



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Πρόταση εξοικονόμησης ενέργειας σε οδικές σήραγγες με επιλογή του βέλτιστου οπτικού

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος, Ι. Κάτσιος - Νεραντζής

Επιβλέπων Καθηγητής:	Φραγκίσκος Β. Τοπαλής
	Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Επιβλέπων :	Κωνσταντίνος Α. Μπουρούσης
	Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2019



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Πρόταση εξοικονόμησης ενέργειας σε οδικές σήραγγες με επιλογή του βέλτιστου οπτικού

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος, Ι. Κάτσιος - Νεραντζής

Επιβλέπων Καθηγητής: Φραγκίσκος Β. Τοπαλής

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Α. Μπουρούσης

Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 14η Φεβρουαρίου 2019.

.....

Φραγκίσκος Β. Τοπαλής

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Ιωάννης Φ. Γκόνος

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Γεώργιος Κορρές

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2019

.....

Κωνσταντίνος, Ι. Κάτσιος - Νεραντζής

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Κωνσταντίνος, Κάτσιος-Νεραντζής, 2019.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάδειξη της σημασίας που πρέπει να δοθεί, κατά την πραγματοποίηση φωτοτεχνικών μελετών οδικών σηράγγων, στην επιλογή κατάλληλου οπτικού.

Αντικείμενο της εργασίας αποτελούν δύο οδικές σήραγγες της Αττικής Οδού, η εγκατάσταση φωτισμού των οποίων πραγματοποιήθηκε βάσει του προτύπου ΕΛΟΤ CR 14380. Αρχικά, εξετάζονται τα διαθέσιμα οπτικά και περιορίζονται σε τρία για ασύμμετρο φωτισμό και ένα για συμμετρικό φωτισμό. Έπειτα, για κάθε ασύμμετρο οπτικό διεξάγονται 63 φωτοτεχνικές μελέτες, οι οποίες συγκρίνονται μεταξύ τους για την επιλογή του αποδοτικότερου οπτικού. Στη συνέχεια, περιορίζονται οι πιθανές περιπτώσεις ανά οπτικό με κριτήρια πρώτα την κάλυψη των απαιτήσεων φωτισμού των σηράγγων και έπειτα απορρίπτονται τα σενάρια με περίσσια κατανάλωση ισχύος. Ύστερα περιορίζονται περαιτέρω οι περιπτώσεις, λαμβάνοντας υπόψη οικονομικά κριτήρια σχετικά με το κόστος πραγμάτωσης κάθε σεναρίου και την εξοικονόμηση που θα αποφέρει. Τέλος, πραγματοποιείται ένας επιπλέον κύκλος μελετών, με τις επικρατέστερες λύσεις, με βάση τα πραγματικά δεδομένα των σηράγγων.

Λέξεις κλειδιά: φωτισμός οδικής σήραγγας, φωτιστικά σηράγγων, εξοικονόμηση ενέργειας, οικονομοτεχνική μελέτη φωτισμού.

ABSTRACT

The aim of the present diploma thesis is to show the attention that must be paid, during photometrical studies, in the choice of proper optic.

The objective of this thesis is two tunnels at Attiki Odos, the lighting system of which was fulfilled in accordance to ELOT CR 14380. At first, all the available optics are limited to three asymmetrical optics and one symmetrical. For each asymmetrical optic 63 photometrical studies are conducted, which are used to determine the most efficient optic. Furthermore, the above-mentioned studies are being limited for each luminaire, with the first criterion being the fulfillment of the photometric needs of the tunnels, while the second criterion is whether or not there is excess power consumption. Then, the remaining cases are being limited again, taking into account the economic criteria regarding the installation cost and the energy saving. Finally, a final photometric study is conducted, with the prevailing solutions, based on the actual data of the two tunnels.

Key words: tunnel lighting, tunnel luminaires, energy saving, lighting techno-economic study.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω ειλικρινείς ευχαριστίες στον καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Φραγκίσκο Β. Τοπαλή, ο οποίος μου εμπιστεύτηκε την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, δίνοντας μου έτσι την ευκαιρία να ασχοληθώ με το αντικείμενο των εφαρμογών φωτισμού και της εξοικονόμησης ενέργειας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον διδάκτορα Ηλεκτρολόγο Μηχανικό & Μηχανικό Υπολογιστών κ. Κωνσταντίνο Μπουρούση, καθώς και τον υποψήφιο διδάκτορα Ηλεκτρολόγο Μηχανικό & Μηχανικό Υπολογιστών κ. Δημήτρη Νικολάου για τη διαρκή βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφεραν, αλλά κυρίως για την υπομονή τους στην επίλυση των αποριών μου.

Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρία Αττικές Διαδρομές Α.Ε. και τον προϊστάμενο συντήρησης Η&Η/Μ κ. Ελευθέριο Ζαμπέτα για τις πληροφορίες που μας παρέδωσαν και αφορούσαν τις υπό μελέτη σήραγγες της Αττικής Οδού. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Ελβετική εταιρία Relux Informatik A.G. και τον κ. Markus Hegi, για την παραχώρηση μίας άδειας χρήσης του λογισμικού RELUX Tunnel για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τις εταιρείες Schreder S.A. και ILS Lighting & City Applications για την παροχή των φωτομετρικών αρχείων που χρησιμοποιήθηκαν στο Κεφάλαιο 5. Η συνεισφορά των ανωτέρω εταιριών ήταν καθοριστική για την ολοκλήρωση της εργασίας.

Πολλές ευχαριστίες οφείλω στους γονείς μου, Ιωάννη και Άννα, οι οποίοι με στηρίζουν καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής μου και με βοήθησαν να γίνω το άτομο που είμαι σήμερα. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους μου, οι οποίοι ήταν μαζί μου και στα καλά, αλλά και στα κακά.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	7
ABSTRACT	9
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	11
Περιεχόμενα	13
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	17
1.1 Το ανθρώπινο μάτι	17
1.2 Η ανάγκη για φωτισμό στο εσωτερικό των σηράγγων	17
1.3 Προβλήματα στον οδοφωτισμό σηράγγων	17
1.3.1 Το φαινόμενο της μαύρης τρύπας (black hole effect)	17
1.3.2 Το φαινόμενο της ζέβρας (the zebra effect)	18
1.4 Το οπτικό πεδίο ενός οδηγού	18
1.5 Βασικές έννοιες φωτισμού	19
1.5.1 Φωτεινή ροή (Luminous Flux):	19
1.5.2 Φωτεινή ένταση (Luminous Intensity):	19
1.5.3 Ένταση φωτισμού (Illuminance):	19
1.5.4 Λαμπρότητα (Luminance):	20
1.5.5 Φωτεινή απόδοση (Luminous efficiency):	21
1.5.6 Ομοιομορφία (Uniformity):	21
1.5.7 Αντίθεση (Contrast):	21
1.5.8 Θάμβωση (Glare) και Κατώφλι προσαύξησης (TI):	22
Κεφάλαιο 2: Φωτισμός οδικών σηράγγων - Θεωρητικό υπόβαθρο	23
2.1 Σκοπός του φωτισμού σηράγγων	23
2.2 Απαιτήσεις του φωτισμού σηράγγων	23
2.3 Ζώνες φωτισμού σηράγγων	24
2.4 Ορισμοί βασικών μεγεθών στη μελέτη φωτισμού σηράγγων	25
2.5 Απόσταση ασφαλούς πέδησης	26
2.6 Διαχωρισμός σε σήραγγες μεγάλου και μικρού μήκους	28
2.7 Η μέθοδος Look Through Percentage – LTP	29
2.8 Φωτισμός Ημέρας	30
2.8.1 Μέθοδος Αντιληπτής Αντίθεσης (Perceived Contrast Method)	30

2.8.2 Μέθοδος L ₂₀	30
2.8.3 Σταθμισμένη Μέθοδος L ₂₀	33
2.8.4 Επιλογή μεθόδου και πραγματοποίηση υπολογισμών	34
2.8.5 Απαιτήσεις Φωτισμού στι ζώνες της σήραγγας	37
2.8.6 Φωτισμός στους τοίχους της σήραγγας.....	38
2.8.7 Ομοιομορφία λαμπρότητας	39
2.8.8 Φωτεινή πάλμωση (Flicker effect)	39
2.8.9 Θάμβωση (Glare).....	40
2.9 Φωτισμός νύχτας	40
2.10 Συστήματα τεχνητού φωτισμού	41
2.10.1 Συμμετρικός φωτισμός	41
2.10.2 Ασύμμετρος φωτισμός.....	41
2.11 Προσδιορισμός μήκους των ζωνών μιας σήραγγας	42
Κεφάλαιο 3: Παρουσίαση και επεξεργασία αποτελεσμάτων των πειραμάτων γύρω από την επιλογή οπτικού	44
3.1 Εισαγωγή.....	44
3.2 Επιλογή φωτιστικών σωμάτων και παραμετροποίηση	44
3.3 Διεξαγωγή προκαταρκτικής μελέτης και παρουσίαση αποτελεσμάτων	44
3.3.1 Μελέτη ασύμμετρων οπτικών	46
3.3.2 Μελέτη συμμετρικών φωτιστικών	50
3.4 Προετοιμασία Φωτομετρικών Αρχείων	51
3.5 Αποτελέσματα	52
3.5.1 Αποτελέσματα μελετών με τη χρήση του πρώτου οπτικού.....	52
3.5.2 Αποτελέσματα μελετών με τη χρήση του δεύτερου οπτικού	56
3.5.3 Αποτελέσματα μελετών με τη χρήση του τρίτου οπτικού.....	59
3.6 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα υπολογισμών.....	62
3.7 Συμπεράσματα.....	66
Κεφάλαιο 4: Οικονομοτεχνική μελέτη	67
4.1 Εισαγωγή.....	67
4.2 Μεθοδολογία υπολογισμού του συνολικού κόστους επένδυσης μιας εγκατάστασης	67
4.3 Υπολογισμός ετήσιου λειτουργικού κόστους:	68
4.4 Κριτήρια Οικονομικής Αξιολόγησης.....	69
4.4.1 Περίοδος Αποπληρωμής (Payback period)	70

4.4.2 Απόδοση Επένδυσης (Return on Investment - ROI)	70
4.4.3 Καθαρή Παρούσα Αξία – ΚΠΑ (Net Present Value – NPV).....	70
4.4.4 Δείκτης Αποδοτικότητας – ΔΑ (Cost Effectiveness Index – CEI).....	71
4.4.5 Σταθμισμένο Κόστος Εξοικονομούμενης Ενέργειας – ΣΚΕΕ (Levelized Energy Efficiency Cost – LEEC).....	72
4.5 Παράμετροι αξιολόγησης του κόστους κάθε σεναρίου	72
4.5.1 Κόστος αρχικής επένδυσης	73
4.5.2 Κόστος καταναλισκόμενης ενέργειας	74
4.5.3 Κόστος συντήρησης εγκατάστασης	78
4.6 Επιλογή οικονομικού κριτηρίου αξιολόγησης προσφορών	79
4.7 Παρουσίαση οικονομικών αποτελεσμάτων	79
4.8 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων.....	84
Κεφάλαιο 5: Εκπόνηση μελέτης φωτισμού με πραγματικά δεδομένα	85
5.1 Εισαγωγή.....	85
5.2 Χαρακτηριστικά των σηράγγων της Αττικής Οδού Μαύρη Ωρα (Α) και Μαύρη Ωρα (Ε)	85
5.2.1 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Σηράγγων.....	85
5.2.2 Χαρακτηριστικά Εγκατεστημένων Φωτιστικών Σωμάτων	85
5.3 Επιλογή Φωτιστικών Σωμάτων και θέσεις τοποθέτησής τους.....	86
5.4.1 Εναλλακτική 1	91
5.4.2 Εναλλακτική 2	94
5.4.3 Οικονομικά Μεγέθη Μαύρης Ωρας (Α).....	96
5.5 Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τη δεύτερη σήραγγα: Μαύρη Ωρα (Ε)	98
5.5.1 Εναλλακτική 1	99
5.5.2 Εναλλακτική 2	102
5.5.3 Οικονομικά Μεγέθη Μαύρης Ωρας (Ε)	104
5.6 Συμπεράσματα.....	106
Κεφάλαιο 6: Σύνοψη αποτελεσμάτων, τελικά συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα	108
6.1 Σύνοψη αποτελεσμάτων.....	108
6.2 Συμπεράσματα.....	109
6.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	110
Βιβλιογραφία	111
Παράρτημα Α: Αναλυτικά αποτελέσματα μετρήσεων Κεφαλαίου 3.	112

A.1 Κωδικοποίηση Περιπτώσεων	112
A.2 Πίνακες Αποτελεσμάτων Περιπτώσεων Οπτικού 1	115
A.3 Ενδεικτικές Γραφικές Παραστάσεις Αποτελεσμάτων	126
Παράρτημα Β: Αποτελέσματα Τελικών Μελετών	130

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Το ανθρώπινο μάτι

Προτού παρουσιαστεί οτιδήποτε άλλο, πρέπει πρώτα να παρουσιαστεί και να εξηγηθεί η ανάγκη για οδικό φωτισμό στις σήραγγες. Προκειμένου να παρουσιαστεί επαρκώς αυτή η ανάγκη, παρουσιάζεται επιγραμματικά ο τρόπος λειτουργίας του ανθρώπινου ματιού.

Το ανθρώπινο μάτι είναι το όργανο υπεύθυνο για την όραση. Είναι ικανό να μεταβάλει την ευαισθησία του στο φως έως και 1,000,000 φορές (από λαμπρό φως ηλίου σε απόλυτο σκοτάδι), αλλά κάθε στιγμή μπορεί να αντιλαμβάνεται αντικείμενα με μέγιστη αναλογία αντίθεσης 1000 [1].

Για να προσαρμοστεί το ανθρώπινο μάτι από συνθήκες έντονης λαμπρότητας λόγω ηλιακής ακτινοβολίας σε συνθήκες απόλυτου σκοταδιού, χρειάζεται 20-30 λεπτά. Αντίθετα, για να προσαρμοστεί από το απόλυτο σκοτάδι σε συνθήκες φωτισμού ημέρας χρειάζεται περίπου 5 λεπτά. Με άλλα λόγια, το μάτι προσαρμόζεται πιο εύκολα από το σκοτάδι στο φως, παρά από το φως στο σκοτάδι [2].

1.2 Η ανάγκη για φωτισμό στο εσωτερικό των σηράγγων

Με βάση την παραπάνω περιγραφή για το ανθρώπινο μάτι, γίνεται φανερό πως υπάρχει ανάγκη για φωτισμό στο εσωτερικό των σηράγγων, διαφορετικά θα χρειαζόταν χρόνος για να προσαρμοστεί το ανθρώπινο μάτι στο σκοτάδι στο εσωτερικό της σήραγγας και έπειτα, χρόνος για να προσαρμοστεί το μάτι από τις συνθήκες φωτισμού στο εσωτερικό της σήραγγας, στις συνθήκες φωτισμού στο εξωτερικό.

Σκοπός του οδοφωτισμού σηράγγων είναι να εξασφαλιστούν κατάλληλες συνθήκες προκειμένου οι χρήστες της σήραγγας να μπορούν να διαβούν τη σήραγγα με τη μέγιστη δυνατή οπτική άνεση. Ειδικά στην περίπτωση των οδηγών, οι κακές συνθήκες φωτισμού μπορούν να προκαλέσουν δυσφορία, με αποτέλεσμα να περιοριστεί η αντίληψη του οδηγού για τον περιβάλλον του και να αυξηθούν οι πιθανότητες ατυχημάτων.

1.3 Προβλήματα στον οδοφωτισμό σηράγγων

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα πιο συνηθισμένα προβλήματα που συνδέονται με τον οδοφωτισμό σηράγγων.

1.3.1 Το φαινόμενο της μαύρης τρύπας (black hole effect)

Πρόκειται για το φαινόμενο που αντιμετωπίζει ένας οδηγός όταν πλησιάζει μία σήραγγα, η οποία δεν είναι σωστά φωτισμένη. Το πεδίο όρασης ενός οδηγού είναι κανονικά 20 μοίρες, καθώς, όμως, ο οδηγός πλησιάζει στο στόμιο μιας σήραγγας, το πεδίο όρασης του περιορίζεται στο στόμιο της σήραγγας και μειώνεται σε 2 μοίρες. Εάν, λοιπόν, η σήραγγα δεν είναι καλά φωτισμένη, τα μάτια του οδηγού δυσκολεύονται να προσαρμοστούν στις νέες συνθήκες φωτισμού, με αποτέλεσμα να δημιουργείται δυσφορία στον οδηγό και να αυξάνονται οι πιθανότητες ατυχήματος. Η ονομασία

του εν λόγω φαινομένου προκύπτει από το σκοτεινό στόμιο της σήραγγας που αντιλαμβάνεται ο οδηγός.[3].

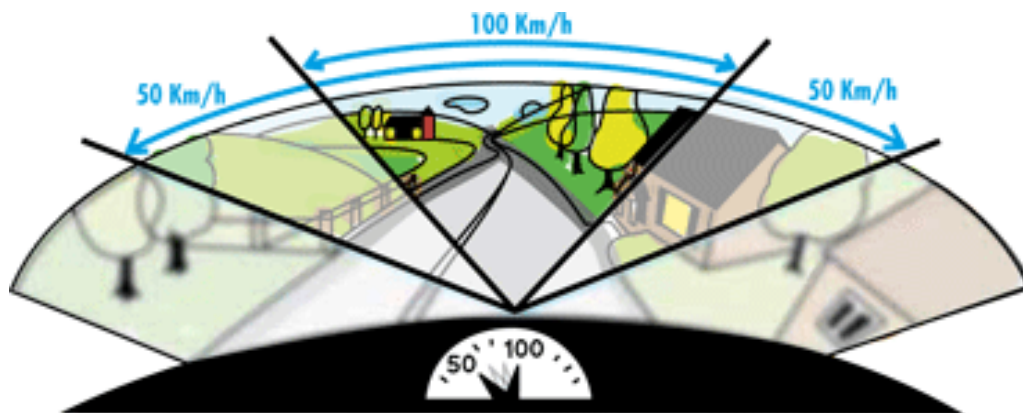
1.3.2 Το φαινόμενο της ζέβρας (the zebra effect)

Όπως παρουσιάστηκε παραπάνω, το ανθρώπινο μάτι χρειάζεται χρόνο για να προσαρμοστεί σε διαφορετικές συνθήκες φωτισμού. Το συγκεκριμένο φαινόμενο λαμβάνει το όνομά του από τις ρίγες που έχει η ζέβρα. Πρόκειται ουσιαστικά για την εναλλαγή, «άσπρου» και «μαύρου» ή στην περίπτωση του φωτισμού, επαναλαμβανόμενων «φωτεινών» και «σκοτεινών» περιοχών στην επιφάνεια του δρόμου. Η διαρκής αυτή μεταβολή των συνθηκών φωτισμού προκαλούν έντονες οπτικές και ψυχολογικές διαταραχές, με αποτέλεσμα να αυξάνουν τον κίνδυνο ατυχήματος [4].

Προκειμένου να εξασφαλισθεί η οπτική άνεση, πρέπει να ληφθεί υπόψη ο τρόπος με τον οποίο δουλεύει το ανθρώπινο μάτι. Πιο συγκεκριμένα, πρέπει η εναλλαγή στο φωτισμό να μην γίνεται απότομα. Παράλληλα, πρέπει να μην υπάρχουν έντονες διαφορές στο φωτισμό «γειτονικών» περιοχών. Επιπλέον απαιτήσεις, όπως η οριζόντια ομοιομορφία και η πάλωση flicker, αναλύονται στο Κεφάλαιο 2, στο οποίο παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες και οι απαιτήσεις για το φωτισμό σιράγγων.

1.4 Το οπτικό πεδίο ενός οδηγού

Τα μάτια του τυπικού οδηγού αυτοκινήτου έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά. Βρίσκονται σε ύψος 1m από την επιφάνεια του οδοστρώματος και σχηματίζει με τον ορίζοντα γωνία 1°. Το οπτικό πεδίο του οδηγού εξαρτάται από την ταχύτητα του οχήματος. Όσο πιο γρήγορα κινείται το όχημα, τόσο μειωμένο είναι το οπτικό πεδίο του οδηγού.



Εικόνα 1.1: Οπτικό πεδίο του οδηγού με βάση την ταχύτητα.

1.5 Βασικές έννοιες φωτισμού

1.5.1 Φωτεινή ροή (Luminous Flux):

Η φωτεινή ροή Φ αποτελεί το γινόμενο της μέγιστης φασματικής ακτινοβολίας (k_m) επί το ολοκλήρωμα του γινομένου της φασματικής ισχύος ακτινοβολίας (P) επί τη φασματική ευαισθησία του ανθρώπινου ματιού (V) στο φάσμα της ορατής ακτινοβολίας για τον άνθρωπο (380-780nm). Μετριέται σε lumen (lm) και εκφράζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\Phi = k_m \int_{380}^{780} P(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (1.1)$$

1.5.2 Φωτεινή ένταση (Luminous Intensity):

Μια φωτεινή πηγή δεν εκπέμπει ομοιόμορφα το φως που παράγει. Συνεπώς, ορίζουμε ένα διανυσματικό μέγεθος που θα καθορίζει πόση φωτεινή ροή εκπέμπει η φωτεινή πηγή προς κάποια συγκεκριμένη κατεύθυνση του στερεού χώρου. Το μέγεθος αυτό ονομάζεται Φωτεινή Ένταση ή Ένταση Φωτεινής Πηγής και συμβολίζεται με I . Η Φωτεινή Ένταση ορίζεται ως ο λόγος της στοιχειώδους Φωτεινής Ροής $d\Phi$ που εκπέμπει μια φωτεινή πηγή σε στοιχειώδη στερεά γωνία $d\Omega$, προς τη γωνία αυτή. Δηλαδή:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (1.2)$$

Μονάδα μέτρησης της φωτεινής έντασης αποτελεί η candela (cd) και ισχύει:

$$cd = \frac{lm}{sr} \quad (candela = \frac{lumen}{sterad})$$

Επειδή το στερεακτίσιο (sterad) είναι αδιάστατο μέγεθος, η μονάδα cd έχει τις ίδιες διαστάσεις με τη μονάδα lm.

Η candela (ή κήριο) αποτελεί ένα από τα εφτά θεμελιώδη φυσικά μεγέθη. Ο ορισμός της είναι ο ακόλουθος:

«Το κήριο είναι η φωτεινή ένταση που προκύπτει στην κάθετη διεύθυνση επιφάνειας μέλανος σώματος εμβαδού ίσου με το $1/600.000$ του τετραγωνικού μέτρου (m^2) στη θερμοκρασία πήξης τηγμένου λευκόχρυσου (περίπου στους $1.773^\circ C$ ή $2046^\circ K$) σε κανονική ατμοσφαιρική πίεση. Η πρακτική αναπαράσταση της; Παραπάνω συνθήκης (με δεδομένη τη δυσκολία προσομοίωσης του μέλανος σώματος) μπορεί να οριστεί και ως η φωτεινή ένταση σε ορισμένη κατεύθυνση φωτεινής πηγής, που εκπέμπει μονοχρωματική ακτινοβολία συχνότητας 540×10^{12} Hz με ενεργειακή ένταση στην κατεύθυνση αυτή, $1/683$ βατ ανά στερεακτίσιο» [5].

1.5.3 Ένταση φωτισμού (Illuminance):

Κατ' αντιστοιχία με την Φωτεινή Ένταση, μας ενδιαφέρει να μελετήσουμε και το φως που προσπίπτει σε μία επιφάνεια που φωτίζεται. Γι' αυτό ορίζουμε την Ένταση Φωτισμού ή Φωτισμός επιφάνειας (E). Πρόκειται για το λόγο της στοιχειώδους φωτεινής ροής $d\Phi$ που προσπίπτει σε μία στοιχειώδη επιφάνεια dS , προς την επιφάνεια αυτή. Με άλλα λόγια:

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \quad (1.3)$$

Η Ένταση φωτισμού μετριέται σε lux (lx) και ισχύει:

$$lx = \frac{lm}{m^2} \quad (lx = \frac{lumen}{m^2})$$

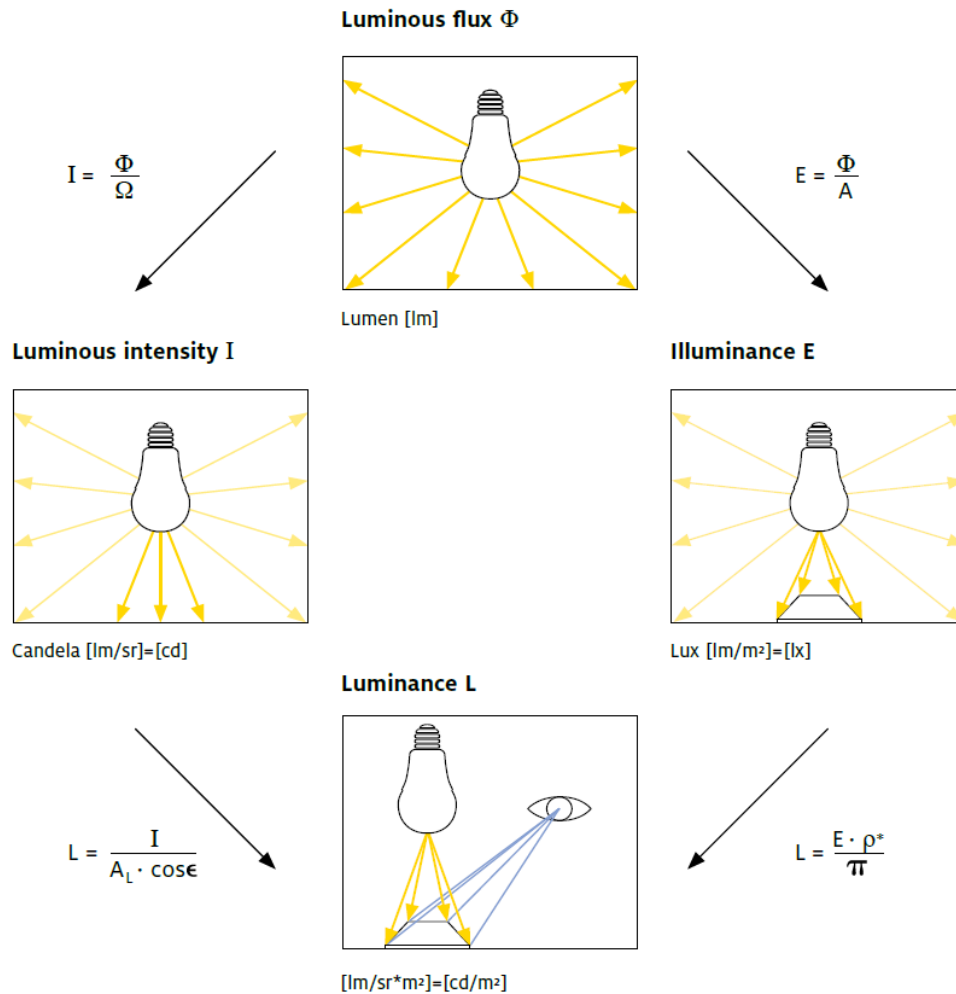
1.5.4 Λαμπρότητα (Luminance):

Πρόκειται για το μέγεθος που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής όταν κοιτάει μια φωτεινή πηγή (αυτόφωτη ή ετερόφωτη). Είναι μια υποκειμενική αίσθηση και ορίζεται ως η ένταση σε μια δεδομένη κατεύθυνση που διαιρείται με μια προβαλλόμενη περιοχή, όπως αυτή φαίνεται από τον παρατηρητή.

Πιο συγκεκριμένα, η Λαμπρότητα (L) εκφράζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$L = \frac{I}{S_{\pi\eta\gamma\acute{\eta}\varsigma}} \quad (1.4)$$

Η Λαμπρότητα είναι το μοναδικό βασικό φωτομετρικό μέγεθος που γίνεται αντιληπτό από το ανθρώπινο μάτι. Η λαμπρότητα εκφράζεται σε $\frac{cd}{m^2}$.



Εικόνα 1.2: Η σχέση μεταξύ των βασικών φωτομετρικών μεγεθών

Η παραπάνω εικόνα δείχνει τον τρόπο που συνδέονται τα τέσσερα παραπάνω βασικά φωτομετρικά μεγέθη.

Το κύριο μέγεθος που χρησιμοποιείται κατά την μελέτη του φωτισμού μιας σήραγγας από τα παραπάνω τέσσερα βασικά μεγέθη είναι η λαμπρότητα.

1.5.5 Φωτεινή απόδοση (Luminous efficiency):

Η έννοια της φωτεινής απόδοσης εκφράζει την ποσότητα των παραγόμενων lumen ανά καταναλισκόμενο Watt. Αποτελεί σημαντικό μέγεθος για την αξιολόγηση της απόδοσης μιας φωτεινής ροής και μετριέται σε $\frac{lm}{W}$.

1.5.6 Ομοιομορφία (Uniformity):

Η ομοιομορφία U καθορίζει και εκφράζει την ποιότητα του φωτεινού αποτελέσματος. Στον οδοφωτισμό εξετάζονται δύο είδη ομοιομορφίας: η συνολική και η διαμήκης.

Η συνολική ομοιομορφία (overall uniformity U_o) αποτελεί το λόγο της ελάχιστης τιμής της λαμπρότητας στη μετρούμενη επιφάνεια του δρόμου, προς τη μέση λαμπρότητα. Η συνολική ομοιομορφία μας βοηθά να αποφανθούμε για την ελάχιστη ορατότητα στο δρόμο.

Η διαμήκης ομοιομορφία (longitudinal uniformity U_l) αποτελεί το πηλίκο της ελάχιστης προς τη μέγιστη τιμή της λαμπρότητας κατά μήκος του μέσου της λωρίδας κυκλοφορίας. Η τιμή της διαμήκους ομοιομορφίας αποτελεί κριτήριο σχετικά με την οπτική άνεση και ο σκοπός του (κριτηρίου) είναι η αποφυγή ενός επαναλαμβανόμενου μοτίβου από ζώνες πολύ χαμηλής και υψηλής λαμπρότητας στο δρόμο (Zebra effect).

1.5.7 Αντίθεση (Contrast):

Πρόκειται για τη διαφορά στη λαμπρότητα μεταξύ ενός αντικειμένου και του παρακείμενου χώρου. Η αντίθεση ουσιαστικά καθορίζει πόσο εύκολα το αντικείμενο αυτό γίνεται αντιληπτό. Για τον υπολογισμό της αντίθεσης έχουν αναπτυχθεί αρκετοί τύποι. Για τη μελέτη μικρών αντικειμένων σε μεγάλο ομοιόμορφο φόντο, που μας ενδιαφέρει στο φωτισμό σήραγγων, χρησιμοποιείται ο τύπος του Weber:

$$\text{Contrast} = \frac{L_{\text{object}} - L_{\text{background}}}{L_{\text{background}}} \quad (1.5)$$

όπου:

L_{object} : Η λαμπρότητα του εξεταζόμενου αντικειμένου και

$L_{\text{background}}$: Η λαμπρότητα του παρακείμενου χώρου.

Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι η αντίθεση ενός αντικειμένου μπορεί να έχει θετικό πρόσημο, όταν το αντικείμενο είναι πιο λαμπερό από το περιβάλλον του, ή αρνητική σε περίπτωση που το αντικείμενο είναι πιο σκούρο από το περιβάλλον.

Το πόσο μεγάλη πρέπει να είναι η αντίθεση έτσι ώστε ένα αντικείμενο να γίνεται αντιληπτό εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η ηλικία του παρατηρητή, η θάμβωση κ.α. Το ελάχιστο ποσό αντίθεσης που απαιτείται ονομάζεται κατώφλι αντίθεσης (threshold contrast) και

βασίζεται στην ικανότητα διάκρισης ενός αντικειμένου τουλάχιστον τις μισές φορές παρατήρησης.

Ένας επιπλέον παράγοντας που καθορίζει την αντίθεση είναι και η διαφορά του χρώματος ενός αντικειμένου με το περιβάλλον του. Βέβαια, η επίδραση του χρώματος εξαρτάται τόσο από το χρώμα του αντικειμένου όσο και από την ποιότητα απόδοσης (CRI) των χρωμάτων του συστήματος φωτισμού.

1.5.8 Θάμβωση (Glare) και Κατώφλι προσαύξεσης (TI):

Η θάμβωση, σύμφωνα με την IESNA (Illuminating Engineering Society of North America) είναι «η αίσθηση που προκαλείται από φωτεινές πηγές μέσα στο οπτικό πεδίο του ανθρώπου, για την οποία ο οφθαλμός δεν είναι προσαρμοσμένος και προκαλείται δυσφορία, ενόχληση ή απώλεια της δυνατότητας της όρασης». Οι περιορισμοί σχετικά με τη θάμβωση στο φωτισμό σηράγγων θα παρουσιαστούν σε επόμενο κεφάλαιο.

Ο δείκτης TI (Threshold Increment) χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της θάμβωσης. Όταν ένα αντικείμενο είναι οριακά ορατό χωρίς θάμβωση, τότε παύει να είναι ορατό όταν παρουσιαστεί θάμβωση. Ο δείκτης αυτός εκφράζει το ποσοστό που πρέπει να αυξηθεί η αντίθεση ώστε το αντικείμενο να είναι ορατό με πιθανότητα 50%.

Κεφάλαιο 2: Φωτισμός οδικών σήραγγων - Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1 Σκοπός του φωτισμού σήραγγων

Η κύρια μέριμνα κατά το φωτισμό μιας σήραγγας είναι να εξασφαλιστεί στον οδηγό, τόσο κατά τη διάρκεια της μέρας, όσο και κατά τη διάρκεια της νύχτας, η ίδια αίσθηση οδικής ασφάλειας και άνεσης που διαθέτει σε έναν ανοιχτό δρόμο.

Προκειμένου να πετύχουμε αυτό το αποτέλεσμα, κάθε οδηγός θα πρέπει να διαθέτει ικανοποιητική πληροφόρηση σχετικά με: α) την κατάσταση του οδοστρώματος μπροστά του, β) την ύπαρξη τυχών εμποδίων στο οδόστρωμα γ) την παρουσία και την οδική συμπεριφορά των άλλων οδηγών και δ) την οδοσήμανση.

2.2 Απαιτήσεις του φωτισμού σήραγγων

Το πρόβλημα του φωτισμού μιας σήραγγας διαχωρίζεται σε δύο υποπροβλήματα: στο φωτισμό κατά τη διάρκεια της ημέρας και στο φωτισμό κατά τη διάρκεια της νύχτας.

Κατά τη διάρκεια της νύχτας, η απαίτηση είναι να διατηρηθεί το επίπεδο φωτισμού ίδιο με αυτό του δρόμου στο εξωτερικό της σήραγγας [6].

Κατά τη διάρκεια της μέρας, η πιθανότητα ατυχήματος κατά την είσοδο σε μία σήραγγα είναι αυξημένη, λόγω των διαφορετικών συνθηκών φωτισμού που επικρατούν στο εσωτερικό και στο εξωτερικό της σήραγγας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το ανθρώπινο μάτι χρειάζεται κάποιο χρονικό διάστημα προκειμένου να προσαρμοστεί στα διαφορετικά επίπεδα φωτισμού. Είναι, λοιπόν, αναγκαίο να δημιουργηθούν οι κατάλληλες συνθήκες στο εσωτερικό της σήραγγας, ώστε η όραση του οδηγού να προσαρμόζεται ομαλά κατά την είσοδο και τη διέλευση από τη σήραγγα.

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη που εξετάζονται ώστε να εξασφαλιστεί η ομαλή οπτική προσαρμογή κατά τη διάβαση της σήραγγας, είναι τα ακόλουθα [7]:

- τα επίπεδα λαμπρότητας του δρόμου και η ομοιομορφία τους,
- τα επίπεδα έντασης φωτισμού του δρόμου και η ομοιομορφία τους,
- τα επίπεδα λαμπρότητας των τοίχων σε ύψος έως 2m πάνω από την επιφάνεια του δρόμου,
- ο περιορισμός της θάμβωση
- ο περιορισμός της φωτεινής πάλμωσης (flicker) και
- η οπτική καθοδήγηση
- Οι απαιτήσεις που υπάρχουν γύρω από τα παραπάνω χαρακτηριστικά μεγέθη θα παρουσιαστούν αναλυτικά στη συνέχεια του κεφαλαίου.

2.3 Ζώνες φωτισμού σήραγγων

- Ζώνης Προσέγγισης (Access Zone):

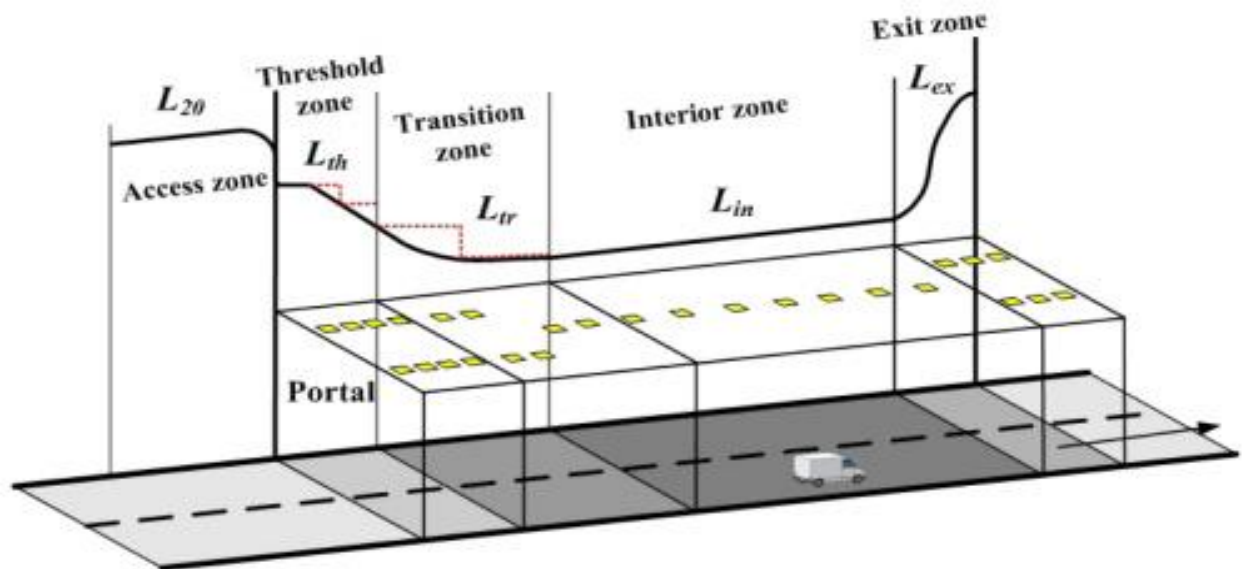
Πρόκειται για το τμήμα του δρόμου που βρίσκεται ακριβώς έξω από την είσοδο της σήραγγας, από το οποίο ο οδηγός πρέπει να είναι σε θέση να διακρίνει τι υπάρχει μέσα στη σήραγγα. Η ζώνη προσέγγισης εκτείνεται από την απόσταση ασφαλούς πέδησης από την είσοδο της σήραγγας έως την είσοδο της σήραγγας. Οι μετρήσεις για τη μέθοδο L_{20} πραγματοποιούνται στην αρχή της ζώνης προσέγγισης.

- Ζώνη Κατωφλίου (Threshold Zone):

Είναι η πρώτη ζώνη εντός της σήραγγας. Ξεκινάει στην αρχή της σήραγγας και έχει μήκος ίσο με την απόσταση ασφαλούς πέδησης [8].

- Μεταβατική Ζώνη (Transition Zone):

Πρόκειται για το τμήμα της σήραγγας που βρίσκεται μεταξύ της ζώνης κατωφλίου και της εσωτερικής ζώνης. Στο τμήμα αυτό, ο φωτισμός της σήραγγας μειώνεται από το επίπεδο της ζώνης κατωφλίου έως το επίπεδο της εσωτερικής ζώνης.



Εικόνα 2.1: Οι ζώνες μια σήραγγας και οι απαιτήσεις για τα επίπεδα λαμπρότητας (ποιοτικά)

- Εσωτερική Ζώνη (Interior Zone):

Πρόκειται για το τμήμα της σήραγγας το οποίο ξεκινάει στο τέλος της μεταβατικής ζώνης και εκτείνεται έως την αρχή της ζώνης εξόδου.

- Ζώνη Εξόδου (Exit Zone):

Είναι το τελευταίο τμήμα της σήραγγας. Αποτελεί το κομμάτι της σήραγγας στο οποίο, κατά τη διάρκεια της ημέρας, η όραση του οδηγού επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τη φωτεινότητα που παρατηρείται στο εξωτερικό της σήραγγας. Εκτείνεται από το τέλος της εσωτερικής ζώνης έως το τέλος της σήραγγας.

- Ζώνη Χωρισμού (Parting Zone):

Αποτελεί το πρώτο τμήμα του δρόμου που βρίσκεται ακριβώς μετά το τέλος της σήραγγας. Αν και δεν αποτελεί τμήμα της σήραγγας, επηρεάζεται από το φωτισμό της σήραγγας. Η ζώνη αυτή έχει μήκος ίσο με δύο φορές την απόσταση ασφαλούς πέδησης. Μήκος μεγαλύτερο των 200 μέτρων στη ζώνη αυτή είναι περιττό.

2.4 Ορισμοί βασικών μεγεθών στη μελέτη φωτισμού σηράγγων

Παρακάτω παρουσιάζονται οι ορισμοί καθώς και οι συντομογραφίες βασικών μεγεθών που χρησιμοποιούνται κατά τη μελέτη του φωτισμού σηράγγων.

- Απόσταση Ασφαλούς Πέδησης (Safe Stopping Distance): Πρόκειται για την απόσταση που διανύει ένα όχημα, από τη στιγμή που ο οδηγός αντιλαμβάνεται ένα εμπόδιο μέχρι το όχημα να ακινητοποιηθεί. Από εδώ και πέρα, όπου αναφέρεται Απόσταση Πέδησης (SD) θα εννοείται η Απόσταση Ασφαλούς Πέδησης.
- Τυπικό αντικείμενο: Πρόκειται για ένα αντικείμενο διαστάσεων 0.2m x 0.2m (ύψος και πλάτος) με συντελεστή ανάκλασης 0.2. Ένα τέτοιο αντικείμενο πρέπει να είναι ορατό στην επιφάνεια του δρόμου από έναν οδηγό σε απόσταση ίση με την απόσταση πέδησης.
- Κυκλοφοριακός φόρτος: Ο αριθμός των οχημάτων που περνούν από ένα συγκεκριμένο σημείο σε μια δεδομένη χρονική στιγμή και κατεύθυνση. Για το φωτισμό και το σχεδιασμό σηράγγων, ενδιαφερόμαστε για την κίνηση ώρας αιχμής σε οχήματα ανά λωρίδα ανά ώρα.
- Λαμπρότητα της ζώνης κατωφλίου L_{th} : Η μέση λαμπρότητα της επιφάνειας του δρόμου σε μία εγκάρσια λωρίδα, σε μία δεδομένη θέση της ζώνης κατωφλίου της σήραγγας.
- Λαμπρότητα της μεταβατικής ζώνης L_{tr} : Η μέση λαμπρότητα της επιφάνειας του δρόμου σε μία εγκάρσια λωρίδα, σε μία δεδομένη θέση της μεταβατικής ζώνης της σήραγγας.
- Λαμπρότητα της εσωτερικής ζώνης L_{int} : Η μέση λαμπρότητα της επιφάνειας του δρόμου σε μία εγκάρσια λωρίδα, σε μία δεδομένη θέση της εσωτερικής ζώνης της σήραγγας.
- Λαμπρότητα της ζώνης προσέγγισης L_{20} : Η μέγιστη τιμή της μέσης λαμπρότητας που παρατηρείται στο εξωτερικό της σήραγγας σε κωνικό οπτικό πεδίο με υποκείμενη γωνία 20°, της οποίας η κορυφή βρίσκεται σε απόσταση ίση με την απόσταση πέδησης, σε θέση τυπικού παρατηρητή.
- Κάθετη ένταση φωτισμού (vertical illuminance E_{v+}): Πρόκειται για την ένταση φωτισμού σε μία δεδομένη θέση, σε ύψος συνήθως 0,1m πάνω από την επιφάνεια του δρόμου, σε κατακόρυφο επίπεδο προς την κατεύθυνση της ερχόμενης κίνησης. Το ύψος 0,1m από την επιφάνεια του δρόμου αντιπροσωπεύει το κέντρο τυπικού αντικείμενου.

