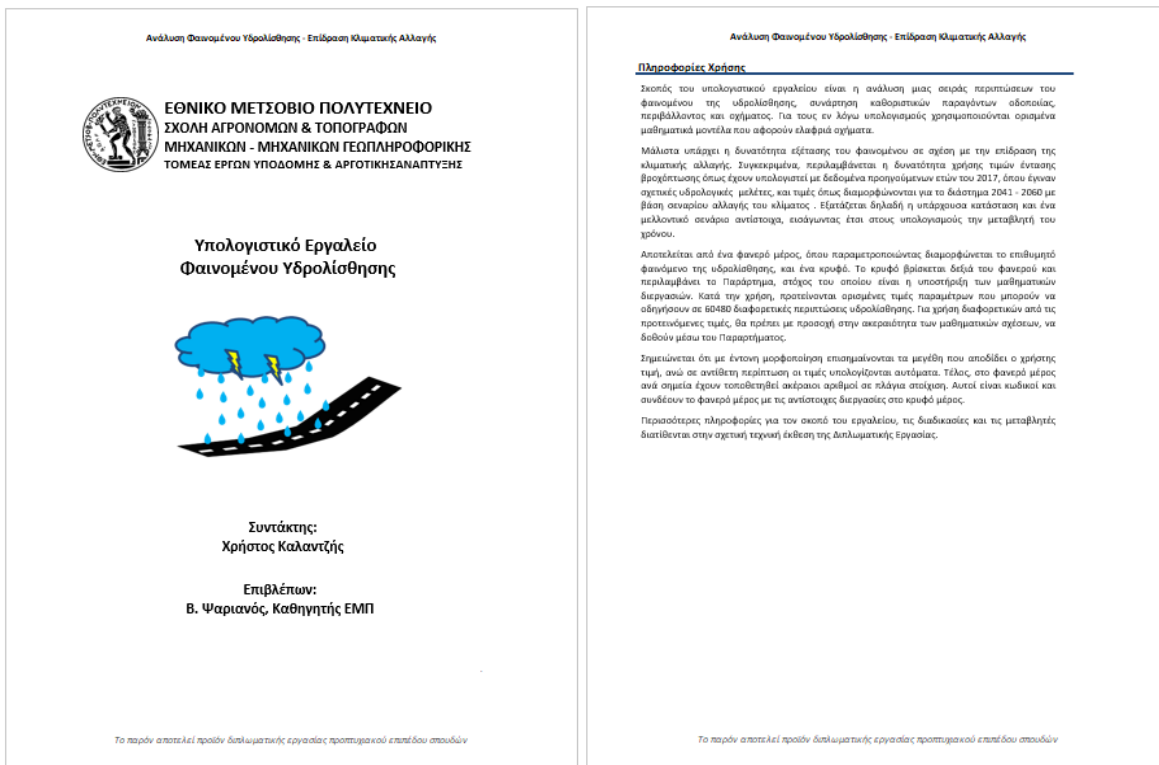
Αναλυτικότερα, στις πρώτες δύο σελίδες του υπολογιστικού φύλλου περιλαμβάνονται το εξώφυλλο και ορισμένα βασικά στοιχεία για αυτό (βλέπε *Σχήμα 27*). Στις επόμενες δύο σελίδες, πραγματοποιείται η εισαγωγή των τιμών των παραμέτρων. Οι τιμές, είτε επιλέγονται από τον χρήστη μέσω μιας λίστας διαθέσιμων τιμών, είτε προκύπτουν υπολογιστικά. Στην πρώτη περίπτωση, η μορφοποίηση είναι με έντονο κείμενο. Η εισαγωγή των τιμών των παραμέτρων ομαδοποιείται με βάση του παράγοντες, έτσι στην αρχή περιλαμβάνονται οι παράγοντες οδοποιίας, στην συνέχεια οι παράγοντες περιβάλλοντος και τέλος οι παράγοντες οχήματος.

Όπως φαίνεται στο *Σχήμα 28*, για την πληρέστερη κατανόηση των επιλογών των τιμών παρατίθενται σχήματα που επεξηγούν σημαντικές παραμέτρους, όπως οι τυπικές διατάξεις προσαρμογής και το πλάτος που συνεισφέρει στην ροή. Οι παράγοντες οδοποιίας, ουσιαστικά, διαμορφώνουν στην κάθε περίπτωση το μοντέλο της οδού στο οποίο θα λάβει μέρος το φαινόμενο της υδρολίσθησης. Στην παρούσα εργασία επιλέγονται οδικά τμήματα κατηγορίας ΑΙ, που ανήκουν δηλαδή σε αυτοκινητόδρομους πολλαπλών λωρίδων και με όριο ταχύτητας τα 130 km/h. Σε αυτό το τμήμα του εργαλείου, ο χρήστης καλείται να επιλέξει τιμή για την τυπική διάταξη

προσαρμογής, τον αριθμό των λωρίδων του αυτοκινητόδρομου και το μέσο βάθος της τραχύτητας οδοστρώματος.