- Συντελεστής αντίθεσης (contrast revealing coefficient q_c): Είναι ο λόγος της λαμπρότητας της επιφάνειας του δρόμου προς την ένταση φωτισμού E_v στο σημείο αυτό. Ισχύει ότι:
 $q_c = \frac{L}{E_v}$ και η μονάδα μέτρησης είναι $\frac{cd}{m^2 lx}$.
- Λόγος λαμπρότητας ζώνης κατωφλίου k : Είναι ο λόγος ανάμεσα στη λαμπρότητα της ζώνης κατωφλίου L_{th} και στη λαμπρότητα της ζώνης προσέγγισης L_{20} . Ισχύει ότι:
 $k = \frac{L_{th}}{L_{20}}$.
- Ολική ομοιομορφία (της λαμπρότητας της επιφάνειας του δρόμου και των τοίχων) U_o : ο λόγος της χαμηλότερης προς τη μέση λαμπρότητα σε ένα πρόγραμμα αναφοράς.
- Διαμήκης ομοιομορφία (της λαμπρότητας επιφάνειας δρόμου) U_l : ο λόγος της χαμηλότερης προς την υψηλότερη λαμπρότητα επιφάνειας δρόμου που συναντάται κατά μήκος μιας γραμμής στο κέντρο της κάθε λωρίδας που έχει ο δρόμος.

2.5 Απόσταση ασφαλούς πέδησης

Η απόσταση πέδησης είναι η απόσταση που διανύει ένα όχημα από τη στιγμή που ο οδηγός αντιλαμβάνεται ένα εμπόδιο στο δρόμο, έως τη στιγμή που το όχημα ακινητοποιείται. Η απόσταση πέδησης χωρίζεται σε δύο τμήματα: την απόσταση που διανύει το όχημα κατά το χρόνο αντίδρασης του οδηγού (x_o) και την απόσταση που διανύει το όχημα κατά το φρενάρισμα έως ότου ακινητοποιηθεί (x).

Για τον υπολογισμό του x_o , είναι γνωστό ότι:

$$x_o = u \cdot t_o \quad (2.1)$$

Όπου:

u : η ταχύτητα του οχήματος και

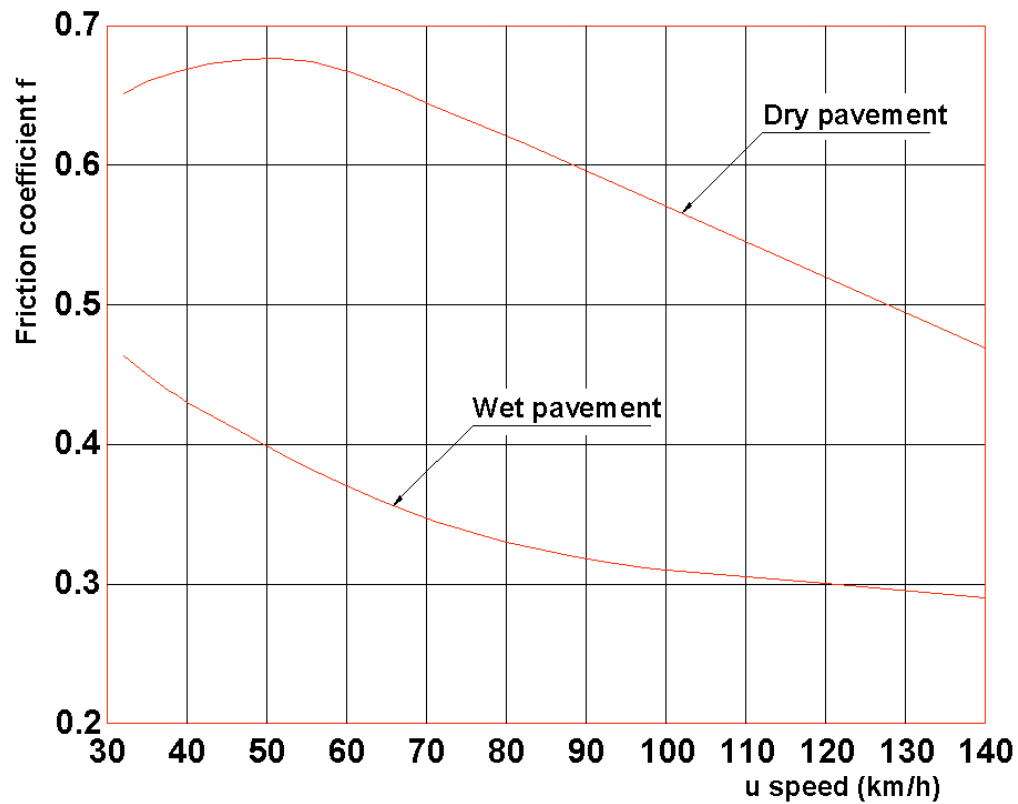
t_o : ο χρόνος αντίδρασης του οδηγού.

Ο χρόνος αντίδρασης του οδηγού διαφέρει από άνθρωπο σε άνθρωπο και κυμαίνεται από 0.75 έως 2 δευτερόλεπτα. Σύμφωνα με το πρότυπο CIE 88:2004, μπορεί να θεωρηθεί ότι $t_o=1$.

Ο υπολογισμός του x γίνεται με χρήση του δεύτερου νόμου του Νεύτωνα μέσα από τη σχέση:

$$-(f \cdot m \cdot g \cdot \cos\beta \pm m \cdot g \cdot \sin\beta) \cdot dt = m \cdot du \quad (2.2)$$

Για τον υπολογισμό του συντελεστή τριβής f , χρησιμοποιούμε το παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 2.1: Η τιμή του συντελεστή τριβής συναρτήσει της ταχύτητας και της κατάστασης του οδοστρώματος (στεγνό ή βρεγμένο)

Η σχέση η οποία προκύπτει μετά από πράξεις είναι η ακόλουθη:

$$x = \frac{u^2}{2 \cdot g \cdot (f \pm s)} \quad (2.3)$$

Όπου:

f: ο συντελεστής τριβής μεταξύ οδοστρώματος και οχήματος

g: η επιτάχυνση της βαρύτητας

β: η κλίση του οδοστρώματος

υ: η ταχύτητα το οχήματος

m: η μάζα του οχήματος

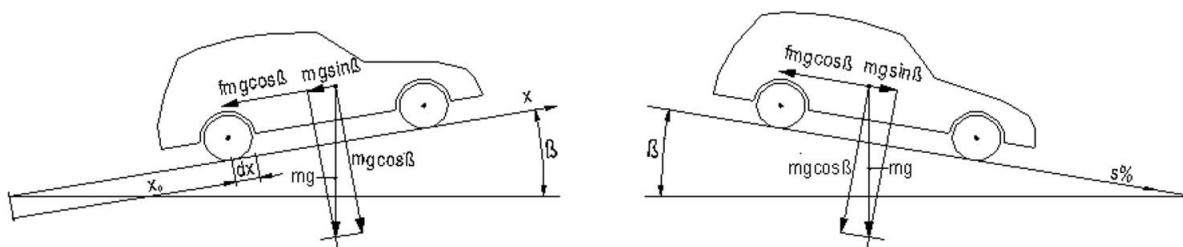
s: η εφαπτομένη της β

Συνεπώς, η απόσταση πέδησης δίνεται από τον τύπο:

$$SD = x_0 + x = u \cdot t_0 + \frac{u^2}{2 \cdot g \cdot (f \pm s)} \Leftrightarrow$$

$$SD = u \cdot t_0 + \frac{u^2}{2 \cdot g \cdot (f \pm s)} \quad (2.4)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις, χρησιμοποιείται το ‘+’ όταν το όχημα ανεβαίνει την πλαγιά, ‘-’ όταν κατεβαίνει, ενώ ο όρος μηδενίζεται όταν το όχημα κινείται σε δρόμο με μηδενική κλίση.



Εικόνα 2.2: Οι συνιστώσες των δυνάμεων βάσει της κλίσης του οδοστρώματος

2.6 Διαχωρισμός σε σήραγγες μεγάλου και μικρού μήκους

Οι απαιτήσεις στο φωτισμό των σηράγγων μεγάλου και μικρού μήκους διαφέρουν ανάλογα με το βαθμό ορατότητας του οδηγού δια μέσου της σήραγγας, όπως φαίνεται από ένα σημείο που απέχει από το στόμιο της σήραγγας απόσταση ίση με την απόσταση πέδησης. Η ικανότητα να βλέπει κάποιος μέσα από τη σήραγγα εξαρτάται κυρίως από το μήκος της σήραγγας, αλλά και από άλλες σχεδιαστικές παραμέτρους (πλάτος, ύψος οριζόντιες ή κάθετες καμπυλώσεις κτλ).

Σήραγγες μικρού μήκους συνήθως συναντώνται όταν ένας δρόμος περνάει κάτω από έναν άλλο δρόμο ή από γραμμή τρένου ή όταν ένα μικρό κομμάτι του δρόμου καλύπτεται σε αστικές περιοχές. Σήραγγες με μήκος μικρότερο των 25m δε χρειάζονται φωτισμό κατά τη διάρκεια της ημέρας. Σήραγγες με μήκος μεγαλύτερο των 200m πάντα χρειάζονται κάποιο είδος τεχνητού φωτισμού, ώστε να αποφεύγονται προβλήματα οπτικής προσαρμογής των οδηγών. Για σήραγγες με μήκος μεταξύ 25m και 200m, η ανάγκη για τεχνητό φωτισμό καθορίζεται από την ακόλουθη μέθοδο.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, κατά το φωτισμό σηράγγων το κύριο ενδιαφέρον είναι η επίτευξη της ομαλής οπτικής μετάβασης, αλλά και ο εντοπισμός ενός εμποδίου σε απόσταση ίση με την απόσταση πέδησης. Συνεπώς η ανάγκη για χρήση ή όχι τεχνητού φωτισμού εξαρτάται από το βαθμό στον οποίο οι λοιποί χρήστες του οδικού δικτύου και τα αντικείμενα που υπάρχουν σε αυτό είναι ορατά από έναν οδηγό ο οποίος βρίσκεται μπροστά από την είσοδο της σήραγγας έναντι του φόντου που εμφανίζεται από την έξοδο της σήραγγας με το φως της ημέρας, σε απόσταση ίση με την απόσταση πέδησης.

Όταν το στόμιο εξόδου καταλαμβάνει ένα μεγάλο μέρος του οπτικού πεδίου που φαίνεται δια μέσου της σήραγγας, τότε άλλοι οδηγοί ή αντικείμενα διακρίνονται ως σκοτεινές φιγούρες μπροστά από ένα φωτεινό φόντο. Από την άλλη μεριά, το τεχνητό φως χρειάζεται όταν η έξοδος είναι μέσα σε ένα σχετικά μεγάλο σκοτεινό πλαίσιο, στο οποίο τα αντικείμενα μπορεί να μη φαίνονται. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν η μικρή σήραγγα είναι σχετικά «μεγάλη» ή όταν η σήραγγα έχει τέτοια καμπύλη, ώστε μόνο ένα μέρος της εξόδου να είναι ορατό ή όταν η έξοδος δεν είναι καθόλου ορατή.

Για να καθοριστεί η ανάγκη για την ύπαρξη τεχνητού φωτισμού κατά τη διάρκεια της ημέρας χρησιμοποιείται ο όρος «όραση απ' άκρη σ' άκρη» (Look Through). Αυτός ο όρος ορίζεται ως ο λόγος ανάμεσα στο ορατό κομμάτι της εισόδου και το ορατό κομμάτι της εξόδου εκφραζόμενος ως ποσοστό. Συμβολίζεται με LTP (Look Through Percentage).

Ο λόγος αυτό βασίζεται:

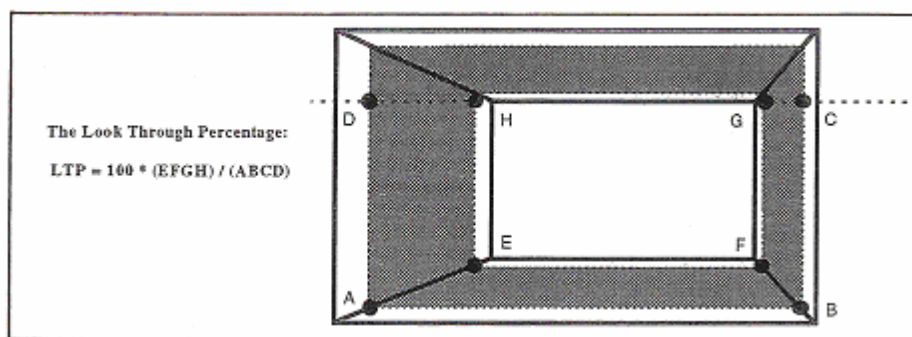
- στις γεωμετρικές διαστάσεις της σήραγγας όπως πλάτος ύψος και μήκος (το μήκος παίζει μεγαλύτερο ρόλο από τις άλλες δύο διαστάσεις),
- στις οριζόντιες και κάθετες καμπύλες της σήραγγας,
- στην απόσταση πέδησης και
- στην επίδραση του ημερήσιου φωτός στην είσοδο και την έξοδο της σήραγγας.

2.7 Η μέθοδος Look Through Percentage – LTP

Ο υπολογισμός της τιμής LTP γίνεται με χρήση του ακόλουθου τύπου:

$$LTP = 100 * \frac{(EFGH)}{(ABCD)} \quad (2.5)$$

όπου με παρένθεση ορίζεται το εμβαδόν της επιφάνειας και με γράμματα οι κορυφές της επιφάνειας αυτής.



Εικόνα 2.3: Σκίτσο πρόσοψης της σήραγγας για τον υπολογισμό του LTP

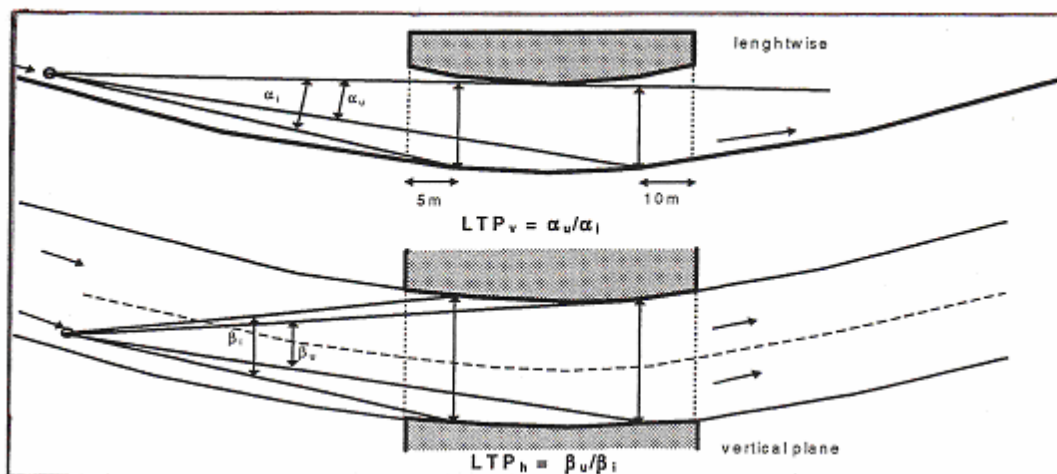
Προκειμένου να σχεδιαστεί το παραπάνω σχέδιο, πρέπει το σημείο αναφοράς να βρίσκεται σε απόσταση ίση με την απόσταση πέδησης από την επηρεαζόμενη από το φως της ημέρας εμφανή είσοδο της σήραγγας, στο κέντρο της λωρίδας κυκλοφορίας και σε ύψος 1.2m από την επιφάνεια του δρόμου.

Συνοπτικά αναφέρεται ότι η οροφή δε λαμβάνεται υπόψη καθώς δεν αποτελεί φόντο που κρύβει οχήματα ή άλλα εμπόδια. Επίσης, για τον υπολογισμό των δύο επιφανειών επιλέγεται η φαινόμενη πύλη εισόδου, η οποία βρίσκεται περίπου 5m εντός της σήραγγας και η φαινόμενη πύλη εξόδου, η οποία βρίσκεται 10m εντός της σήραγγας.

Επειδή οι δύο επιφάνειες είναι ορθογώνια παραλληλόγραμμα, η σχέση (2.5) μπορεί να πάρει και την ακόλουθη μορφή:

$$LTP = 100 * \frac{(EFGH)}{(ABCD)} = 100 * \frac{(EF)}{(AB)} * \frac{(FG)}{(BC)} = 100 * \frac{b_u * a_u}{b_i * a_i} \quad (2.6)$$

Η χρήση της εξίσωσης (2.6) φαίνεται καλύτερα στην παρακάτω εικόνα, καθώς φαίνεται πως αντιμετωπίζουμε περιπτώσεις με οριζόντια ή κάθετη κύρτωση της σήραγγας.



Εικόνα 2.4: Πλάγια και πανοραμική όψη μιας σήραγγας με οριζόντια και κάθετη κύρτωση.

Βάσει ερευνών γύρω από το LTP μπορούν να τυποποιηθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- αν $LTP < 20\%$, τότε χρειάζεται πάντα τεχνητός φωτισμός την ημέρα,
- αν $LTP > 50\%$, τότε δε χρειάζεται τεχνητός φωτισμός την ημέρα,
- αν $20\% < LTP < 50\%$, τότε ίσως χρειάζεται τεχνητός φωτισμός την ημέρα.

Για την τρίτη περίπτωση χρειάζεται επιπλέον διερεύνηση, επειδή όμως το αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας είναι σήραγγα μεγάλου μήκους, δε θα γίνει περεταίρω αναφορά.

2.8 Φωτισμός Ημέρας

2.8.1 Μέθοδος Αντιληπτής Αντίθεσης (Perceived Contrast Method)

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στο φωτεινό πέπλο που δημιουργείται από διάφορους παράγοντες (ατμόσφαιρα, παρμπρίζ αυτοκινήτου, άλλες πηγές) και την αντίθεση που δημιουργείται λόγω αυτού μεταξύ της αντιληπτής και της πραγματικής λαμπρότητας. Η συγκεκριμένη μέθοδος δεν αναλύεται περεταίρω, διότι δεν χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία.

2.8.2 Μέθοδος L_{20}

Μεθοδολογία

Για το υπολογισμό του L_{20} , είναι απαραίτητη μια φωτογραφία του στομίου της σήραγγας σε απόσταση ίση με την απόσταση πέδησης από τη θέση τυπικού παρατηρητή (στο κέντρο της κεντρικής λωρίδας και σε ύψος 1,5m). Σε περίπτωση που η σήραγγα είναι υπό κατασκευή, χρησιμοποιείται μοντέλο ή τρισδιάστατη μορφή ή φωτογραφία του στομίου, εφόσον το

περίγραμμα του τοπίου σε σχέση με του ουρανό δεν μεταβάλλεται. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, οι εκτιμήσεις θα γίνουν με βάση φωτογραφίες και υπολογίζονται με βάση την παρακάτω σχέση:

$$L_{20} = \gamma L_c + \rho L_R + \varepsilon L_E + \tau L_{th} \quad \text{με: } \gamma + \rho + \varepsilon + \tau = 1 \quad (2.7)$$

όπου:

L_c : η λαμπρότητα του ουράνιου θόλου,

γ : το ποσοστό κάλυψης του ουράνιου θόλου,

L_R : η λαμπρότητα της οδού, ρ το ποσοστό κάλυψης της οδού,

L_E : η λαμπρότητα του περιβάλλοντος χώρου,

ε : το ποσοστό κάλυψης του περιβάλλοντος χώρου,

L_{th} : η λαμπρότητα κατωφλίου και

τ : το ποσοστό κάλυψης του στομίου της σήραγγας.

Όλα τα μεγέθη αναφέρονται στο οπτικό πεδίου των 20° σε απόσταση ίση με την απόσταση πέδησης από το στόμιο της σήραγγας.

Στον παραπάνω τύπο, το ζητούμενο είναι η λαμπρότητα κατωφλίου. Όταν οι τιμές της απόστασης πέδησης είναι μεγαλύτερες των 100m, η τιμή του τ είναι μικρή ($\tau < 10\%$) και η L_{th} είναι αρκετά χαμηλότερη σε σύγκριση με τις υπόλοιπες τιμές λαμπρότητας του L_{20} . Συνεπώς, η συνεισφορά του όρου τL_{th} , μπορεί να παραληφθεί. Τότε η εξίσωση (2.7) λαμβάνει τη μορφή:

$$L_{20} = \gamma L_c + \rho L_R + \varepsilon L_E \quad \text{με: } \gamma + \rho + \varepsilon < 1 \quad (2.8)$$

Η τιμή λαμπρότητας L_{20} που υπολογίζεται με την παραπάνω μέθοδο είναι η μέγιστη δυνατή. Όμως, υπάρχει ο κίνδυνος να υπερεκτιμηθεί, καθώς σε ορισμένες σήραγγες, οι τιμές των L_c , L_R και L_E (λαμπρότητες ουράνιου θόλου, οδού και περιβάλλοντος χώρου) μπορεί να μη μεγιστοποιούνται την ίδια χρονική στιγμή. Επιπλέον, δεν υπάρχει γνώση για τη συχνότητα εμφάνισης αυτής της τιμής στη διάρκεια του έτους.

Οι τιμές των παραμέτρων L_c , L_R και L_E παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 2.1: Τιμές λαμπρότητας για διάφορες επιφάνειες [7].

Driving direction	L _c (sky) kcd/m ²	L _R (road) kcd/m ²	L _E (environment) kcd/m ²			
			Rock	Buildings	Snow	Vegetation
N	8	3	3	8	15 (V, H)	2
E-W	12	4	2	6	10 (V)	2
					15 (H)	
S	16	5	1	4	5 (V)	2
					15 (H)	
V stands for vertical and H for horizontal						

Υπολογισμός Συντελεστή k

Ο συντελεστής k είναι ο λόγος μεταξύ της λαμπρότητας της ζώνης κατωφλίου L_{th} και της υπολογιζόμενης λαμπρότητας L_{20} , όπως προκύπτει από τον παρακάτω τύπο:

$$k = \frac{L_{th}}{L_{20}} \quad (2.9)$$

Η τιμή του συντελεστή k προκύπτει με βάση την ταχύτητα διέλευσης των οχημάτων από τη σήραγγα σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2.2: Τιμές συντελεστή k σε διάφορες ταχύτητες διέλευσης [7].

Ταχύτητα (km/h)	k = L_{th}/L_{20}
≤ 60	0.05
80	0.06
120	0.10

Προσδιορισμός επιπέδου λαμπρότητας εσωτερικής ζώνης

Για να προσδιοριστεί η τιμή της λαμπρότητας στο εσωτερικό της σήραγγας, λαμβάνονται υπόψιν δύο παράμετροι: α) Η απόσταση πέδησης των οχημάτων και β) ο κυκλοφοριακός φόρτος εντός της σήραγγας.

Προκειμένου να υπολογιστεί ο κυκλοφοριακός φόρτος, πρέπει να ληφθεί κατά νου τόσο η κατεύθυνση της κυκλοφορίας, όσο και ο αριθμός των οχημάτων που διέρχονται από ένα συγκεκριμένο τμήμα του δρόμου σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Επιλέγεται ο υπολογισμός των οχημάτων που διέρχονται ανά λωρίδα του δρόμου σε χρονικό διάστημα μίας ώρας για να υπολογιστεί ο κυκλοφοριακός φόρτος. Ο χαρακτηρισμός με βάση αυτές τις δύο προαναφερθέντες μεταβλητές παρουσιάζεται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 2.3: Κατηγορίες του κυκλοφοριακού φόρτου σε οχήματα ανά ώρα και λωρίδα [7].

Κυκλοφοριακός φόρτος	Σήραγγα μονής κατεύθυνσης (οχήματα/ώρα/λωρίδα)	Σήραγγα διπλής κατεύθυνσης (οχήματα/ώρα/λωρίδα)
Υψηλός	>1,500	>400
Μέσος	500 – 1,500	100-400
Χαμηλός	<500	<100

Τέλος, υπολογίζεται η απαίτηση για την λαμπρότητα εσωτερικής ζώνης βάσει του κυκλοφοριακού φόρτου και της απόστασης πέδησης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2.4: Λαμπρότητα εσωτερικής ζώνης βάσει της μεθόδου L_{20} [7].

Κυκλοφοριακός φόρτος / Απόσταση πέδησης (m)	Χαμηλός	Μέσος	Υψηλός
160	5 cd/m ²	10 cd/m ²	15 cd/m ²
100	2 cd/m ²	4 cd/m ²	6 cd/m ²
60	1 cd/m ²	2 cd/m ²	3 cd/m ²

2.8.3 Σταθμισμένη Μέθοδος L_{20}

Ομοιότητες με τη μέθοδο L_{20}

Η σταθμισμένη μέθοδος L_{20} αποτελεί παραλλαγή της μεθόδου L_{20} . Συνεπώς, παρατηρούνται αρκετές ομοιότητες μεταξύ των δύο μεθόδων. Οι δύο μέθοδοι υπολογίζουν την τιμή της λαμπρότητας L_{20} και τον κυκλοφοριακό φόρτο.

Διαφορές με τη μέθοδο L_{20}

Η σταθμισμένη μέθοδος, σε αντίθεση με την απλή L_{20} , βασίζεται σε αρκετούς υπολογισμούς στην κατηγοριοποίηση της κλάσης της σήραγγας συναρτήσει του κυκλοφοριακού φόρτου και του είδους των χρηστών της σήραγγας. Οι υπολογισμοί αυτοί αφορούν το συντελεστή k και την λαμπρότητα εσωτερικής ζώνης.

Υπολογισμός κλάσης σήραγγας

Για τον υπολογισμό του κυκλοφοριακού φόρτου ακολουθείται η ίδια διαδικασία που χρησιμοποιείται και στη μέθοδο L_{20} , όπως αυτή παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.3. Οι σήραγγες μπορούν να χωριστούν σε δυο μεγαλύτερες κατηγορίες σύμφωνα με τον τύπο των χρηστών:

- Μηχανοκίνητοι χρήστες μόνο (A)
- Μεικτή χρήση συμπεριλαμβάνοντας πεζούς και ποδηλάτες (M)

Η κλάση καθορίζεται όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2.5: Καθορισμός των κλάσεων των σιράγγων σύμφωνα με τον κυκλοφοριακό φόρτο και τον τύπο των χρηστών [7].

Κυκλοφοριακός φόρτος	Υψηλός	Υψηλός	Μέτριος	Μέτριος	Χαμηλός	Χαμηλός
Χρήστες σήραγγας	M	A	M	A	M	A
Κλάση σήραγγας	4	3	3	2	2	1

Προσδιορισμός συντελεστή k και λαμπρότητας εσωτερικής ζώνης

Ο συντελεστής k καθώς και η λαμπρότητα εσωτερικής ζώνης της σήραγγας υπολογίζονται με βάση την κλάση της σήραγγας και την απόσταση πέδησης.

Πίνακας 2.6: Αναθεωρημένες τιμές k ($k=L_{th}/L_{20}$) [7].

Απόσταση πέδησης(m) / Κλάση σήραγγας	60	100	160
4	0.05	0.06	0.10
3	0.04	0.05	0.07
2	0.03	0.04	0.05
1	Χωρίς απαίτηση (μόνο φωτισμός προσανατολισμού)		

Από τον πίνακα 2.6 προκύπτει η τιμή του συντελεστή $k = L_{th}/L_{20}$.

Όσο αφορά την λαμπρότητα εσωτερική ζώνης, υπολογίζεται συναρτήσει την κλάση και την απόσταση πέδησης, όπως φαίνεται παρακάτω:

Πίνακας 2.7: Αναθεωρημένες τιμές λαμπρότητας της εσωτερικής ζώνης της σήραγγας [7].

Απόσταση πέδησης(m) / Κλάση σήραγγας	60	100	160
4	3	6	10
3	2	4	6
2	1.5	2	4
1	Χωρίς απαίτηση	0.5	1.5

2.8.4 Επιλογή μεθόδου και πραγματοποίηση υπολογισμών

Επιλογή μεθόδου

Η μέθοδος που επιλέγεται είναι η σταθμισμένη μέθοδος L_{20} . Ο λόγος που επιλέγεται αυτή η μέθοδος είναι η ύπαρξη δεδομένων σχετικά με την κυκλοφορία στις σήραγγες και δεν υπάρχει ανάγκη για υπερκάλυψη των αναγκών, καθώς τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από τη μέθοδο αυτή θα είναι επαρκή για την κάλυψη των αναγκών φωτισμού.

Υπολογισμός L_{20} στις σήραγγες της Αττικής Οδού

Παρακάτω παρουσιάζεται αναλυτικά ο υπολογισμός της λαμπρότητας και για τις δύο σήραγγες της μαύρης ώρας με βάση φωτογραφία του στομίου της σήραγγας.

Περίπτωση 1: Σήραγγα Μαύρης Ώρας (Α) Αττικής Οδού Α.Ε.

Από τη σχέση (2.8) προκύπτει ότι:

$$L_{20} = \gamma L_c + \rho L_R + \varepsilon L_E$$

Η κατεύθυνση οδήγησης της σήραγγας είναι ανατολικά, όποτε:

$L_c = 12$, $L_R = 4$ και $L_E = 2$ (kcd/m²)

$$L_{20} = 0.19 \cdot 2 + 0.4 \cdot 4 + 0.38 \cdot 2 = 4.64 \text{ kcd/m}^2 = 4,640 \text{ cd/m}^2$$



Εικόνα 2.5: Σήραγγα Μαύρης Ώρας (Α) Αττικής Οδού Α.Ε. σε απόσταση πέδησης για υπολογισμό λαμπρότητας L_{20} [9].

Περίπτωση 2: Σήραγγα Μαύρης Ώρας (Ε) Αττικής Οδού Α.Ε.

Από τη σχέση (2.8) προκύπτει ότι:

$$L_{20} = \gamma L_c + \rho L_R + \varepsilon L_E$$

Η κατεύθυνση οδήγησης της σήραγγας είναι δυτικά, όποτε:

$L_c = 12$, $L_R = 4$ και $L_E = 2$ (kcd/m²)

$$L_{20} = 0.19 \cdot 2 + 0.41 \cdot 4 + 0.37 \cdot 2 = 4.66 \text{ kcd/m}^2 = 4,660 \text{ cd/m}^2$$



Εικόνα 2.6: Σήραγγα Μαύρης Ώρας (Ε) Αττικής Οδού Α.Ε. σε απόσταση πέδησης για υπολογισμό λαμπρότητας L_{20} [9].

Υπολογισμός συντελεστή k και λαμπρότητας εσωτερικής ζώνης

Οι υπολογισμοί για το συντελεστή k και τη λαμπρότητα γίνονται με βάση τους πίνακες 2.3, 2.5, 2.6 και 2.7. Τα διαθέσιμα δεδομένα σχετικά με τον κυκλοφοριακό φόρτο υποδεικνύουν πως σε καμία από τις δύο περιπτώσεις ο μέγιστος αριθμός οχημάτων ανά ώρα ανά λωρίδα δεν υπερβαίνει τον αριθμό 400. Συνεπώς η κυκλοφορία και στις δύο σήραγγες της Αττικής Οδού εντάσσεται στην κατηγορία της «χαμηλής» κυκλοφορίας.

Έπειτα, υπολογίζεται η κλάση των σιράγγων. Οι χρήστες και στις δύο σήραγγες είναι μηχανοκίνητοι χρήστε μόνο (Α) και με δεδομένη τον χαμηλό κυκλοφοριακό φόρτο, προκύπτει πως και οι δύο σήραγγες είναι κλάσης 1.

Στην συνέχεια, υπολογίζονται οι τιμές της εσωτερικής λαμπρότητας και του συντελεστή k . Με δεδομένη την κοινή απόσταση πέδησης και στις δύο σήραγγες (160m), προκύπτει η κοινή τιμή λαμπρότητας εσωτερικής ζώνης $L_{int} = 1.5 \text{ cd/m}^2$ και ο κοινός συντελεστής $k = 0.05$.

Τέλος, για τον υπολογισμό της λαμπρότητας κατωφλίου κάθε σήραγγας αρκεί να πολλαπλασιαστεί η τιμή της λαμπρότητας L_{20} με το συντελεστή k κάθε σήραγγας.

- Περίπτωση 1: Σήραγγα Μαύρης Ώρας (Α) Αττικής Οδού Α.Ε.

$$L_{th} = k * L_{20} = 0.05 * 4,640 \text{ cd/m}^2 = 232 \text{ cd/m}^2$$

- Περίπτωση 2: Σήραγγα Μαύρης Ώρας (Ε) Αττικής Οδού Α.Ε.

$$L_{th} = k * L_{20} = 0.05 * 4,660 \text{ cd/m}^2 = 233 \text{ cd/m}^2$$

2.8.5 Απαιτήσεις Φωτισμού στι ζώνες της σήραγγας

Ζώνη Κατωφλίου

Το μήκος της ζώνης κατωφλίου ισούται με την απόσταση πέδησης της σήραγγας. Στο πρώτο μισό της ζώνης κατωφλίου, απαιτείται η μέση λαμπρότητα να έχει τιμή ίση με L_{th} . Στο δεύτερο μισό της ζώνης κατωφλίου, η τιμή της λαμπρότητας μειώνεται γραμμικά από L_{th} μέχρι $0.4 \cdot L_{th}$ στο τέλος της ζώνης κατωφλίου. Η μείωση της λαμπρότητας μπορεί να γίνει και βηματικά, με την απαίτηση η πραγματική λαμπρότητα της σήραγγας να είναι μεγαλύτερη ή ίσης της καμπύλης σε κάθε σημείο της ζώνης. Ισοδύναμα, καμία τμηματική μείωση δεν πρέπει να ρίχνει την πραγματική λαμπρότητα κάτω από την καμπύλη που φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.

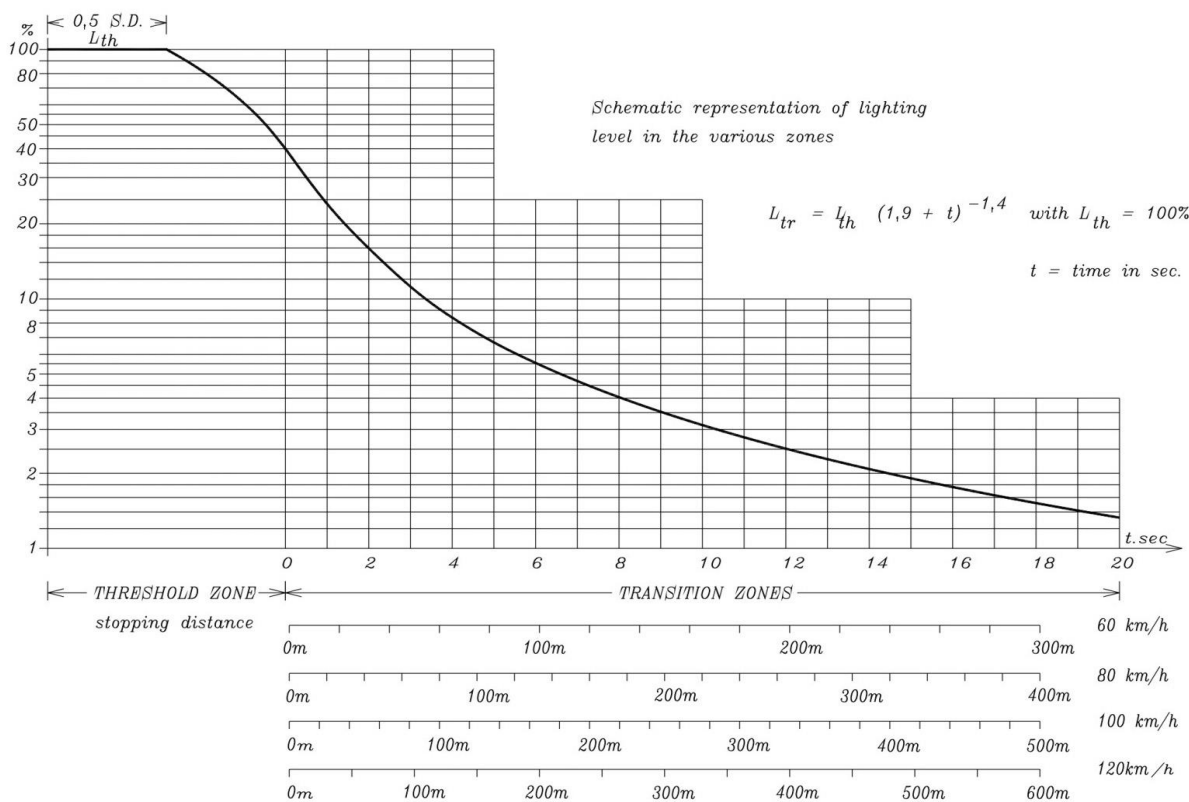
Μεταβατική Ζώνη

Η εξίσωση που περιγράφει την λαμπρότητα της μεταβατικής ζώνης είναι η ακόλουθη:

$$L_{tr} = L_{th} (1.9+t)^{-1.4} \quad (2.10) \text{ όπου:}$$

L_{th} : η λαμπρότητα στην αρχή της ζώνης κατωφλίου (δηλαδή στο 100%),

t : ο χρόνος, θεωρώντας $t = 0$ τη χρονική στιγμή που το όχημα βρίσκεται στο τέλος της ζώνης κατωφλίου.



Διάγραμμα 2.2: Λαμπρότητα στη ζώνη κατωφλίου και στη μεταβατική ζώνη [10].

Από τη μορφή της εξίσωσης (2.10) προκύπτει ότι η μείωση της λαμπρότητας σε αυτή τη ζώνη είναι εκθετική. Όμως, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, είναι δυνατή η μείωση να επιτευχθεί με βήματα εφόσον ακολουθούνται οι τρεις παρακάτω περιορισμοί:

1. Η βηματική μείωση θα πρέπει να έχει τιμή μεγαλύτερη της καμπύλης σε κάθε θέση,
2. ο μέγιστος επιτρεπτός λόγος ανάμεσα στη λαμπρότητα δύο διαδοχικών βημάτων είναι 3, δηλαδή $L_n \leq 3L_{(n+1)}$ και
3. Το τελευταίο βήμα πριν την εσωτερική ζώνη δεν θα πρέπει να έχει μέση λαμπρότητα μεγαλύτερη από αυτή της εσωτερικής ζώνης, πολλαπλασιασμένη επί δύο, δηλαδή $L_{trfinal} \leq 2L_{int}$

Προκειμένου να μην εμφανιστεί το φαινόμενο της μαύρης τρύπας, συνιστάται η αύξηση του μήκους της μεταβατικής ζώνης, έτσι ώστε να υπάρχει μια πιο ομαλή μετάβαση για το μάτι του οδηγού.

Για παρόμοιους λόγους, στην περίπτωση της βηματικής μείωσης, συνιστάται η παράταση της εσωτερικής ζώνης για 1 έως 2 δευτερόλεπτα, για την επίτευξη επιπρόσθετης οδηγικής άνεσης.

Εσωτερική ζώνη

Η λαμπρότητα της εσωτερικής ζώνης λαμβάνει τη χαμηλότερη τιμή συγκριτικά με τη λαμπρότητα στις υπόλοιπες ζώνες. Η τιμή της είναι σταθερή και εξαρτάται από την κλάση της σήραγγας και την απόσταση πέδησης, όπως και ο συντελεστής $k = L_{th}/L_{20}$.

Η μέση λαμπρότητα της επιφάνειας του δρόμου πρέπει να καθορίζεται πάνω στις λωρίδες κυκλοφορίας μέσα στη σήραγγα. Σε κάποιες περιπτώσεις η μέση λαμπρότητα της επιφάνειας του δρόμου μπορεί να είναι μικρότερη στις λωρίδες έκτακτης ανάγκης από ότι στις λωρίδες κυκλοφορίας. Όταν η σήραγγα έχει λωρίδες έκτακτης ανάγκης, για σήραγγες κλάσης 4, η μέση λαμπρότητα της επιφάνειας του δρόμου στις λωρίδες έκτακτης ανάγκης πρέπει να είναι ίση με εκείνη των λωρίδων κυκλοφορίας. Για σήραγγες των κλάσεων 3 και 2, η μέση λαμπρότητα της επιφάνειας του δρόμου στις λωρίδες έκτακτης ανάγκης πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με το 50% της μέσης λαμπρότητας της επιφάνειας του δρόμου των λωρίδων κυκλοφορίας.

Ζώνη εξόδου

Οι απαιτήσεις για το φωτισμό στη ζώνη εξόδου είναι παρόμοιες με αυτές της εσωτερικής ζώνης, προκειμένου να εξασφαλιστεί επαρκής άμεσος φωτισμός. Σε περίπτωση που αναμένονται αντίξοες συνθήκες στην έξοδο της σήραγγας και για σήραγγες με εσωτερική ζώνη μεγάλου μήκους, συνιστάται γραμμική αύξηση της λαμπρότητας. Η λαμπρότητα πρέπει να αυξάνεται γραμμικά σε απόσταση ίση με την απόστασης πέδησης, ενώ οι τιμές της θα πρέπει να ξεκινούν από την τιμή της λαμπρότητας εσωτερικής ζώνης και να καταλήγουν σε τιμή λαμπρότητας πέντε φορές μεγαλύτερης αυτής σε ένα σημείο 20m πριν το στόμιο εξόδου.

2.8.6 Φωτισμός στους τοίχους της σήραγγας

Οι τοίχοι της σήραγγας αποτελούν τμήμα της εικόνας που βλέπει ο οδηγός καθώς διέρχεται από αυτήν, με αποτέλεσμα να συνεισφέρουν στον εντοπισμό εμποδίων και στην οπτική καθοδήγηση. Συνεπώς, απαιτείται η μέση λαμπρότητα στους τοίχους της σήραγγας σε ύψους μέχρι 2m, να είναι

τουλάχιστον ίση με το 60% της μέσης λαμπρότητας του δρόμου στη συγκεκριμένη τοποθεσία. Δηλαδή:

$$L_{\text{wall}} = 0.6 * L_{\text{road}} \quad (2.11)$$

2.8.7 Ομοιομορφία λαμπρότητας

Προκειμένου να επιτευχθούν ικανοποιητικά αποτελέσματα, τόσο στην οδική καθοδήγηση όσο και στον εντοπισμό εμποδίων, πέρα από την τιμή της λαμπρότητας, εξετάζεται και η ομοιομορφία του φωτισμού στο οδόστρωμα και στους τοίχους σε ύψος έως 2m. Πιο συγκεκριμένα, απαιτείται οι τιμές της ολικής ομοιομορφίας U_o να μην πέφτουν κάτω από το 0,4 για το οδόστρωμα και για τους τοίχους σε ύψος έως 2m. Επίσης, χρειάζεται διαμήκης ομοιομορφία U_l στο κέντρο κάθε λωρίδας με τιμή τουλάχιστον ίση με 0,6. Υπενθυμίζεται εδώ ότι $U_o = L_{\text{min}} / L_{\text{avg}}$ και $U_l = L_{\text{min}} / L_{\text{max}}$. Τέλος, στο δεύτερο μισό της ζώνης κατωφλίου, στη μεταβατική ζώνη και στη ζώνη εξόδου (αν υπάρχει), η ομοιομορφία πρέπει να μετριέται και να υπολογίζεται στην κεντρική τιμή κάθε βήματος.

2.8.8 Φωτεινή πάλμωση (Flicker effect)

Το φαινόμενο της φωτεινής πάλμωσης (flickering) οφείλεται σε περιοδικές μεταβολές της λαμπρότητας στο οπτικό πεδίο του οδηγού. Η αίσθηση του flickering μπορεί να προκαλέσει από οπτική δυσφορία σε ορισμένους οδηγούς μέχρι και επιληπτική κρίση. Η δυσφορία που προκαλεί όλο το φαινόμενο εξαρτάται από:

1. Τη συχνότητα της πάλμωσης (flicker frequency).
2. Το ρυθμό μεταβολής της λαμπρότητας και τη χρονική αναλογία φωτεινών και σκοτεινών σημείων.
3. Τη συνολική διάρκεια του φαινομένου.

Σε γενικές γραμμές η πάλμωση είναι αμελητέα σε όλες τις συχνότητες μικρότερες των 2,5Hz ή μεγαλύτερες των 15Hz. Ιδιαίτερα προβληματικό είναι το διάστημα 4-11Hz καθώς το φαινόμενο αυτό για διάστημα μεγαλύτερο των 20s προκαλεί δυσφορία.

Για να υπολογιστεί η συχνότητα που εμφανίζεται το φαινόμενο, αρκεί μόνο να ληφθεί υπόψη η ταχύτητα με την οποία κινούνται τα οχήματα και να διαιρεθεί με την απόσταση μεταξύ διαδοχικών φωτιστικών σωμάτων, από το κέντρο του ενός, στο κέντρο του άλλου. Η συνάρτηση που περιγράφει τη συχνότητα πάλμωσης είναι η παρακάτω:

$$f_{\text{flicker}} = \frac{\text{Ταχύτητα οχήματος}}{\text{Απόσταση διαδοχικών φωτιστικών}} \quad (2.12)$$

Η ταχύτητα είναι γνωστή και ίση με την ταχύτητα κίνησης των οχημάτων σύμφωνα με τη μελέτη (100km/h $\approx$ 27,78m/s). Επειδή η απόσταση d διαδοχικών φωτιστικών σωμάτων δεν είναι σταθερή, θα μελετηθούν οι αποστάσεις φωτιστικών σωμάτων που προκαλούν πρόβλημα (ώστε να αποφευχθεί εμφάνιση του φαινομένου), συναρτήσει των συχνοτήτων τους.