Σχήμα 26. Σκαρίφημα δομής υπολογιστικού εργαλείου



Σχήμα 27. Εξώφυλλο και εισαγωγικά στοιχεία υπολογιστικού εργαλείου

Στην τέταρτη σελίδα περιλαμβάνονται οι παράγοντες περιβάλλοντος και οχήματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 29. Οι παράγοντες περιβάλλοντος, που ο χρήστης καλείται να προσδιορίσει, είναι οι μεταβλητές της έντασης βροχόπτωσης και της θερμοκρασίας. Η ένταση της βροχόπτωσης, ουσιαστικά, προκύπτει με την επιλογή του επιθυμητού σταθμού προς εξέταση και του χρονικού διαστήματος στο οποίο γίνεται η αναφορά. Η θερμοκρασία επιλέγεται με την σειρά της καθώς καθορίζει το κινηματικό ιξώδες του νερού, το οποίο συμμετέχει στο μαθηματικό μοντέλο υδρολίστεσης PAVDRN για το πάχος της ροής του νερού. Οι παράγοντες περιβάλλοντος διαμορφώνουν την ένταση του φαινομένου της υδρολίστεσης. Οι παράγοντες οχήματος καθορίζονται πλήρως από τον χρήστη και είναι το βάθος των αυλακώσεων των ελαστικών, η πίεση των ελαστικών και το ποσοστό σπινιαρίσματος.

Ακόμη, στην τέταρτη σελίδα μετά το πέρας της εισαγωγής των τιμών των παραμέτρων, περιλαμβάνεται και η επιλογή των μαθηματικών μοντέλων για το πάχος της ροής του νερού και της ταχύτητας υδρολίστεσης, μαζί με τα αποτελέσματά του.

Ωστόσο, τα αποτελέσματα παρατίθενται αναλυτικά στην τελευταία σελίδα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 30. Σε αυτό το τμήμα εκτός από τα πάχη της ροής του νερού, παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα της ταχύτητας υδρολίστεσης για κάθε συνδυασμό μαθηματικού μοντέλου για το πάχος και την ταχύτητα.

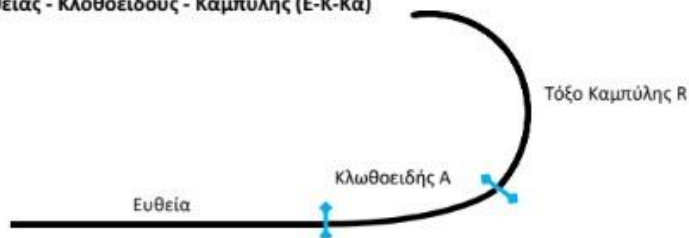
Ανάλυση Φαινομένου Υδρολίσησης - Επίδραση Κλιματικής Αλλαγής

Εισαγωγή Παραμέτρων - Διαμόρφωση Φαινομένου Υδρολίσησης

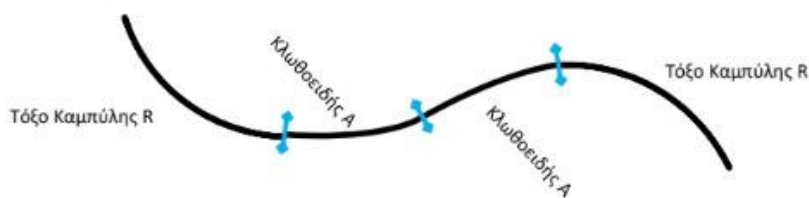
Παράγοντες Οδοποιίας

Τυπική Διάταξη Προσαρμογής 1 | E-K-Κα m

Οριζοντιογραφία Ευθείας - Κλωθοειδούς - Καμπύλης (E-K-Κα)



Οριζοντιογραφία Καμπύλης - Κλωθοειδούς - Κλωθοειδούς - Καμπύλης (Κα-Κ-Κ-Κα)



Λωρίδες 2 | 2 m

Πλάτος Οδοστρώματος (W) | 10,5 m

Τμήμα Διατομής Οδοστρώματος	Πλάτος
Πλάτος Εσωτερικής λωρίδας Καθοδήγησης	0,75 m
Αριστερή Λωρίδα Κυκλοφορίας	3,5 m
-	0 m
Δεξιά Λωρίδα Κυκλοφορίας	3,75 m
Εξωτερική Λωρίδα Καθοδήγησης και ΛΕΑ	2,5 m



Μήκος Ροής Νερού (Lf) | 189,336 m

Κλίση κατά Μήκος της Ροής του Νερού (Sf) | 0,007 Αδιάστ.

Μέσο Βάθος Τραχύτητας Οδοστρώματος (MTD) 3 | 0,5 mm

Το παρόν αποτελεί προϊόν διπλωματικής εργασίας προπτυχιακού επιπέδου σπουδών

Σχήμα 28. Τμήμα επιλογής τιμών για τους παράγοντες οδοποιίας

Ανάλυση Φαινομένου Υδρολίσθησης - Επίδραση Κλιματικής Αλλαγής

Παράγοντες Περιβάλλοντος

Περίοδος	4	Έως και 2017
Σταθμός	5	ΑΣΚΥΦΟΥ
Υπολογισθείσα Ένταση Βροχόπτωσης (I)	6	20,687 mm/h
Πρόβλεψη Ένταση Βροχόπτωσης (I)	7	- mm/h
Θερμοκρασία (T)		20 °C
Ρυθμός Ροής (Q)		3,780 m ³ /h
Κινηματικό Ιξώδες Νερού (u)		1,0034 mm ² /s
Αριθμός Reynold's (N _κ)		1084 Αδιάστ.
Συντελεστής Τραχύτητας Manning (n)		0,017 Αδιάστ.

Παράγοντες Οχήματος

Βάθος Αυλακώσεων Ελαστικών (TD)	8	3 mm
Πίεση Ελαστικών (Pt)	9	33 psi
Ποσοστό Σπιναρίσματος (SD)		10 %

Επιλογή και Χρήση Μοντέλων Υδρολίσθησης

Πάχος Ροής Νερού

Μοντέλο	PAVDRN
Πάχος Ροής Νερού (WFD)	5,853 mm

Ταχύτητα Υδρολίσθησης

Μοντέλο	PAVDRN
Ταχύτητα Υδρολίσθησης (HPS)	107 km/h

Το παρόν αποτελεί προϊόν διπλωματικής εργασίας προπτυχιακού επιπέδου σπουδών

Σχήμα 29. Τμήμα επιλογής τιμών για τους παράγοντες περιβάλλοντος και οχήματος – Επιλογή μαθηματικών μοντέλων και αποτελέσματα

Ανάλυση Φαινομένου Υδρολίσησης - Επίδραση Κλιματικής Αλλαγής

Αναλυτικά Αποτελέσματα

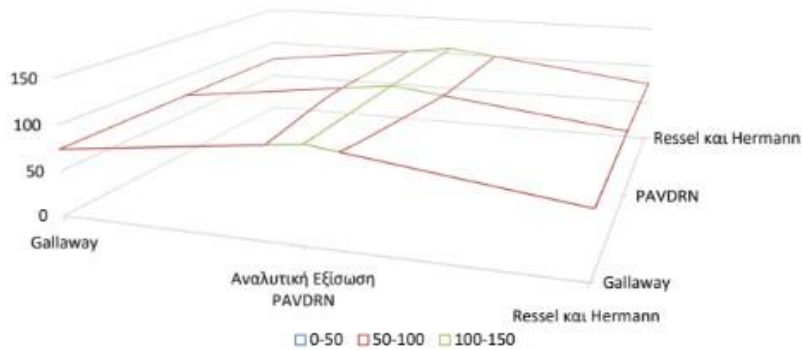
Πάχος Ροής Νερού (WFD)

Galloway	8,291 mm
Αναλυτική Εξίσωση PAVDRN	5,853 mm
Ressel και Hermann	5,767 mm



Ταχύτητα Υδρολίσησης (HPS)

Μοντέλο WFD	Μοντέλο HPS			11, 12, 13
	Galloway	PAVDRN	Ressel και Hermann	
Galloway	74	104	71	km/h
Αναλυτική Εξίσωση PAVDRN	75	107	75	
Ressel και Hermann	75	107	76	



Στρογγυλοποίηση στο πλησιέστερο πολλαπλάσιο του 5, προς τα επάνω

Μοντέλο WFD	Μοντέλο HPS			km/h
	Galloway	PAVDRN	Ressel και Hermann	
Galloway	75	105	75	km/h
Αναλυτική Εξίσωση PAVDRN	75	110	80	
Ressel και Hermann	75	110	80	

Το παρόν αποτελεί προϊόν διπλωματικής εργασίας προπτυχιακού επιπέδου σπουδών

Σχήμα 30. Τμήμα αναλυτικής παράθεσης αποτελεσμάτων

Τέλος Διπλωματικής εργασίας