- $f_{\text{flicker}} = 2,5\text{Hz} \Leftrightarrow d = 27.78/2.5 = 11.112\text{m}$
- $f_{\text{flicker}} = 4\text{Hz} \Leftrightarrow d = 27.78/4 = 6.945\text{m}$
- $f_{\text{flicker}} = 11\text{Hz} \Leftrightarrow d = 27.78/11 = 2.525\text{m}$

- $f_{\text{flicker}} = 15\text{Hz} \Leftrightarrow d = 27.78/15 = 1.852\text{m}$

Άρα για μία σήραγγα με ταχύτητα διέλευσης 100km/h, οι αποστάσεις δύο διαδοχικών φωτιστικών που δημιουργούν φαινόμενο πάλμωσης είναι μεταξύ των 1.852 και 11.112m. Πιο συγκεκριμένα, οι αποστάσεις 2.525 έως 6.945m είναι οι πιο επικίνδυνες, διότι για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο των 20s, δημιουργούν δυσφορία. Στις σήραγγες που μελετώνται στην παρούσα διπλωματική, δεν έχει νόημα να εξετάσουμε το φαινόμενο, καθώς η ταχύτητα σχεδιασμού είναι 27.78m/s, ενώ τα μήκη των δύο σηράγγων δεν υπερβαίνουν τα 400m, οπότε οι οδηγοί χρειάζονται λιγότερο από 20s για να τις διασχίσουν.

2.8.9 Θάμβωση (Glare)

Η θάμβωση μειώνει την ορατότητα, συνεπώς είναι σημαντικό να την περιορίζουμε. Το μέγεθος που περιγράφει τη θάμβωση στο φωτισμό σηράγγων είναι η προσαύξηση κατωφλίου ή Threshold Increment (T.I.) και ισχύουν οι περιορισμοί του παρακάτω πίνακα:

Πίνακα 2.8: Περιορισμοί για θάμβωση ημέρας και νύχτας

Threshold Increment $\leq 15\%$	Ζώνες Σήραγγας
Κατά την ημέρα	Κατωφλίου & Εσωτερική
Κατά τη νύχτα	Όλες εκτός της ζώνης εξόδου

Για τον υπολογισμό του T.I. χρησιμοποιούνται οι παρακάτω σχέσεις:

$$\begin{aligned} \text{T.I.} &= 65 \cdot L_v / L_{\text{road}}^{1.05} \text{ για } L_{\text{road}} < 5 \text{ cd/m}^2 \\ \text{T.I.} &= 95 \cdot L_v / L_{\text{road}}^{1.05} \text{ για } L_{\text{road}} \geq 5 \text{ cd/m}^2 \end{aligned}$$

Όπου:

L_{road} : η μέση λαμπρότητα του οδοστρώματος και

L_v : το φωτεινό πέπλο που δημιουργείται από όλα τα φωτιστικά στο πεδίο όρασης μέχρι 20° πάνω από τον οριζόντιο άξονα.

2.9 Φωτισμός νύχτας

Κατά τη διάρκεια της νύχτας, η σήραγγα αντιμετωπίζεται σαν μια ενιαία εσωτερική ζώνη. Διακρίνονται δύο περιπτώσεις:

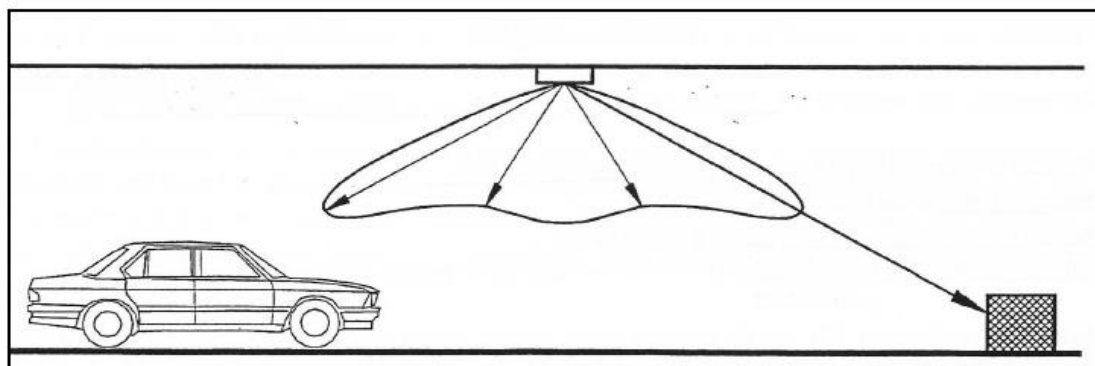
- Εάν η σήραγγα αποτελεί τμήμα ενός φωτισμένου δρόμου, οι απαιτήσεις του φωτισμού στο εσωτερικό της σήραγγας πρέπει να είναι τουλάχιστον ίσες με το επίπεδο των απαιτήσεων του δρόμου προσέγγισης (λαμπρότητα, ομοιομορφίες και θάμβωση).
- Εάν η σήραγγα αποτελεί τμήμα ενός δρόμου που δεν φωτίζεται, η μέση λαμπρότητα στην επιφάνεια του οδοστρώματος θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 1 cd/m^2 , η ολική ομοιομορφία 0.4 και η διαμήκης ομοιομορφία 0.6.

2.10 Συστήματα τεχνητού φωτισμού

Η οπτική αντίθεση των αντικειμένων μπορεί να είναι αρνητική ή θετική, ανάλογα με τις ανακλαστικές ιδιότητες της επιφάνειας του αντικειμένου και ανάλογα με το σύστημα φωτισμού το οποίο χρησιμοποιείται. Χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον δύο συστήματα τεχνητού φωτισμού: το σύστημα συμμετρικού φωτισμού και το σύστημα ασύμμετρου φωτισμού. Οι όροι συμμετρικός και ασύμμετρος αναφέρονται στην κατανομή της φωτεινής έντασης των φωτιστικών τα οποία χρησιμοποιούνται στο εκάστοτε σύστημα.

2.10.1 Συμμετρικός φωτισμός

Συμμετρικός είναι ο φωτισμός εκείνος κατά τον οποίο το φως πέφτει ισόποσα τόσο στη διεύθυνση της κυκλοφορίας, όσο και στην αντίθετή της. Η χρήση συμμετρικού φωτισμού χαρακτηρίζεται από τη χρήση φωτιστικών των οποίων η κατανομή της φωτεινής έντασης (πολικό διάγραμμα) είναι συμμετρική ως προς τον άξονα της κυκλοφορίας, άρα και το C-επίπεδο 90-270.



Εικόνα 2.7: Συμμετρικός φωτισμός

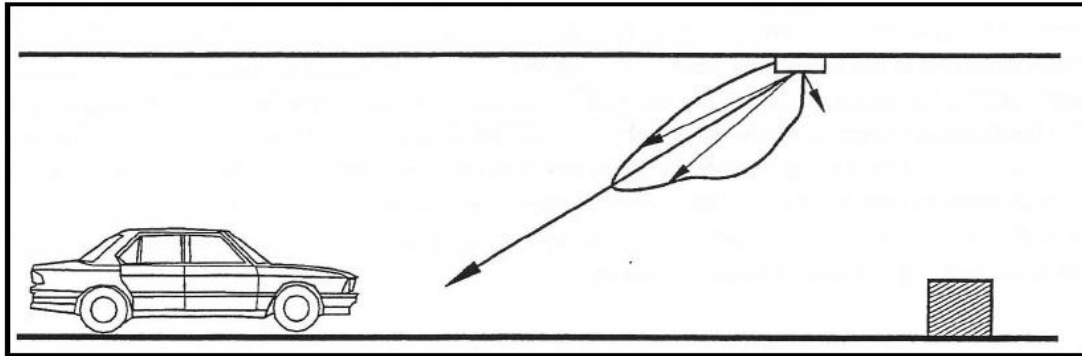
2.10.2 Ασύμμετρος φωτισμός

Το σύστημα ασύμμετρου φωτισμού αποτελείται από φωτιστικά, τα οποία έχουν κατανομή της φωτεινής έντασης που «στοχεύει» αντίθετα από την κατεύθυνση της κυκλοφορίας. Με τη χρήση ασύμμετρου φωτισμού επιτυγχάνεται αυξημένη αρνητική αντίθεση σε αντικείμενα του δρόμου, λόγω της μειωμένης έντασης φωτισμού στα επίπεδα που βλέπουν οι οδηγοί. Παράλληλα, όταν γίνεται χρήση κατοπτρικών επιφανειών δρόμου, το πεδίο της λαμπρότητας είναι συνήθως αισθητά υψηλότερο σε σύγκριση με την περίπτωση χρήσης συμμετρικού φωτισμού. Το ασύμμετρο σύστημα φυσιολογικά θα προκαλέσει μεγαλύτερη αντίθεση μεταξύ των αντικειμένων και του περιγύρου (π.χ. επιφάνειες του δρόμου και των τοίχων).

Όμως, πέρα από τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει ο ασύμμετρος φωτισμός (αυξημένη αρνητική αντίθεση και λαμπρότητα), παρουσιάζει και τα ακόλουθα μειονεκτήματα:

- Πιθανή επιδείνωση του φαινομένου της «μαύρης τρύπας», καθώς σε ορισμένες σχεδιαστικές μεθόδους μειώνεται η λαμπρότητα κατωφλίου, προκειμένου να περιοριστεί η απρόσεκτη οδήγηση.
- Πιθανή ακαταλληλότητα για χρήση σε σήραγγες με μεγάλη διείσδυση φυσικού φωτός.

- Πιθανή μείωση αποτελεσματικότητας των πλεονεκτημάτων του ασύμμετρου φωτισμού σε περιπτώσεις σήραγγων με αυξημένη κυκλοφοριακή κίνηση ή σε σήραγγες με υψηλό ποσοστό βαρέων οχημάτων.
- Περιορισμένη αποτελεσματικότητα για το φωτισμό οδικών σημάνσεων, λόγω της αντανακλαστικότητας αυτών των επιφανειών.



Εικόνα 2.8: Ασύμμετρος φωτισμός

2.11 Προσδιορισμός μήκους των ζωνών μιας σήραγγας

Βάσει όσων έχουν δειχθεί σε αυτό το κεφάλαιο, μπορεί κανείς να διαπιστώσει ότι οι περισσότερες ζώνες της σήραγγας δεν έχουν σαφή ορισμό για το μήκος τους. Θα ήταν λοιπόν χρήσιμο να οριστεί το μήκος κάθε ζώνης με βάση το συνολικό μήκος της σήραγγας. Η διερεύνηση θα ξεκινήσει από μία σήραγγα μεγάλου μήκους και θα συνεχιστεί με διαρκή μείωση (ποιοτικά) του μήκους της σήραγγας. Προτού όμως ξεκινήσει αυτή η διεργασία, θα ήταν χρήσιμο να καθοριστεί το μήκος όσο περισσότερων ζωνών είναι δυνατό.

Οι ζώνες στο εσωτερικό της σήραγγας είναι τέσσερις: ζώνη κατωφλίου, μεταβατική ζώνη, εσωτερική ζώνη και ζώνη εξόδου.

Συνοπτικά υπενθυμίζεται ότι η ζώνη κατωφλίου έχει μήκος ίσο με την απόσταση πέδησης. Συνεπώς ισχύει $x_{th}=SD$.

Ο υπολογισμός του μήκους της μεταβατικής ζώνης x_{tr} είναι πιο περίπλοκος, καθώς εξαρτάται από:

- 1)Τη λαμπρότητα στη ζώνη κατωφλίου L_{th} .
- 2)Τη λαμπρότητα της εσωτερικής ζώνης L_{int} .
- 3)Την ταχύτητα διέλευσης των οχημάτων U .

Είναι ήδη γνωστό ότι η εξίσωση που περιγράφει τη λαμπρότητα της μεταβατικής ζώνης είναι η ακόλουθη:

$$L_{tr} = L_{th} (1.9+t)^{-1.4}$$

Για τον υπολογισμό του χρόνου που χρειάζεται για να διανύσει κάποιος την απόσταση της μεταβατικής ζώνης, θέτεται $L_{tr}=L_{int}$ και υπολογίζεται ο χρόνος t_{int} . Έπειτα, χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$x_{tr} = U \cdot t_{tr} \quad (2.13)$$

προκύπτει εύκολα το μήκος της μεταβατικής ζώνης. Υπενθυμίζεται ότι συνιστάται η αύξηση του μήκους της μεταβατικής ζώνης για 1-2s, για καλύτερη οπτική προσαρμογή, όμως αυτή η αύξηση δεν είναι αναγκαία.

Το μήκος της ζώνης εξόδου x_{ex} , είναι πιο δύσκολο να υπολογιστεί, διότι δεν υπάρχει σαφής ορισμός και το μέγεθός της εξαρτάται από τις συνθήκες στην έξοδο της σήραγγας.

Τέλος, το μήκος της εσωτερικής ζώνης ισούται με τη διαφορά του συνολικού μήκους της σήραγγας και των υπολοίπων τριών ζωνών της. Δηλαδή:

$$x_{int} = x_{tunnel} - x_{th} - x_{tr} - x_{ex} \quad (2.14)$$

Για μία σήραγγα μεγάλου μήκους λοιπόν είναι εύκολο να υπολογιστούν οι διαστάσεις κάθε ζώνης, καθώς όμως το μήκος της σήραγγας μειώνεται, θα πρέπει να εξετασθεί τι συμβαίνει τότε. Πρωταρχική έννοια αποτελεί η ομαλή οπτική μετάβαση, οπότε το τμήμα της σήραγγας που θα «αποκόπτεται» σε κάθε μείωση θα είναι αυτό με τη μικρότερη λαμπρότητα.

Το πρώτο τμήμα που θα μικρύνει μέχρι να εξαφανιστεί είναι η εσωτερική ζώνη, καθώς το μήκος της εξαρτάται άμεσα από το μήκος της σήραγγας, όπως πληροφορούμαστε και από την εξίσωση (2.14). Έπειτα, με βάση τις εξωτερικές συνθήκες (άρα και την ανάγκη για ύπαρξη ζώνης εξόδου ή μη), θα αρχίσει να μειώνεται η μεταβατική ζώνη για ομαλές εξωτερικές συνθήκες, ή τμηματικά η μεταβατική και η ζώνη εξόδου, μέχρι η χαμηλότερη τιμή λαμπρότητας εντός της σήραγγας να είναι $5 \cdot L_{int}$ (η μέγιστη τιμή της ζώνης εξόδου), όπου η ζώνη εξόδου θα έχει εξαφανιστεί τελείως. Στη συνέχεια, θα μειωθεί το μήκος της μεταβατικής ζώνης, καθώς εκεί συναντάμε τη χαμηλότερη λαμπρότητα, ενώ στο τέλος (όταν η μεταβατική ζώνη έχει εξαφανιστεί τελείως), θα μειωθεί η ζώνη κατωφλίου. Στο σημείο αυτό, υπενθυμίζεται το περιεχόμενο της ενότητας 2.6, στην οποία αναφέρεται ότι αν το μήκος μιας σήραγγας είναι αρκετά μικρό, δεν υπάρχει ανάγκη για φωτισμό κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Κεφάλαιο 3: Παρουσίαση και επεξεργασία αποτελεσμάτων των πειραμάτων γύρω από την επιλογή οπτικού

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό διεξάγεται η μελέτη γύρω από τη σημασία της επιλογής κατάλληλου οπτικού. Αρχικά επιλέγονται φωτιστικά κατάλληλα για το φωτισμό σηράγγων και παραμετροποιούνται κατάλληλα, όπως θα εξηγηθεί παρακάτω. Στη συνέχεια, διεξάγεται μια προκαταρκτική μελέτη για τον περιορισμό των υποψηφίων οπτικών που είναι διαθέσιμα. Αφού επιλεγθούν τα τελικά οπτικά, γίνεται κατάλληλη παραμετροποίηση και διεξάγονται μελέτες με το λογισμικό Relux Tunnel, για κάθε δυνατό συνδυασμό. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των φωτοτεχνικών μελετών και παρουσιάζονται τα πρώτα συμπεράσματα.

3.2 Επιλογή φωτιστικών σωμάτων και παραμετροποίηση

Όπως έχει ήδη παρουσιαστεί, σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να αποδειχθεί η σημαντικότητα της επιλογής κατάλληλου φακού για τη διεξαγωγή μελετών φωτισμού σηράγγων. Συνεπώς, η πρώτη ενέργεια που έγινε ήταν η συλλογή φωτομετρικών αρχείων για διάφορα φωτιστικά σώματα. Αρχικά συγκεντρώθηκαν διάφορα οπτικά κατάλληλα για φωτισμό σηράγγων από διαφορετικούς κατασκευαστές. Για να αποφευχθεί η μελέτη περιπτώσεων που θα αποφέρουν ίδια ή παρόμοια αποτελέσματα, φωτιστικά με παρεμφερή πολικά διαγράμματα, δε θα διαχωρίζονται, αλλά θα μελετώνται ως μία περίπτωση. Δηλαδή, κρίνεται πως αν το πολικό διάγραμμα δύο οπτικών φέρει αρκετές ομοιότητες, είναι άσκοπο να μελετηθούν και οι δύο περιπτώσεις. Ο τελικός απολογισμός ήταν 35 διαφορετικά ασύμμετρα οπτικά και 3 συμμετρικά. Ο λόγος που δεν έγινε εκτενέστερη έρευνα στα συμμετρικά οπτικά αφορά το ρόλο τους στο φωτισμό σηράγγων. Αρχικά, καλούνται να καλύψουν χαμηλότερες απαιτήσεις με αισθητά μικρότερη (συγκριτικά με τα ασύμμετρα οπτικά) κατανάλωση ενέργειας. Υπενθυμίζεται πως η λαμπρότητα που απαιτείται στο εσωτερικό μιας σήραγγας είναι αρκετά μικρότερη από την αντίστοιχη λαμπρότητα στο κατώφλι.

Προκειμένου να αποφευχθούν λανθασμένα αποτελέσματα λόγω διαφοροποιήσεων μεταξύ των διαφορετικών φωτιστικών (αποδοτικότητα LED, ρεύμα οδήγησης κτλ), ακολουθήθηκε η τακτική των ανηγμένων μεγεθών, δημιουργήθηκαν για το σκοπό αυτό νέα φωτομετρικά αρχεία (τόσο για τα συμμετρικά όσο και για τα ασύμμετρα), με βάση τα αρχικά αρχεία, τα οποία έχουν μεταξύ τους τα ακόλουθα κοινά χαρακτηριστικά: ίδια ισχύ (W), ίδια φωτεινή ροή φωτιστικού σώματος (Luminaire Output lm) και κατά συνέπεια και ίδια απόδοση (lm/W).

3.3 Διεξαγωγή προκαταρκτικής μελέτης και παρουσίαση αποτελεσμάτων

Όπως έχει εξηγηθεί ήδη στο προηγούμενο κεφάλαιο, για το φωτισμό σηράγγων χρησιμοποιούνται, κατά κύριο λόγο, ασύμμετρα φωτιστικά για το φωτισμό στη ζώνη κατωφλίου και στη μεταβατική ζώνη, λόγω των υψηλών τιμών λαμπρότητας που επιτυγχάνουν, και συμμετρικά φωτιστικά για την εσωτερική ζώνη αλλά και το σύνολο του νυχτερινού φωτισμού, λόγω της καλύτερης ομοιομορφίας και του πιο άνετου φωτισμού που προσφέρουν.

Λόγω του αυξημένου αριθμού των διαφορετικών οπτικών, γίνεται αρχικά ένας περιορισμός των εξεταζόμενων περιπτώσεων. Ο λόγος που επιλέγεται να γίνει αυτός ο περιορισμός είναι επειδή κρίνεται πως η μελέτη επιπλέον περιπτώσεων δε συμβάλει στην καλύτερη διεξαγωγή συμπερασμάτων, όπως φαίνεται στη συνέχεια της παρούσας εργασίας.

Το πρώτο κριτήριο επιλογής φωτιστικών είναι εάν καλύπτουν τις ελάχιστες απαιτήσεις φωτισμού της σήραγγας. Αφού απορριφθούν οι περιπτώσεις που οι απαιτήσεις δεν καλύπτονται, τα εναπομείναντα φωτιστικά σώματα εξετάζονται ως προς την κατανάλωση ισχύος που απαιτούν για να καλύψουν τις απαιτήσεις του φωτοτεχνικού μοντέλου.

Επειδή η μελέτη των δύο σήραγγων της Αττικής Οδού απαιτεί αρκετές διαφορετικές διαβαθμίσεις ισχύος, για να εξεταστούν τα παραπάνω οπτικά, δημιουργείται μία σήραγγα-μοντέλο, η οποία θα είναι παρόμοια με τις εξεταζόμενες σήραγγες, αλλά παράλληλα θα μπορεί να επιλυθεί με ένα μόνο διαβάθμιση ισχύος, κοινό για όλα τα οπτικά.

Η σήραγγα-μοντέλο έχει τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά κατά πλάτος με τις δύο εξεταζόμενες σήραγγες. Δηλαδή:

- 1) Αριθμός λωρίδων (3, χωρίς ΛΕΑ)
- 2) Πλάτος ανά λωρίδα (3.75m)
- 3) Ύψος σήραγγας (6.7m)
- 4) Ύψος τοποθέτησης φωτιστικών σωμάτων (5.5m)
- 5) Γεωμετρία σήραγγας (ημικυλινδρική)
- 6) Πλάτος πεζοδρομίου (1m, εκατέρωθεν)

Μερικά ακόμα στοιχεία που είναι κοινά μεταξύ του μοντέλου σήραγγας και των πραγματικών σήραγγων σχετίζονται με τα όρια ασφάλειας για τους οδηγούς και είναι:

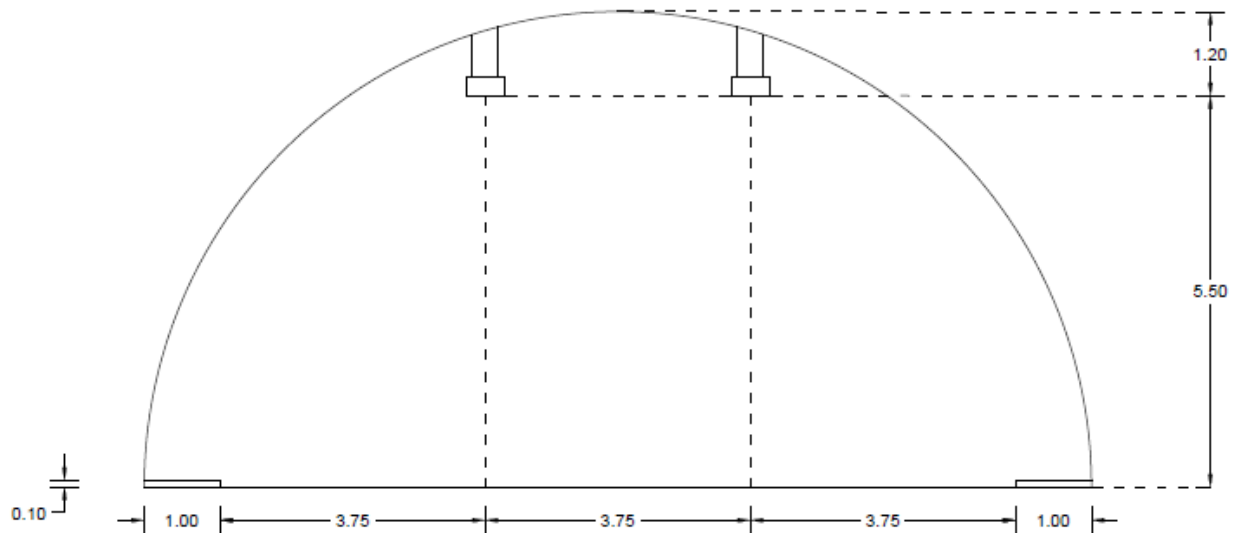
- α) Η ταχύτητα κυκλοφορίας των οχημάτων (100km/h)
- β) Η απόσταση πέδησης (160m)

Παράλληλα, όμως, παρουσιάζονται και διαφορές μεταξύ των σήραγγων. Οι διαφορές αυτές είναι:

- i) Στην σήραγγα-μοντέλο, η λαμπρότητα της ζώνης κατωφλίου είναι 230cd/m^2 . Στις δύο σήραγγες της Αττικής οδού η λαμπρότητα είναι 232 και 233cd/m^2 αντίστοιχα. Ο λόγος που επιλέχθηκε οι 230 cd/m^2 σαν τιμή είναι ότι αποτελεί στρογγυλοποίηση των δύο μεγεθών στο ψηφίο των μονάδων τους και η τιμή αυτή δεν παρουσιάζει αισθητή διαφορά ($<1.5\%$) από τις τιμές λαμπρότητας των δύο σήραγγων.
- ii) Το μέγεθος της σήραγγας-μοντέλου είναι 200m και όλο της το μήκος αποτελείται από τη ζώνη κατωφλίου. Η παραδοχή αυτή γίνεται διότι ο αριθμός αυτός (200m) διευκολύνει την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τις απαιτήσεις ισχύος και φωτεινής ροής ανά 100m και ανά km, χωρίς να υποπίπτει σε τυχόν σφάλματα λόγω μικρού μήκους. Ακόμα, επιλέχθηκε όλη η σήραγγα να είναι ζώνη κατωφλίου, ώστε οι μεγάλες απαιτήσεις της λαμπρότητας να δημιουργήσουν μεγάλες απαιτήσεις για

φωτεινή ροή, άρα και ισχύ, με αποτέλεσμα η επιλογή των καλύτερων οπτικών με βάση την ισχύ να γίνεται πιο εμφανής.

Για την επιλογή της θέσης των φωτιστικών αποφασίστηκε η τοποθέτηση αυτών σε δύο σειρές, η καθεμία πάνω στη διαχωριστική γραμμή της κεντρικής λωρίδας, δηλαδή στις θέσεις $y = 3.75\text{m}$ και $y = 7.50\text{m}$ κατά το πλάτος του οδοστρώματος, θέτοντας τα 0m στο δεξιότερο σημείο της δεξιάς λωρίδας και τα 11.25m στο αριστερότερο άκρο της αριστερής λωρίδας ($3 \text{ λωρίδες} \times 3.75\text{m}/\text{λωρίδα} = 11.25\text{m}$ πλάτος δρόμου της σήραγγας). Η τοποθέτηση φωτιστικών αρχίζει σε όλες τις περιπτώσεις 4.8m από την αρχή της σήραγγας, όπως περίπου και στις πραγματικές σήραγγες. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των σηράγγων φαίνονται καλύτερα στη παρακάτω εικόνα. Όλες οι διαστάσεις είναι αποτυπωμένες σε μέτρα.



Εικόνα 3.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά εξεταζόμενων σηράγγων

3.3.1 Μελέτη ασύμμετρων οπτικών

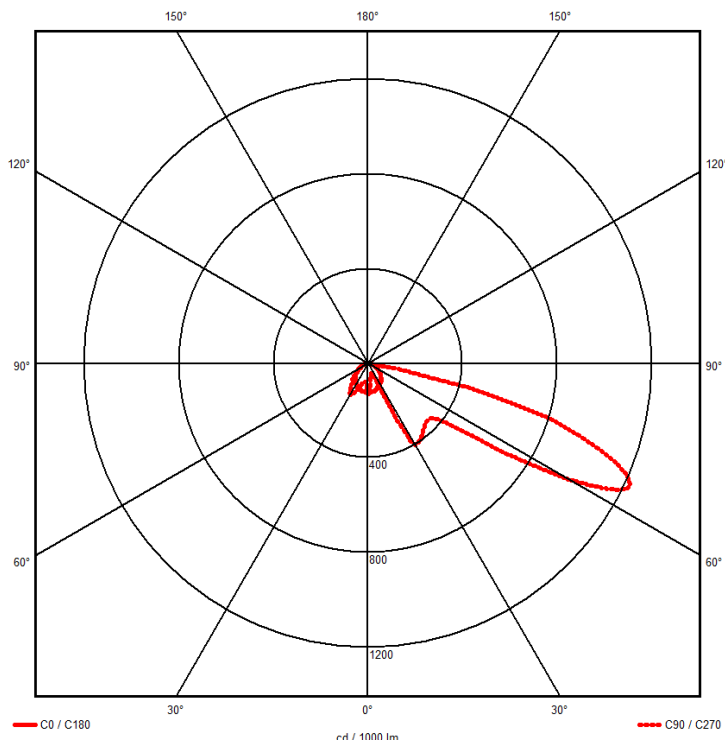
Αρχικά εξετάζονται τα ασύμμετρα οπτικά. Τα φωτιστικά που χρησιμοποιούνται έχουν ισχύ 250W και φωτεινή ροή $25,000\text{lumen}$, για να ικανοποιούν την απαίτηση υψηλής λαμπρότητας κατωφλίου. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις παρουσιάζονται συνολικά στον παρακάτω πίνακα. Λόγω της σταθερής τιμής στη φωτεινή ροή κάθε αρχείο είναι αδύνατον να επιτευχθεί επίλυση με την ακριβή τιμή της λαμπρότητας κατωφλίου, L_{th} , που έχει τεθεί παραπάνω, συνεπώς, οποιεσδήποτε τιμές λαμπρότητας κυμαίνονται στις $230\text{cd}/\text{m}^2 \pm 1\%$, δηλαδή 227.7 έως $232.3 \text{ cd}.\text{m}^2$. Παράλληλα, απαιτείται και επαρκής ομοιομορφία, τόσο ολική (U_o), όσο και διαμήκης (U_l), με όρια 0.4 και 0.6 αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα των 35 μελετών φωτισμού φαίνονται στον Πίνακα 3.1 που ακολουθεί:

Πίνακας 3.1: Αποτελέσματα μελέτης σήραγγας-μοντέλου για επιλογή ασύμμετρων οπτικών

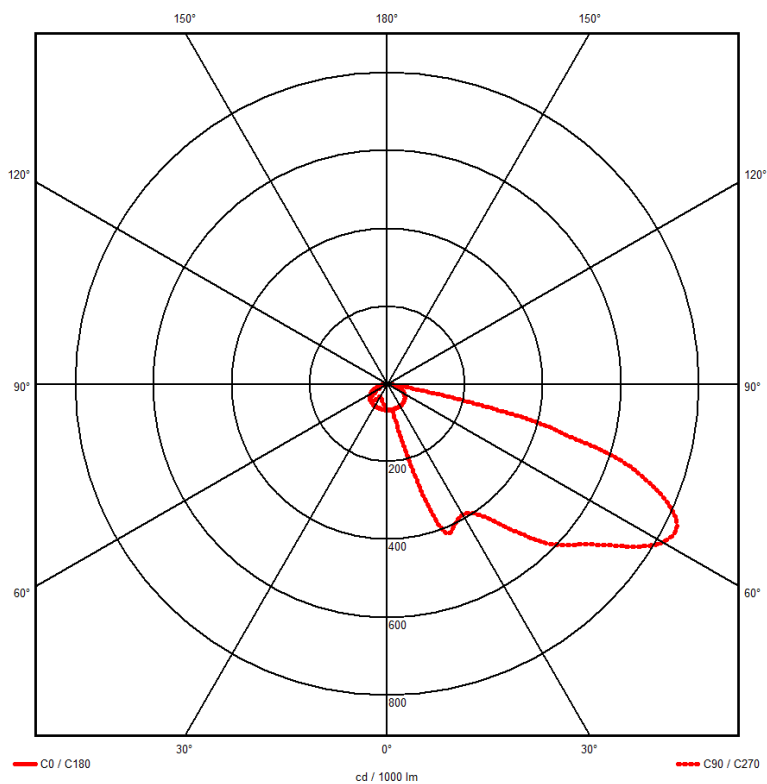
#	Ολική Ομοιομορφία U_o	Διαμήκης Ομοιομορφία U_l	Λαμπρότητα ζώνης κατωφλίου L_{avg} (cd/m ²)	Συνολική ισχύς φωτιστικών (kW)
1	0.40	0.98	229.63	68.6
2	0.54	1.00	201.93	156.6
3	0.48	1.00	228.68	120.0
4	0.46	1.00	229.22	104.6
5	0.41	0.99	228.86	75.6
6	0.41	0.99	229.33	79.6
7	0.64	1.00	208.09	157.0
8	0.61	1.00	217.16	156.6
9	0.70	1.00	174.58	155.0
10	0.68	1.00	185.62	157.0
11	0.67	1.00	166.79	140.0
12	0.71	1.00	163.65	140.6
13	0.59	1.00	231.23	129.6
14	0.54	1.00	228.57	140.0
15	0.54	1.00	230.26	116.6
16	0.16	1.00	163.55	155.6
17	0.16	1.00	210.69	155.6
18	0.36	1.00	221.29	155.6
19	0.11	1.00	199.22	155.6
20	0.69	1.00	167.67	156.0
21	0.71	1.00	156.69	139.0
22	0.68	1.00	166.92	139.0
23	0.66	1.00	183.07	140.0
24	0.69	1.00	158.79	139.0
25	0.57	1.00	179.71	140.6
26	0.72	1.00	176.51	156.0
27	0.65	1.00	172.84	156.0
28	0.67	1.00	180.32	156.6
29	0.64	1.00	193.56	157.6
30	0.71	1.00	170.64	156.0
31	0.68	1.00	156.56	138.6
32	0.65	1.00	173.55	139.6
33	0.59	1.00	182.99	140.0
34	0.13	1.00	156.14	138.0
35	0.16	0.98	163.88	138.0

Από τις 35 περιπτώσεις, μόλις οι 8 είναι ικανές να καλύψουν όλες τις ποιοτικές και ποσοτικές απαιτήσεις ως προς τη λαμπρότητα και τις ομοιομορφίες (ολική και διαμήκη). Οι περιπτώσεις που καλύπτουν τις απαιτήσεις είναι οι: 1, 3, 4, 5, 6, 13, 14 και 15. Από τις οκτώ αυτές περιπτώσεις, μόλις τρεις, οι 1, 5 και 6, καταφέρνουν να καλύψουν τις απαιτήσεις με συνολική κατανάλωση ισχύος μικρότερη από 100kW. Για τη διευκόλυνση της εύρεσης των παραπάνω περιπτώσεων, όλες

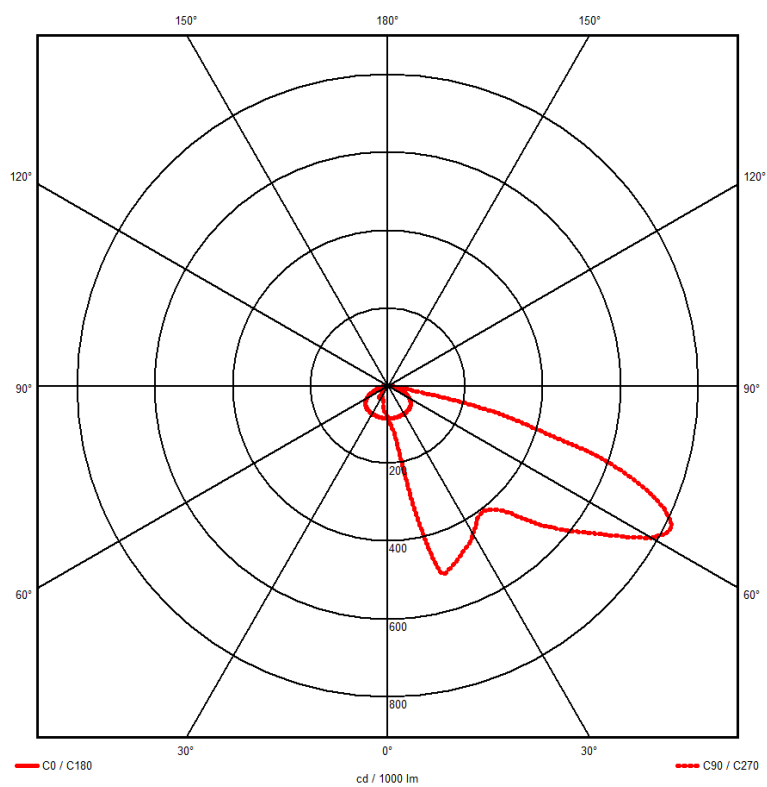
οι αποδεκτές περιπτώσεις σημειώνονται με γκρι φόντο, ενώ οι τρεις περιπτώσεις με κατανάλωση ισχύος κάτω από 100kW σημειώνονται με σκούρο γκρι φόντο. Επειδή οι διαφορές μεταξύ των τριών αυτών περιπτώσεων σε ισχύ δεν υπερβαίνουν τα 11kW (περίπτωση 1 στα 68.6 kW και περίπτωση 6 στα 79.6 kW), ενώ η τέταρτη πιο αποδοτική λύση απαιτεί 104.6 kW (# 4), εξετάζονται περεταίρω μόνο οι περιπτώσεις των οπτικών 1,5 και 6. Από το σημείο αυτό και έπειτα, ορίζεται ως φωτιστικό/οπτικό τύπου 1, ο αριθμός 1 του πίνακα 3.1, ως φωτιστικό/οπτικό τύπου 2 ο αριθμός 5 και ως οπτικό/φωτιστικό τύπου 3 ο αριθμός 6. Η μετονομασία αυτή γίνεται με βάση τη συνολική ισχύ που υπολογίστηκε από τις προκαταρκτικές μελέτες, ξεκινώντας από το φωτιστικό με το οποίο προέκυψε η χαμηλότερη συνολική ισχύς καταλήγοντας στο φωτιστικό με το οποίο προέκυψε η μεγαλύτερη συνολική ισχύς. Τα πολικά διαγράμματα των οπτικών 1, 2 και 3 παρουσιάζονται στη συνέχεια:



Εικόνα 3.2: Πολικό διάγραμμα ασύμμετρου οπτικού 1



Εικόνα 3.3: Πολικό διάγραμμα ασύμμετρου οπτικού 2



Εικόνα 3.4: Πολικό διάγραμμα ασύμμετρου οπτικού 3

3.3.2 Μελέτη συμμετρικών φωτιστικών

Παρόμοια με τα ασύμμετρα φωτιστικά, εξετάζονται και τα 3 συμμετρικά φωτιστικά. Οι απαιτήσεις για το συμμετρικό φωτισμό είναι να καλύπτουν τις απαιτήσεις για τον εσωτερικό φωτισμό και το νυχτερινό φωτισμό. Οι απαιτήσεις αυτές είναι:

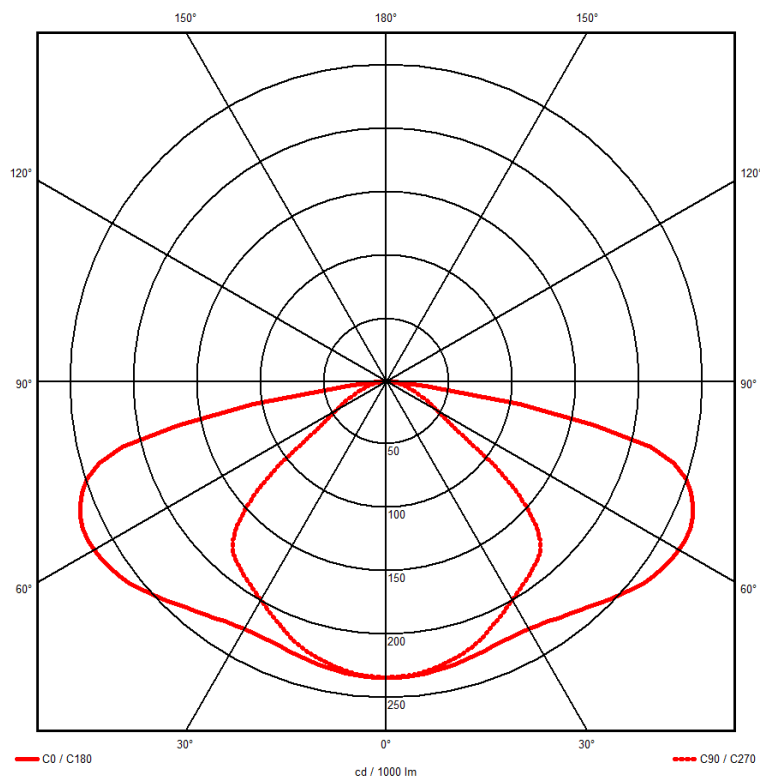
- 1) Μέση λαμπρότητα οδοστρώματος $L \geq 1.5 \text{ cd/m}^2$
- 2) Ολική ομοιομορφία λαμπρότητας $U_o \geq 0.4$
- 3) Διαμήκης ομοιομορφία λαμπρότητας $U_l \geq 0.6$

Σε αντίθεση όμως με τον ασύμμετρο φωτισμό, οι απαιτήσεις για το συμμετρικό φωτισμό παραμένουν σταθερές σε όλο το μήκος της σήραγγας. Συνεπώς, για τον υπολογισμό του βέλτιστου συμμετρικού οπτικού, θα χρησιμοποιηθεί η σήραγγα-μοντέλο. Τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για να εξεταστούν τα οπτικά είναι τα ίδια με την περίπτωση του ασύμμετρου φωτισμού. Το πρώτο κριτήριο είναι η κάλυψη των φωτομετρικών απαιτήσεων και το δεύτερο είναι η κατανάλωση ισχύος. Λόγω της χαμηλής απαίτησης λαμπρότητας που απαιτείται για αυτή τη μέτρηση τα φωτιστικά δεν έχουν τόσο υψηλές απαιτήσεις για φωτεινή ροή και ισχύ. Επιλέγεται φωτεινή ροή 5000lm και ισχύς φωτιστικού 50W (απόδοση φωτιστικού 100lm/W, όμοια με προηγούμενως). Φωτιστικά με αυτά ακριβώς τα χαρακτηριστικά δεν υπάρχουν, αλλά δημιουργούνται (ως μοντέλα), προκειμένου να συγκριθούν τα οπτικά μεταξύ τους. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 3.2: Αποτελέσματα μελέτης σήραγγας-μοντέλου για επιλογή συμμετρικών οπτικών

#	Ολική Ομοιομορφία U_o	Διαμήκης Ομοιομορφία U_l	Λαμπρότητα εσωτερικής ζώνης $L_{avg} \text{ (cd/m}^2\text{)}$	Συνολική ισχύς φωτιστικών (kW)
1	0.44	0.79	1.50	1.1
2	0.33	0.76	1.87	1.1
3	0.42	0.79	1.70	1.1

Επειδή η απαίτηση για το επίπεδο φωτισμού είναι αρκετά χαμηλή, άρα και οι απαιτήσεις ισχύος θα πρέπει να είναι ανάλογα χαμηλές, επιλέχθηκε εκείνο το επίπεδο ισχύος για το οποίο όλα τα οπτικά καλύπτουν την απαίτηση της λαμπρότητας. Με άλλα λόγια, βρέθηκε η κοινή απόσταση (άρα και πλήθος φωτιστικών σωμάτων) για την οποία όλα τα οπτικά καλύπτουν τις απαιτήσεις λαμπρότητας. Έπειτα, αγνοούνται οι περιπτώσεις που δεν καλύπτουν τις ελάχιστες απαιτήσεις και τέλος, από τις απομείναντες επιλογές, επιλέγεται αυτή με την υψηλότερη μέση λαμπρότητα, καθώς αυτό σημαίνει ότι μπορεί να καλύψει τις απαιτήσεις με λιγότερα φωτιστικά σώματα. Εύκολα παρατηρείται ότι η περίπτωση 3 επιτυγχάνει τα καλύτερα αποτελέσματα, οπότε επιλέγεται το φωτιστικό 3 για χρήση στις μελέτες από εδώ και πέρα, το οποίο θα λέγεται φωτιστικό εσωτερικής ζώνης ή συμμετρικό φωτιστικό από εδώ και πέρα.



Εικόνα 3.4: Πολικό διάγραμμα συμμετρικού οπτικού

3.4 Προετοιμασία Φωτομετρικών Αρχείων

Με βάση τα δεδομένα για τις απαιτήσεις λαμπρότητας στο εσωτερικό της σήραγγας, γίνεται φανερό πως δεν είναι δυνατόν να καλυφθούν όλες οι απαιτήσεις για τη μέση τιμή της λαμπρότητας με μία κοινή διαβάθμιση φωτεινής ροής, άρα και ισχύος, καθώς οι απαιτήσεις αυτές διαμορφώνονται από 233 cd/m^2 έως 1.5 cd/m^2 . Για το λόγο αυτό, κρίνεται σκόπιμο να διαμορφωθούν επιπρόσθετα τυπικά φωτιστικά σώματα που χρησιμοποιούν τους επιλεγμένους φακούς, σε διάφορες διαβαθμίσεις φωτεινής ροής και ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, προκειμένου να καλύπτονται όλες οι απαιτήσεις για τη μέση λαμπρότητα, χωρίς να έχουμε επιπρόσθετη αχρεία στη κατανάλωση ισχύος, δημιουργήθηκαν φωτομετρικά αρχεία για τα 3 επιλεγμένα ασύμμετρα οπτικά στις παρακάτω διαβαθμίσεις ισχύος: 300W, 250W, 200W, 150W, 100W και 50W. Για το συμμετρικό οπτικό δεν δημιουργήθηκαν επιπρόσθετες παραλλαγές, επειδή υπάρχει απαίτηση μόνο για μία στάθμη λαμπρότητας, η οποία καλύπτεται ήδη.

Με έξι διαφορετικές διαβαθμίσεις ισχύος ανά οπτικό, προκύπτουν 63 διαφορετικοί συνδυασμοί φωτιστικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να φωτιστεί το εσωτερικό της σήραγγας, (2^6 διαφορετικοί συνδυασμοί με τις έξι διαβαθμίσεις ισχύος = 64, -1 συνδυασμός, διότι η περίπτωση που δεν χρησιμοποιείται κανένα φωτιστικό δεν αποτελεί λύση και συνεπώς δεν εξετάζεται, = 63 διαφορετικοί συνδυασμοί).

3.5 Αποτελέσματα

Στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα των μελετών φωτισμού για κάθε ένα από τα τρία διαφορετικά οπτικά. Η κωδικοποίηση των επιμέρους μελετών φωτισμού σχετικά με τις διαβαθμίσεις ισχύος των φωτιστικών σωμάτων που χρησιμοποιούνται σε κάθε διαφορετική περίπτωση, παρατίθεται στο Παράρτημα Α στο τέλος της παρούσας εργασίας και πιο συγκεκριμένα στον Πίνακα Α.1.

Σημειώνεται ότι επειδή οι δύο πραγματικές σήραγγες που εξετάζονται έχουν κοινά όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά κατά πλάτος, ενώ οι διαφορές στο μήκος και στην λαμπρότητα ζώνης κατωφλίου είναι πολύ μικρές (μήκος 393m και 395m, L_{th} 232cd/m² και 233cd/m² για τις σήραγγες Α και Ε αντίστοιχα), εξετάζεται μόνο η μία σήραγγα στον παρόν τμήμα της εργασίας αυτής, καθώς η δεύτερη δε διαφοροποιείται αρκετά, ώστε να αποτελέσει αντικείμενο μελέτης με αισθητή διαφορά, που θα παράγει διαφορετικά αποτελέσματα.

3.5.1 Αποτελέσματα μελετών με τη χρήση του πρώτου οπτικού

Στη συνέχεια ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων για όλες τις περιπτώσεις που ελέγχθηκαν με τη χρήση του πρώτου οπτικού. Επειδή η παρουσίαση των αναλυτικών αποτελεσμάτων περιέχει πάρα πολλές πληροφορίες και περιπτώσεις, γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων στο σημείο αυτό. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται είναι το πλήθος των φωτιστικών σωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν ανά μελέτη φωτισμού και η εγκαταστημένη ισχύς, τόσο η συνολική όσο και η ισχύς μόνο για τον ασύμμετρο φωτισμό. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικότερα στους Πίνακες 2-6 του παραρτήματος:

Πίνακας 3.3: Πλήθος φωτιστικών ανά κατηγορία και ισχύς εγκατάστασης για κάθε εναλλακτική λύση με το οπτικό 1.

	A/A	Συνολικ ή Ισχύς (kW)	Ισχύς Ασύμ. (kW)	300W	250W	200W	150W	100W	50W	Εσωτερ ική (50W)
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1: ΧΡΗΣΗ 5 Η 6 ΦΣ	1.1	68.7	66.5	198	4	4	8	16	50	44
	1.2	68.5	66.3	0	240	6	8	14	50	44
	1.3	68.7	66.5	198	0	10	6	16	52	44
	1.4	68.7	66.5	198	4	0	14	14	52	44
	1.5	68.7	66.5	198	4	4	0	28	50	44
	1.6	68.7	66.5	198	4	4	8	0	82	44
	1.7	70	67.8	198	4	4	8	54	0	44
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2: ΧΡΗΣΗ 4 ΦΣ	2.1	68.3	66.1	0	0	304	8	16	50	44
	2.2	68.5	66.3	0	240	0	16	14	50	44
	2.3	68.5	66.3	0	240	6	0	26	50	44
	2.4	68.5	66.3	0	240	6	8	0	78	44
	2.5	69.8	67.6	0	240	6	8	52	0	44
	2.6	68.7	66.5	198	0	0	20	16	50	44
	2.7	68.7	66.5	198	0	10	0	26	50	44
	2.8	68.7	66.5	198	0	10	6	0	84	44
	2.9	70.1	67.9	198	0	10	6	56	0	44

Πίνακας 3.3: Πλήθος φωτιστικών ανά κατηγορία και ισχύς εγκατάσταση για κάθε εναλλακτική με το οπτικό 1 (συνέχεια).

	A/A	Συνολικ ή Ισχύς (kW)	Ισχύς Ασύμ. (kW)	300W	250W	200W	150W	100W	50W	Εσωτερ ική (50W)
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2: ΧΡΗΣΗ 4 ΦΣ	2.10	68.7	66.5	198	4	0	0	36	50	44
	2.11	68.7	66.5	198	4	0	14	0	80	44
	2.12	70.1	67.9	198	4	0	14	54	0	44
	2.13	68.7	66.5	198	4	4	0	0	106	44
	2.14	70.0	67.8	198	4	4	0	66	0	44
	2.15	72.4	70.2	198	4	4	60	0	0	44
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 3: ΧΡΗΣΗ 3 ΦΣ	3.1	75.0	72.8	198	4	62	0	0	0	44
	3.2	72.2	70.0	198	4	0	64	0	0	44
	3.3	70.0	67.8	198	4	0	0	74	0	44
	3.4	68.7	66.5	198	4	0	0	0	122	44
	3.5	72.3	70.1	198	0	10	58	0	0	44
	3.6	70.0	67.8	198	0	10	0	64	0	44
	3.7	68.7	66.5	198	0	10	0	0	102	44
	3.8	70.0	67.8	198	0	0	20	54	0	44
	3.9	68.7	66.5	198	0	0	20	0	82	44
	3.10	68.7	66.5	198	0	0	0	46	50	44
	3.11	72.1	69.9	0	240	6	58	0	0	44
	3.12	69.8	67.6	0	240	6	0	64	0	44
	3.13	68.5	66.3	0	240	6	0	0	102	44
	3.14	69.8	67.6	0	240	0	16	52	0	44
	3.15	68.5	66.3	0	240	0	16	0	78	44
	3.16	68.5	66.3	0	240	0	0	38	50	44
	3.17	69.6	67.4	0	0	304	8	54	0	44
	3.18	68.3	66.1	0	0	304	8	0	82	44
	3.19	68.3	66.1	0	0	304	0	28	50	44
	3.20	68.8	66.6	0	0	0	418	14	50	44
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 4: ΧΡΗΣΗ 2 ΦΣ	4.1	78.1	75.9	198	66	0	0	0	0	44
	4.2	75.2	73.0	198	0	68	0	0	0	44
	4.3	72.4	70.2	198	0	0	72	0	0	44
	4.4	70.0	67.8	198	0	0	0	84	0	44
	4.5	68.7	66.5	198	0	0	0	0	142	44
	4.6	75.0	72.8	0	240	64	0	0	0	44
	4.7	72.1	69.9	0	240	0	66	0	0	44
	4.8	69.8	67.6	0	240	0	0	76	0	44
	4.9	68.5	66.3	0	240	0	0	0	126	44
	4.10	72.0	69.8	0	0	304	60	0	0	44
	4.11	69.6	67.4	0	0	304	0	66	0	44

Πίνακας 3.3: Πλήθος φωτιστικών ανά κατηγορία και ισχύς εγκατάσταση για κάθε εναλλακτική με το οπτικό 1 (συνέχεια).

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 4: ΧΡΗΣΗ 2 ΦΣ	4.12	68.3	66.1	0	0	304	0	0	106	44
	4.13	70.1	67.9	0	0	0	418	52	0	44
	4.14	68.8	66.6	0	0	0	418	0	78	44
	4.15	65.0	62.8	0	0	0	0	602	52	44
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 5: ΧΡΗΣΗ 1 ΦΣ	5.1	81.4	79.2	264	0	0	0	0	0	44
	5.2	78.2	76.0	0	304	0	0	0	0	44
	5.3	74.6	72.4	0	0	362	0	0	0	44
	5.4	72.4	70.2	0	0	0	468	0	0	44
	5.5	66.4	64.2	0	0	0	0	642	0	44
	5.6	34.3	32.1	0	0	0	0	0	642	44

Σημειώνεται ότι οι περιπτώσεις 4.15, 5.5 και 5.6 είναι γραμμένες με κόκκινο χρώμα, διότι δεν μπορούν να καλύψουν τις απαιτήσεις της σήραγγας. Παρατηρείται επίσης ότι ενώ αρκετές περιπτώσεις έχουν παρεμφερείς τιμές ισχύος, υπάρχουν και αρκετές περιπτώσεις που οι καταναλώσεις ισχύος διαφέρουν και μάλιστα είναι μεγαλύτερα. Παρατηρώντας τις γραφικές παραστάσεις που βρίσκονται στο Παράρτημα Α, διαπιστώνεται πως σε όλες τις περιπτώσεις που απουσιάζει το φωτιστικό των 50W, οι απαιτήσεις στο τέλος της «ουράς» της γραφικής παράστασης της λαμπρότητας της σήραγγας υπερκαλύπτονται, με αποτέλεσμα να καταναλώνεται περιττή ενέργεια. Για το λόγο αυτό, δημιουργείται ένας νέος πίνακας (Πίνακας 3.4), με βάση τον προηγούμενο, στον οποίο παραλείπονται όλες οι περιπτώσεις που δεν περιέχουν το εξεταζόμενο φωτιστικό σώμα των 50W, καθώς και οι περιπτώσεις που δεν καλύπτονται οι φωτομετρικές απαιτήσεις της σήραγγας. Στον πίνακα αυτό με πράσινο σημειώνονται οι οικονομικότερες λύσεις και με κόκκινο οι πιο ακριβές (ως προς την εγκατεστημένη ισχύ).

Πίνακας 3.4: Αναθεωρημένος πίνακας αποτελεσμάτων με τη χρήση του οπτικού 1

	A/A	Συνολική Ισχύς (kW)	Ισχύς Ασύμ. (kW)	300W	250W	200W	150W	100W	50W	Εσωτερική (50W)
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1: ΧΡΗΣΗ 5 Η 6 ΦΣ	1.1	68.7	66.5	198	4	4	8	16	50	44
	1.2	68.5	66.3	0	240	6	8	14	50	44
	1.3	68.7	66.5	198	0	10	6	16	52	44
	1.4	68.7	66.5	198	4	0	14	14	52	44
	1.5	68.7	66.5	198	4	4	0	28	50	44
	1.6	68.7	66.5	198	4	4	8	0	82	44

Πίνακας 3.4: Αναθεωρημένος πίνακας αποτελεσμάτων με τη χρήση του οπτικού 1 (συνέχεια)

	A/A	Συνολική Ισχύς (kW)	Ισχύς Ασύμ. (kW)	300W	250W	200W	150W	100W	50W	Εσωτερική (50W)
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2: ΧΡΗΣΗ 4 ΦΣ	2.1	68.3	66.1	0	0	304	8	16	50	44
	2.2	68.5	66.3	0	240	0	16	14	50	44
	2.3	68.5	66.3	0	240	6	0	26	50	44
	2.4	68.5	66.3	0	240	6	8	0	78	44
	2.6	68.7	66.5	198	0	0	20	16	50	44
	2.7	68.7	66.5	198	0	10	0	26	50	44
	2.8	68.7	66.5	198	0	10	6	0	84	44
	2.10	68.7	66.5	198	4	0	0	36	50	44
	2.11	68.7	66.5	198	4	0	14	0	80	44
	2.13	68.7	66.5	198	4	4	0	0	106	44
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 3: ΧΡΗΣΗ 3 ΦΣ	3.4	68.7	66.5	198	4	0	0	0	122	44
	3.7	68.7	66.5	198	0	10	0	0	102	44
	3.9	68.7	66.5	198	0	0	20	0	82	44
	3.10	68.7	66.5	198	0	0	0	46	50	44
	3.13	68.5	66.3	0	240	6	0	0	102	44
	3.15	68.5	66.3	0	240	0	16	0	78	44
	3.16	68.5	66.3	0	240	0	0	38	50	44
	3.18	68.3	66.1	0	0	304	8	0	82	44
	3.19	68.3	66.1	0	0	304	0	28	50	44
	3.20	68.8	66.6	0	0	0	418	14	50	44
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 4: ΧΡΗΣΗ 2 ΦΣ	4.5	68.7	66.5	198	0	0	0	0	142	44
	4.9	68.5	66.3	0	240	0	0	0	126	44
	4.12	68.3	66.1	0	0	304	0	0	106	44
	4.14	68.8	66.6	0	0	0	418	0	78	44
Μέσος Όρος		68.6	66.4	Διαφορά με max (kW)		0.2	Διαφορά με min (kW)		0.3	

Παρατηρείται ότι δεν υπάρχει καμία αποδεκτή διάταξη από την περίπτωση 5 (χρήση μίας διαβάθμισης ισχύος), καθώς όλες οι περιπτώσεις που δεν χρησιμοποιούν τη διαβάθμιση ισχύος των 50W είναι πολύ ενεργοβόρες, ενώ η περίπτωση των 50W δεν καλύπτει τις απαιτήσεις της φωτομετρίας. Παράλληλα, η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος έχουν απόκλιση 0.3kW και 0.2kW αντίστοιχα από τη μέση τιμή της συνολικής ισχύς λόγω του οπτικού 1 (Ισχύς Ασύμ.). Αυτό μεταφράζεται σε απόκλιση μικρότερη του 0.5% από τη μέση τιμή.

3.5.2 Αποτελέσματα μελετών με τη χρήση του δεύτερου οπτικού

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του δεύτερου οπτικού, όμοια με την περίπτωση του πρώτου, σε πίνακα με τα φωτιστικά και τις διαβαθμίσεις ισχύος που χρησιμοποιούνται καθώς και τη συνολική ισχύ. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικότερα στους Πίνακες 7-11 του παραρτήματος.

Πίνακας 3.5: Πλήθος φωτιστικών ανά κατηγορία και ισχύς εγκατάσταση για κάθε εναλλακτική με το οπτικό 2.

	A/A	Συνολικ ή Ισχύς (kW)	Ισχύς Ασύμ. (kW)	300W	250W	200W	150W	100W	50W	Εσωτερ ική (50W)
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1: ΧΡΗΣΗ 5 Η 6 ΦΣ	1.1	75.3	73.1	218	4	6	10	16	48	44
	1.2	75.4	73.2	0	268	4	10	14	50	44
	1.3	75.3	73.1	218	0	12	8	16	50	44
	1.4	75.3	73.1	218	4	0	18	16	48	44
	1.5	75.3	73.1	218	4	6	0	30	50	44
	1.6	75.3	73.1	218	4	6	10	0	80	44
	1.7	76.5	74.3	218	4	6	10	52	0	44
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2: ΧΡΗΣΗ 4 ΦΣ	2.1	75.6	73.4	0	0	340	10	14	50	44
	2.2	75.5	73.3	0	268	0	16	14	50	44
	2.3	75.4	73.2	0	268	4	0	30	48	44
	2.4	75.3	73.1	0	268	4	10	0	76	44
	2.5	76.5	74.3	0	268	4	10	50	0	44
	2.6	75.3	73.1	218	0	0	24	16	50	44
	2.7	75.3	73.1	218	0	12	0	28	50	44
	2.8	75.3	73.1	218	0	12	8	0	82	44
	2.9	76.4	74.2	218	0	12	8	52	0	44
	2.10	75.3	73.1	218	4	0	0	42	50	44
	2.11	75.3	73.1	218	4	0	18	0	80	44
	2.12	76.5	74.3	218	4	0	18	52	0	44
	2.13	75.3	73.1	218	4	6	0	0	110	44
	2.14	76.4	74.2	218	4	6	0	66	0	44
	2.15	78.5	76.3	218	4	6	58	0	0	44
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 3: ΧΡΗΣΗ 3 ΦΣ	3.1	81.4	79.2	218	4	64	0	0	0	44
	3.2	78.5	76.3	218	4	0	66	0	0	44
	3.3	76.4	74.2	218	4	0	0	78	0	44
	3.4	75.3	73.1	218	4	0	0	0	134	44
	3.5	78.7	76.5	218	0	12	58	0	0	44
	3.6	76.4	74.2	218	0	12	0	64	0	44
	3.7	75.3	73.1	218	0	12	0	0	106	44
	3.8	76.4	74.2	218	0	0	24	52	0	44
	3.9	75.3	73.1	218	0	0	24	0	82	44

Πίνακας 3.5: Πλήθος φωτιστικών ανά κατηγορία και ισχύς εγκατάσταση για κάθε εναλλακτική με το οπτικό 2 (συνέχεια).

	A/A	Συνολικ ή Ισχύς (kW)	Ισχύς Ασύμ. (kW)	300W	250W	200W	150W	100W	50W	Εσωτερ ική (50W)
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 3: ΧΡΗΣΗ 3 ΦΣ	3.10	75.3	73.1	218	0	0	0	52	50	44
	3.11	78.7	76.5	0	268	4	58	0	0	44
	3.12	76.6	74.4	0	268	4	0	66	0	44
	3.13	75.4	73.2	0	268	4	0	0	108	44
	3.14	76.5	74.3	0	268	0	14	52	0	44
	3.15	75.4	73.2	0	268	0	14	0	82	44
	3.16	75.4	73.2	0	268	0	0	38	48	44
	3.17	76.7	74.5	0	0	340	10	50	0	44
	3.18	75.6	73.4	0	0	340	10	0	78	44
	3.19	75.6	73.4	0	0	340	0	30	48	44
	3.20	75.0	72.8	0	0	0	458	16	50	44
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 4: ΧΡΗΣΗ 2 ΦΣ	4.1	84.1	81.9	218	66	0	0	0	0	44
	4.2	81.2	79.0	218	0	68	0	0	0	44
	4.3	78.7	76.5	218	0	0	74	0	0	44
	4.4	76.4	74.2	218	0	0	0	88	0	44
	4.5	75.3	73.1	218	0	0	0	0	154	44
	4.6	81.2	79.0	0	268	60	0	0	0	44
	4.7	78.8	76.6	0	268	0	64	0	0	44
	4.8	76.6	74.4	0	268	0	0	74	0	44
	4.9	75.4	73.2	0	268	0	0	0	124	44
	4.10	78.9	76.7	0	0	340	58	0	0	44
	4.11	76.8	74.6	0	0	340	0	66	0	44
	4.12	75.6	73.4	0	0	340	0	0	108	44
	4.13	76.1	73.9	0	0	0	458	52	0	44
	4.14	75.0	72.8	0	0	0	458	0	82	44
	4.15	64.4	62.2	0	0	0	0	596	52	44
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 5: ΧΡΗΣΗ 1 ΦΣ	5.1	87.4	85.2	284	0	0	0	0	0	44
	5.2	84.2	82.0	0	328	0	0	0	0	44
	5.3	81.4	79.2	0	0	396	0	0	0	44
	5.4	78.4	76.2	0	0	0	508	0	0	44
	5.5	66.0	63.8	0	0	0	0	638	0	44
	5.6	34.1	31.9	0	0	0	0	0	638	44

Όμοια με το οπτικό 1, παρατηρείται ότι οι περιπτώσεις 4.15, 5.5 και 5.6 δεν καλύπτουν τις φωτομετρικές απαιτήσεις της σήραγγας και γι' αυτό σημειώνονται με κόκκινο. Επίσης, στις περιπτώσεις που απουσιάζει η χρήση του οπτικού 2 των 50W, η συνολική ισχύ είναι αυξημένη

λόγω της υπερκάλυψης της «ουράς» της γραφικής παράστασης και την κατανάλωσης περιττής ενέργειας. Δημιουργείται, λοιπόν, ένας δεύτερος πίνακας (Πίνακας 3.6) βάσει του Πίνακα 3.5, χωρίς τις περιπτώσεις που απουσιάζει το οπτικό 2 των 50W και χωρίς τις περιπτώσεις 4.15, 5.5 και 5.6 που δεν καλύπτουν τις φωτομετρικές απαιτήσεις της σήραγγας.

Πίνακας 3.6: Αναθεωρημένος πίνακας αποτελεσμάτων με τη χρήση του οπτικού 2

	A/A	Συνολικ ή Ισχύς (kW)	Ισχύς Ασύμ. (kW)	300W	250W	200W	150W	100W	50W	Εσωτερ ική (50W)
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1: ΧΡΗΣΗ 5 Η 6 ΦΣ	1.1	75.3	73.1	218	4	6	10	16	48	44
	1.2	75.4	73.2	0	268	4	10	14	50	44
	1.3	75.3	73.1	218	0	12	8	16	50	44
	1.4	75.3	73.1	218	4	0	18	16	48	44
	1.5	75.3	73.1	218	4	6	0	30	50	44
	1.6	75.3	73.1	218	4	6	10	0	80	44
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2: ΧΡΗΣΗ 4 ΦΣ	2.1	75.6	73.4	0	0	340	10	14	50	44
	2.2	75.5	73.3	0	268	0	16	14	50	44
	2.3	75.4	73.2	0	268	4	0	30	48	44
	2.4	75.3	73.1	0	268	4	10	0	76	44
	2.6	75.3	73.1	218	0	0	24	16	50	44
	2.7	75.3	73.1	218	0	12	0	28	50	44
	2.8	75.3	73.1	218	0	12	8	0	82	44
	2.10	75.3	73.1	218	4	0	0	42	50	44
	2.11	75.3	73.1	218	4	0	18	0	80	44
	2.13	75.3	73.1	218	4	6	0	0	110	44
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 3: ΧΡΗΣΗ 3 ΦΣ	3.4	75.3	73.1	218	4	0	0	0	134	44
	3.7	75.3	73.1	218	0	12	0	0	106	44
	3.9	75.3	73.1	218	0	0	24	0	82	44
	3.10	75.3	73.1	218	0	0	0	52	50	44
	3.13	75.4	73.2	0	268	4	0	0	108	44
	3.15	75.4	73.2	0	268	0	14	0	82	44
	3.16	75.4	73.2	0	268	0	0	38	48	44
	3.18	75.6	73.4	0	0	340	10	0	78	44
	3.19	75.6	73.4	0	0	340	0	30	48	44
	3.20	75.0	72.8	0	0	0	458	16	50	44
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 4: ΧΡΗΣΗ 2 ΦΣ	4.5	75.3	73.1	218	0	0	0	0	154	44
	4.9	75.4	73.2	0	268	0	0	0	124	44
	4.12	75.6	73.4	0	0	340	0	0	108	44
	4.14	75.0	72.8	0	0	0	458	0	82	44
Μέσος Όρος		75.35	73.15	Διαφορά με max (kW)		0.25	Διαφορά με min (kW)		0.35	

Όπως και στον Πίνακα 3.4 με πράσινο σημειώνονται οι λύσεις με την ελάχιστη ισχύ, ενώ με κόκκινο οι λύσεις με τη μέγιστη εγκατεστημένη ισχύ. Ομοίως με την περίπτωση του οπτικού 1, δεν υπάρχει καμία αποδεκτή διάταξη της περίπτωσης 5. Η διαφορά κατ' απόλυτη τιμή της ελάχιστης και της μέγιστης συνολικής εγκατεστημένης ισχύος είναι 0.35kW και 0.25kW αντίστοιχα από την μέση τιμή της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος λόγω του οπτικού 2 (Ισχύς Ασύμ.). Η απόκλιση αυτή είναι μικρότερη του 0.5% της μέσης τιμής.

3.5.3 Αποτελέσματα μελετών με τη χρήση του τρίτου οπτικού

Τέλος, παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα του τρίτου οπτικού, με τον ίδιο τρόπο που παρουσιάστηκαν και οι προηγούμενες δύο περιπτώσεις αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικότερα στους Πίνακες 12-16 του παραρτήματος.

Πίνακας 3.7: Πλήθος φωτιστικών ανά κατηγορία και ισχύς εγκατάσταση για κάθε εναλλακτική με το οπτικό 3.

	A/A	Συνολικ ή Ισχύς (kW)	Ισχύς Ασύμ. (kW)	300W	250W	200W	150W	100W	50W	Εσωτερ ική (50W)
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1: ΧΡΗΣΗ 5 Η 6 ΦΣ	1.1	79.5	77.3	232	6	4	10	16	46	44
	1.2	79.8	77.6	0	284	6	10	16	46	44
	1.3	79.5	77.3	232	0	12	8	18	46	44
	1.4	79.5	77.3	232	6	0	14	18	46	44
	1.5	79.5	77.3	232	6	4	0	32	44	44
	1.6	79.5	77.3	232	6	4	10	0	78	44
	1.7	80.6	78.4	232	6	4	10	50	0	44
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2: ΧΡΗΣΗ 4 ΦΣ	2.1	79.2	77.0	0	0	358	10	16	46	44
	2.2	79.7	77.5	0	284	0	16	18	46	44
	2.3	79.7	77.5	0	284	6	0	30	46	44
	2.4	79.7	77.5	0	284	6	8	0	82	44
	2.5	80.8	78.6	0	284	6	8	52	0	44
	2.6	79.5	77.3	232	0	0	24	18	46	44
	2.7	79.5	77.3	232	0	12	0	30	46	44
	2.8	79.5	77.3	232	0	12	8	0	82	44
	2.9	80.6	78.4	232	0	12	8	52	0	44
	2.10	79.5	77.3	232	6	0	0	40	44	44
	2.11	79.5	77.3	232	6	0	14	0	82	44
	2.12	80.6	78.4	232	6	0	14	52	0	44
	2.13	79.5	77.3	232	6	4	0	0	108	44
	2.14	80.5	78.3	232	6	4	0	64	0	44
	2.15	82.5	80.3	232	6	4	56	0	0	44

Πίνακας 3.7: Πλήθος φωτιστικών ανά κατηγορία και ισχύς εγκατάσταση για κάθε εναλλακτική με το οπτικό 3 (συνέχεια).

	A/A	Συνολική Ισχύς (kW)	Ισχύς Ασύμ. (kW)	300W	250W	200W	150W	100W	50W	Εσωτερικ ή (50W)
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 3: ΧΡΗΣΗ 3 ΦΣ	3.1	85.3	83.1	232	6	60	0	0	0	44
	3.2	82.6	80.4	232	6	0	62	0	0	44
	3.3	80.5	78.3	232	6	0	0	72	0	44
	3.4	79.5	77.3	232	6	0	0	0	124	44
	3.5	82.6	80.4	232	0	12	56	0	0	44
	3.6	80.6	78.4	232	0	12	0	64	0	44
	3.7	79.5	77.3	232	0	12	0	0	106	44
	3.8	80.6	78.4	232	0	0	24	52	0	44
	3.9	79.5	77.3	232	0	0	24	0	82	44
	3.10	79.5	77.3	232	0	0	0	54	46	44
	3.11	82.8	80.6	0	284	6	56	0	0	44
	3.12	80.8	78.6	0	284	6	0	64	0	44
	3.13	79.7	77.5	0	284	6	0	0	106	44
	3.14	80.8	78.6	0	284	0	16	52	0	44
	3.15	79.7	77.5	0	284	0	16	0	82	44
	3.16	79.7	77.5	0	284	0	0	42	46	44
	3.17	80.3	78.1	0	0	358	10	50	0	44
	3.18	79.3	77.1	0	0	358	10	0	80	44
	3.19	79.3	77.1	0	0	358	0	32	46	44
	3.20	79.8	77.6	0	0	0	490	18	46	44
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 4: ΧΡΗΣΗ 2 ΦΣ	4.1	88.3	86.1	232	66	0	0	0	0	44
	4.2	85.4	83.2	232	0	68	0	0	0	44
	4.3	82.6	80.4	232	0	0	72	0	0	44
	4.4	80.6	78.4	232	0	0	0	88	0	44
	4.5	79.5	77.3	232	0	0	0	0	154	44
	4.6	85.6	83.4	0	284	62	0	0	0	44
	4.7	82.8	80.6	0	284	0	64	0	0	44
	4.8	80.8	78.6	0	284	0	0	76	0	44
	4.9	79.8	77.6	0	284	0	0	0	132	44
	4.10	82.5	80.3	0	0	358	58	0	0	44
	4.11	80.4	78.2	0	0	358	0	66	0	44
	4.12	79.3	77.1	0	0	358	0	0	110	44
	4.13	80.9	78.7	0	0	0	490	52	0	44
	4.14	79.8	77.6	0	0	0	490	0	82	44
	4.15	64.5	62.3	0	0	0	0	596	54	44

Πίνακας 3.7: Πλήθος φωτιστικών ανά κατηγορία και ισχύς εγκατάσταση για κάθε εναλλακτική με το οπτικό 3 (συνέχεια).

	A/A	Συνολική Ισχύς (kW)	Ισχύς Ασύμ. (kW)	300W	250W	200W	150W	100W	50W	Εσωτερικ ή (50W)
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 5: ΧΡΗΣΗ 1 ΦΣ	5.1	91.0	88.8	296	0	0	0	0	0	44
	5.2	88.2	86.0	0	344	0	0	0	0	44
	5.3	8.05	82.8	0	0	414	0	0	0	44
	5.4	82.9	80.7	0	0	0	538	0	0	44
	5.5	66.0	63.8	0	0	0	0	638	0	44
	5.6	34.1	31.9	0	0	0	0	0	638	44

Παρατηρείται πως και σε αυτήν την εξεταζόμενη περίπτωση οι υποπεριπτώσεις 4.15, 5.5 και 5.6 δεν μπορούν να καλύψουν τις φωτομετρικές απαιτήσεις της σήραγγας και γι' αυτό σημειώνονται με έντονα κόκκινα γράμματα. Ταυτόχρονα, η απουσία του φωτιστικού των 50W του οπτικού 3 ανεβάζει αισθητά την κατανάλωση ισχύος, λόγω της αυξημένης λαμπρότητας που παρατηρείται στην «ουρά» από την απουσία του φωτιστικού των 50W. Για το λόγο αυτό, δημιουργείται και σε αυτή τη δοκιμή ένας επιπλέον πίνακας (Πίνακας 3.8) έχοντας ως βάση τον Πίνακα 3.7, που δεν περιλαμβάνει τις περιπτώσεις χωρίς το οπτικό 3 των 50W ούτε και τις περιπτώσεις που δεν καλύπτουν τις απαιτήσεις της σήραγγας.

Πίνακας 3.8: Αναθεωρημένος πίνακας αποτελεσμάτων με τη χρήση του οπτικού 3.

	A/A	Συνολική Ισχύς (kW)	Ισχύς Ασύμ. (kW)	300W	250W	200W	150W	100W	50W	Εσωτερική (50W)
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1: ΧΡΗΣΗ 5 Η 6 ΦΣ	1.1	79.5	77.3	232	6	4	10	16	46	44
	1.2	79.8	77.6	0	284	6	10	16	46	44
	1.3	79.5	77.3	232	0	12	8	18	46	44
	1.4	79.5	77.3	232	6	0	14	18	46	44
	1.5	79.5	77.3	232	6	4	0	32	44	44
	1.6	79.5	77.3	232	6	4	10	0	78	44
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2: ΧΡΗΣΗ 4 ΦΣ	2.1	79.2	77.0	0	0	358	10	16	46	44
	2.2	79.7	77.5	0	284	0	16	18	46	44
	2.3	79.7	77.5	0	284	6	0	30	46	44
	2.4	79.7	77.5	0	284	6	8	0	82	44
	2.6	79.5	77.3	232	0	0	24	18	46	44
	2.7	79.5	77.3	232	0	12	0	30	46	44
	2.8	79.5	77.3	232	0	12	8	0	82	44
	2,10	79.5	77.3	232	6	0	0	40	44	44
	2.11	79.5	77.3	232	6	0	14	0	82	44
	2.13	79.5	77.3	232	6	4	0	0	108	44

Πίνακας 3.8: Αναθεωρημένος πίνακας αποτελεσμάτων με τη χρήση του οπτικού 3 (συνέχεια).

	A/A	Συνολική Ισχύς (kW)	Ισχύς Ασύμ. (kW)	300W	250W	200W	150W	100W	50W	Εσωτερική (50W)
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 3: ΧΡΗΣΗ 3 ΦΣ	3.4	79.5	77.3	232	6	0	0	0	124	44
	3.7	79.5	77.3	232	0	12	0	0	106	44
	3.9	79.5	77.3	232	0	0	24	0	82	44
	3,10	79.5	77.3	232	0	0	0	54	46	44
	3.13	79.7	77.5	0	284	6	0	0	106	44
	3.15	79.7	77.5	0	284	0	16	0	82	44
	3.16	79.7	77.5	0	284	0	0	42	46	44
	3.18	79.3	77.1	0	0	358	10	0	80	44
	3.19	79.3	77.1	0	0	358	0	32	46	44
	3,20	79.8	77.6	0	0	0	490	18	46	44
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 4: ΧΡΗΣΗ 2 ΦΣ	4.5	79.5	77.3	232	0	0	0	0	154	44
	4.9	79.8	77.6	0	284	0	0	0	132	44
	4.12	79.3	77.1	0	0	358	0	0	110	44
	4.14	79.8	77.6	0	0	0	490	0	82	44
Μέσος Όρος		79.55	77.35	Διαφορά με max (kW)		0.25	Διαφορά με min (kW)		0.35	

Όμοια με τους Πίνακες 3.4 και 3.6, με κόκκινο σημειώνονται οι λύσεις με την μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ, ενώ με πράσινο οι λύσεις με την ελάχιστη εγκατεστημένη ισχύ. Και σε αυτό το σενάριο, παρατηρείται πως καμία λύση από την περίπτωση 5 δεν είναι αποδεκτή, ενώ για άλλη μια φορά η απόκλιση που φέρει η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή για την ισχύ που καταναλώνεται από όλες τα φωτιστικά του οπτικού 3 (Ισχύς Ασύμ.), είναι 0.35 και 0.25 kW αντίστοιχα. Οι αποκλίσεις αυτές είναι μικρότερες του 0.5% της μέσης τιμής και σε αυτό το σενάριο.

3.6 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα υπολογισμών

Μία ακόμη μέθοδος προκειμένου να αποδειχθεί η σταθερή σχέση ανάμεσα στην ισχύ των διαφορετικών οπτικών είναι να συγκριθούν οι παραπάνω περιορισμένες περιπτώσεις συνολικά. Για το λόγο αυτό δημιουργείται ο ακόλουθος πίνακας ο οποίος περιέχει όλα τα αποτελέσματα για της εγκατεστημένης ισχύς από τα ασύμμετρα οπτικά

Πίνακας 3.9: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για όλες τις αποδεκτές περιπτώσεις. Με I_i συμβολίζεται η ισχύς ασύμμετρου φωτισμού για το οπτικό i .

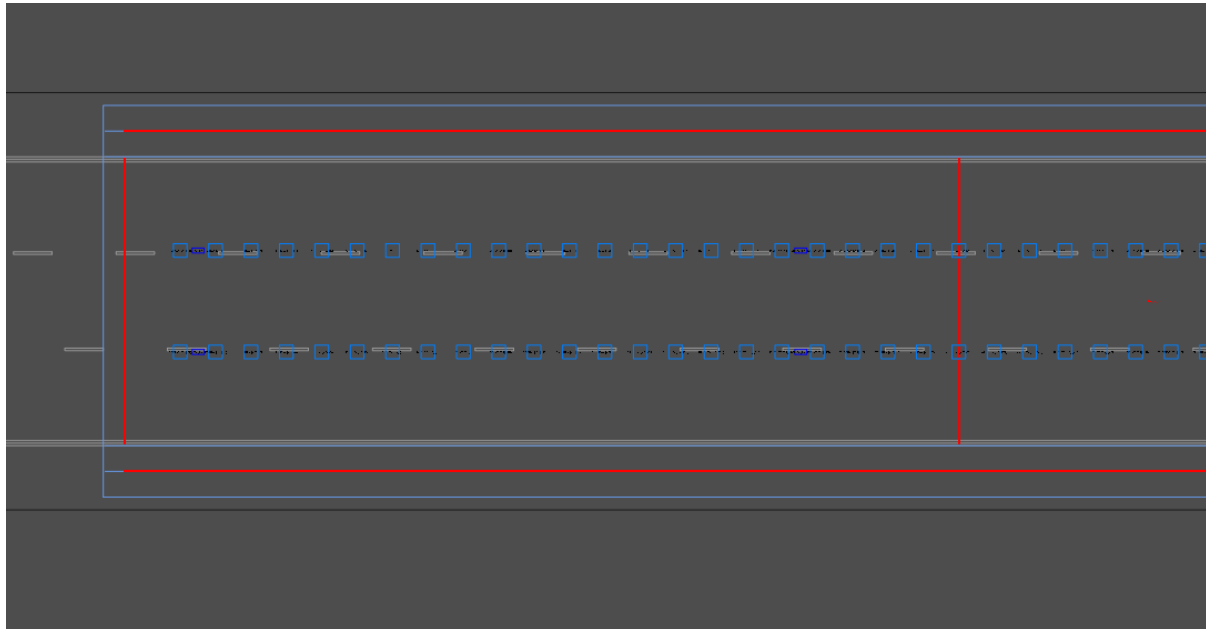
Περίπτωση	Εγκατεστημένη Ισχύς (kW)			Διαφορά		Αναλογία (%)	
	Οπτικό 1	Οπτικό 2	Οπτικό 3	I2-I1	I3-I1	I2/I1	I3/I1
1.1	66.5	73.1	77.3	6.6	10.8	109.9	116.2
1.2	66.3	73.2	77.6	6.9	11.3	110.4	117.0
1.3	66.5	73.1	77.3	6.6	10.8	109.9	116.2
1.4	66.5	73.1	77.3	6.6	10.8	109.9	116.2
1.5	66.5	73.1	77.3	6.6	10.8	109.9	116.2
1.6	66.5	73.1	77.3	6.6	10.8	109.9	116.2
2.1	66.1	73.4	77.0	7.3	10.9	111.0	116.4
2.2	66.3	73.3	77.5	7.0	11.2	110.5	116.8
2.3	66.3	73.2	77.5	6.9	11.2	110.4	116.8
2.4	66.3	73.1	77.5	6.8	11.2	110.2	116.8
2.6	66.5	73.1	77.3	6.6	10.8	109.9	116.2
2.7	66.5	73.1	77.3	6.6	10.8	109.9	116.2
2.8	66.5	73.1	77.3	6.6	10.8	109.9	116.2
2.10	66.5	73.1	77.3	6.6	10.8	109.9	116.2
2.11	66.5	73.1	77.3	6.6	10.8	109.9	116.2
2.13	66.5	73.1	77.3	6.6	10.8	109.9	116.2
3.4	66.5	73.1	77.3	6.6	10.8	109.9	116.2
3.7	66.5	73.1	77.3	6.6	10.8	109.9	116.2
3.9	66.5	73.1	77.3	6.6	10.8	109.9	116.2
3.10	66.5	73.1	77.3	6.6	10.8	109.9	116.2
3.13	66.3	73.2	77.5	6.9	11.2	110.4	116.8
3.15	66.3	73.2	77.5	6.9	11.2	110.4	116.8
3.16	66.3	73.2	77.5	6.9	11.2	110.4	116.8
3.18	66.1	73.4	77.1	7.3	11.0	111.0	116.6
3.19	66.1	73.4	77.1	7.3	11.0	111.0	116.6
3.20	66.6	72.8	77.6	6.2	11.0	109.3	116.5
4.5	66.5	73.1	77.3	6.6	10.8	109.9	116.2
4.9	66.3	73.2	77.6	6.9	11.3	110.4	117.0
4.12	66.1	73.4	77.1	7.3	11.0	111.0	116.6
4.14	66.6	72.8	77.6	6.2	11.0	109.3	116.5
Μ. Όρος	66.4	73.2	77.4	6.8	11.0	110.1	116.4
Ελάχιστο	66.1	72.8	77.0	6.2	10.8	109.3	116.2
Μέγιστο	66.6	73.4	77.6	7.3	11.3	111.0	117.0

Ως εγκατεστημένη ισχύ των ασύμμετρων οπτικών εννοείται η συνολικής ισχύς μείον την ισχύ που χρησιμοποιείται για τον ασύμμετρο φωτισμό. Στον πίνακα περιλαμβάνονται τέσσερις επιπλέον στήλες που συγκρίνουν τη διαφορά και το λόγο της ασύμμετρης ισχύς μεταξύ των διαφορετικών οπτικών.

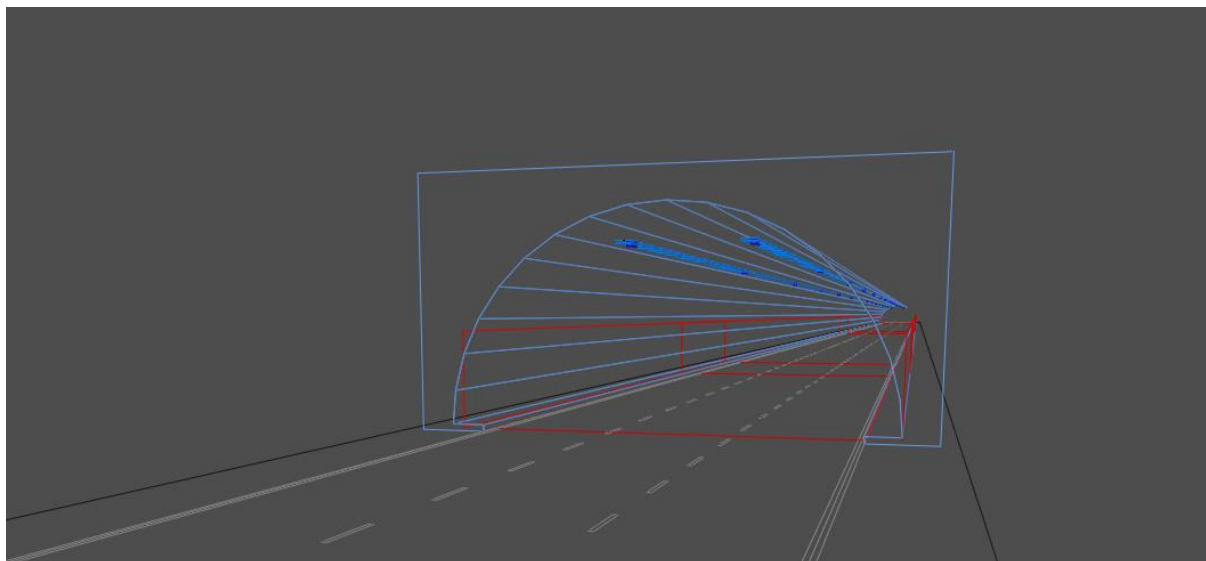
Παρατηρείται ότι οι διαφορές και οι αναλογίες στην κατανάλωση ισχύος των διαφορετικών φωτιστικών στην ίδια περίπτωση παραμένουν σε μεγάλο βαθμό σταθερές και με μικρές αποκλίσεις. Με τόσες συγκρίσεις σε τόσες διαφορετικές περιπτώσεις, χωρίς την ύπαρξη αισθητών

διαφορών, μπορεί κανείς με ασφάλεια να παρατηρήσει πως οι διαφορές μεταξύ των οπτικών είναι ανεξάρτητες (ή εξαρτημένες σε αμελητέο βαθμό) από το συνδυασμό ισχύων των φωτιστικών σωμάτων υπό το ίδιο οπτικό σύστημα που μελετάται και ότι το βέλτιστο οπτικό παραμένει σταθερά καλύτερο.

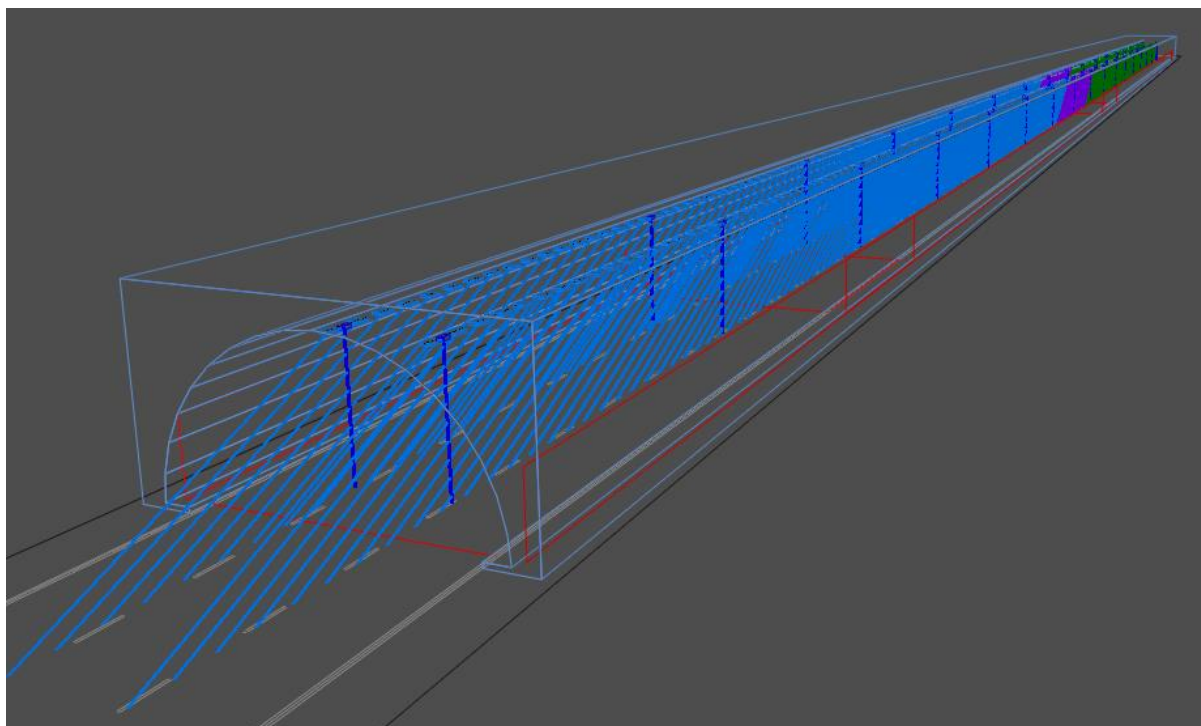
Στη συνέχεια παρουσιάζονται μερικά στιγμιότυπα που προέκυψαν κατά τον υπολογισμό των παραπάνω αποτελεσμάτων με τη χρήση του λογισμικού Relux Tunnel.



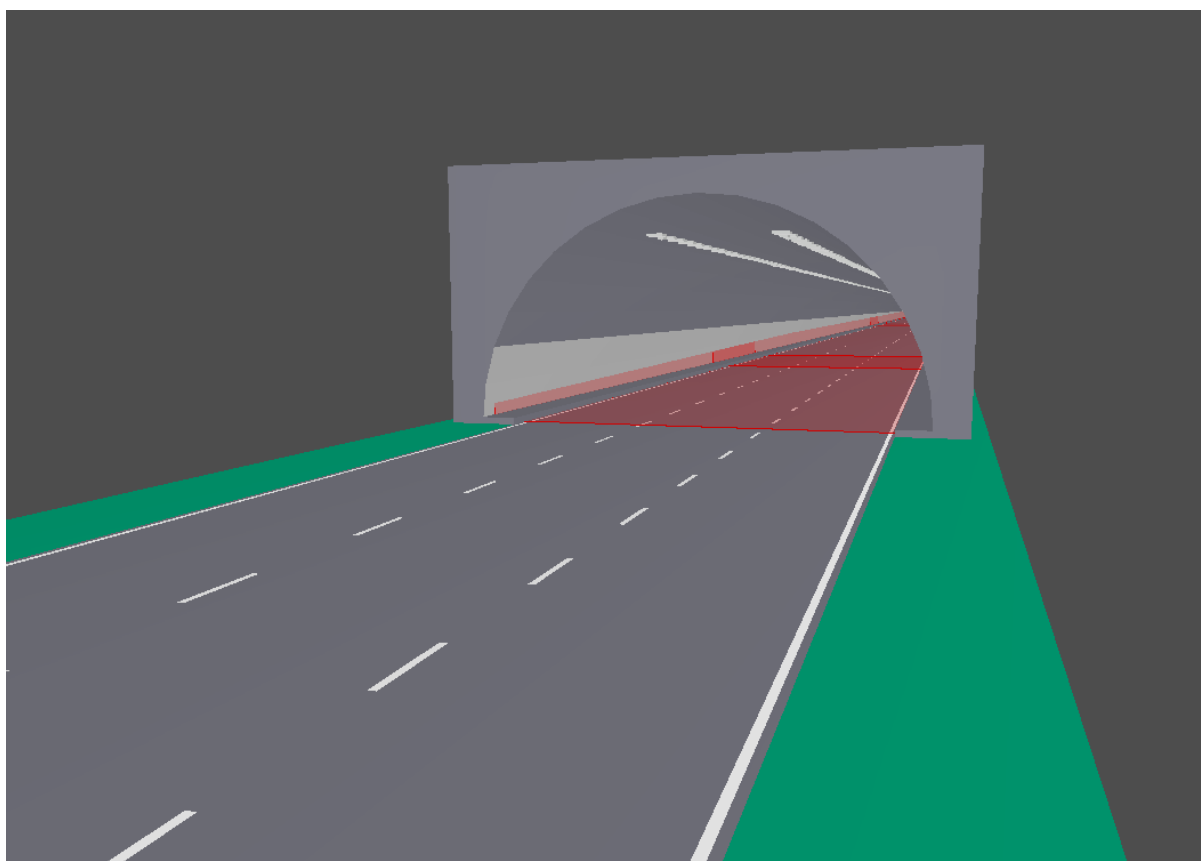
Εικόνα 3.6: Στιγμιότυπο με τη θέση των φωτιστικών.



Εικόνα 3.7: Στιγμιότυπο με το στόμιο της σήραγγας, τις θέσεις των φωτιστικών και το διαχωρισμού του εσωτερικού.



Εικόνα 3.8: Καμπύλη μέγιστης έντασης (I_{max}) για κάθε οπτικό.



Εικόνα 3.9: 3D αναπαράσταση της προσέγγισης στη σήραγγα και της αρχής της σήραγγας.

3.7 Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τα παραπάνω μπορεί κανείς να καταλήξει στα εξής συμπεράσματα:

- Η επιλογή κατάλληλου οπτικού αποτελεί, αν όχι το σημαντικότερο, έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες για την επίτευξη των επιθυμητών αποτελεσμάτων φωτισμού με τη λιγότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας. Εξετάζοντας τις μικρές αποκλίσεις στις αναλογίες εγκαταστημένης ισχύος μεταξύ των περιπτώσεων (δηλαδή το συνδυασμό ισχύων των φωτιστικών σωμάτων υπό το ίδιο οπτικό σύστημα), παρατηρείται πως οι απαιτήσεις για το καταλληλότερο οπτικό είναι ανεξάρτητες από τις διαβαθμίσεις ισχύος που χρησιμοποιούνται, δεδομένης κοινής αποδοτικότητας (εδώ 100lm/W).
- Οι διαφοροποιήσεις στην εγκατεστημένη ισχύ ανά διαφορετική περίπτωση που εξετάζεται είναι αρκετά μικρές (<0.5%) με την προϋπόθεση ότι θα γίνουν σεβαστές δύο απαιτήσεις:
 - i. Η διάταξη που επιλέγεται είναι ικανή να καλύψει τις απαιτήσεις λαμπρότητας.
 - ii. Θα υπάρχει κατάλληλη διαβάθμιση ισχύος για την κάλυψη των αναγκών στην «ουρά» της καμπύλης CIE, για να διασφαλίζεται ότι δεν θα υπάρχει υπερκάλυψη των απαιτήσεων και σπατάλη ενέργειας.

Εύκολα, λοιπόν, μπορεί να συμπεράνει κανείς ότι η επιλογή μιας ανταγωνιστικής επιλογής, ως προς την εγκατεστημένη ισχύ, παραμένει αρκετά ευέλικτη, αρκεί να βρεθεί το καταλληλότερο οπτικό και να χρησιμοποιηθεί κατάλληλη διαβάθμιση ισχύος για το κομμάτι της σήραγγας με χαμηλές απαιτήσεις λαμπρότητας (τέλος μεταβατικής ζώνης και εσωτερική ζώνη). Δεδομένης της παραπάνω ευελιξίας, η επιλογή της βέλτιστης εναλλακτικής επηρεάζεται από διάφορους οικονομικούς παράγοντες, οι οποίοι θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 4: Οικονομοτεχνική μελέτη

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται η οικονομοτεχνική προσέγγιση στην υλοποίηση ενός έργου. Αρχικά παρουσιάζεται η μέθοδος υπολογισμού του κόστους μιας επένδυσης. Το συνολικό κόστος που εξετάζεται στην τεchnοοικονομική ανάλυση ενός σεναρίου διακρίνεται σε τρία τμήματα:

- 1) το κόστος αρχικής επένδυσης
- 2) το κόστος καταναλισκόμενης ενέργειας και
- 3) το κόστος των ανταλλακτικών και των εργασιών συντήρησης.

Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι η ανάλυση που γίνεται σε κάθε μελέτη διαχωρίζεται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα για το αν πρόκειται για αναβάθμιση υπάρχοντος τμήματος φωτισμού ή αν πρόκειται για τη δημιουργία ενός καινούργιου τμήματος φωτισμού. Η περίπτωση που εξετάζεται και θα σχολιασθεί στην παρούσα εργασία αφορά την αναβάθμιση ενός ήδη υπάρχοντος δικτύου, με σκοπό τη μείωση του λειτουργικού του κόστους και την ύπαρξη οικονομικού οφέλους μέσω της εξοικονόμησης ενέργειας. Κριτήριο αξιολόγησης σε αυτήν την περίπτωση αποτελεί η εναλλακτική με το μεγαλύτερο οικονομικό όφελος.

4.2 Μεθοδολογία υπολογισμού του συνολικού κόστους επένδυσης μιας εγκατάστασης

Το κόστος επένδυσης σε ένα σενάριο θα μπορούσε να χωριστεί σε τρία τμήματα:

- Το κόστος μελέτης: Αφορά τις εργασίες που σχετίζονται με την συλλογή πληροφοριών για το υπάρχον δίκτυο και με την προδιαγραφή των απαιτήσεων που θα εισηγηθούν στο νέο δίκτυο, με σκοπό τη βελτίωση και τη συμμόρφωση γύρω από τα ισχύοντα Εθνικά και Ευρωπαϊκά πρότυπα.
- Το κόστος προμήθειας: Σε αυτό συμπεριλαμβάνονται όλα τα κόστη γύρω από την αγορά του απαραίτητου εξοπλισμού για την πραγματοποίηση του έργου, όπως φωτιστικά, λαμπτήρες, σύστημα διαχείρισης και ελέγχου κ.α. Δεδομένου ότι πρόκειται για αναβάθμιση υπάρχοντος συστήματος, το κόστος αυτό είναι μειωμένο συγκριτικά με ένα καινούργιο έργο, καθώς μέρος του ήδη υπάρχοντος συστήματος μπορεί να αξιοποιηθεί.
- Το εργατικό κόστος: Σε αυτό περιλαμβάνονται όλα τα κόστη που απαιτούνται για την υλοποίηση των απαραίτητων εργασιών, όπως εργασίες απεγκατάστασης μέρους του παλιού συστήματος και εργασίες εγκατάστασης του καινούργιου εξοπλισμού. Στο κόστος αυτό συμπεριλαμβάνονται οι αμοιβές των εργαζομένων και τα κόστη για τη χρήση ειδικού εξοπλισμού, όπως ανυψωτικά μηχανήματα κ.α.

4.3 Υπολογισμός ετήσιου λειτουργικού κόστους:

Το ετήσιο λειτουργικό κόστος ενός σεναρίου αποτελείται από τη ετήσιο κόστος λειτουργίας και το κόστος ανταλλακτικών και εργασιών συντήρησης. Για να εκτιμηθεί το κόστος καταναλισκόμενης ενέργειας, πρέπει πρώτα να υπολογιστεί η ετήσια κατανάλωση ενέργειας $E_{\text{ετήσια}}$ με βάση τους παρακάτω τύπους [11]:

$$E_{\text{ετήσια}} = \sum_{k=1}^N [M_k * E_k] + E_{\text{nisc}} \text{ (kWh)} \quad (4.1)$$

με

$$E_k = \sum_{i=1}^{D_k} [P_{k,i} * \Delta t_{k,i}] \text{ (kWh)} \quad (4.2)$$

Όπου:

$E_{\text{ετήσια}}$: Ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος οδοφωτισμού

E_k : Ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας φωτιστικού τύπου k

N : Σύνολο διαφορετικών τύπων φωτιστικών σωμάτων

M_k : Πλήθος φωτιστικών τύπου k

D_k : Σύνολο διαφορετικών επιπέδων φωτεινής ροής του φωτιστικού τύπου k

$P_{k,j}$: Απορροφούμενη ισχύς του φωτιστικού σώματος τύπου k (W) στο επίπεδο φωτεινής ροής i

Δt_i : Ετήσιες ώρες λειτουργίας του φωτιστικού τύπου k στο επίπεδο φωτεινής ροής i

E_{misc} : Ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας πρόσθετου εξοπλισμού (controllers κ.λ.π.)

Εφόσον βρεθεί η ετήσια κατανάλωση ενέργειας, το ετήσιο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την $E_{\text{ετήσια}}$ με το συνολικό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας (€/kWh). Συνεπώς, η τιμή του κόστους καταναλισκόμενης ενέργειας είναι η ακόλουθη [11]:

$$K_{\text{ετήσιο}}^{\text{ενέργειας}} = E_{\text{ετήσια}} * \text{Τιμή}_{\text{Κ.Ε.}} \text{ (€)} \quad (4.3)$$

Στη συνέχεια, προστίθεται στο ετήσιο κόστος ενέργειας το ετήσιο κόστος συντήρησης, ώστε να υπολογιστεί το ετήσιο λειτουργικό κόστος [11]

$$K_{\text{ετήσιο}} = K_{\text{ετήσιο}}^{\text{ενέργειας}} + K_{\text{συντήρησης}} \text{ (€)} \quad (4.4)$$

Σε περιπτώσεις αντικατάστασης φωτισμού, πρέπει να υπολογίζεται το ετήσιο κόστος τόσο για την παρούσα εγκατάσταση ($K_{\text{ετήσιο}}^{\text{υφιστάμενης}}$), όσο και για κάθε εναλλακτική i . ($K_{\text{ετήσιο}}^{\text{εναλλακτικής } i}$). Έπειτα, πρέπει να υπολογίζεται το ετήσιο οικονομικό όφελος (ΕΟΟ) που αναμένεται για κάθε σενάριο, με βάση τον ακόλουθο τύπο [11]:

$$\text{ΕΟΟ}^{\text{εναλλακτικής } i} = K_{\text{ετήσιο}}^{\text{ενέργειας}} - K_{\text{ετήσιο}}^{\text{ενέργειας}} \text{ (€)} \quad (4.5)$$

4.4 Κριτήρια Οικονομικής Αξιολόγησης

Μια οικονομική επένδυση αξιολογείται με βάση την ικανότητά της να παράγει μελλοντικά έσοδα σε τέτοιο βαθμό, ώστε να καλύπτει τα μελλοντικά της κόστη (κόστη συντήρησης και λειτουργίας) αλλά και το αρχικό κόστος που χρειάστηκε για να υλοποιηθεί η επένδυση.

Τα κριτήρια με τα οποία μπορεί να αξιολογηθεί μια επένδυση διαφοροποιούνται με βάση το κατά πόσο λαμβάνουν υπόψη της τη μεταβολή της αξίας του χρήματος με την πάροδο του χρόνου. Η μεταβολή της αξίας του χρήματος με το πέρασμα του χρόνου βασίζεται στο δεδομένο ότι μία μονάδα χρήματος την παρούσα χρονική στιγμή αξίζει περισσότερο από μία μονάδα χρήματος σε κάποια μελλοντική στιγμή (φαινόμενο του πληθωρισμού). Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η χρονική μεταβολή της αξίας του χρήματος, αλλά και να μπορεί να υπολογιστεί η αξία που έχει το χρήμα μιας χρονικής στιγμής σε κάποια άλλη χρονική στιγμή, χρησιμοποιείται το επιτόκιο αναγωγής, γνωστό και ως κόστος ευκαιρίας κεφαλαίου, το οποίο συμβολίζει την απόδοση που «θυσιάζει» ο επενδυτής δεσμεύοντας τα χρήματά του σε μία επένδυση Α, αντί μίας επένδυσης Β. Το επιτόκιο αναγωγής συνήθως λαμβάνεται ίσο με τον πληθωρισμό, είτε το επιτόκιο που θα επιφέρει μια κάποια άλλη επένδυση (π.χ. προνομιακή κατάθεση), είτε με το επιτόκιο με το οποίο δανείζεται ο επενδυτής (κόστος κεφαλαίου).

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα, γίνεται σαφές ότι δεν μπορεί να εξεταστεί καμία περίπτωση με αρνητικό Ετήσιο Οικονομικό Όφελος (ΕΟΟ), καθώς διαφορετικά η επένδυση θα αποφέρει σίγουρη ζημία για τον επενδυτή.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά κάποια οικονομικά κριτήρια βάσει των οποίων μπορεί να αξιολογηθεί η επένδυση σε ένα έργο, τόσο σε περίπτωση αναβάθμισης υφιστάμενης εγκατάστασης, όσο και στη δημιουργία μίας καινούργιας εγκατάστασης. Τα κριτήρια, οι περιπτώσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν καθώς και το κατά πόσο λαμβάνεται υπόψη η μεταβολή της αξίας του χρήματος παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4.1: Κριτήρια οικονομικής αξιολόγησης [11].

Κριτήριο	Περίπτωση Χρήσης		Χρονική Μεταβολή Αξίας Χρήματος
	Αναβάθμιση Υφιστάμενου	Δημιουργία Καινούργιου	
Περίοδος Αποπληρωμής	Ναι	Όχι	Δεν Εφαρμόζεται
Απόδοση Επένδυσης (ROI)	Ναι	Όχι	Δεν Εφαρμόζεται
Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ)	Ναι	Ναι	Εφαρμόζεται
Δείκτης Αποδοτικότητας	Ναι	Όχι	Εφαρμόζεται
Σταθμισμένο Κόστος Εξοικονόμησης Ενέργειας	Ναι	Ναι	Εφαρμόζεται

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε κανένα από τα παραπάνω κριτήρια δεν λαμβάνεται υπόψη η απομένουσα αξία της υφιστάμενης εγκατάστασης. Αυτό δεν επηρεάζει τη λήψη απόφασης, καθώς ο εκάστοτε τελικός αποδέκτης μπορεί να την εκμεταλλευτεί ανεξάρτητα της εναλλακτικής που θα επιλεγεί.

4.4.1 Περίοδος Αποπληρωμής (Payback period)

Το κριτήριο αυτό αγνοεί τη χρονική μεταβολή της αξίας του χρήματος και υπολογίζει το διάστημα στο οποίο μια επένδυση επιστρέφει το κόστος υλοποίησής της. Πρόκειται ουσιαστικά για το πηλίκο του κόστους επένδυσης προς το ετήσιο οικονομικό όφελος που επιφέρει η συγκεκριμένη επένδυση. Η τιμή της περιόδου αποπληρωμής σε έτη υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο [11]:

$$ΠΑ_{\text{εναλλακτικής } i} = \frac{\text{Κόστος Επένδυσης}_{\text{εναλλακτικής } i}}{ΕΟΟ_{\text{εναλλακτικής } i}} \text{ (έτη)} \quad (4.6)$$

Όπου:

Κόστος επένδυσης: το αρχικό κόστος που χρειάζεται για την υλοποίηση της επένδυσης.

$ΕΟΟ_{\text{εναλλακτικής } i}$: το ετήσιο οικονομικό όφελος όπως υπολογίζεται από τη σχέση (4.5).

Για την επιλογή της βέλτιστης επένδυσης με βάση αυτό το κριτήριο, υπολογίζονται οι ΠΑ κάθε εναλλακτικής, απορρίπτονται εκείνες οι εναλλακτικές που η Περίοδος Αποπληρωμής υπερβαίνει τη διάρκεια ζωής της επένδυσης και τέλος επιλέγεται η επιλογή με την μικρότερη τιμή ΠΑ, καθώς είναι η επιλογή που θα κάνει τη γρηγορότερη απόσβεση της επένδυσης.

4.4.2 Απόδοση Επένδυσης (Return on Investment - ROI)

Πρόκειται για ένα ακόμα κριτήριο που αγνοεί τη χρονική μεταβολή της αξίας του χρήματος. Σε αντίθεση με την Περίοδο Αποπληρωμής, η Απόδοση Επένδυσης υπολογίζει το κέρδος που επιφέρει η επένδυση ανά επενδυμένη χρηματική μονάδα. Με άλλα λόγια, το κριτήριο αυτό είναι το πηλίκο του συνολικού οικονομικού οφέλους από την υλοποίηση μιας επένδυσης, προς το κόστος της επένδυσης. Αποτελεί έναν άμεσο δείκτη σχετικά με το ύψος του οικονομικού οφέλους και υπολογίζεται με βάση τον παρακάτω τύπο [11]:

$$ROI = \frac{ΕΟΟ_{\text{εναλλακτικής } i} \cdot \Delta ΖΕ_{\text{εναλλακτικής } i}}{\text{Κόστος Επένδυσης}} \quad (4.7)$$

Όπου:

Κόστος επένδυσης: το αρχικό κόστος που χρειάζεται για την υλοποίηση της επένδυσης.

$ΕΟΟ_{\text{εναλλακτικής } i}$: το ετήσιο οικονομικό όφελος όπως υπολογίζεται από τη σχέση (4.5).

$\Delta ΖΕ_{\text{εναλλακτικής } i}$: η αναμενόμενη διάρκεια ζωής της επένδυσης.

Για την επιλογή της βέλτιστης επένδυσης, υπολογίζονται τα ROI, απορρίπτονται εκείνα με τιμή μικρότερη της μονάδας, καθώς δεν αποφέρουν κέρδος αλλά ζημία και τέλος επιλέγεται η εναλλακτική με την μεγαλύτερη Απόδοση (ROI).

4.4.3 Καθαρή Παρούσα Αξία – ΚΠΑ (Net Present Value – NPV)

Στο κριτήριο αυτό λαμβάνεται υπόψη η χρονική μεταβολή της αξίας του χρήματος και υπολογίζεται η αξία των αναμενόμενων ετήσιων οικονομικών οφελών την παρούσα χρονική στιγμή. Η ΚΠΑ αποτελεί τη διαφορά του κόστους επένδυσης από την τωρινή αξία των αναμενόμενων ετήσιων οικονομικών οφελών της επένδυσης.

Η ΚΠΑ αποτελεί την πιο διαδεδομένη μέθοδο αξιολόγησης επενδύσεων. Ο λόγος που χρησιμοποιείται τόσο εκτεταμένα είναι ότι υπολογίζει την αξία που θα αποφέρει μία επένδυση

λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή της αξίας του χρήματος. Η τιμή της ΚΠΑ υπολογίζεται από τον επόμενο τύπο [11]:

$$ΚΠΑ = -Κόστος Επένδυσης + \sum_{\tau=1}^{\Delta ZE} \frac{K_{ετήσιο}^{υφιστάμενη} - K_{ετήσιο}^{επένδυσης}}{(1+i)^{\tau}} \quad (€) \quad (4.8)$$

Όπου:

Κόστος Επένδυσης: Το αρχικό κόστος που χρειάζεται για να πραγματοποιηθεί η εξεταζόμενη επένδυση

$K_{ετήσιο}^{υφιστάμενη}$: το υφιστάμενο ετήσιο κόστος λειτουργίας με βάση τη σχέση (4.4).

$K_{ετήσιο}^{επένδυσης}$: το ετήσιο λειτουργικό κόστος μετά την επένδυση με βάση τη σχέση (4.4).

ΔZE : η αναμενόμενη διάρκεια ζωής της επένδυσης σε έτη

i : το επιτόκιο αναγωγής (κόστος ευκαιρίας κεφαλαίου)

τ : το κάθε έτος από 1 έως ΔZE

Όταν η ΚΠΑ χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ενός νέου έργου, $K_{ετήσιο}^{υφιστάμενη} = 0$ και επιλέγεται η επένδυση με το μικρότερο συνολικό κόστος. Στην περίπτωση όμως που η ΚΠΑ χρησιμοποιείται για την αντικατάσταση υπάρχουσας εγκατάστασης, για την επιλογή της καταλληλότερης επένδυσης απορρίπτονται όλες οι εναλλακτικές με αρνητική ΚΠΑ, καθώς επιφέρουν ζημία και από τις απομένουσες θετικές ΚΠΑ, επιλέγεται η εναλλακτική με τη μεγαλύτερη τιμή στην ΚΠΑ.

4.4.4 Δείκτης Αποδοτικότητας – ΔΑ (Cost Effectiveness Index – CEI)

Το κριτήριο του Δείκτη Αποδοτικότητας (ΔΑ) είναι όμοιο με το κριτήριο της απόδοσης επί του επενδυμένου κεφαλαίου (ROI), με τη διαφορά ότι ο ΔΑ λαμβάνει υπόψη την χρονική μεταβολή της αξίας του χρήματος. Πρόκειται για το πηλίκο της τωρινής αξίας των αναμενόμενων ετήσιων οικονομικών οφελών προς το κόστος επένδυσης. Όπως και στην περίπτωση του δείκτη ROI, πρόκειται για άμεσο δείκτη και δείχνει το ύψος του οικονομικού οφέλους, σε παρούσα αξία, που επιτυγχάνει μια επένδυση. Η τιμή του ΔΑ υπολογίζεται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο [11]:

$$\Delta A = \frac{\sum_{\tau=1}^{\Delta ZE} \frac{ΕΟΟ}{(1+i)^{\tau}}}{Κόστος Επένδυσης} \quad (4.9)$$

Όπου:

Κόστος Επένδυσης: Το αρχικό κόστος που χρειάζεται για να πραγματοποιηθεί η εξεταζόμενη επένδυση

ΔZE : η αναμενόμενη διάρκεια ζωής της επένδυσης σε έτη

i : το επιτόκιο αναγωγής (κόστος ευκαιρίας κεφαλαίου)

τ : το κάθε έτος από 1 έως ΔZE

Όταν γίνεται χρήση του κριτηρίου ΔΑ, απορρίπτονται οι εναλλακτικές με ΔΑ μικρότερο της μονάδας και στη συνέχεια επιλέγεται η εναλλακτική με τον μεγαλύτερο ΔΑ.

4.4.5 Σταθμισμένο Κόστος Εξοικονομούμενης Ενέργειας – ΣΚΕΕ (Levelized Energy Efficiency Cost – LEEC)

Το κριτήριο αυτό λαμβάνει υπόψη τη μεταβολή στην χρονική αξία του χρήματος και υπολογίζει το κόστος που απαιτείται για την εξοικονόμηση μιας μονάδας ενέργειας (1 KWh). Το ΣΚΕΕ ορίζεται ως το πηλίκο του αθροίσματος του ετήσιου λειτουργικού κόστους και της μελλοντικής αξίας του κόστους επένδυσης στη διάρκεια ζωής της επένδυσης, προς την ετήσια εξοικονομούμενη ενέργεια. Το στοιχείο που κάνει το ΣΚΕΕ ένα πολύ σημαντικό κριτήριο αξιολόγησης επενδύσεων είναι ότι ανεξαρτητοποιεί την κάθε επένδυση από τη διάρκεια ζωής της, επιτρέποντας την άμεση σύγκριση εναλλακτικών με διαφορετική διάρκεια ζωής. Αυτό επιτυγχάνεται υπολογίζοντας την ισοδύναμη ετήσια αξία (σχέση (4)) του κόστους επένδυσης στη διάρκεια ζωής της. Επίσης, επειδή το ΣΚΕΕ δείχνει το συνολικό κόστος (κόστος επένδυσης και λειτουργικό) που χρειάζεται να καταβληθεί για να εξοικονομηθεί μία μονάδα ενέργειας, δείχνει άμεσα την «τιμή» της εξοικονομούμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Το κριτήριο υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο [11]:

$$\text{ΣΚΕΕ} = \frac{\text{Κόστος Επένδυσης} \cdot \frac{i \cdot (1+i)^{\Delta ZE}}{(1+i)^{\Delta ZE} - 1} + K_{\text{ετήσιο}}^{\text{επένδυσης}}}{\frac{E_{\text{ετήσια}}^{\text{υφιστάμενη}} - E_{\text{ετήσια}}^{\text{επένδυσης}}}} \quad (\text{€}) \quad (4.10)$$

Όπου:

Κόστος Επένδυσης: Το αρχικό κόστος που χρειάζεται για να πραγματοποιηθεί η εξεταζόμενη επένδυση

$K_{\text{ετήσιο}}^{\text{επένδυσης}}$: το ετήσιο κόστος λειτουργίας μετά την επένδυση με βάση τη σχέση (4.4).

$E_{\text{ετήσιο}}^{\text{υφιστάμενης}}$: η υφιστάμενη ετήσια καταναλισκόμενη ενέργεια με βάση τη σχέση (4.3).

$E_{\text{ετήσια}}^{\text{επένδυσης}}$: η ετήσια καταναλισκόμενη ενέργεια μετά την επένδυση από τη σχέση (4.3)

ΔZE : η αναμενόμενη διάρκεια ζωής της επένδυσης σε έτη

i : το επιτόκιο αναγωγής (κόστος ευκαιρίας κεφαλαίου)

Στην περίπτωση που εξετάζεται η αντικατάσταση υφιστάμενου δικτύου, συγκρίνονται τα ΣΚΕΕ, απορρίπτονται οι εναλλακτικές με ΣΚΕΕ μεγαλύτερο από την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας (€/KWh) και στη συνέχεια επιλέγεται η επένδυση με το μικρότερο ΣΚΕΕ. Για την κατασκευή νέου τμήματος δικτύου, υπολογίζεται το σταθμισμένο κόστος ενέργειας κάθε επένδυσης, το οποίο κατ' απόλυτη τιμή ισούται με το ΣΚΕΕ με δεδομένο ότι $K_{\text{ετήσιο}}^{\text{υφιστάμενης}} = 0$ και στη συνέχεια επιλέγεται η επένδυση με το μικρότερο σταθμισμένο κόστος ενέργειας.

4.5 Παράμετροι αξιολόγησης του κόστους κάθε σεναρίου

Το σενάριο που μελετάται σε αυτό το τμήμα της εργασίας είναι το ακόλουθο:

Εξετάζεται η αναβάθμιση του φωτισμού σε δύο σήραγγες της Αττικής Οδού (Μαύρη Ωρα (Α) και Μαύρη Ωρα (Ε)) με μήκος 393 και 395 μέτρα και λαμπρότητα κατωφλίου 232 και 233 cd/m² αντίστοιχα. Λόγω των ομοιοτήτων των δύο περιπτώσεων, όπως αυτές έχουν διατυπωθεί παραπάνω, στο παρόν μέρος της εργασίας αρκεί να μελετηθεί μόνο η μία σήραγγα, καθώς το ίδιο

σενάριο για κάθε σήραγγα θα επιφέρει παρόμοια αποτελέσματα. Συνεπώς, εξετάζεται οικονομικά μόνο η περίπτωση της «Μαύρης Ώρας (Α)» και θεωρείται πως το κόστος της άλλης σήραγγας είναι παρόμοιο.

4.5.1 Κόστος αρχικής επένδυσης

Το συνολικό κόστος κάθε περίπτωσης χωρίζεται σε κόστος αρχικής επένδυσης, κόστος λειτουργίας και κόστος συντήρησης. Το κόστος λειτουργίας με τη σειρά του χωρίζεται σε κόστος μελέτης (φωτισμού και Η/Μ), κόστος προμήθειας και κόστος εργασία όπως έχει δειχθεί και παραπάνω. Δεδομένου του χαρακτήρα της παρούσας εργασίας, το κόστος μελέτης μπορεί να θεωρηθεί μηδενικό, καθώς η μελέτη των περιπτώσεων γίνεται στην εργασία αυτή. Σε διαφορετική περίπτωση, το κόστος μελέτης μπορεί να θεωρηθεί κοινό για κάθε επίλυση και ίσο με 20,000€.

Το κόστος προμήθειας αποτελεί το κόστος το οποίο είναι απαραίτητο για να αγοραστούν και να μεταφερθούν όλα τα επιμέρους υλικά που χρειάζονται για την πραγματοποίηση της αναβάθμισης στο χώρο που γίνεται η αναβάθμιση. Αποτελεί δηλαδή το κόστος αγοράς συν το κόστος μεταφοράς όλων των επιμέρους απαραίτητων υλικών. Επειδή το κόστος αυτό είναι συνεχώς μεταβαλλόμενο και εξαρτάται τόσο από τις εκάστοτε τιμές των προσφερόμενων ειδών, την τοποθεσία προέλευσής τους αλλά και το μεταβλητό κόστος μεταφοράς τους, υπολογίζεται προσεγγιστικά ένα ανηγμένο κόστος προμήθειας ανά τύπο φωτιστικού σώματος.

Το κόστος προμήθειας για τα υπό μελέτη φωτιστικά σώματα προέκυψε λαμβάνοντας τιμές για φωτιστικά σώματα κατάλληλα για φωτισμό σηράγγων, από γνωστές και καταξιωμένες Ευρωπαϊκές εταιρείες. Για το ασύμμετρο οπτικό επιλέχθηκαν (ως προς την τιμή) φωτιστικά τα οποία να μπορούν να καλύψουν αν όχι όλο, το μεγαλύτερο εύρος των απαιτούμενων επιπέδων ισχύος (50-300 W). Συνεπώς, τα κόστη που προέκυψαν, ήταν τα παρακάτω:

Πίνακας 4.2: Κόστος προμήθειας ανά τύπο φωτιστικού σώματος

Φωτιστικό Σώμα	Τιμή (€)
Ασύμμετρο 300W	1,200
Ασύμμετρο 250W	1,150
Ασύμμετρο 200W	1,100
Ασύμμετρο 150W	950
Ασύμμετρο 100W	900
Ασύμμετρο 50W	850
Συμμετρικό 50W	350

Εύκολα κανείς μπορεί να παρατηρήσει ότι το κόστος των φωτιστικών είναι παρεμφερές μεταξύ 200 έως 300W, και 50 έως 150W, όπου διαδοχικές διαμορφώσεις έχουν διαφορά κόστους 50€. Οι τμηματοποιήσεις αυτές των τιμών προκύπτουν, καθώς για φωτιστικά εμπορίου 200W και άνω, το πλήθος των LED αυξάνεται αισθητά, με αποτέλεσμα να υπάρχει μία απότομη αύξηση και στην τιμή μεταξύ 150 και 200W. Σε ότι αφορά το συμμετρικό φωτιστικό, λόγω του διαφορετικού σχεδιασμού του και της ανάγκης για κάλυψης μίας διαμόρφωσης ισχύος (αυτή των 50W), γίνεται χρήση μικρότερου αριθμού LED και γενικά μειώνεται το κόστος προμήθειας. Ο τύπος που υπολογίζει το κόστος προμήθειας, συνεπώς, είναι ο παρακάτω:

$$K_{\text{προμ}} = 1,200 * M_{A300} + 1,150 * M_{A250} + 1,100 * M_{A200} + 950 * M_{A150} + 900 * M_{A100} + 850 * M_{A50} + 350 * M_{\Sigma 50} \quad (\text{€}) \quad (4.11)$$

Όπου:

M_{yx} : Το πλήθος των φωτιστικών τύπου y (A = ασύμμετρο, Σ = συμμετρικό) με ισχύ ίση με x

Τέλος, το εργατικό κόστος αποτελεί το κόστος που χρειάζεται για την απεγκατάσταση της παρούσας διάταξης φωτιστικών σωμάτων και την εγκατάστασης της καινούργιας. Μπορούμε να χωρίσουμε το κόστος αυτό σε δύο τμήματα: στο κόστος απεγκατάστασης και στο κόστος εγκατάστασης. Για το εργατικό κόστος δεν γίνεται διάκριση ανάλογα με τον τύπου του φωτιστικού, συνεπώς μπορεί να θεωρηθεί σταθερό κόστος απεγκατάστασης για κάθε τύπου φωτιστικού σώματος της εγκατάστασης και σταθερό κόστος εγκατάστασης για κάθε προσφερόμενο τύπο φωτιστικού σώματος. Πιο συγκεκριμένα, το κόστος εγκατάστασης ανέρχεται σε 40€ ανά φωτιστικό σώμα, ενώ το κόστος απεγκατάστασης είναι 25€ ανά φωτιστικό σώμα.

Συνεπώς, το κόστος εγκατάστασης υπολογίζεται από τον τύπο:

$$K_{\text{εγκ}} = 40 * M_{\text{νέα}} + 25 * M_{\text{παλιά}} \quad (\text{€}) \quad (4.12)$$

Όπου

$M_{\text{νέα}}$: Το πλήθος των νέων φωτιστικών σωμάτων που θα εγκατασταθούν.

$M_{\text{παλιά}}$: Το πλήθος των παλαιών φωτιστικών σωμάτων που θα απεγκατασταθούν.

Αθροίζοντας τα παραπάνω κόστη προκύπτει το κόστος αρχικής επένδυσης κάθε προσφοράς.

$$\begin{aligned} K_{\text{αρχεπενδ}} &= K_{\text{εγκ}} + K_{\text{προμ}} \\ &= 1,200 * M_{A300} + 1,150 * M_{A250} + 1,100 * M_{A200} + 950 * M_{A150} + 900 * M_{A100} + 850 * M_{A50} + 350 * M_{\Sigma 50} + \\ &\quad 40 * M_{\text{νέα}} + 25 * M_{\text{παλιά}} \quad (\text{€}) \quad (4.13) \end{aligned}$$

και ισχύει:

$$M_{\text{νέα}} = M_{A300} + M_{A250} + M_{A200} + M_{A150} + M_{A100} + M_{A50} + M_{\Sigma 50} \quad (4.14)$$

4.5.2 Κόστος καταναλισκόμενης ενέργειας

Πρόκειται ουσιαστικά για το λειτουργικό κόστος και εκφράζει το ποσό που θα πρέπει να πληρωθεί για τη λειτουργία του έργου σε ένα πεπερασμένο χρονικό διάστημα. Το ετήσιο λειτουργικό κόστος αποτελεί ουσιαστικά το κόστος καταναλισκόμενης ενέργειας μίας εγκατάστασης για χρονικό διάστημα ενός έτους.

Όπως έχει εξηγηθεί και στο προηγούμενο κεφάλαιο, η εξεταζόμενη σήραγγα διαθέτει 5 στάθμες φωτισμού: 100%, 75%, 50%, 25% και φωτισμό νύχτας. Οι ανηγμένες ανά ημέρα ώρες λειτουργίας της κάθε στάθμης φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Οι ώρες αυτές προέκυψαν από την επεξεργασία των δεδομένων που παραδόθηκαν από την Αττική Οδό για τις ημέρες της ισημερίας.

Πίνακας 4.3: Ανηγμένες ώρες λειτουργίας κάθε στάθμης της σήραγγας ανά ημέρα [9].

Διαβάθμιση	Χρόνος λειτουργίας (hh:mm)
100%	04:35
75%	04:45
50%	01:30
25%	02:45
Νυχτερινή	10:25
Σύνολο	24:00

Πολλαπλασιάζοντας τις ώρες του παραπάνω πίνακα με 365, υπολογίζονται οι ετήσιες ώρες λειτουργίας σε κάθε στάθμη ισχύος της σήραγγας. Ο φωτισμός της σήραγγας γίνεται με τη χρήση 3 ομάδων φωτιστικών, 2 ομάδων ασύμμετρων φωτιστικών σωμάτων και μίας ομάδας συμμετρικών φωτιστικών σωμάτων. Κάθε ασύμμετρο φωτιστικό λειτουργεί σε 3 επίπεδα ισχύος: 100%, 50% και 0% (off). Στα επίπεδα 100% και 0%, η κατανάλωση κάθε φωτιστικού είναι 100% και 0% της αναγραφόμενης αντίστοιχα. Στη στάθμη 50%, η κατανάλωση είναι μικρότερη από το 50% της ονομαστικής ισχύς του φωτιστικού, καθώς η καμπύλη της φωτεινής ροής συναρτήσει της ισχύος για τα φωτιστικά τεχνολογίας LED είναι κοίλη. Το ποσοστό της καταναλισκόμενης ισχύος είναι ίσο με 45% [12] Η καταναλισκόμενη ισχύς ανά στάθμη φωτισμού περιγράφεται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 4.4: Καταναλισκόμενη ισχύς για κάθε διαβάθμιση φωτισμού με χρήση LED

Διαβάθμιση	Επίπεδα Ισχύος Ανά Ομάδα		
	Ασύμμετρη 1	Ασύμμετρη 2	Συμμετρική
100%	100%	100%	100%
75%	100%	45%	100%
50%	100%	0%	100%
25%	45%	0%	100%
Νυχτερινή	0%	0%	100%

Αντίστοιχα με τον παραπάνω πίνακα, δημιουργείται πίνακας για την κατανάλωση σε όλα τα επίπεδα ισχύος της παρούσας εγκατάστασης. Προτού, όμως, υπολογιστεί η ποσοστιαία κατανάλωση ενέργειας πρέπει να υπολογιστεί η μέγιστη καταναλισκόμενη ισχύς της εγκατάστασης. Στο ακόλουθο πίνακα παρουσιάζεται αναλυτικά ο υπολογισμός της κατανάλωσης για το σύστημα φωτισμού που χρησιμοποιείται στη σήραγγα Μαύρη Ώρα (Α).

Πίνακας 4.5: Πλήθος και κατηγορίες φωτιστικών σωμάτων και μέγιστη καταναλισκόμενη ισχύς της σήραγγας Μαύρη Ωρα (Α)

Κατηγορία Φωτιστικού	Ισχύς ΦΣ (W)	Πλήθος
Τύπος 1	400	281
Τύπος 2	250	34
Τύπος 3	150	43
Σύνολο Φωτιστικών		358
Εγκατεστημένη Ισχύς Φωτιστικών (kW)		127.3
Προσαύξηση λόγω ballast		15%
Εγκατεστημένη Ισχύς Συστήματος Φωτισμού (kW)		146.4

Παρατηρείται πως η παρούσα εγκατάσταση έχει συνολική ισχύ περίπου διπλάσια από αυτή των προτεινόμενων λύσεων. Οι λόγοι για τους οποίους παρατηρείται αυτή η διαφορά είναι η αρχική υπερδιαστασιολόγηση της σήραγγας ως προς τον αριθμό κυκλοφορίας των οχημάτων, που έχει ως συνέπεια μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή k , μέσω του οποίου υπολογίζεται το L_{th} . Συνεπώς, η παρούσα εγκατάσταση είναι σχεδιασμένη για να καλύπτει υψηλότερα επίπεδα λαμπρότητας. Παράλληλα, η κατανάλωση ισχύος αυξάνεται συμβατικά, λόγω της κατανάλωσης των ballast των φωτιστικών, που όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα, αυξάνουν τη συνολική κατανάλωση κατά 15%. Το στραγγαλιστικό πηνίο (ή ballast) αποτελεί μία διάταξη εντός του λαμπτήρα, η οποία είναι υπεύθυνη για την τροφοδοσία του φωτιστικού σώματος με την απαραίτητη ένταση για να εκκινήσει και να λειτουργήσει το φωτιστικό. Ουσιαστικά, παράγει συνεχές σταθερό ρεύμα, ώστε να εξασφαλίσει την ομαλή λειτουργία του φωτιστικού [13].

Όμοια με τον Πίνακα 4.4, δημιουργείται ένας πίνακας που περιέχει την κατανάλωση σε κάθε επίπεδο της παρούσας εγκατάστασης. Στο σημείο αυτό παρουσιάζονται δύο παραδοχές που γίνονται κατά τον υπολογισμό της κατανάλωσης της παρούσας εγκατάστασης.

- 1) Κατά την καταγραφή των φωτιστικών σωμάτων, υπήρχαν 6 φωτιστικά σώματα, που σύμφωνα με το υπόμνημα της μελέτης, μπορεί να είναι 250W, είτε 150W. Τα φωτιστικά αυτά υπολογίζονται πως έχουν ισχύ 150W καθώς έτσι υπολογίζεται «δυσκολότερη» προς αντικατάσταση περίπτωση (χαμηλότερη κατανάλωση, άρα και πιο οικονομική).
- 2) Λόγω του υψηλού αριθμού φωτιστικών σωμάτων, θεωρείται ότι η κάθε διαβάθμιση μπορεί να επιτευχθεί χωρίς dimming, με αποτέλεσμα να υπολογίζεται χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας για τις διαβαθμίσεις 75% και 25%.

Πίνακας 4.6: Καταναλισκόμενη ισχύς για κάθε διαβάθμιση φωτισμού με χρήση της παρούσας εγκατάστασης

Διαβάθμιση	Καταναλισκόμενη Ισχύς (kW)
100%	146.4
75%	111.4
50%	76.4
25%	41.4
Νυχτερινή	6.4

Για τον υπολογισμό της ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας, χρησιμοποιούνται τα στοιχεία των Πινάκων 4.3, 4.4 και 4.6 σε συνδυασμό με τις εξισώσεις (4.1) και (4.2).

Για τις μελέτες με τη χρήση φωτιστικών LED η κατανάλωση υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned}
 E_{\text{ετήσια}} &= P_{\kappa,1} * \Delta t_{\kappa,1} = 2,2\text{kW} * 24\text{ώρες/ημέρα} * 365\text{ημέρες} = 19,272\text{kWh} \\
 E_{\text{ετήσια}} &= P_{\text{α}} * [275*(1+1)/2 + 285*(1+0.45)/2 + 90*(1+0)/2 + 165*(0.45+0)/2 + \\
 &\quad 625*(0+0)/2] / 60 * 365 \\
 &= P_{\text{α}} * 9.4\text{ώρες/ημέρα} * 365\text{ημέρες} \Leftrightarrow \\
 E_{\text{ετήσια}} &= P_{\text{α}} * 3,431 \text{ (kWh)} \quad (4.15)
 \end{aligned}$$

Για την ετήσια συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας προκύπτει ότι:

$$E_{\text{ετήσια}} = E_{\text{ετήσια}} + E_{\text{ετήσια}} = 19,272 + P_{\text{α}} * 3,431 \text{ (kWh)} \quad (4.16)$$

Για την ετήσια κατανάλωση ενέργειας της παλιάς εγκατάστασης προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned}
 E_{\text{ετήσια}} &= P_{\kappa,1} * \Delta t_{\kappa,1} = (146.4*275 + 111.4*285 + 73.2*90 + 76.4*41.4 + 625*6.4)/60*365 \Leftrightarrow \\
 E_{\text{ετήσια}} &= 1,495.27 * 365 \text{ kWh} = 545,772 \text{ kWh} = 545.772 \text{ MWh} \quad (4.17)
 \end{aligned}$$

Σε ότι αφορά την τιμή της καταναλισκόμενης ενέργειας, θεωρείται ίση με 0.10 €/kWh, σύμφωνα με τα δεδομένα από την Αττική Οδό [9].

Με βάση την εξίσωση (4.3), το ετήσιο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας, για αντικατάσταση με φωτιστικά σώματα LED προκύπτει ίσο με:

$$\begin{aligned}
 K_{\text{ετήσιο}}^{\text{ενέργειας}} &= E_{\text{ετήσια}} * \text{Τιμή}_{\text{Κ.Ε.}} = (19,272 + P_{\text{α}} * 3,399.0625) * 0.10 \text{ (€)} \Leftrightarrow \\
 K_{\text{ετήσιο}}^{\text{ενέργειας}} &= (1,927.2 + 340 * P_{\text{α}}) \text{ (€)} \quad (4.18)
 \end{aligned}$$

Ενώ, για την υπάρχουσα εγκατάσταση, το ετήσιο κόστος ενέργειας είναι ίσο με:

$$K_{\text{ετήσιο}}^{\text{ενέργειας}} = E_{\text{ετήσια}} * \text{Τιμή}_{\text{Κ.Ε.}} = 545,772 \text{ kWh} * 0.10 \text{ €/kWh} = 54,755.2 \text{ €} \quad (4.19)$$

4.5.3 Κόστος συντήρησης εγκατάστασης

Το κόστος αυτό περιλαμβάνει το κόστος για την αντικατάσταση φωτιστικών (ή τμημάτων φωτιστικών) που δυσλειτουργούν ή δε λειτουργούν και ισούται με 30€ ανά φωτιστικό σώμα, καθώς και το κόστος συντήρησης της εγκατάστασης (καθαρισμός φωτιστικών, καθάρισμα προστατευτικών κ.α.), που υπολογίζεται ίσο με 15€ ανά φωτιστικό σώμα. Τα κόστη αυτά είναι σταθερά και ανεξάρτητα από τον τύπο του φωτιστικού σώματος που χρησιμοποιείται. Σε ότι αφορά την αντικατάσταση καμένων φωτιστικών σωμάτων σε ότι αφορά τις εναλλακτικές με χρήση φωτιστικών LED, για επένδυση που εξετάζεται για χρονικό διάστημα 20 ετών, μπορεί να θεωρηθεί πως δεν προκύπτουν αστοχίες στις φωτοδιόδους LED (δεν υπάρχουν καμένοι λαμπτήρες) και πως τα κόστη συντήρησης αποτελούν τα κόστη αντικατάστασης για τυχόν βλάβες στα τροφοδοτικά (drivers) των φωτιστικών, καθώς και το κόστος συντήρησης της εγκατάστασης (καθαρισμός φωτιστικών σωμάτων κ.α.).

Το κόστος αγοράς νέου τροφοδοτικού ανέρχεται σε 50€ για τα συμμετρικά φωτιστικά και σε 100€ για τα ασύμμετρα, όπως προέκυψε μετά από έρευνα των τιμών κορυφαίων Ευρωπαϊκών κατασκευαστών. Ο λόγος αστοχίας για τα τροφοδοτικά (Failure rate) ανέρχεται σε 10%@100.000 ώρες λειτουργίας. Δεδομένων των επιπέδων φωτισμού, τα συμμετρικά φωτιστικά λειτουργούν 24 ώρες ανά ημέρα, ενώ τα ασύμμετρα κατά μέσο όρο 11,5 ώρες ανά ημέρα. Με δεδομένο ότι ένα έτος έχει 8760 ώρες, οι ετήσιοι λόγοι αστοχίας για τα συμμετρικά και τα ασύμμετρα φωτιστικά προκύπτουν ίσοι με 0.876% και 0.42% αντίστοιχα. Οι λόγοι αστοχίας για 20 έτη προκύπτουν ίσοι με 17,52% και 8,4% αντίστοιχα. Με δεδομένους τα χαμηλούς ετήσιους λόγους αστοχίας, κρίνεται πως τα κόστη αντικατάστασης τροφοδοτικών μπορούν να υπολογίζονται ανά έτος, σε συνδυασμό με το κόστος καθαρισμού των φωτιστικών σωμάτων.

Πίνακας 4.7: Κόστος αγοράς και λόγος αστοχίας τροφοδοτικών

Περίπτωση	Κόστος (€)	Ετήσιος Λόγος Αστοχίας
Συμμετρικό φωτιστικό	50€	0.876%
Ασύμμετρο φωτιστικό	100€	0.42%

Σε ότι αφορά τα κόστη αντικατάστασης των φωτιστικών της υπάρχουσας εγκατάστασης, υπολογίζεται πως το κόστος προμήθειας ενός νέου λαμπτήρα νατρίου υψηλής) ανέρχεται στα 35€ ανά φωτιστικό. Οι λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης έχουν χρόνο ζωής (Lifetime) 20,000 ώρες. Σύμφωνα με τις ώρες λειτουργίας των φωτιστικών, το 43.8% αυτών που χρησιμοποιούνται για την κάλυψη του νυχτερινού επιπέδου λαμπρότητας, που είναι τα φωτιστικά των 150W και λειτουργούν όλη την ημέρα, χρειάζονται ανά έτος αντικατάσταση λαμπτήρα, ενώ το 21.0% των υπολοίπων φωτιστικών (400W και 250W) χρειάζονται ανά έτος αντικατάσταση λαμπτήρα. Τα ποσοστά αυτά μεταφράζονται σε 147.2 φωτιστικά που χρειάζονται κάθε έτος αντικατάσταση, κατά μέσο όρο [14].

Το κόστος συντήρησης, για τις περιπτώσεις που γίνεται αντικατάσταση του υπάρχοντος φωτισμού με φωτιστικά LED, υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας τον ετήσιο λόγο αστοχίας επί το πλήθος των φωτιστικών επί την τιμή του τροφοδοτικού ανά κατηγορία (ασύμμετρα και συμμετρικά) συν το

κόστος αντικατάστασης (30€ ανά φωτιστικό) και αθροίζοντας σε αυτά το κόστος καθαρισμού ανά φωτιστικό σώμα (15€) . Δηλαδή:

$$K_{\text{συντ}} = 0.42 \cdot M_A \cdot (100+30+15) + 0.876 \cdot M_{\Sigma} \cdot (50+30+15) = 60.9 \cdot M_A + 0.876 \cdot 44 \cdot 95 \Leftrightarrow$$

$$K_{\text{συντ}} = 60.9 \cdot M_A + 3,662(\text{€}) \quad (4.21)$$

Όπου

$M_{\text{νέα}}$: Το πλήθος των νέων φωτιστικών σωμάτων. Ισχύει $M_{\text{νέα}} = M_A + M_{\Sigma}$

M_A : Το πλήθος των ασύμμετρων φωτιστικών

M_{Σ} : Το πλήθος των συμμετρικών φωτιστικών.

Για την υπάρχουσα εγκατάσταση, το ετήσιο κόστος συντήρησης ισούται με το κόστος αγοράς νέων λαμπτήρων (35€ ανά ΦΣ) και εγκατάστασή τους (30€ ανά ΦΣ) επί τον αριθμό των φωτιστικών που χρειάζονται αλλαγή λαμπτήρα, συν το ετήσιο κόστος για τον καθαρισμό των φωτιστικών (15€ ανά ΦΣ) επί το συνολικό αριθμό των φωτιστικών. Με άλλα λόγια:

$$K_{\text{συντ}} = (30+35) \cdot 147.2 + 15 \cdot 358 = 14,939\text{€} \quad (4.22)$$

Με βάση τις σχέσεις (4.13), (4.18), (4.19), (4.21) και (4.22) μπορεί να υπολογιστεί το κόστος επένδυσης κάθε εναλλακτικής, ανάλογα με το οικονομικό κριτήριο που επιλέγεται ως κριτήριο αξιολόγησης.

4.6 Επιλογή οικονομικού κριτηρίου αξιολόγησης προσφορών

Στο κεφάλαιο αυτό έχουν ήδη παρουσιαστεί πέντε διαφορετικά κριτήρια επιλογής της καλύτερης (από οικονομική άποψη) εναλλακτικής. Δεδομένου ότι εξετάζονται σενάρια αντικατάστασης φωτισμού σηράγγων, καλό θα είναι να ληφθεί υπόψη το επιτόκιο αναγωγής, οπότε τα κριτήρια «Απόδοση Επένδυσης» και «Περίοδος Αποπληρωμής» απορρίπτονται.

Πριν την πραγματοποίηση της τελικής μελέτης, καλό θα ήταν να εξετασθούν όλες οι αποδεκτές λύσεις ως προς τα οικονομικά τους οφέλη, ώστε να υπάρχει μία εικόνα σχετικά με τις πιο συμφέρουσες λύσεις, αλλά και τη διαφορά στο κόστος μεταξύ αυτών των λύσεων [15].

Για το λόγο αυτό, από τα εναπομείναντα 3 κριτήρια (ROI, NPV, CEI) επιλέγεται το κριτήριο της Καθαρής Παρούσας Αξίας σε αυτό το σημείο της εργασίας, λόγω της ευκολίας που προσφέρει στο να κατανοηθούν τα οικονομικά αποτελέσματα κάθε εναλλακτικής σε βάθος χρόνου και πιο συγκεκριμένα σε βάθος 20 ετών. Ο λόγος για τον οποίο επιλέγεται αυτό το χρονικό διάστημα είναι πως αποτελεί το σύνηθες διάστημα ζωής μιας εγκατάστασης φωτισμού σηράγγων, σε συνδυασμό με τα υψηλά κόστη κατασκευής και λειτουργίας σε έργα οδοφωτισμού σηράγγων. Σχετικά με το ετήσιο επιτόκιο αναγωγής των επενδύσεων, αυτό θεωρείται ότι ισούται με 2%.

4.7 Παρουσίαση οικονομικών αποτελεσμάτων

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα οικονομικά αποτελέσματα από κάθε περίπτωση. Τα κόστη χωρίζονται σε 3 τμήματα, κόστη αρχικής επένδυσης, κόστη λειτουργίας και κόστη συντήρησης.

Για κάθε μία από τις παραπάνω κατηγορίες, δημιουργείται και ένα πίνακας όπου παρουσιάζεται το εκάστοτε κόστος κάθε κατηγορίας για κάθε εναλλακτική.

Αρχικά παρουσιάζεται το κόστος αρχικής επένδυσης κάθε εναλλακτικής στον παρακάτω πίνακα, με βάση την εξίσωση (4.13).

Πίνακας 4.8: Κόστος αρχικής επένδυσης για κάθε εναλλακτική

A/A	Κόστος Προμήθειας (€)	Κόστος Εγκατάστασης (€)	Κόστος Απεγκατάστασης (€)	Σύνολο (€)
1.1	368,100	14,320	8,950	391,370 €
1.2	411,600	16,240	8,950	436,790 €
1.3	369,900	14,400	8,950	393,250 €
1.4	369,300	14,400	8,950	392,650 €
1.5	371,300	14,480	8,950	394,730 €
1.6	380,900	14,960	8,950	404,810 €
2.1	472,200	18,960	8,950	500,110 €
2.2	412,500	16,320	8,950	437,770 €
2.3	414,700	16,400	8,950	440,050 €
2.4	425,900	16,960	8,950	451,810 €
2.6	371,900	14,560	8,950	395,410 €
2.7	373,100	14,560	8,950	396,610 €
2.8	384,300	15,120	8,950	408,370 €
2.10	374,100	14,640	8,950	397,690 €
2.11	383,700	15,120	8,950	407,770 €
2.13	396,900	15,760	8,950	421,610 €
3.4	406,100	16,240	8,950	431,290 €
3.7	397,100	15,760	8,950	421,810 €
3.9	386,300	15,280	8,950	410,530 €
3.10	381,500	15,040	8,950	405,490 €
3.13	438,700	17,600	8,950	465,250 €
3.15	426,900	17,040	8,950	452,890 €
3.16	418,900	16,640	8,950	444,490 €
3.18	486,700	19,680	8,950	515,330 €
3.19	477,100	19,200	8,950	505,250 €
3.20	536,200	23,920	8,950	569,070 €
4.5	424,700	17,200	8,950	450,850 €
4.9	454,200	18,400	8,950	481,550 €
4.12	502,700	20,480	8,950	532,130 €
4.14	550,600	24,640	8,950	584,190 €

Παρατηρείται ότι το κόστος εγκατάστασης ανά περίπτωση κυμαίνεται από 391,370€ έως και 584,190€. Η μέγιστη τιμή είναι δηλαδή κατά 49% μεγαλύτερης της ελάχιστης. Παρατηρείται μεγάλη αύξηση όταν δεν περιέχεται το φωτιστικό των 300W. Αισθητή αύξηση παρατηρείται επίσης όταν δεν υπάρχουν φωτιστικά από δύο διαδοχικές διαβαθμίσεις ισχύος (π.χ. σύγκριση κόστους περιπτώσεων 1.2 και 2.1)

Έπειτα, καταγράφεται το ετήσιο κόστος λειτουργίας, τόσο για την παρούσα εγκατάσταση, όσο και για όλες τις εξεταζόμενες εναλλακτικές.

Πίνακας 4.9: Ετήσιο κόστος λειτουργίας κάθε περίπτωσης.

A/A	Ημερήσια Κατανάλωση Ενέργειας (KWh)	Ετήσια Κατανάλωση Ενέργειας (KWh)	Ετήσιο Κόστος Λειτουργίας (€)
1.1	779.1	284,370.7	28,437.1 €
1.2	781.9	285,399.6	28,540.0 €
1.3	779.1	284,370.7	28,437.1 €
1.4	779.1	284,370.7	28,437.1 €
1.5	779.1	284,370.7	28,437.1 €
1.6	779.1	284,370.7	28,437.1 €
2.1	776.3	283,341.9	28,334.2 €
2.2	781.0	285,056.6	28,505.7 €
2.3	781.0	285,056.6	28,505.7 €
2.4	781.0	285,056.6	28,505.7 €
2.6	779.1	284,370.7	28,437.1 €
2.7	779.1	284,370.7	28,437.1 €
2.8	779.1	284,370.7	28,437.1 €
2.10	779.1	284,370.7	28,437.1 €
2.11	779.1	284,370.7	28,437.1 €
2.13	779.1	284,370.7	28,437.1 €
3.4	779.1	284,370.7	28,437.1 €
3.7	779.1	284,370.7	28,437.1 €
3.9	779.1	284,370.7	28,437.1 €
3.10	779.1	284,370.7	28,437.1 €
3.13	781.0	285,056.6	28,505.7 €
3.15	781.0	285,056.6	28,505.7 €
3.16	781.0	285,056.6	28,505.7 €
3.18	777.2	283,684.8	28,368.5 €
3.19	777.2	283,684.8	28,368.5 €
3.20	781.9	285,399.6	28,540.0 €
4.5	779.1	284,370.7	28,437.1 €
4.9	781.9	285,399.6	28,540.0 €
4.12	777.2	283,684.8	28,368.5 €
4.14	781.9	285,399.6	28,540.0 €
Υπάρχουσα Εγκ.	1,495.3	545,772.3	54,577.2 €

Όπως έχει ήδη παρατηρηθεί, το ετήσιο κόστος λειτουργίας της υπάρχουσας εγκατάστασης είναι σχεδόν διπλάσιο από τα ετήσια κόστη των προτεινόμενων εναλλακτικών. Παρά την αυξημένη εγκατεστημένη ισχύ στην παρούσα εγκατάσταση οδο φωτισμού της σήραγγας, το ετήσιο κόστος λειτουργίας παραμένει χαμηλό. Ο λόγος για το χαμηλωμένο ετήσιο κόστος λειτουργίας είναι η χαμηλή τιμή κόστους της κιλοβατώρας. Σε παρόμοιες εγκαταστάσεις (οδικός φωτισμός και φωτισμός πλατειών), το μέσο κόστος μια κιλοβατώρας ανέρχεται περίπου στα 0.15€/kWh, ενώ η

τιμή στην παρούσα εγκατάσταση είναι αισθητά (50%) πιο μικρή και ίση με 0,10€/kWh, με αποτέλεσμα το ετήσιο κόστος λειτουργίας να παραμένει σε χαμηλότερο επίπεδα από παρόμοιες εγκαταστάσεις οδοφωτισμού σηράγγων.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα ετήσια κόστη συντήρησης της εγκατάστασης, για κάθε εξεταζόμενη εναλλακτική, καθώς και για την παρούσα εγκατάσταση.

Πίνακας 4.10: Ετήσιο κόστος συντήρησης για κάθε περίπτωση.

A/A	Ετήσιο Κόστος Αντικαταστάσεων (€)	Ετήσιο Κόστος Καθαρισμού (€)	Ετήσιο Κόστος Συντήρησης (€)
1.1	202.2	5,370.0	5,572.2 €
1.2	228.4	6,090.0	6,318.4 €
1.3	203.3	5,400.0	5,603.3 €
1.4	203.3	5,400.0	5,603.3 €
1.5	204.4	5,430.0	5,634.4 €
1.6	210.9	5,610.0	5,820.9 €
2.1	265.5	7,110.0	7,375.5 €
2.2	229.5	6,120.0	6,349.5 €
2.3	230.6	6,150.0	6,380.6 €
2.4	238.2	6,360.0	6,598.2 €
2.6	205.5	5,460.0	5,665.5 €
2.7	205.5	5,460.0	5,665.5 €
2.8	213.1	5,670.0	5,883.1 €
2.10	206.5	5,490.0	5,696.5 €
2.11	213.1	5,670.0	5,883.1 €
2.13	221.8	5,910.0	6,131.8 €
3.4	228.4	6,090.0	6,318.4 €
3.7	221.8	5,910.0	6,131.8 €
3.9	215.3	5,730.0	5,945.3 €
3.10	212.0	5,640.0	5,852.0 €
3.13	246.9	6,600.0	6,846.9 €
3.15	239.3	6,390.0	6,629.3 €
3.16	233.8	6,240.0	6,473.8 €
3.18	275.3	7,380.0	7,655.3 €
3.19	268.7	7,200.0	7,468.7 €
3.20	333.1	8,970.0	9,303.1 €
4.5	241.5	6,450.0	6,691.5 €
4.9	257.8	6,900.0	7,157.8 €
4.12	286.2	7,680.0	7,966.2 €
4.14	343.0	9,240.0	9,583.0 €
Υπάρχουσα Εγκ.	9,569.5	5,370.0	14,939.5 €

Παρατηρείται πως για τις προτεινόμενες λύσεις, το κύριο ετήσιο έξοδο είναι ο καθαρισμός των φωτιστικών, καθώς αποτελεί περίπου το 95% του ετήσιου κόστους συντήρησης. Αντίθετα, στην υπάρχουσα εγκατάσταση, το κύριο κόστος είναι η αντικατάσταση φωτιστικών σωμάτων και ισοδυναμεί με το 64% του ετήσιου κόστους συντήρησης της υπάρχουσας εγκατάστασης.

Τέλος, αθροίζονται τα συνολικά κόστη της κάθε εγκατάστασης και υπολογίζεται το συνολικό κόστος λειτουργίας για 20 έτη σε €, ισοδύναμο με το πρώτο έτος. Δηλαδή, πόσα € θα έπρεπε να πληρωθούν το πρώτο έτος της μελέτης, για να καλυφθούν οι οικονομικές απαιτήσεις της κάθε εναλλακτικής σε βάθος 20 ετών.

Πίνακας 4.11: Κόστος λειτουργίας 20ετίας κάθε εναλλακτικής.

A/A	Κόστος Αρχικής Επένδυσης	Ετήσιο Κόστος Λειτουργίας	Ετήσιο Κόστος Συντήρησης	Κόστος 20ετίας	ΚΠΑ 20ετίας
1.1	391,370.0 €	28,437.1 €	5,572.2 €	958,592.0 €	200,839.8 €
1.2	436,790.0 €	28,540.0 €	6,318.4 €	1,018,173.3 €	141,258.5 €
1.3	393,250.0 €	28,437.1 €	5,603.3 €	960,990.6 €	198,441.3 €
1.4	392,650.0 €	28,437.1 €	5,603.3 €	960,390.6 €	199,041.3 €
1.5	394,730.0 €	28,437.1 €	5,634.4 €	962,989.1 €	196,442.7 €
1.6	404,810.0 €	28,437.1 €	5,820.9 €	976,180.4 €	183,251.4 €
2.1	500,110.0 €	28,334.2 €	7,375.5 €	1,095,692.3 €	63,739.5 €
2.2	437,770.0 €	28,505.7 €	6,349.5 €	1,019,099.9 €	140,332.0 €
2.3	440,050.0 €	28,505.7 €	6,380.6 €	1,021,898.4 €	137,533.4 €
2.4	451,810.0 €	28,505.7 €	6,598.2 €	1,037,288.3 €	122,143.5 €
2.6	395,410.0 €	28,437.1 €	5,665.5 €	964,187.7 €	195,244.2 €
2.7	396,610.0 €	28,437.1 €	5,665.5 €	965,387.7 €	194,044.2 €
2.8	408,370.0 €	28,437.1 €	5,883.1 €	980,777.6 €	178,654.3 €
2.10	397,690.0 €	28,437.1 €	5,696.5 €	966,986.2 €	192,445.6 €
2.11	407,770.0 €	28,437.1 €	5,883.1 €	980,177.6 €	179,254.3 €
2.13	421,610.0 €	28,437.1 €	6,131.8 €	998,166.0 €	161,265.8 €
3.4	431,290.0 €	28,437.1 €	6,318.4 €	1,010,957.3 €	148,474.5 €
3.7	421,810.0 €	28,437.1 €	6,131.8 €	998,366.0 €	161,065.8 €
3.9	410,530.0 €	28,437.1 €	5,945.3 €	983,974.7 €	175,457.2 €
3.10	405,490.0 €	28,437.1 €	5,852.0 €	977,379.0 €	182,052.8 €
3.13	465,250.0 €	28,505.7 €	6,846.9 €	1,054,876.8 €	104,555.1 €
3.15	452,890.0 €	28,505.7 €	6,629.3 €	1,038,886.9 €	120,545.0 €
3.16	444,490.0 €	28,505.7 €	6,473.8 €	1,027,894.1 €	131,537.7 €
3.18	515,330.0 €	28,368.5 €	7,655.3 €	1,116,151.3 €	43,280.6 €
3.19	505,250.0 €	28,368.5 €	7,468.7 €	1,102,959.9 €	56,471.9 €
3.20	569,070.0 €	28,540.0 €	9,303.1 €	1,200,234.7 €	-40,802.8 €
4.5	450,850.0 €	28,437.1 €	6,691.5 €	1,036,740.0 €	122,691.8 €
4.9	481,550.0 €	28,540.0 €	7,157.8 €	1,076,934.3 €	82,497.5 €
4.12	532,130.0 €	28,368.5 €	7,966.2 €	1,138,136.8 €	21,295.0 €
4.14	584,190.0 €	28,540.0 €	9,583.0 €	1,220,021.7 €	-60,589.8 €
Υπάρχουσα Εγκ.	0.0€	54,577.2 €	14,939.5 €	1,159,431.8 €	0.0€

Οι στήλες του κόστους αρχικής επένδυσης, του ετήσιου κόστους λειτουργίας, καθώς και του ετήσιου κόστους προκύπτουν από τους Πίνακες 4.8, 4.9 και 4.10. Η στήλη «Κόστος 20ετίας» περιγράφει το κόστος λειτουργίας της εγκατάστασης για 20 χρόνια, ανηγμένο σε χρήματα του 1^{ου} έτους λειτουργίας. Τέλος Η στήλη «ΚΠΑ» περιγράφει την Καθαρή Παρούσα Αξία κάθε επένδυσης, συγκριτικά με την υπάρχουσα εγκατάσταση.

4.8 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, παρατηρείται ότι η οικονομικότερη λύση αντικατάστασης των φωτιστικών, είναι η εναλλακτική που χρησιμοποιούνται όλες οι διαβαθμίσεις ισχύος με ΚΠΑ 200,839.8€, αν και υπάρχουν συνολικά άλλες 11 λύσεις που το κόστος 20ετίας τους δεν είναι μεγαλύτερο από 30,000€ σε σχέση με την οικονομικότερη λύση. Αυτό σημαίνει ότι η βέλτιστη λύση θα μπορούσε να είναι άλλη, εάν τα δεδομένα ήταν λίγο διαφορετικά (π.χ. μεγαλύτερη τιμή κιλοβατώρας, διαφορετικά κόστη προμήθειας φωτιστικών κ.α.) Παράλληλα, υπάρχουν 2 εναλλακτικές με αρνητική ΚΠΑ, η χειρότερη εκ των οποίων είναι κατά 60,589.8€ ακριβότερη της υπάρχουσας εγκατάστασης. Με άλλα λόγια, ενώ υπάρχουν αρκετές εναλλακτικές με παρεμφερή κόστη λειτουργίας, υπάρχουν και κάποιες εναλλακτικές οι οποίες είναι σαφώς χειρότερες από άλλες. Για το λόγο αυτό, στο επόμενο κεφάλαιο, που παρουσιάζεται η τελική μελέτη με πραγματικά δεδομένα, επιλέγονται ως ενδεικτικότερες οι περιπτώσεις 1.1 ως η οικονομικότερη λύση και η 3.9 ως η 12^η οικονομικότερη. Ο λόγος που επιλέγεται η 3.9 είναι καθώς είναι η «τελευταία» από τις 12 οικονομικότερες, που έχουν μεταξύ τους συγκριτικά μικρή διαφορά και επιτρέπει με αυτό τον τρόπο να μελετηθεί η διαφορά στο κόστος συγκριτικά με την οικονομικότερη λύση, με πραγματικά δεδομένα.

Κεφάλαιο 5: Εκπόνηση μελέτης φωτισμού με πραγματικά δεδομένα

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η τελική μελέτη με βάση τα φωτομετρικά αρχεία πραγματικών φωτιστικών, προκειμένου να εξαχθούν αποτελέσματα σχετικά με το κατά πόσο είναι δυνατή η αντικατάσταση των υπαρχόντων φωτιστικών, αλλά και κατά πόσο η αντικατάσταση αυτή αποτελεί μία οικονομικά βιώσιμη λύση. Παράλληλα γίνεται και επαλήθευση της μεθοδολογίας βελτιστοποίησης της μελέτης φωτισμού που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

5.2 Χαρακτηριστικά των σηράγγων της Αττικής Οδού Μαύρη Ώρα (Α) και Μαύρη Ώρα (Ε)

5.2.1 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Σηράγγων

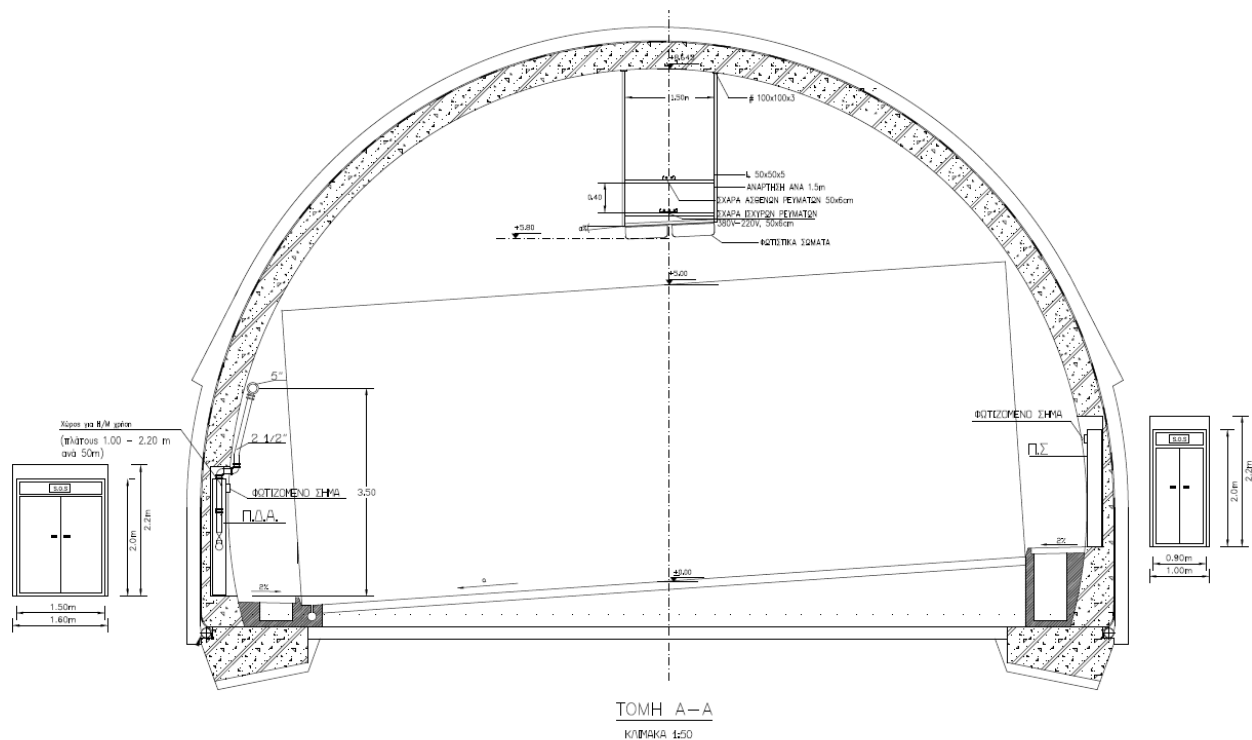
Όπως έχει ήδη διατυπωθεί στο Κεφάλαιο 3, οι σήραγγες έχουν κοινή γεωμετρία και είναι όμοιες με τις σήραγγες που χρησιμοποιήθηκαν ως μοντέλο. Τα κοινά τους χαρακτηριστικά με τις σήραγγα μοντέλο που εξετάστηκε είναι τα ακόλουθα:

- Αριθμός λωρίδων (3)
- Πλάτος οδοστρώματος (11.25m, δηλαδή 3.75m ανά λωρίδα)
- Πλάτος πεζοδρομίων (1m εκατέρωθεν του οδοστρώματος)
- Ύψος πεζοδρομίων (0.1m)
- Σχήμα σήραγγας (ημικυλινδρική)

Τα δύο σημεία που διαφοροποιούνται οι εξεταζόμενες σήραγγες από τη σήραγγα μοντέλο του τρίτου κεφαλαίου είναι το μήκος κάθε σήραγγας (μήκος σήραγγας μοντέλου = μήκος σήραγγας Μαύρη Ώρα (Α) = 393m και μήκος σήραγγας Μαύρη Ώρα (Ε) = 395m) καθώς και στο γεγονός πως οι υπάρχουσες σήραγγες της Αττικής Οδού παρουσιάζουν κλίση κάθετα στην κατεύθυνση κυκλοφορίας του οδοστρώματος κατά 2%. Η κλίση αυτή δεν επηρεάζει την τοποθέτηση των φωτιστικών σωμάτων, καθώς η επίδραση της κλίσης στο οδόστρωμα εξουδετερώνεται με την χρήση ίδιας κλίσης κατά την ανάρτηση των φωτιστικών σωμάτων, όπως φαίνεται και στη ακόλουθη εικόνα.

5.2.2 Χαρακτηριστικά Εγκατεστημένων Φωτιστικών Σωμάτων

Τα φωτιστικά σώματα που χρησιμοποιούνται στις δύο σήραγγες βρίσκονται σε τρεις διαφορετικές διαβαθμίσεις ισχύος: 400W, 250W και 150W. Η σήμανση κάθε φωτιστικού γίνεται με βάση το υπόμνημα και τις κατόψεις των δύο σηράγγων της Αττικής Οδού, στις οποίες φαίνονται οι θέσεις και ο τύπος των φωτιστικών. Σε κάθε σήραγγα υπάρχει ένας αριθμός φωτιστικών σωμάτων (6), τα οποία έχουν σήμανση 250W και 150W ταυτόχρονα. Τα φωτιστικά αυτά θεωρούνται ως φωτιστικά ισχύος 150W, καθώς η επίλυση αυτής της περίπτωσης εξασφαλίζει και τη λύση για τις λοιπές περιπτώσεις, δηλαδή αν κάποια από τα φωτιστικά σώματα είναι 250W.



Εικόνα 5.1: Κοινή πρόσοψη των σηράγγων Μαύρη Ώρα (Α) και Μαύρη Ώρα (Ε)

Σε ότι αφορά τη θέση εγκατάστασης των φωτιστικών, παρατηρείται ότι αυτή διαφοροποιείται από την αρχική υπόθεση τόσο ως προς το ύψος (πραγματικό ύψος εγκατάστασης 5.8m, ύψος εγκατάστασης στις υποθέσεις 5.5m), όσο και στο πλάτος του οδοστρώματος στο οποίο τα φωτιστικά είναι τοποθετημένα. Στην υπόθεση, τα φωτιστικά σώματα τοποθετήθηκαν (ως προς το πλάτος τους) στις θέσεις $y_{1\mu}=3.75\text{m}$ και $y_{2\mu}=7.50\text{m}$, δηλαδή πάνω στη διαχωριστική γραμμή της κεντρικής λωρίδας. Με βάση όμως την παραπάνω εικόνα, παρατηρείται ότι η εγκατάσταση των φωτιστικών γίνεται αξονικά με απόσταση των δύο φωτιστικών από το κέντρο του ενός στο κέντρο του άλλου ίση με 1m, δηλαδή τα φωτιστικά έχουν τοποθετηθεί στις θέσεις $y_1=5.125\text{m}$ και $y_2=6.125\text{m}$. Επίσης, 50m μετά την αρχή της ζώνης προσαρμογής (transition zone), χρησιμοποιείται μία γραμμή φωτιστικών σωμάτων αντί για δύο, στο κέντρο της σήραγγας, δηλαδή στη θέση $y_3=5.625\text{m}$.

Παράλληλα, τα φωτιστικά είναι τοποθετημένα μέσα στη σήραγγα, με τρόπο που επιτρέπει την κάλυψη 5 επιπέδων λαμπρότητας φωτισμού (4 επίπεδα για την ημέρα +1 για τη νύχτα).

5.3 Επιλογή Φωτιστικών Σωμάτων και θέσεις τοποθέτησής τους

Λόγω της μεγάλης διαφοροποίησης στις θέσεις τοποθέτησης των φωτιστικών μεταξύ των πραγματικών σηράγγων και της σήραγγας μοντέλου, εξετάζεται κατά πόσο οι απαιτήσεις φωτισμού της σήραγγας μπορούν να καλυφθούν και από τις θέσεις $y_1=5.125\text{m}$ και $y_2=6.125\text{m}$, σε όλο το μήκος της σήραγγας με τη χρήση του οπτικού 1.

Αρχικά τοποθετούνται τα φωτιστικά στις θέσεις $y_1=5.125\text{m}$ και $y_2=6.125\text{m}$. Οι απαιτήσεις φωτισμού καλύπτονται ως προς το επίπεδο λαμπρότητας και διαμήκους ομοιομορφίας, αλλά η απαίτηση της ολικής ομοιομορφίας ($U_o \geq 0.40$) δεν καλύπτεται. Στη συνέχεια δοκιμάζονται όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί δίνοντας κλίση στις δύο σειρές φωτιστικών, είτε προς τα δεξιά είτε προς τα αριστερά του οδοστρώματος, από 0° έως 10° με βήμα 5° . Προκειμένου να διατηρηθεί η ομοιομορφία απαιτείται η κλίση που δίνεται στη μία σειρά φωτιστικών να είναι αντίθετη από αυτή που δίνεται στην άλλη (π.χ. αν η σειρά y_1 λάβει κλίση 5° προς τα δεξιά, η y_2 θα λάβει κλίση 5° προς τα αριστερά). Παρατηρείται ότι δεν υπάρχει αποδεκτή κλίση στα φωτιστικά, η οποία να καλύπτει τις απαιτήσεις ως προς την ολική ομοιομορφία της σήραγγας.

Στη συνέχεια εξετάζονται και τα οπτικά 2 και 3 με θέσεις τοποθέτησης $y_1=5.125\text{m}$ και $y_2=6.125\text{m}$ και με κλίση των φωτιστικών κάθετα στην κατεύθυνση μετακίνησης των οχημάτων, όπως και προηγουμένως. Όμοια με πριν, δεν προκύπτει λύση η οποία να ικανοποιεί τις απαιτήσεις της ολικής ομοιομορφίας U_o . Δεδομένης της μεγάλης διαφοράς ισχύος που έχει υπολογιστεί στο Κεφάλαιο 3 μεταξύ του οπτικού 3 και του επόμενου (Πίνακας 3.1 #6 το οπτικό 3 και #4 η επόμενη αποδεκτή λύση με την 4^η χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας), αποφασίζεται πως η βέλτιστη λύση, που θα καλύπτει τις ανάγκες φωτισμού των σηράγγων, αλλά θα είναι και η πιο οικονομική, είναι η τοποθέτηση φωτιστικών με το πολικό διάγραμμα του οπτικού 1, σε καινούργιες θέσεις στο εσωτερικό της σήραγγας.

Για την επιλογή των θέσεων τοποθέτησης των δύο σειρών φωτιστικών επιλέγονται οι θέσεις εκείνες που εξασφαλίζουν σε όλες τις στάθμες φωτισμού τις απαιτήσεις λαμπρότητας, ολικής ομοιομορφίας και διαμήκους ομοιομορφίας. Με δεδομένο ότι η υπάρχουσα εγκατάσταση έχει 4 στάθμες φωτισμού συν τη νυχτερινή (σύνολο 5), επιλέγονται 9 στάθμες φωτισμού για τη νέα εγκατάσταση, ώστε να επιτυγχάνεται η κάλυψη των αναγκών φωτισμού των σηράγγων με μικρότερη σπατάλη ενέργειας. Τα επίπεδα φωτισμού που επιλέγονται είναι τα ακόλουθα: 100%, 87.5%, 75%, 62.5%, 50%, 37.5%, 25%, 12.5% και νυχτερινός φωτισμός, όπου ως 100% ορίζεται η μέγιστη λαμπρότητα κατωφλίου L_{th} (232cd/m^2 και 233cd/m^2 για τις σήραγγες Μαύρη Ωρα (Α) και (Ε) αντίστοιχα).

Τα παραπάνω επίπεδα επιτυγχάνονται με τη χρήση 3 ομάδων ασύμμετρων φωτιστικών και τη μείωση της φωτεινής ροής κάθε ομάδας από 100% έως 50% (dimming). Η πρώτη ομάδα φωτιστικών έχει το 50% των φωτιστικών, ενώ οι υπόλοιπες 2 έχουν το 25% η κάθε μία. Τέλος, υπάρχει και μία ομάδα με τα συμμετρικά φωτιστικά, η οποία λειτουργεί μόνιμα. Τα επίπεδα φωτεινής ροής φαίνονται αναλυτικότερα στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5.1: Επίπεδα φωτισμού για τη σήραγγα Μαύρη Ωρα (Α)

Επίπεδο	1	2	3	4	5	6	7	8	Νυχτερινό
Ομάδα 1	100%	100%	100%	100%	100%	0%	0%	0%	0%
Ομάδα 2	100%	100%	100%	50%	0%	100%	100%	50%	0%
Ομάδα 3	100%	50%	0%	0%	0%	50%	0%	0%	0%
Συμμετρικός	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Ποσοστό L_{th}	100%	87.5%	75%	62.5%	50%	37.5%	25%	12.5%	-
L_{th} (cd/m^2)	232	203	174	145	116	87	58	29	1.5

Λόγω της μικρής διαφοράς στην λαμπρότητα κατωφλίου L_{th} μεταξύ της Μαύρης Ώρας (Α) και της Μαύρης Ώρας (Ε), ο πίνακας για την περίπτωση της Μαύρης Ώρας (Ε) είναι ίδιος, με εξαίρεση τις τιμές κάποιων κελιών στην τελευταία γραμμή, οπότε δεν παρατίθεται.

Συνεπώς, για να καλυφθούν τα παραπάνω επίπεδα φωτισμού με τις 3 προαναφερθείσες ομάδες, υπολογίζεται πως οι βέλτιστες θέσεις τοποθέτησης των φωτιστικών είναι $y_1=3.650m$ και $y_2=7.600m$. Παρατηρείται πως οι θέσεις τοποθέτησης παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ τους και από αυτές του Κεφαλαίου 3 ($y_1=3.750m$ και $y_2=7.500m$). Ο λόγος για αυτή τη διαφορά οφείλεται στην ύπαρξη περισσότερων ομάδων φωτισμού αλλά και στη μικρότερη ανοχή τιμών σε σχέση με τις τιμές της ομοιομορφίας, συγκριτικά με τη μελέτη που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3 (ανοχή για U_o έως 0.39). Οι επιπλέον ομάδες φωτιστικών σημαίνει πως υπάρχουν περιπτώσεις που πάνω από τα μισά φωτιστικά θα είναι εκτός λειτουργίας, άρα και σε αυτές τις περιπτώσεις, που τα ενεργά φωτιστικά θα είναι πιο αραιά, πρέπει να καλύπτονται οι απαιτήσεις για την οριζόντια και τη διαμήκη ομοιομορφία.

Τα φωτιστικά που επιλέγονται για την πραγματοποίηση της μελέτης είναι τα φωτιστικά εκείνα που έχουν τα πιο κοντινά πολικά διαγράμματα, σε σύγκριση με το πολικό διάγραμμα του οπτικού 1 από τα Κεφάλαια 3 και 4. Τα φωτιστικά που επιλέχθηκαν είναι από την εταιρεία Schreder και είναι τα ακόλουθα [16]:

- Schreder OMNISTAR 72LED NW με κωδικό οπτικού 2258
- Schreder OMNISTAR 144LED NW με κωδικό οπτικού 2258
- Schreder GL2 COMPACT2 32LED NW με κωδικό οπτικού 5103

Ως προς τα επίπεδα ισχύος των παραπάνω φωτιστικών, το GL2 COMPACT2 μοντέλο που επιλέγεται έχει ονομαστική ισχύ 51W και φωτεινή ροή 6,004lm. Όμοια, το φωτιστικό OMNISTAR 72LED που χρησιμοποιείται στην παρακάτω μελέτη διατίθεται σε τρία επίπεδα ισχύος: 78W 112W και 157W με φωτεινή ροή φωτιστικού 8,408, 11,351 και 14,715lm αντίστοιχα. Τέλος για το φωτιστικό OMNISTAR 144LED επιλέγονται δύο διαφορετικές εκδοχές, στα 224W και στα 316W αντίστοιχα με φωτεινή ροή φωτιστικού 22,871 και 29,430lm αντίστοιχα.

Παρατηρείται ότι οι διαμορφώσεις ισχύος των πραγματικών φωτιστικών διαφοροποιούνται αρκετά από αυτές που έχουν διαμορφωθεί στο Κεφάλαιο 3 για τα ασύμμετρα φωτιστικά (εδώ τα OMNISTAR 72LED και OMNISTAR 144LED). Αν και υπάρχει η δυνατότητα να γίνει μόνιμο dimming στα φωτιστικά σώματα, ώστε οι διαβαθμίσεις ισχύος των φωτιστικών να βρίσκονται πιο κοντά στις εξεταζόμενες του Κεφαλαίου 3, αυτή η ιδέα δεν εφαρμόζεται. Ο λόγος για τον οποίο δεν εφαρμόζεται η παραπάνω ιδέα είναι ότι η ρύθμιση της φωτεινής ροής (dimming) κάτω από το 50% της ονομαστικής φωτεινής ροής του φωτιστικού, δημιουργεί προβλήματα σχετικά με το διαχωρισμό των ομάδων των φωτιστικών πετυχαίνοντας παράλληλα τα επιθυμητά επίπεδα στην ομοιομορφία (U_o και U_l), ενώ παράλληλα μειώνει το χρόνο ζωής των driver των φωτιστικών, με αποτέλεσμα να αυξάνεται το κόστος συντήρησης. Επειδή κατά το διαχωρισμό των φωτιστικών σε ομάδες χρησιμοποιείται dimming έως 50% στα φωτιστικά σώματα, για να επιτυγχάνονται και τα 9 επίπεδα λαμπρότητας, ένα φωτιστικό που θα έχει υποστεί μόνιμο dimming και θα δέχεται επιπλέον dimming, θα λειτουργεί για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα σε επίπεδο φωτεινής ροής μικρότερο του 50% του ονομαστικού, με αποτέλεσμα τη μείωση του χρόνου ζωής των LED εντός

των φωτιστικών και την αύξηση του κόστους της επένδυσης. Για το λόγο αυτό, επιλέγεται να μην γίνει μόνιμη ρύθμιση της φωτεινής ροής των φωτιστικών και να λειτουργήσουν τα φωτιστικά στα ονομαστικά επίπεδα φωτεινής ροής και ισχύος.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μελετών για τις δύο σήραγγες της Αττικής Οδού, με χρήση πραγματικών φωτιστικών σωμάτων. Όπως περιγράφεται και στο Κεφάλαιο 4, επιλέγονται δύο διαφορετικές εναλλακτικές ανά σήραγγα. Πιο συγκεκριμένα, επιλέγονται οι πραγματικές λύσεις που είναι πιο κοντά στις περιπτώσεις 1.1 και 3.9, δηλαδή η περίπτωση 1.1 που επιλέγονται προς χρήση όλες οι διαφορετικές διαμορφώσεις των ασύμμετρων φωτιστικών και η περίπτωση 3.9, που γίνεται χρήση των ασύμμετρων φωτιστικών με ισχύ 78W, 157W και 316W. Οι δύο περιπτώσεις ονομάζονται Εναλλακτική 1 και 2, ανάλογα με τα φωτιστικά σώματα που χρησιμοποιούνται, με βάση τον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 5.2: Φωτιστικά σώματα που χρησιμοποιούνται στην τελική μελέτη ανά εναλλακτική

	Φωτιστικά Σώματα					
Περίπτωση	316W	224W	157W	112W	78W	51W (Int)
Εναλλακτική 1	✓	✗	✓	✗	✓	✓
Εναλλακτική 2	✓	✓	✓	✓	✓	✓

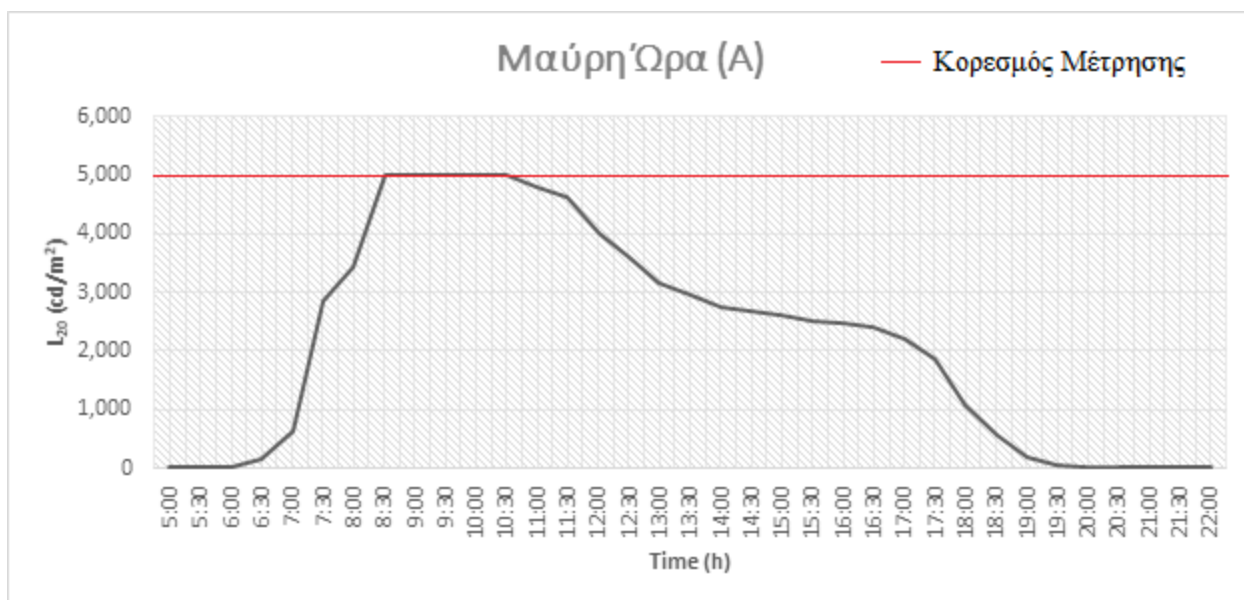
5.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων για την πρώτη σήραγγα: Μαύρη Ώρα (Α)

Αρχικά παρουσιάζεται η γραφική παράσταση της λαμπρότητας L_{20} για την εξεταζόμενη σήραγγα, με σκοπό να υπολογιστούν οι στάθμες φωτισμού στις οποίες λειτουργεί η σήραγγα, καθώς και ο ημερήσιος χρόνος που η κάθε στάθμη παραμένει ενεργή. Το παρακάτω διάγραμμα προκύπτει από την κανονικοποίηση των δεδομένων για την εξωτερική λαμπρότητα. Με άλλα λόγια, οι αρχικές τιμές που δεν συνάδουν με την ημερήσια μεταβολή της λαμπρότητας, αγνοούνται. Έπειτα, υπολογίζονται οι ενδιάμεσες τιμές με τη χρήση γραμμικής παρεμβολή, έτσι ώστε να υπολογίζεται η μέση τιμή της ετήσιας εξωτερικής λαμπρότητας ανά πέντε λεπτά. Παρατηρείται ότι η λαμπρότητα στο χρονικό διάστημα $t_1 = 8:30$ έως $t_2 = 10:30$ παραμένει σταθερή και ίση με $5,000 \text{ cd/m}^2$. Αυτό συμβαίνει λόγω του εύρους λειτουργίας του οργάνου μέτρησης. Η απώλεια ακρίβειας για αυτές της 2 ώρες δεν αποτελεί εμπόδιο στον υπολογισμό της καταλληλότερης στάθμης φωτισμού, καθώς για $L_{20} = 5,000 \text{ cd/m}^2$ και για δείκτη $k=0.05$ (όπως έχει ήδη υπολογιστεί στο Κεφάλαιο 2), η διαμόρφωση ισχύος που χρησιμοποιείται είναι το 100% της εγκατεστημένης.

Σε ότι αφορά τη μορφή της γραφικής παράστασης, παρατηρείται ότι στο χρονικό διάστημα από $t_3=20:00$ έως $t_4=6:00$, η τιμή της εξωτερικής λαμπρότητας είναι μηδενική, που σημαίνει ότι δεν υπάρχει φωτισμός λόγω ήλιου και λειτουργεί το νυχτερινό επίπεδο φωτισμού. Για το χρονικό διάστημα από t_4 έως t_3 , παρατηρείται πως η λαμπρότητα αυξάνεται σταδιακά, φτάνει τη μέγιστη τιμή της σε κάποια χρονική στιγμή μεταξύ t_1 και t_2 και έπειτα μειώνεται σταδιακά, μέχρι να φτάσει πάλι μηδενική τιμή για $t_3 = 20:00$.

Για τον υπολογισμό του χρόνου λειτουργίας κάθε επιπέδου φωτισμού, δεδομένων των τιμών L_{20} της σήραγγας ανά 5 λεπτά, υπολογίζεται η αντίστοιχη τιμή L_{th} για κάθε τιμή L_{20} με βάση τη σχέση (2.9). Εάν η τιμή της λαμπρότητας κατωφλίου L_{20} είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τιμή του

παρόντος επιπέδου λειτουργίας, τότε μπαίνει σε λειτουργία ανώτερο επίπεδο λειτουργίας, για να επιτευχθεί η απαιτούμενη λαμπρότητα. Αντίστοιχα, εάν η στάθμη λειτουργίας υπερκαλύπτει τις ανάγκες φωτισμού, τότε μπαίνει σε λειτουργία χαμηλότερη στάθμη.



Διάγραμμα 5.1: Εξωτερική Λαμπρότητα L_{20} για τη σήραγγα Μαύρη Ώρα (Α) [9].

Τα όρια λειτουργίας κάθε επιπέδου λαμπρότητας φαίνονται αναλυτικά στον παρακάτω Πίνακα.

Πίνακας 5.3: Όρια λειτουργίας επιπέδων φωτισμού της σήραγγας Μαύρη Ώρα (Α).

Επίπεδο/ L_{20}	1	2	3	4	5	6	7	8	9 (Νυχτ)
Max	-	203	174	145	116	87	58	29	1.5
Min	204	175	146	117	88	59	30	2	0

Παρατηρείται ότι δεν υπάρχει άνω όριο για την ανώτερη στάθμη, καθώς σε περίπτωση που υπάρχει $L_{20} > 232 \text{ cd/m}^2$, δεν υπάρχει ανώτερη στάθμη να λειτουργήσει, συνεπώς εξακολουθεί να είναι σε λειτουργία η στάθμη 1. Με βάση τον παραπάνω πίνακα και τις τιμές του Διαγράμματος 5.1, υπολογίζεται ο χρόνος λειτουργίας κάθε στάθμης φωτισμού στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 5.4: Ημερήσιος χρόνος λειτουργίας για κάθε στάθμη φωτισμού νέας εγκατάστασης για τη Μαύρη Ώρα (Α)

Επίπεδο	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Σύνολο
Χρόνος (hh:mm)	3:45	0:50	1:30	3:15	0:55	0:35	0:40	2:05	10:25	24:00

Σε ότι αφορά το χρόνο λειτουργίας της υπάρχουσας εγκατάστασης, αυτός υπολογίζεται προσθέτοντας ανά δύο τους χρόνους σε διαδοχικά επίπεδα φωτισμού, ξεκινώντας από την πρώτη, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί ένας νέος πίνακας με 5 επίπεδα φωτισμού, με το τελευταίο να είναι αυτό του νυχτερινού φωτισμού.

Πίνακας 5.5: Ημερήσιος χρόνος λειτουργίας για κάθε στάθμη φωτισμού υπάρχουσας εγκατάστασης για τη Μαύρη Ώρα (Α)

Επίπεδο	1	2	3	4	5 (Νυχτ)	Σύνολο
Χρόνος (hh:mm)	4:35	4:45	1:30	2:45	10:25	24:00

Ο πίνακας που προκύπτει είναι προφανώς ίδιο με τον Πίνακα 4.3 του Κεφαλαίου 4.

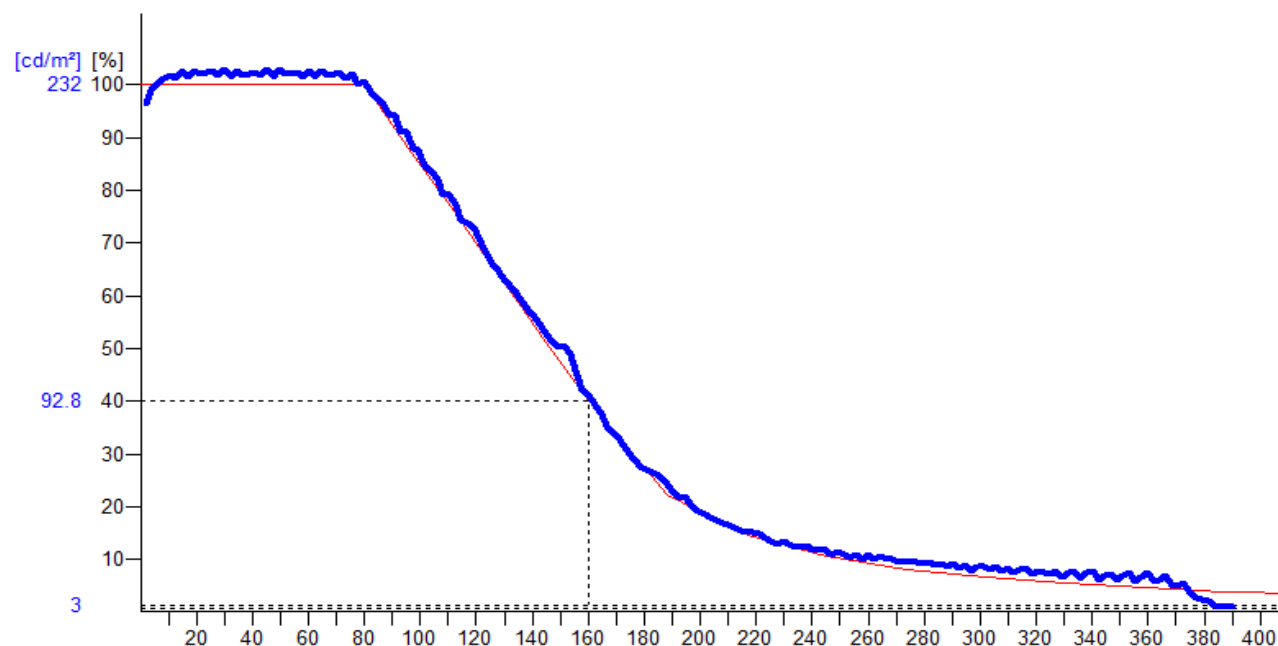
5.4.1 Εναλλακτική 1

Σε αυτή την εναλλακτική γίνεται χρήση 3 διαφορετικών διαμορφώσεων ασύμμετρων φωτιστικών. Το πλήθος των φωτιστικών που χρησιμοποιούνται είναι το ακόλουθο:

Πίνακας 5.6: Αριθμός φωτιστικών σωμάτων ανά κατηγορία για την περίπτωση Α1.

Φωτιστικά Σώματα					
316W	224W	157W	112W	78W	51W (Int)
206	0	34	0	92	34

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η καμπύλη λαμπρότητας για το εσωτερικό της σήραγγας για επίπεδο λαμπρότητας 100%. Με μπλε φαίνεται η πραγματική καμπύλη, όπως αυτή προκύπτει από την παραπάνω εγκατάσταση, ενώ με κόκκινο φαίνεται η ιδανική καμπύλη.



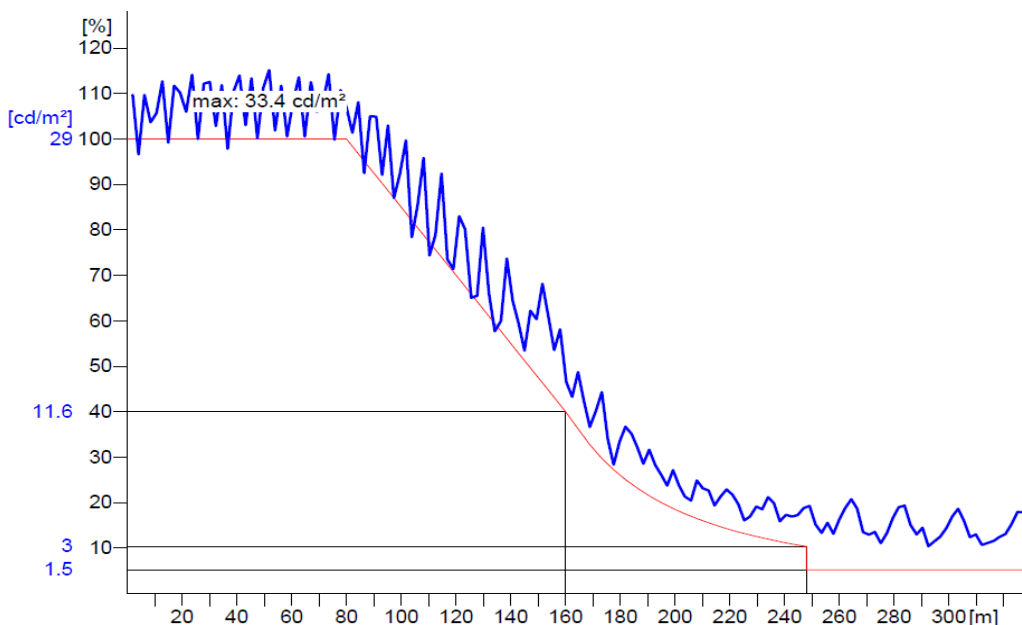
Διάγραμμα 5.2: Διάγραμμα λαμπρότητας στην περίπτωση Α1 για επίπεδο λαμπρότητας 100% [17].

Παρατηρείται πως η πραγματική τιμή της λαμπρότητας ακολουθεί πολύ καλά την ιδανική καμπύλη. Με βάση τον πίνακα 5.6, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς της παρούσας εναλλακτικής υπολογίζεται ίση με:

$$P_{A1} = 206 \cdot 316 + 157 \cdot 34 + 78 \cdot 92 + 51 \cdot 34 = 79.31 \text{ kW}$$

Παρατηρείται πως το επίπεδο της μέγιστης καταναλισκόμενης ισχύος είναι παρεμφερές με την αντίστοιχη περίπτωση 3.9 που προκύπτει από το Κεφάλαιο 3 και ισούται με 79.5 kW. Αν και τα πραγματικά φωτιστικά που χρησιμοποιούνται έχουν καλύτερη απόδοση (με συνέπεια να αναμένεται μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας), οι λόγοι που η μείωση στην κατανάλωση ενέργειας είναι τόσο μικρή, σχεδόν αμελητέα, είναι τρεις:

- 1) Το ύψος εγκατάστασης των φωτιστικών είναι 5.8m έναντι 5.5m με αποτέλεσμα η λαμπρότητα να μειώνεται αναλογικά, σύμφωνα με το λόγο του ανάστροφου τετραγώνου της απόστασης.
- 2) Τα φωτιστικά, τοποθετούνται πιο μακριά (ως προς τη θέση y) από το μέσο της σήραγγας, προκειμένου να επιτευχθούν οι απαιτήσεις σχετικά με την ολική ομοιομορφία και στα 9 επίπεδα φωτισμού, με αποτέλεσμα η κατανομή της φωτεινής ροής των φωτιστικών να είναι ελαφρώς λιγότερο αποδοτική και να απαιτούνται επιπλέον φωτιστικά σώματα.
- 3) Όπως φαίνεται και από το Διάγραμμα 5.1, η λαμπρότητα στο κατώφλι της σήραγγας L_{th} είναι αυστηρά μεγαλύτερη από 232 cd/m^2 . Για τη μελέτη του Κεφαλαίου 3, η απαίτηση για την λαμπρότητα στη ζώνη κατωφλίου ήταν να μην απέχει περισσότερο από 1% από την υπολογισμένη τιμή L_{th} (232 cd/m^2).



Διάγραμμα 5.3: Διάγραμμα λαμπρότητας στην περίπτωση A1 για επίπεδο λαμπρότητας 12.5% [17].

Παράλληλα, παρατίθεται και το διάγραμμα για τη χαμηλότερη στάθμη λειτουργίας της εγκατάστασης, πριν την στάθμη νυχτερινού φωτισμού. Παρουσιάζεται δηλαδή η στάθμη φωτισμού 8. Ο λόγος που επιλέγεται η συγκεκριμένη στάθμη είναι καθώς αποτελεί τη δυσκολότερη περίπτωση ως προς την κάλυψη των απαιτήσεων, μιας και για την κάλυψη της λειτουργεί μόλις το 25% των ασύμμετρων φωτιστικών. Η δυσκολία κάλυψης των απαιτήσεων φαίνεται και από τις έντονες ταλαντώσεις στην τιμή της λαμπρότητας.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα οικονομικά αποτελέσματα της παρούσα εναλλακτικής όπως προκύπτουν με βάση τις εξισώσεις που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4. Σε σχέση με το κόστος αρχικής επένδυσης, οι τιμές των φωτιστικών αλλάζουν. Πιο συγκεκριμένα, με δεδομένο ότι τα φωτιστικά LED που χρησιμοποιούνται έχουν δύο διαφορετικές διαμορφώσεις για την περίπτωση του ασύμμετρου και μία για την περίπτωση του συμμετρικού, οι τιμές διαμορφώνονται με βάση τον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.7: Κόστος προμήθειας φωτιστικών σωμάτων ανά περίπτωση

Φωτιστικό Σώμα (W)	Κόστος (€)
316	1,150
224	1,150
157	880
112	880
78	880
51	335

Παρατηρείται πως τα φωτιστικά σώματα που έχουν κοινό αριθμό LED έχουν και κοινό κόστος, καθώς το μόνο πράγμα που τα διαφοροποιεί είναι το ρεύμα οδήγησης (I_f) των LED τους.

Συγκριτικά με το Κεφάλαιο 4 η ημερήσια (και κατά συνέπεια και η ετήσια) κατανάλωση ενέργειας διαφοροποιούνται, καθώς πλέον υπάρχουν 9 επίπεδα λαμπρότητας. Σε ότι αφορά το χρόνο για τον οποίο κάθε επίπεδο λειτουργεί, αυτό φαίνεται στον Πίνακα 5.4. Στον ακόλουθο πίνακα φαίνεται η ισχύς λειτουργίας του καθενός από τα 9 επίπεδα.

Πίνακας 5.8: Καταναλισκόμενη ισχύς για κάθε επίπεδο λαμπρότητας για την περίπτωση Α1.

Κατανάλωση / Επίπεδο (kW)								
Επίπ. 1 100%	Επίπ. 2 87.5%	Επίπ. 3 75%	Επίπ. 4 62.5%	Επίπ. 5 50%	Επίπ. 6 37.5%	Επίπ. 7 25%	Επίπ. 8 12.5%	Επίπ. 9 Νυχτ
79.3	68.6	59.9	49.2	40.5	29.8	21.1	10.4	1.7

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία, υπολογίζονται το κόστος αρχικής επένδυσης, το ετήσιο κόστος λειτουργίας, καθώς και το ετήσιο κόστος συντήρησης. Τα κόστη αυτά παρουσιάζονται στη Ενότητα 5.4.3 μαζί με τα αντίστοιχα κόστη της εναλλακτικής 2.

5.4.2 Εναλλακτική 2

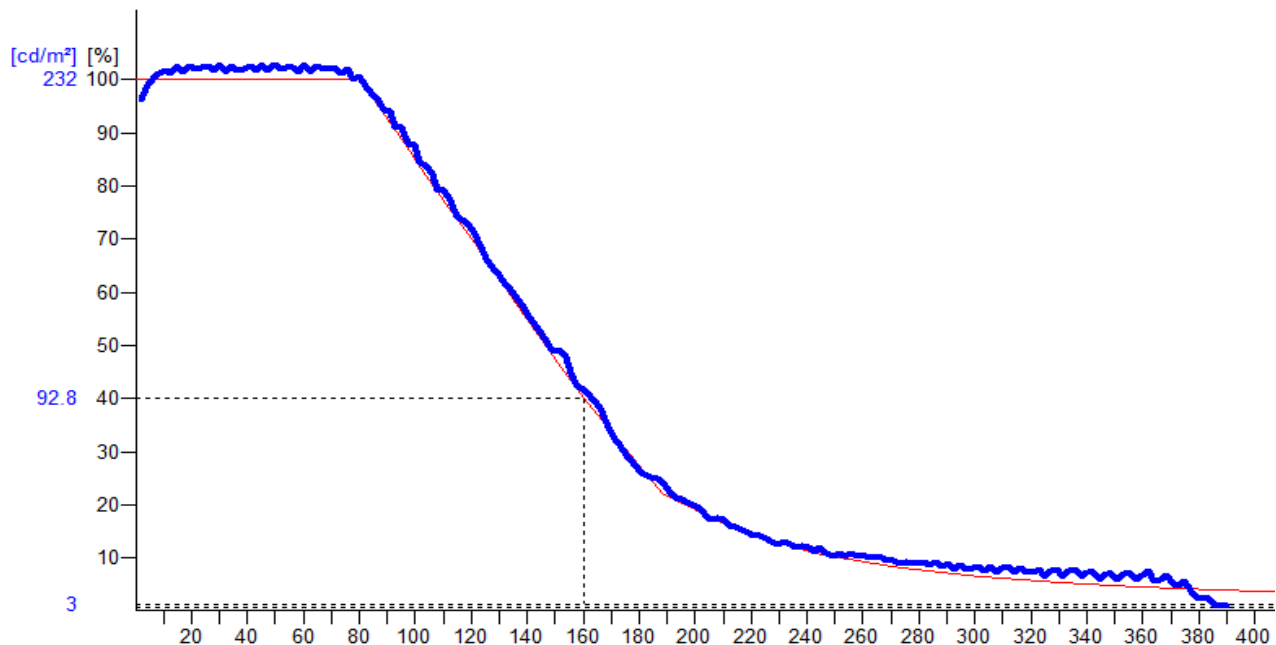
Όμοια με πριν παρατίθεται ο πίνακας με το πλήθος των φωτιστικών σωμάτων ανά κατηγορία

Πίνακας 5.9: Αριθμός φωτιστικών σωμάτων ανά κατηγορία για την περίπτωση A2.

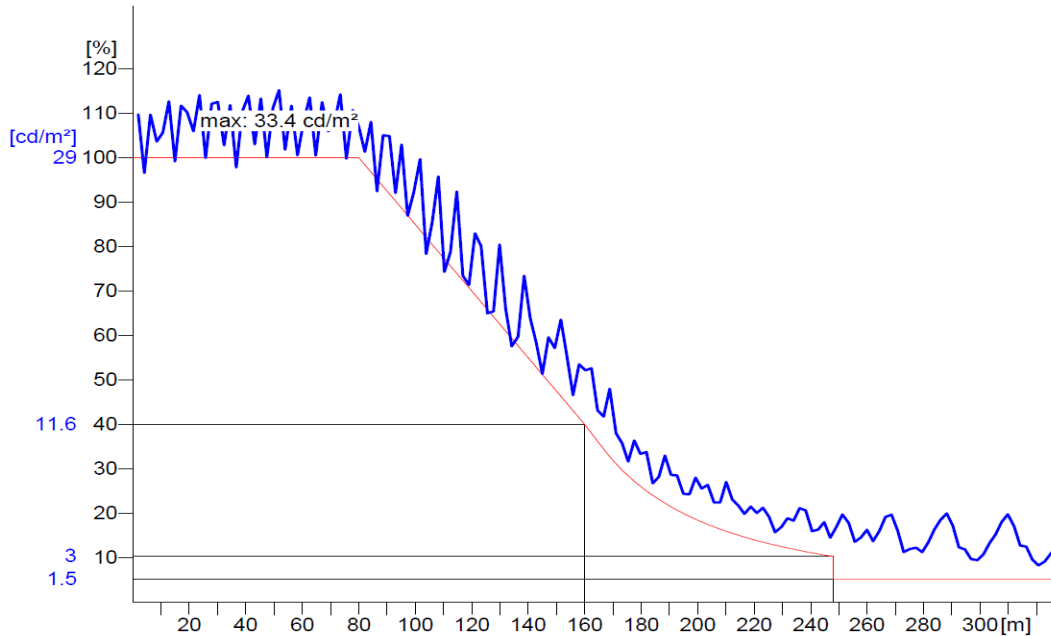
Φωτιστικά Σώματα					
316W	224W	157W	112W	78W	51W (Int)
206	10	18	12	76	34

Παρατηρείται πως αν και γίνεται χρήση όλων των διαθέσιμων φωτιστικών σωμάτων, η απουσία της μίας επιπλέον διαβάθμισης κάνει την εκδοχή αυτή να είναι πιο κοντά στις περιπτώσεις 1.3 και 1.4, όπως αυτές έχουν παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 4.

Έπειτα παρατίθενται οι καμπύλες λαμπρότητας για το εσωτερικό της σήραγγας για επίπεδα λαμπρότητας 100% και 12.5% για την περίπτωση A2.



Διάγραμμα 5.4: Διάγραμμα λαμπρότητας στην περίπτωση A2 για επίπεδο λαμπρότητας 100% [17].



Διάγραμμα 5.5: Διάγραμμα λαμπρότητας στην περίπτωση A2 για επίπεδο λαμπρότητας 12.5% [17].

Στη συνέχεια υπολογίζεται η μέγιστη εγκατεστημένη ισχύς για την περίπτωση A2.

$$P_{A2} = 206 \cdot 316 + 224 \cdot 10 + 157 \cdot 18 + 112 \cdot 12 + 78 \cdot 76 + 51 \cdot 34 = 79.13 \text{ kW}$$

Παρατηρείται ότι η ισχύς της εναλλακτικής 2 είναι παρεμφερής με εκείνη της εναλλακτικής 1. Αυτό είναι αναμενόμενο, δεδομένης της μικρής απόκλισης όλων των περιπτώσεων που έγιναν αποδεκτές στο Κεφάλαιο 3 για το οπτικό 1 (συνολικά 30 περιπτώσεις).

Σε ότι αφορά τους λόγους για τους οποίους επιλέγονται τα διαγράμματα λαμπρότητας για τις παραπάνω περιπτώσεις, τους λόγους που η εξοικονόμηση ενέργειας δεν είναι μεγαλύτερη, παρά την καλύτερη αποδοτικότητα των φωτιστικών είναι ίδιοι με την περίπτωση A1 και συνεπώς δεν αναλύονται ξανά.

Σε ότι αφορά το κόστος αυτής της εναλλακτικής, τα μεγέθη που διαφοροποιείται και σε αυτή την περίπτωση είναι η ημερήσια κατανάλωση ενέργειας και τα κόστη προμήθειας των φωτιστικών. Συνεπώς, δημιουργείται αντίστοιχος πίνακας με τον Πίνακα 5.8 για την περίπτωση A2.

Πίνακας 5.10: Καταναλισκόμενη ισχύς για κάθε επίπεδο λαμπρότητας για την περίπτωση A2.

Κατανάλωση / Επίπεδο (kW)								
Επίπ. 1 100%	Επίπ. 2 87.5%	Επίπ. 3 75%	Επίπ.4 62.5%	Επίπ. 5 50%	Επίπ. 6 37.5%	Επίπ. 7 25%	Επίπ. 8 12.5%	Επίπ. 9 Νυχτ
79.1	68.5	59.8	49.1	40.4	29.8	21.1	10.4	1.7

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα κόστη και για τις δύο περιπτώσεις, καθώς και το κόστος για την υπάρχουσα εγκατάσταση. Υπενθυμίζεται πως τα κόστη για τις εναλλακτικές 1 και 2 υπολογίζονται με τις ίδιες εξισώσεις που έχουν παρουσιαστεί στο προηγούμενο Κεφάλαιο, ενώ τα κόστη για την παρούσα εγκατάσταση της σήραγγας (Α) έχει ήδη υπολογιστεί.

5.4.3 Οικονομικά Μεγέθη Μαύρης Ώρας (Α)

Σε ότι αφορά το κόστος αρχικής επένδυσης, αυτό υπολογίζεται σύμφωνα με την Ενότητα 4.5.1. Επειδή όμως απαιτείται εγκατάσταση νέων βάσεων για τα φωτιστικά πρέπει στο παραπάνω κόστος να προστεθεί ως επιπλέον κόστος αρχικής επένδυσης. Η κατανομή του κόστους για κάθε περίπτωση φαίνεται αναλυτικά στον παρακάτω Πίνακα. Θεωρείται ότι το κόστος για την εγκατάσταση των νέων αυτών βάσεων για τα φωτιστικά στις θέσεις $y_1=3,650\text{m}$ και $y_2=7,600\text{m}$ είναι ίσο με 120000€.

Πίνακας 5.11: Κόστος Αρχικής Επένδυσης για εναλλακτικές Α1 και Α2

Περίπτωση	Κόστος Προμήθ.	Κόστ Εγκ+Απεγκ	Κόστος Βάσεων	Σύνολο (€)
A1	359,170 €	23,590 €	120,000 €	502,760 €
A2	353,070 €	23,190 €	120,000 €	496,260 €

Στη συνέχεια, υπολογίζεται το ετήσιο κόστος λειτουργίας κάθε εναλλακτικής (Α1, Α2 και αρχική εγκατάσταση) με βάση την Ενότητα 4.5.2 και τους Πίνακες 4.6, 5.4, 5.5, 5.7, 5.8 και 5.10. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα.

Πίνακα 5.12: Κόστος Ετήσιας Λειτουργίας για την αρχική εγκατάσταση και για τις εναλλακτικές Α1 και Α2.

Περίπτωση	Ημερήσια Κατανάλωση Ενέργειας (KWh)	Ετήσια Κατανάλωση Ενέργειας (KWh)	Ετήσιο Κόστος Λειτουργίας (€)
A1	712.4	260,042.1	26,004.2 €
A2	710.7	259,410.3	25,941.0 €
Υπάρχουσα Εγκατάσταση	1,495.3	545,772.3	54,577.2 €

Έπειτα, παρουσιάζεται το ετήσιο κόστος συντήρησης της εγκατάστασης σύμφωνα με τη μεθοδολογία της Ενότητας 4.5.3 και Παρουσιάζεται στον παρακάτω Πίνακα.

Πίνακας 5.13: Ετήσιο Κόστος Συντήρησης για την αρχική εγκατάσταση και για τις εναλλακτικές A1 και A2.

Περίπτωση	Ετήσιο Κόστος Αντικατάστασης (€)	Ετήσιο Κόστος Καθαρισμού (€)	Σύνολο (€)
A1	173 €	5,490 €	5,663€
A2	169 €	5,340 €	5,509€
Υπάρχουσα Εγκατάσταση	9,569 €	5,370 €	14,939€

Με βάση τις τιμές των Πινάκων 5.11, 5.12 και 5.13, υπολογίζεται κατά πόσο οι επενδύσεις A1 και A2 είναι συμφέρουσες. Για την εξαγωγή αυτού του συμπεράσματος χρησιμοποιούνται τα κριτήρια: α) της Καθαρής Παρούσας Αξίας (ΚΠΑ – NPV) και β) του Δείκτη Αποδοτικότητας (ΔΑ – CEI). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 5.14: Οικονομικά Αποτελέσματα για τις εναλλακτικές A1 και A2.

Περίπτωση	Υπάρχουσα Εγκατάσταση	A1	A2
Κόστος Αρχ. Επένδ.	0.0 €	502,760 €	496,260 €
Ετήσιο Κόστος Λειτ.	54,577.2 €	26,004.2 €	25,941.0 €
Ετήσιο Κόστος Συντ.	14,939.5 €	5,663.5 €	5,509.0 €
ΚΠΑ	-	128,503.4 €	138,634.1 €
ΔΑ	-	1.26	1.28

Υπενθυμίζεται πως η απαίτηση για ΚΠΑ είναι η τιμή του δείκτη να είναι μεγαλύτερη του μηδενός και μετά επιλέγεται η λύση με τη μεγαλύτερη τιμή του δείκτη ΚΠΑ. Για το ΔΑ, η απαίτηση είναι να είναι μεγαλύτερος της μονάδας και μετά επιλέγεται η λύση για την οποία προκύπτει η μεγαλύτερη τιμή για το ΔΑ.

Παρατηρείται πως και οι δύο περιπτώσεις είναι αποδεκτές και με τα δύο οικονομικά κριτήρια και μάλιστα πως και στις δύο περιπτώσεις, η επίλυση που χρησιμοποιεί όλες τις διαφορετικές διαμορφώσεις των επιλεγμένων φωτιστικών είναι οικονομικότερη.

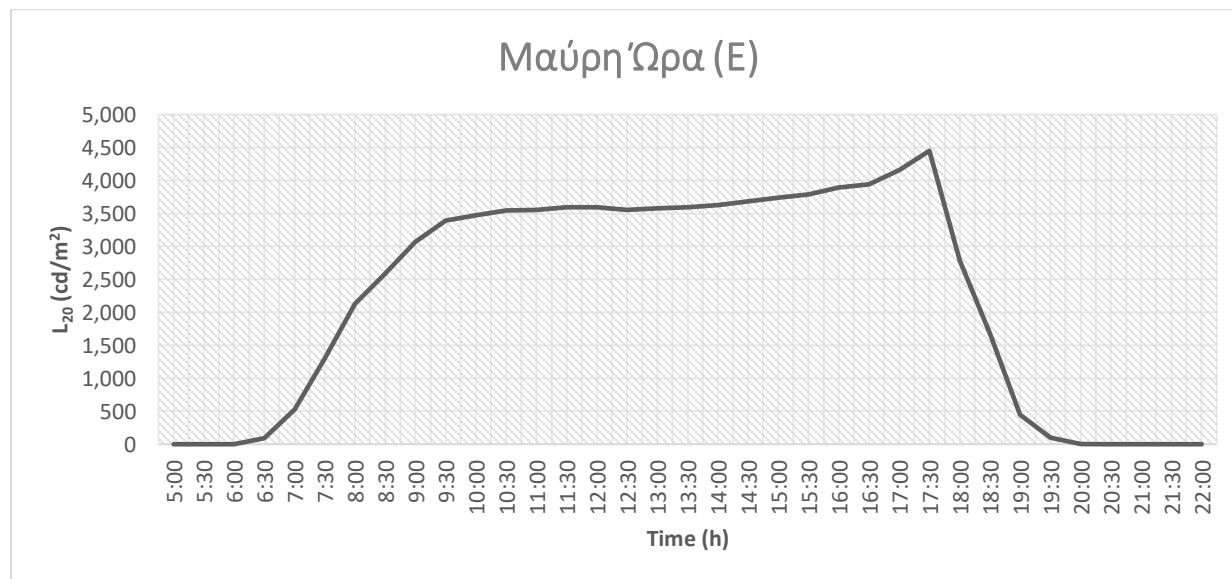
Αξίζει, όμως, να σημειωθεί πως η διαφορά μεταξύ των δύο λύσεων είναι μικρή, καθώς και οι δύο λύσεις αποφέρουν σημαντικό κέρδος. Η παρατήρηση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για την επιλογή εναλλακτικής. Σε περίπτωση που μελετάται η αλλαγή μεγάλου πλήθους φωτιστικών (π.χ. 10 σήραγγες) ή το πλήθος των φωτιστικών είναι μικρότερο, αλλά τα φωτιστικά δεν παρουσιάζουν μεγάλες διαφοροποιήσεις μεταξύ τους (όπως στην παρούσα μελέτη), η επιλογή περισσότερων διαμορφώσεων φωτιστικών σωμάτων είναι πιο εύκολη, καθώς δεν απαιτούνται πολλά διαφορετικά εξαρτήματα για τη συντήρηση. Σε περίπτωση που το πλήθος των εξεταζόμενων σηράγγων (ή των φωτιστικών μέσα σε αυτές) είναι σχετικά μικρό (<500 φωτιστικά σώματα) και οι επιλεγμένες διατάξεις φωτιστικών παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές μεταξύ τους, η επιλογή μιας εναλλακτικής με λιγότερους τύπους φωτιστικών σωμάτων είναι ελαφρώς πιο ακριβή, αλλά μπορεί να είναι συμφέρουσα, αν λάβει κανείς υπόψη τις απαιτήσεις για αποθήκευση εξαρτημάτων, τα

κόστη για την παραγγελία αυτών και τα προβλήματα που εν δυνάμει θα μπορούσε να αποτελέσει η απουσία ενός (ή περισσότερων) από τα εξαρτήματα αυτά.

5.5 Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τη δεύτερη σήραγγα: Μαύρη Ώρα (E)

Όπως και προηγουμένως, στην αρχή παρουσιάζεται η γραφική παράσταση της λαμπρότητας L_{20} για την εξεταζόμενη σήραγγα, με σκοπό να υπολογιστούν οι στάθμες φωτισμού στις οποίες λειτουργεί η σήραγγα, καθώς και ο ημερήσιος χρόνος που η κάθε στάθμη παραμένει ενεργή. Το παρακάτω διάγραμμα προκύπτει και σε αυτήν τη περίπτωση από την κανονικοποίηση των δεδομένων για την εξωτερική λαμπρότητα. Με άλλα λόγια, οι αρχικές τιμές που δεν συνάδουν με την ημερήσια μεταβολή της λαμπρότητας, αγνοούνται. Έπειτα, υπολογίζονται οι ενδιάμεσες τιμές με τη χρήση γραμμικής παρεμβολή, έτσι ώστε να υπολογίζεται η μέση τιμή της ετήσιας εξωτερικής λαμπρότητας ανά πέντε λεπτά. Παρατηρείται ότι η λαμπρότητα σε αυτή την περίπτωση έχει χαμηλότερη μέγιστη τιμή, αλλά διατηρείται για παραπάνω χρονικό διάστημα σταθερή τιμή μεταξύ $3,000 \text{ cd/m}^2$ και $3,600 \text{ cd/m}^2$ (4,5 ώρες).

Και σε αυτή την περίπτωση η γραφική παράσταση της λαμπρότητας στο χρονικό διάστημα από $t_3=20:00$ έως $t_4=6:00$, έχει μηδενική τιμή, που σημαίνει ότι δεν υπάρχει φωτισμός λόγω ήλιου και λειτουργεί το νυχτερινό επίπεδο φωτισμού. Για το χρονικό διάστημα από t_4 έως t_3 , παρατηρείται πως η λαμπρότητα αυξάνεται σταδιακά, φτάνει τη μέγιστη τιμή της σε κάποια χρονική στιγμή μεταξύ t_1 και t_2 και έπειτα μειώνεται σταδιακά, μέχρι να φτάσει πάλι μηδενική τιμή για $t_3 = 20:00$. Η διαφορά με την προηγούμενη περίπτωση είναι πως η μέγιστη τιμή λαμπρότητας επιτυγχάνεται πολύ αργότερα στην ημέρα και είναι αρκετά μικρότερη από την προηγούμενη περίπτωση.



Διάγραμμα 5.6: Εξωτερική Λαμπρότητα L_{20} για τη σήραγγα Μαύρη Ώρα (E) [9].

Για τον υπολογισμό του χρόνου λειτουργίας κάθε επιπέδου φωτισμού, δεδομένων των τιμών L_{20} της σήραγγας ανά 5 λεπτά, υπολογίζεται η αντίστοιχη τιμή L_{th} για κάθε τιμή L_{20} με βάση τη σχέση (2.9). Εάν η τιμή της λαμπρότητας κατωφλίου L_{20} είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τιμή του παρόντος επιπέδου λειτουργίας, τότε μπαίνει σε λειτουργία ανώτερο επίπεδο λειτουργίας, για να

επιτευχθεί η απαιτούμενη λαμπρότητα. Αντίστοιχα, εάν η στάθμη λειτουργίας υπερκαλύπτει τις ανάγκες φωτισμού, τότε μπαίνει σε λειτουργία χαμηλότερη στάθμη.

Τα όρια λειτουργίας κάθε επιπέδου λαμπρότητας φαίνονται αναλυτικά στον παρακάτω Πίνακα.

Πίνακας 5.15: Όρια λειτουργίας επιπέδων φωτισμού της σήραγγας Μαύρη Ώρα (Ε).

<i>Επίπεδο</i> / L_{20}	1	2	3	4	5	6	7	8	9 (Νυχτ)
Max	-	204	175	146	117	87	58	29	1.5
Min	205	176	147	118	88	59	30	2	0

Όπως έχει δειχθεί στη ενότητα 5.4, δεν υπάρχει άνω όριο για την ανώτερη στάθμη, καθώς σε περίπτωση που υπάρχει $L_{20} > 233 \text{ cd/m}^2$, δεν υπάρχει ανώτερη στάθμη να λειτουργήσει. Με βάση τον παραπάνω πίνακα και τις τιμές του Διαγράμματος 5.6, υπολογίζεται ο χρόνος λειτουργίας κάθε στάθμης φωτισμού στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 5.16: Ημερήσιος χρόνος λειτουργίας για κάθε στάθμη φωτισμού νέας εγκατάστασης για τη Μαύρη Ώρα (Ε)

Επίπεδο	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Σύνολο
Χρόνος (hh:mm)	0:50	6:45	1:30	0:55	0:40	0:35	0:40	1:40	10:25	24:00

Σε ότι αφορά το χρόνο λειτουργίας της υπάρχουσας εγκατάστασης, αυτός υπολογίζεται προσθέτοντας ανά δύο τους χρόνους σε διαδοχικά επίπεδα φωτισμού, ξεκινώντας από την πρώτη, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί ένας νέος πίνακας με 5 επίπεδα φωτισμού, με το τελευταίο να είναι αυτό του νυχτερινού φωτισμού.

Πίνακας 5.17: Ημερήσιος χρόνος λειτουργίας για κάθε στάθμη φωτισμού υπάρχουσας εγκατάστασης για τη Μαύρη Ώρα (Ε)

Επίπεδο	1	2	3	4	5 (Νυχτ)	Σύνολο
Χρόνος (hh:mm)	7:35	2:25	1:15	2:20	10:25	24:00

5.5.1 Εναλλακτική 1

Σε αυτή την εναλλακτική γίνεται χρήση 3 διαφορετικών διαμορφώσεων ασύμμετρων φωτιστικών, όπως και προηγουμένως για την εναλλακτική 1 της Μαύρης Ώρας (Α). Το πλήθος των φωτιστικών που χρησιμοποιούνται είναι το ακόλουθο:

Πίνακας 5.18: Αριθμός φωτιστικών σωμάτων ανά κατηγορία για την περίπτωση E1.

Φωτιστικά Σώματα					
316W	224W	157W	112W	78W	51W (Int)
206	0	34	0	94	34

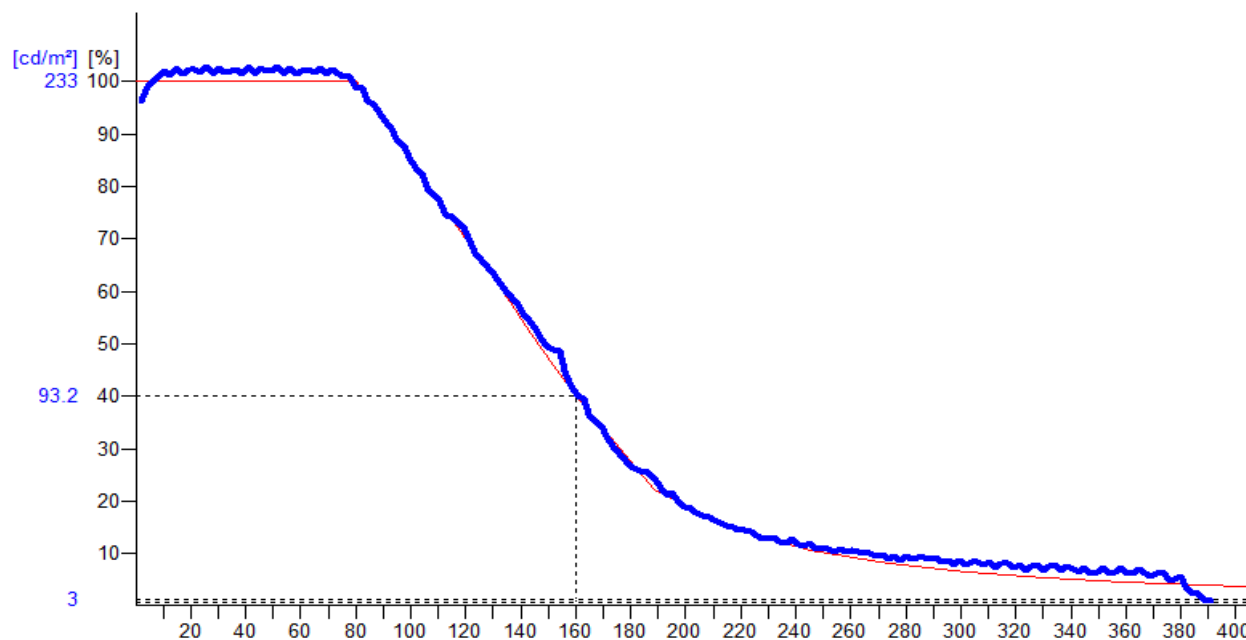
Παρατηρείται πως το πλήθος των φωτιστικών σωμάτων στην περίπτωση E1 είναι το ίδιο με την περίπτωση A1, με μόνη διαφορά 2 επιπλέον φωτιστικά σώματα των 78W. Ο λόγος που υπάρχουν μόνο αυτά τα επιπλέον φωτιστικά σώματα είναι η παραπλήσια τιμή της λαμπρότητας ζώνης κατωφλίου ($L_{th} = 233 \text{cd/m}^2$ στο 100%) και η μικρή διαφορά στο μήκος των δύο σήραγγων (2m).

Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς της εναλλακτικής αυτής υπολογίζεται ίση με:

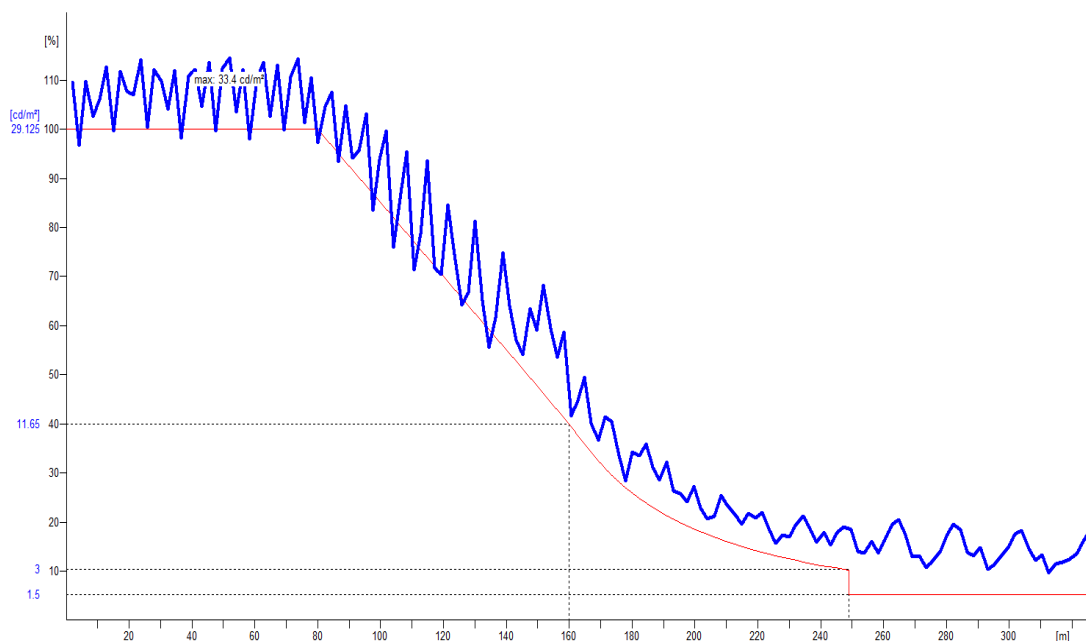
$$P_{E1} = 206 \cdot 316 + 157 \cdot 34 + 78 \cdot 94 + 51 \cdot 34 = 79.47 \text{ kW}$$

Η μικρή διαφορά που παρατηρείται μεταξύ των περιπτώσεων A1 και E1 στο πλήθος των φωτιστικών σωμάτων και το μέγιστο επίπεδο ισχύος, υποδηλώνει πως οι δύο αυτές εναλλακτικές, δεδομένου ότι οι δύο σήραγγες είναι παρεμφερείς ως προς τη γεωμετρία τους και τη λαμπρότητα ζώνης κατωφλίου, θα έχουν κοντινά οικονομικά αποτελέσματα.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η καμπύλη λαμπρότητας για το εσωτερικό της σήραγγας για επίπεδο λαμπρότητας 100%. Με μπλε φαίνεται η πραγματική καμπύλη, όπως αυτή προκύπτει από την παραπάνω εγκατάσταση, ενώ με κόκκινο φαίνεται η ιδανική καμπύλη.



Διάγραμμα 5.7: Διάγραμμα λαμπρότητας στην περίπτωση E1 για επίπεδο λαμπρότητας 100% [17].



Διάγραμμα 5.8: Διάγραμμα λαμπρότητας στην περίπτωση E1 για επίπεδο λαμπρότητας 12.5% [17].

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, μαζί με το διάγραμμα της στάθμης 1, παρουσιάζεται και το διάγραμμα της στάθμης 8 το οποίο παρουσιάζει τις μεγαλύτερες διακυμάνσεις στην τιμή της λαμπρότητας λόγω του μικρού πλήθους φωτιστικών που είναι ενεργά.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα οικονομικά αποτελέσματα της παρούσα εναλλακτικής όπως προκύπτουν με βάση τις εξισώσεις που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4. Το μόνο τμήμα που διαφοροποιείται σε σχέση με το Κεφάλαιο 4 είναι η ημερήσια (και κατά συνέπεια και η ετήσια) κατανάλωση ενέργειας, καθώς πλέον υπάρχουν 9 επίπεδα λαμπρότητας και το κόστος προμήθειας ανά φωτιστικό σώμα. Σε ότι αφορά το χρόνο για τον οποίο κάθε επίπεδο λειτουργεί, αυτό φαίνεται στον Πίνακα 5.18. Στον ακόλουθο πίνακα φαίνεται η ισχύς λειτουργίας του καθενός από τα 9 επίπεδα.

Πίνακας 5.19: Καταναλισκόμενη ισχύς για κάθε επίπεδο λαμπρότητας για την περίπτωση E1.

Κατανάλωση / Επίπεδο (kW)								
Επίπ. 1 100%	Επίπ. 2 87.5%	Επίπ. 3 75%	Επίπ.4 62.5%	Επίπ. 5 50%	Επίπ. 6 37.5%	Επίπ. 7 25%	Επίπ. 8 12.5%	Επίπ. 9 Νυχτ
79.5	68.8	60.1	49.4	40.6	29.9	21.2	10.5	1.7

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία, υπολογίζονται το κόστος αρχικής επένδυσης, το ετήσιο κόστος λειτουργίας, καθώς και το ετήσιο κόστος συντήρησης. Τα κόστη αυτά παρουσιάζονται στη συνέχεια, μαζί με τα αντίστοιχα κόστη της εναλλακτικής 2.

5.5.2 Εναλλακτική 2

Όμοια με πριν παρατίθεται ο πίνακας με το πλήθος των φωτιστικών σωμάτων ανά κατηγορία

Πίνακας 5.20: Αριθμός φωτιστικών σωμάτων ανά κατηγορία για την περίπτωση E2.

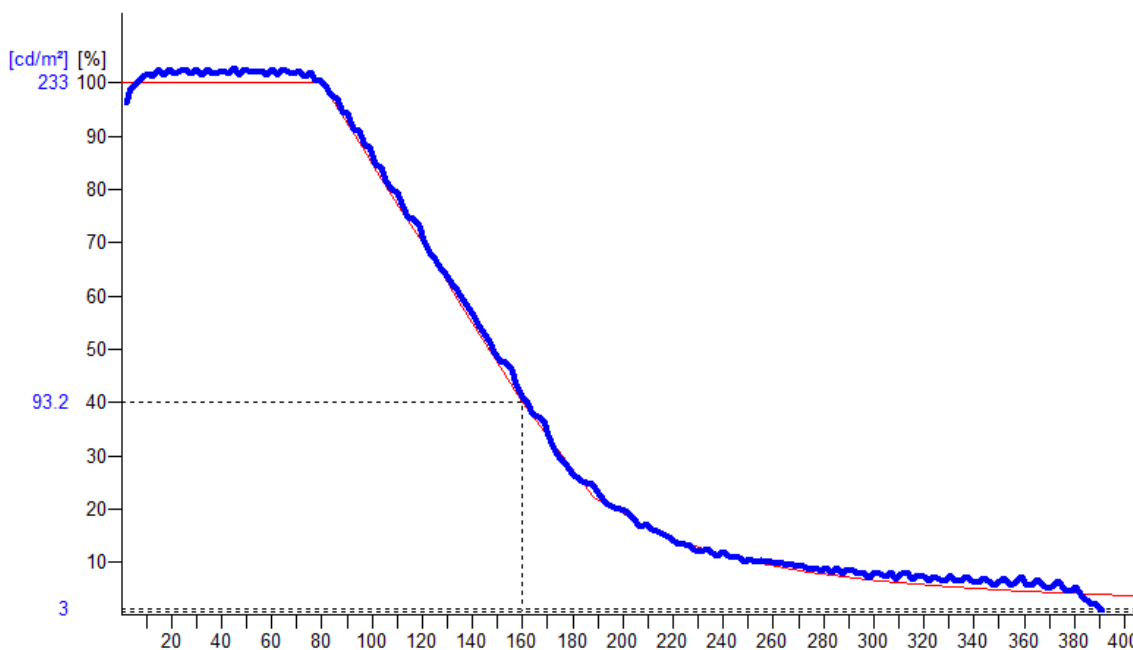
Φωτιστικά Σώματα					
316W	224W	157W	112W	78W	51W (Int)
206	12	16	12	76	34

Συγκριτικά με την εναλλακτική A2, παρατηρείται πως η E2 περιέχει 2 περισσότερα φωτιστικά των 224W, αλλά και 2 λιγότερα των 157W. Δηλαδή, έχει το ίδιο πλήθος φωτιστικών με την A2, με τη διαφορά ότι 2 φωτιστικά της είναι ένα επίπεδο ισχύος παραπάνω από δύο αντίστοιχα φωτιστικά για την εναλλακτική A2.

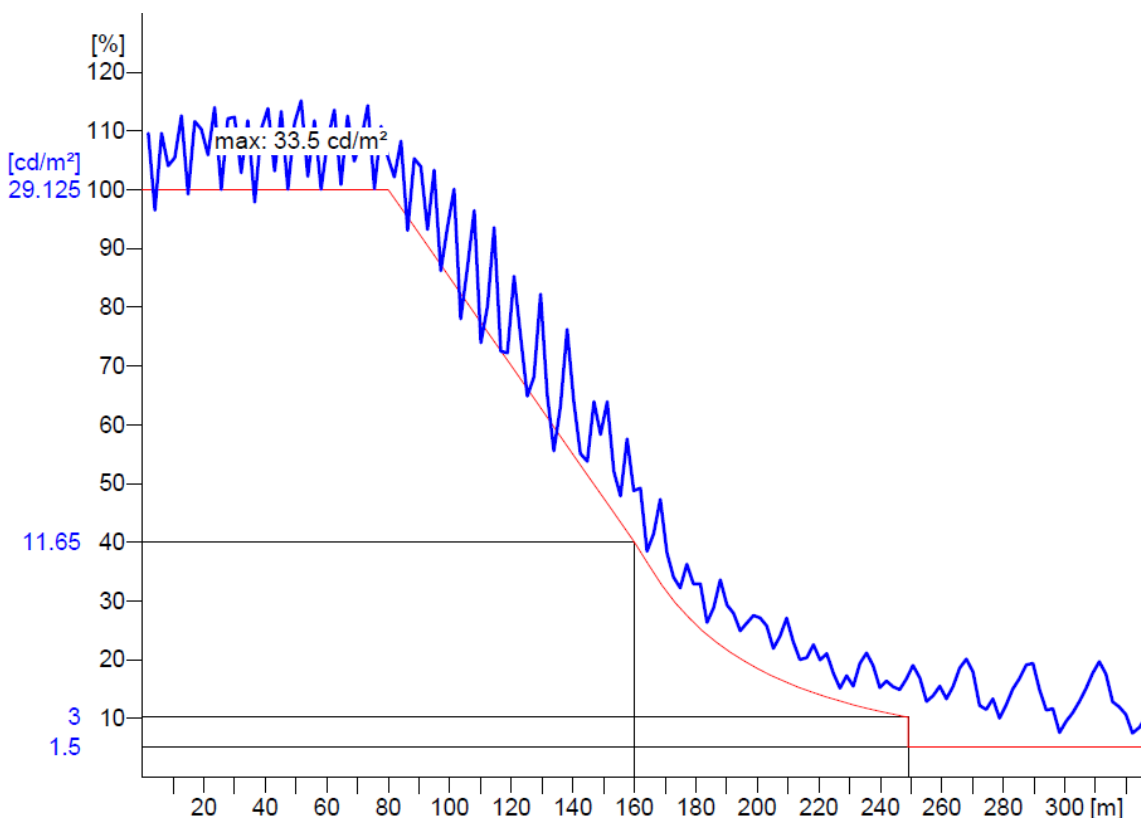
Η μέγιστη εγκατεστημένη ισχύς για την περίπτωση E2 ισούται με:

$$P_{A2} = 206 \cdot 316 + 224 \cdot 12 + 157 \cdot 16 + 112 \cdot 12 + 78 \cdot 76 + 51 \cdot 34 = 79.27 \text{ kW}$$

Όπως αναμένεται, η διαφορά στην εγκατεστημένη ισχύ των περιπτώσεων A2 και E2 είναι πολύ μικρή, για τους ίδιους λόγους που αναλύθηκαν στον Ενότητα 5.5.1 προηγουμένως.



Διάγραμμα 5.9: Διάγραμμα λαμπρότητας στην περίπτωση E2 για επίπεδο λαμπρότητας 100% [17].



Διάγραμμα 5.10: Διάγραμμα λαμπρότητας στην περίπτωση E2 για επίπεδο λαμπρότητας 12.5% [17].

Σε ότι αφορά το κόστος αυτής της εναλλακτικής, το μόνο μέγεθος που διαφοροποιείται και σε αυτή την περίπτωση είναι η ημερήσια κατανάλωση ενέργειας και τα κόστη προμήθειας ανά κατηγορία φωτιστικού σώματος. Συνεπώς, δημιουργείται αντίστοιχος πίνακας με τον Πίνακα 5.19, για την περίπτωση E2.

Πίνακας 5.21: Καταναλισκόμενη ισχύς για κάθε επίπεδο λαμπρότητας για την περίπτωση E2.

Κατανάλωση / Επίπεδο (kW)								
Επίπ. 1 100%	Επίπ. 2 87.5%	Επίπ. 3 75%	Επίπ.4 62.5%	Επίπ. 5 50%	Επίπ. 6 37.5%	Επίπ. 7 25%	Επίπ. 8 12.5%	Επίπ. 9 Νυχτ
79.3	68.6	59.9	49.2	40.5	29.8	21.1	10.4	1.7

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα κόστη και για τις δύο περιπτώσεις, καθώς και το κόστος για την υπάρχουσα εγκατάσταση. Σε αντίθεση με το κόστος της υπάρχουσας εγκατάστασης για τη σήραγγα Μαύρη Ωρα (Α), το κόστος της υπάρχουσας εγκατάστασης για τη Μαύρη Ωρα (Ε) δεν έχει υπολογιστεί, αλλά λόγω ευκολίας, παραλείπεται ο αναλυτικός υπολογισμός των επιμέρους κοστών (ετήσιο κόστος λειτουργίας και ετήσιο κόστος συντήρησης).

5.5.3 Οικονομικά Μεγέθη Μαύρης Ώρας (E)

Όπως και στην πρώτη σήραγγα, έτσι και στη Μαύρη Ώρα (E) το κόστος αρχικής επένδυσης υπολογίζεται βάσει της ενότητας 4.5.1 και σε αυτό προστίθεται ένα κόστος 120,000€ για την εγκατάσταση των νέων βάσεων πάνω στις οποίες θα τοποθετηθούν τα νέα φωτιστικά σώματα.

Πίνακας 5.22: Κόστος Αρχικής Επένδυσης για εναλλακτικές E1 και E2

Περίπτωση	Κόστος Προμήθ.	Κόστ Εγκ+Απεγκ	Κόστος Βάσεων	Σύνολο (€)
E1	360,930 €	23,695 €	120,000 €	504,625.00 €
E2	353,610 €	23,215 €	120,000 €	496,825.00 €

Στη συνέχεια, υπολογίζεται το ετήσιο κόστος λειτουργίας κάθε εναλλακτικής (E1, E2 και αρχική εγκατάσταση) με βάση την Ενότητα 4.5.2

Για να υπολογιστεί η ημερήσια κατανάλωση ενέργειας, πρέπει να υπολογιστούν τα επίπεδα ισχύος, καθώς και οι ώρες λειτουργίας των φωτιστικών σωμάτων σε κάθε επίπεδο. Σε ότι αφορά τις ώρες λειτουργίας κάθε επιπέδου ισχύος, αυτές παρουσιάζονται ήδη στον Πίνακα 5.17. Για τον υπολογισμό της μέγιστης καταναλισκόμενης ενέργειας δημιουργείται όμοιος πίνακας με τον Πίνακα 4.5 του προηγούμενου Κεφαλαίου, στον οποίο υπολογίζεται αναλυτικά πως προκύπτει η μέγιστη κατανάλωση ισχύος. Οι παραδοχές για την κατανάλωση ενέργειας της υπάρχουσας εγκατάστασης που λήφθηκαν υπόψη στο Κεφάλαιο 4, εξακολουθούν να ισχύουν και σε αυτό το Κεφάλαιο.

Πίνακας 5.23: Πλήθος και κατηγορίες φωτιστικών σωμάτων και μέγιστη καταναλισκόμενη ισχύς της σήραγγας Μαύρη Ώρα (E)

Κατηγορία Φωτιστικού	Ισχύς ΦΣ (W)	Πλήθος
Τύπος 1	400	281
Τύπος 2	250	34
Τύπος 3	150	43
Σύνολο Φωτιστικών		358
Εγκατεστημένη Ισχύς Φωτιστικών (kW)		127.7
Προσαύξηση λόγω ballast		15%
Εγκατεστημένη Ισχύς Συστήματος Φωτισμού (kW)		146.9

Έπειτα, δημιουργείται πίνακας με την κατανάλωση ανά επίπεδο ισχύος για την υπάρχουσα εγκατάσταση, με βάση τον Πίνακα 4.6

Πίνακας 5.24: Καταναλισκόμενη ισχύς για κάθε διαβάθμιση φωτισμού με χρήση της παρούσας εγκατάστασης για τη σήραγγα Μαύρη Ωρα (Ε)

Διαβάθμιση	Καταναλισκόμενη Ισχύς (kW)
100%	146.9
75%	111.7
50%	76.6
25%	41.5
Νυχτερινή	6.4

Με βάση τους Πίνακες 5.16, 5.17, 5.19, 5.21 και 5.24, υπολογίζεται το κόστος ετήσια λειτουργίας στον παρακάτω Πίνακα.

Πίνακα 5.25: Κόστος Ετήσιας Λειτουργίας για την αρχική εγκατάσταση και για τις εναλλακτικές Ε1 και Ε2.

Περίπτωση	Ημερήσια Κατανάλωση Ενέργειας (KWh)	Ετήσια Κατανάλωση Ενέργειας (KWh)	Ετήσιο Κόστος Λειτουργίας (€)
E1	714.2	260,674.0	26,067.4 €
E2	712.4	260,042.1	26,004.2 €
Υπάρχουσα Εγκατάσταση	1,499.6	547,346.4	54,734.6 €

Έπειτα, παρουσιάζεται το ετήσιο κόστος συντήρησης της εγκατάστασης σύμφωνα με τη μεθοδολογία της Ενότητας 4.5.3 και Παρουσιάζεται στον παρακάτω Πίνακα. Ο ημερήσιος χρόνος λειτουργίας για κάθε ασύμμετρο φωτιστικό σώμα υπολογίζεται πως είναι 9.5 ώρες και σε αυτή την περίπτωση. Δηλαδή, παρά τη διαφορά των διαγραμμάτων L₂₀ των δύο σηράγγων, ο μέσος χρόνος λειτουργίας των φωτιστικών σωμάτων παραμένει ίδιος, τόσο για συμμετρικά όσο και για ασύμμετρα φωτιστικά.

Πίνακας 5.26: Ετήσιο Κόστος Συντήρησης για την αρχική εγκατάσταση και για τις εναλλακτικές Ε1 και Ε2.

Περίπτωση	Ετήσιο Κόστος Αντικατάστασης (€)	Ετήσιο Κόστος Καθαρισμού (€)	Σύνολο (€)
E1	174 €	5,520 €	5,694€
E2	169 €	5,340 €	5,509€
Υπάρχουσα Εγκατάσταση	9,598 €	5,385 €	14,983€

Με βάση τις τιμές των Πινάκων 5.22, 5.25 και 5.26, υπολογίζεται κατά πόσο οι επενδύσεις Ε1 και Ε2 είναι συμφέρουσες. Για την εξαγωγή αυτού του συμπεράσματος χρησιμοποιούνται τα

κριτήρια: α) της Καθαρής Παρούσας Αξίας (ΚΠΑ – NPV) και β) του Δείκτη Αποδοτικότητας (ΔΑ – CEI). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 5.27: Οικονομικά Αποτελέσματα για τις εναλλακτικές E1 και E2.

Περίπτωση	Υπάρχουσα Εγκατάσταση	E1	E2
Κόστος Αρχ. Επένδ.	0.0 €	504,625.0 €	496,825.0 €
Ετήσιο Κόστος Λειτ.	54,734.6 €	26,067.4 €	26,004.2 €
Ετήσιο Κόστος Συντ.	14,982.9 €	5,694.4 €	5,509.0 €
ΚΠΑ	-	125,069.2 €	137,015.3 €
ΔΑ	-	1.25	1.28

Υπενθυμίζεται πως η απαίτηση για ΚΠΑ είναι η τιμή του δείκτη να είναι μεγαλύτερη του μηδενός και μετά επιλέγεται η λύση με τη μεγαλύτερη τιμή του δείκτη ΚΠΑ. Για το ΔΑ, η απαίτηση είναι να είναι μεγαλύτερος της μονάδας και μετά επιλέγεται η λύση για την οποία προκύπτει η μεγαλύτερη τιμή για το ΔΑ.

Όμοια με την περίπτωση της Μαύρης Ώρας (Α) και οι δύο εναλλακτικές προτάσεις είναι αποδεκτές. Η λύση που χρησιμοποιεί τα οπτικά σε όλες τις διαθέσιμες διαμορφώσεις ισχύος, αποτελεί την πιο οικονομική λύση, με μικρή αλλά αισθητή διαφορά. Παρά το μεγάλο κόστος αρχικής επένδυσης, η μείωση του ετήσιου κόστους της σήραγγας (ετήσιο κόστος συντήρησης και ετήσιο κόστος λειτουργίας), καθιστά και τις δύο λύσεις αποδεκτές.

5.6 Συμπεράσματα

Μετά την πραγματοποίηση όλων των παραπάνω μελετών και διερευνήσεων μπορεί κανείς να καταλήξει στα παρακάτω συμπεράσματα:

- 1) Οι υπάρχουσες εγκαταστάσεις στις σήραγγες Μαύρη Ώρα (Α) και Μαύρη Ώρα (Ε) είναι ενεργοβόρες και το ετήσιο κόστος τους (ετήσιο κόστος λειτουργίας και ετήσιο κόστος συντήρησης) μπορεί να μειωθεί πάνω από 50% με την εγκατάσταση νέων φωτιστικών σωμάτων τεχνολογίας LED με πολλαπλά στάδια λειτουργίας για το φωτισμό στο εσωτερικό της σήραγγας.
- 2) Η επένδυση για την αλλαγή των φωτιστικών στο εσωτερικό μιας σήραγγας είναι επικερδής σε βάθος 20ετίας, ακόμα και με την αλλαγή των θέσεων εγκατάστασης των φωτιστικών σωμάτων. Συνεπώς, στη μελέτη για την αντικατάσταση των φωτιστικών μιας σήραγγας, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και το ενδεχόμενο τοποθέτησης των νέων φωτιστικών σωμάτων σε διαφορετικές θέσεις.
- 3) Η προσθήκη επιπλέον επιπέδων φωτισμού αυξάνει το κόστος αρχικής επένδυσης της σήραγγας, αλλά μειώνει το ετήσιο κόστος λειτουργίας. Συνεπώς, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η καμπύλη L_{20} για τη λαμπρότητα στο εξωτερικό της σήραγγας και να εξετάζεται εάν η προσθήκη επιπλέον επιπέδων φωτισμού μπορεί να εξοικονομήσει χρήματα.

- 4) Η βελτιστοποίηση της λύσης εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες, καθώς όλες οι λύσεις έχουν αρκετά κοντινά οικονομικά αποτελέσματα. Η αλλαγή των προϋποθέσεων διεξαγωγής της μελέτης, μπορεί να διαφοροποιεί τη βέλτιστη λύση. Αυτό παρατηρείται και από τις μικρές διαφορές που προέκυψαν στα κόστη των εναλλακτικών στα Κεφάλαια 3 και 4, με τη μικρή διαφοροποίηση του κόστους προμήθειας φωτιστικών.
- 5) Η βέλτιστη λύση καθορίζεται πάντα από το βέλτιστο οπτικό, καθώς αυτό προσφέρει την λιγότερο ενεργοβόρα λύση, η οποία πραγματοποιείται με το μικρότερο αριθμό φωτιστικών, όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα των Κεφαλαίων 3 και 4.

Κεφάλαιο 6: Σύνοψη αποτελεσμάτων, τελικά συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

6.1 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάστηκαν οι βασικές έννοιες και οι απαιτήσεις γύρω από το φωτισμό σηράγγων. Παράλληλα, παρουσιάζεται μία μεθοδολογία για τον υπολογισμό του μήκους των διαφόρων τμημάτων (ζωνών) στο εσωτερικό της σήραγγας.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάστηκε η σημασία της επιλογής κατάλληλου οπτικού για βέλτιστη φωτεινή κατανομή. Η επιλογή του καταλληλότερου οπτικού εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της εξεταζόμενης σήραγγας και από τις θέσεις τοποθέτησης των φωτιστικών σωμάτων (ύψος τοποθέτησης, απόσταση από το κέντρο της σήραγγας).

Η επιλογή ενός οπτικού, η συνολική φωτεινή ροή και η συνολική εγκατεστημένη ισχύς της εξεταζόμενης πρότασης είναι σχεδόν σταθερή υπό τον όρο ότι υπάρχουν διαμορφώσεις του συγκεκριμένου οπτικού που μπορούν να καλύψουν όλα τα επίπεδα λαμπρότητας στο εσωτερικό της σήραγγας αποτελεσματικά. Με άλλα λόγια, να μη δημιουργείται υπερκάλυψη στην ουρά της σήραγγας, ούτε αιχμές στη μεταβατική ζώνη, αλλά παράλληλα να μπορεί να καλυφθούν οι υψηλές απαιτήσεις λαμπρότητας στη ζώνη κατωφλίου.

Μελετήθηκαν συνολικά 35 οπτικά, από τα οποία εξετάστηκαν όλες οι πιθανές περιπτώσεις για τα 3 επικρατέστερα από αυτά. Τα 3 επικρατέστερα οπτικά κανονικοποιήθηκαν ως προς την αποδοτικότητα και την ισχύ τους σε 6 διαμορφώσεις ισχύος. Με βάση αυτές της διαμορφώσεις, εξετάστηκαν όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί για αυτά τα οπτικά στη σήραγγα Μαύρη Ώρα (Α) και βρέθηκε πως ένα οπτικό είναι επικρατέστερο.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάστηκαν μέθοδοι για τον υπολογισμό των οικονομικών αποτελεσμάτων που χρησιμοποιούνται για να εξεταστεί μία επένδυση, ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις και παραδοχές. Στη συνέχεια, υπολογίστηκαν τα οικονομικά μεγέθη για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις του επικρατέστερου οπτικού του Κεφαλαίου 3. Τέλος, υπολογίστηκε το οικονομικό όφελος ή ζημία κάθε μίας από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις, ως προς την παρούσα εγκατάσταση της σήραγγας, σε βάθος 20ετίας.

Στο Κεφάλαιο 5 έγινε πραγματική μελέτη και για τις δύο σήραγγες (Μαύρη Ώρα (Α) και (Ε)) με βάση τα αποτελέσματα των Κεφαλαίων 3 και 4. Χρησιμοποιήθηκαν φωτομετρικά αρχεία πραγματικών φωτιστικών, των οποίων τα πολικά διαγράμματα ήταν τα πιο κοντινά στα επικρατέστερα του Κεφαλαίου 3. Μελετήθηκαν 2 περιπτώσεις ανά σήραγγα.

Σε κάθε περίπτωση, βρέθηκε πως οι προτεινόμενες λύσεις κάλυπταν τις απαιτήσεις φωτισμού των σηράγγων και μάλιστα το οικονομικό όφελος σε βάθος 20ετίας ήταν αισθητό σε όλες τις περιπτώσεις. Τα οικονομικά αποτελέσματα είχαν μικρές αποκλίσεις μεταξύ τους, ενώ το κέρδος μεγιστοποιείται στις περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται όλες οι δυνατές διαμορφώσεις φωτιστικών με το εκάστοτε οπτικό.

6.2 Συμπεράσματα

Από τα σενάρια που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία, προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Η επιλογή των οπτικών που θα χρησιμοποιηθούν κατά τη μελέτη οδο φωτισμού μιας σήραγγας αποτελεί έναν από του σημαντικότερους παράγοντες για την ικανοποίηση των απαιτήσεων φωτισμού της σήραγγας με αποδοτικό τρόπο. Με βάση τα δεδομένα του Κεφαλαίου 3, παρατηρείται πως η επιλογή του οπτικού μπορεί να πραγματοποιηθεί αρκετά απλούστερα απ' ό τι η συνολική μελέτη (Ενότητα 3.3), με τη χρήση ενός απλουστευμένου μοντέλου στο οποίο δοκιμάζονται όλα τα διαφορετικά οπτικά, και να παράγει χρήσιμα συμπεράσματα για το ποια οπτικά είναι τα καταλληλότερα για το φωτισμό μιας σήραγγας με δεδομένη τη γεωμετρία της και τις θέσεις τοποθέτησης των φωτιστικών. Όπως αποδείχθηκε και στο Κεφάλαιο 5, σε περίπτωση που οι θέσεις των φωτιστικών σωμάτων αλλάζουν αισθητά, είναι καλύτερο να πραγματοποιηθεί νέα προκαταρκτική μελέτη, καθώς τα αποτελέσματά της θα βοηθήσουν στην επιλογή του βέλτιστου οπτικού

Η αντικατάσταση των φωτιστικών παλαιότερης τεχνολογίας με φωτιστικά σώματα τύπου LED μπορεί να επιφέρει μείωση στα ετήσια κόστη λειτουργίας και συντήρησης μιας εγκατάστασης έως και 50%. Το κύριο κέρδος στο κόστος συντήρησης προέρχεται από τη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής που έχουν τα φωτιστικά σώματα τύπου LED σε σύγκριση με παλαιότερους λαμπτήρες. Παράλληλα, λόγω της μεγαλύτερης αποδοτικότητας που έχουν τα φωτιστικά LED, απαιτείται μικρότερη κατανάλωση ενέργειας προκειμένου να πετύχουν τα επιθυμητά αποτελέσματα και κατά συνέπεια έχουν χαμηλότερο κόστος λειτουργίας.

Η απόσταση των θέσεων των φωτιστικών από το κέντρο της σήραγγας επηρεάζει την ολική ομοιομορφία και τη μέση λαμπρότητα. Όσο πιο κοντά στο κέντρο της σήραγγας είναι τοποθετημένα τα φωτιστικά σώματα, τόσο αυξάνεται η λαμπρότητα αλλά μειώνεται η ομοιομορφία. Όμως, μια λύση με πιο αποκεντρωμένα φωτιστικά μπορεί να εξασφαλίσει μεγαλύτερη εξοικονόμηση (τόσο ενέργειας όσο και χρημάτων), καθώς επιτρέπει να λειτουργούν περισσότερες ομάδες φωτιστικών, λόγω της υψηλότερης ολικής ομοιομορφίας.

Η φωτεινή ροή που απαιτείται για να καλυφθούν οι ανάγκες φωτισμού μιας σήραγγας είναι σταθερή. Η κατανομή της φωτεινής ροής κάθε οπτικού, που περιγράφεται από το πολικό του διάγραμμα, καθορίζει πόσο αποτελεσματικό είναι ένα φωτιστικό στην κάλυψη των απαιτήσεων μιας σήραγγας με τη συγκεκριμένη γεωμετρία.

6.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στη συνέχεια παρουσιάζονται μερικές προτάσεις για μελλοντική έρευνα με βάση τη μελέτη της παρούσας διπλωματικής.

- Αρχικά, θα μπορούσε να μελετηθεί η μεθοδολογία για την επιλογή του βέλτιστου οπτικού για την τοποθέτηση σε μία σήραγγα, με δεδομένη τη γεωμετρία της σήραγγας, αλλά και τις θέσεις τοποθέτησης των φωτιστικών. Με βάση τα αποτελέσματα αυτής της μεθοδολογίας μπορούν έπειτα να εξαχθούν γενικά συμπεράσματα για κανόνες σχετικά με την τοποθέτηση φωτιστικών.
- Μία άλλη πρόταση είναι να βρεθούν, για μια συγκεκριμένη σήραγγα, οι βέλτιστες θέσεις τοποθέτησης φωτιστικών σωμάτων, με κριτήριο το πολικό τους διάγραμμα. Έπειτα, να υπολογιστεί η σχέση λαμπρότητας και φωτεινής ροής, δηλαδή: «πόση φωτεινή ροή χρειάζομαι με το οπτικό τύπου X, προκειμένου να καλυφθούν οι απαιτήσεις λαμπρότητας επιπέδου Y».
- Επιπλέον, θα μπορούσε να εξεταστεί η ικανότητα κάλυψης των απαιτήσεων της ζώνης κατωφλίου από διαφορετικά οπτικά. Δηλαδή, το μέγιστο όριο λαμπρότητας κατωφλίου που μπορεί να καλύψει κάθε εξεταζόμενο οπτικό, αλλά και πόσο αποδοτικό είναι ως προς το κόστος λειτουργίας του το κάθε οπτικό.
- Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη του φωτισμού μιας σήραγγας με οπτικά τοποθετημένα στα πλαϊνά τοιχώματα μιας σήραγγας και στοχευμένα προς το κέντρο του οδοστρώματος. Η ιδέα πίσω από αυτή την πρόταση είναι να περιοριστεί ο επιπρόσθετος φωτισμός στα τοιχώματα της σήραγγας, τα οποία έχουν χαμηλότερες απαιτήσεις λαμπρότητας από το οδόστρωμα.
- Τέλος, η πρόταση που ίσως έχει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον, αλλά παράλληλα είναι και η δυσκολότερη να μελετηθεί είναι η σχεδίαση οπτικών για το φωτισμό σηράγγων, τα οποία οπτικά θα είναι σχεδιασμένα με τέτοιο τρόπο, ώστε να περιορίζουν τον επιπρόσθετο φωτισμό στα τοιχώματα της σήραγγας, ενώ παράλληλα, η κατανομή των πολικών τους διαγραμμάτων θα συνεισφέρουν στην ομοιομορφία του φωτισμού στο εσωτερικό της σήραγγας, για να μην δημιουργούνται σκοτεινά σημεία.

Βιβλιογραφία

- [1] “Optical Devices in Ophthalmology and Optometry: Technology, Design Principles and Clinical Applications. Journal of Biomedical Optics”. Kaschke, Michael; Donnerhacke, Karl-Heinz; Rill, Michael Stefan (2013).
- [2] "Sensory Reception: Human Vision: Structure and function of the Human Eye" vol. 27, p. Encyclopædia Britannica, 1987
- [3] “Tunnel Lighting Systems”, John J. Buraczynski, Thomas K. Li, Chris Kwong, and Paul J. Lutkevich
- [4] “Design of LED freeform optical system for road lighting with high luminance/illuminance ratio”. Zexin Feng, Yi Luo, and Yanjun Han
- [5] "Base unit definitions: Candela" . The NIST Reference on Constants, Units, and Uncertainty.
- [6] «Πρόταση εξοικονόμησης ενέργειας σε οδικές σήραγγες με παρεμβάσεις στο στόμιο», Ιωάννα Χ. Μαρκοπούλου
- [7] «Εφαρμογές φωτισμού – Φωτισμός Σηράγγων», Ελληνικό Πρότυπο ΕΛΟΤ CR 14380, 2003
- [8] “CIE 88 - 2004 - Guide for the lighting of road tunnels and underpasses”
- [9] Δεδομένα Αττικής Οδού
- [10] “Guide to the Lighting of Road Tunnels in Armenia”, John Rands
- [11] «Οδηγίες σχεδιασμού και ελέγχου εγκαταστάσεων οδοφωτισμού», Τ.Ο.Τ.Ε.Ε.
- [12] «Μεθοδολογία Διεξαγωγής μετρήσεων φωτοτεχνικών και ηλεκτροτεχνικών μεγεθών φωτιστικών σωμάτων LED για τη βελτιστοποίηση έργων οδοφωτισμού», Κωνσταντίνος Α. Μπουρούσης, Δημήτριος Τ. Νικολάου, Φραγκίσκος Β. Τοπαλής.
- [13] “Comparative study of 250 W high pressure sodium lamp operating from both conventional and electronic ballast”, Ahmed A.Mansour, Osama A.Arafa
- [14] «Πρόταση εξοικονόμησης ενέργειας σε οδικές σήραγγες υπό τη νέα θεώρηση του προτύπου ΕΛΟΤ CR 14380 και με την εφαρμογή τεχνολογιών προσαρμοστικού φωτισμού», Αθανασία Κ. Τσιάτσου Κωνσταντίνα Κ. Τσιάτσου
- [15] «Η εφαρμογή των LED στο φωτισμό δρόμων και οι προοπτικές εξοικονόμησης ενέργειας», Δημήτρης Π Νικολάου
- [16] <https://www.schreder.com/products>
- [17] Αποτελέσματα προσομοιώσεων με την χρήση του λογισμικού Relux Tunnel

Παράρτημα Α: Αναλυτικά αποτελέσματα μετρήσεων Κεφαλαίου 3.

Α.1 Κωδικοποίηση Περιπτώσεων

Πίνακας Α.1: Κωδικοποίηση Περιπτώσεων επιλογής Φωτιστικών Σωμάτων

Κωδικός	Ονομασία δοκιμής	Φ/Σ 300W	Φ/Σ 250W	Φ/Σ 200W	Φ/Σ 150W	Φ/Σ 100W	Φ/Σ 50W
Περίπτωση 1: Χρήση 6 ή 5 διαφορετικών ισχύων φωτιστικών σωμάτων							
1.1	All	✓	✓	✓	✓	✓	✓
1.2	Excl. 300	✗	✓	✓	✓	✓	✓
1.3	Excl. 250	✓	✗	✓	✓	✓	✓
1.4	Excl. 200	✓	✓	✗	✓	✓	✓
1.5	Excl. 150	✓	✓	✓	✗	✓	✓
1.6	Excl. 100	✓	✓	✓	✓	✗	✓
1.7	Excl. 50	✓	✓	✓	✓	✓	✗
Περίπτωση 2: Χρήση 4 διαφορετικών ισχύων φωτιστικών σωμάτων							
2.1	Excl. 300&250	✗	✗	✓	✓	✓	✓
2.2	Excl. 300&200	✗	✓	✗	✓	✓	✓
2.3	Excl. 300&150	✗	✓	✓	✗	✓	✓
2.4	Excl. 300&100	✗	✓	✓	✓	✗	✓
2.5	Excl. 300&50	✗	✓	✓	✓	✓	✗
2.6	Excl. 250&200	✓	✗	✗	✓	✓	✓
2.7	Excl. 250&150	✓	✗	✓	✗	✓	✓
2.8	Excl. 250&100	✓	✗	✓	✓	✗	✓
2.9	Excl. 250&50	✓	✗	✓	✓	✓	✗
2.10	Excl. 200&150	✓	✓	✗	✗	✓	✓
2.11	Excl. 200&100	✓	✓	✗	✓	✗	✓
2.12	Excl. 200&50	✓	✓	✗	✓	✓	✗
2.13	Excl. 150&100	✓	✓	✓	✗	✗	✓
2.14	Excl. 150&50	✓	✓	✓	✗	✓	✗
2.15	Excl. 100&50	✓	✓	✓	✓	✗	✗
Περίπτωση 3: Χρήση 3 διαφορετικών ισχύων φωτιστικών σωμάτων							
3.1	300&250&200	✓	✓	✓	✗	✗	✗
3.2	300&250&150	✓	✓	✗	✓	✗	✗
3.3	300&250&100	✓	✓	✗	✗	✓	✗
3.4	300&250&50	✓	✓	✗	✗	✗	✓

Πίνακας Α.1: Κωδικοποίηση Περιπτώσεων επιλογής Φωτιστικών Σωμάτων (συνέχεια)

Κωδικός	Ονομασία δοκιμής	Φ/Σ 300W	Φ/Σ 250W	Φ/Σ 200W	Φ/Σ 150W	Φ/Σ 100W	Φ/Σ 50W
3.5	300&200&150	✓	✗	✓	✓	✗	✗
3.6	300&200&100	✓	✗	✓	✗	✓	✗
3.7	300&200&50	✓	✗	✓	✗	✗	✓
3.8	300&150&100	✓	✗	✗	✓	✓	✗
3.9	300&150&50	✓	✗	✗	✓	✗	✓
3.10	300&100&50	✓	✗	✗	✗	✓	✓
3.11	250&200&150	✗	✓	✓	✓	✗	✗
3.12	250&200&100	✗	✓	✓	✗	✓	✗
3.13	250&200&50	✗	✓	✓	✗	✗	✓
3.14	250&150&100	✗	✓	✗	✓	✓	✗
3.15	250&150&50	✗	✓	✗	✓	✗	✓
3.16	250&100&50	✗	✓	✗	✗	✓	✓
3.17	200&150&100	✗	✗	✓	✓	✓	✗
3.18	200&150&50	✗	✗	✓	✓	✗	✓
3.19	200&100&50	✗	✗	✓	✗	✓	✓
3.20	150&100&50	✗	✗	✗	✓	✓	✓
Περίπτωση 4: Χρήση 2 διαφορετικών ισχύων φωτιστικών σωμάτων							
4.1	300&250	✓	✓	✗	✗	✗	✗
4.2	300&200	✓	✗	✓	✗	✗	✗
4.3	300&150	✓	✗	✗	✓	✗	✗
4.4	300&100	✓	✗	✗	✗	✓	✗
4.5	300&50	✓	✗	✗	✗	✗	✓
4.6	250&200	✗	✓	✓	✗	✗	✗
4.7	250&150	✗	✓	✗	✓	✗	✗
4.8	250&100	✗	✓	✗	✗	✓	✗
4.9	250&50	✗	✓	✗	✗	✗	✓
4.10	200&150	✗	✗	✓	✓	✗	✗
4.11	200&100	✗	✗	✓	✗	✓	✗
4.12	200&50	✗	✗	✓	✗	✗	✓
4.13	150&100	✗	✗	✗	✓	✓	✗
4.14	150&50	✗	✗	✗	✓	✗	✓
4.15	100&50	✗	✗	✗	✗	✓	✓

Πίνακας Α1: Κωδικοποίηση Περιπτώσεων επιλογής Φωτιστικών Σωμάτων (συνέχεια)

Κωδικός	Ονομασία δοκιμής	Φ/Σ 300W	Φ/Σ 250W	Φ/Σ 200W	Φ/Σ 150W	Φ/Σ 100W	Φ/Σ 50W
Περίπτωση 5: Χρήση 1 ισχύς φωτιστικών σωμάτων							
5.1	300	✓	✗	✗	✗	✗	✗
5.2	250	✗	✓	✗	✗	✗	✗
5.3	200	✗	✗	✓	✗	✗	✗
5.4	150	✗	✗	✗	✓	✗	✗
5.5	100	✗	✗	✗	✗	✓	✗
5.6	50	✗	✗	✗	✗	✗	✓

Α.2 Πίνακες Αποτελεσμάτων Περιπτώσεων Οπτικού 1

Πίνακας Α.2: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Ασύμ. χρήσης Φακού τύπου 1 σε φωτιστικά σώματα 6 ή 5 διαφορετικών επιπέδων ισχύος.

Περίπτωση 1.1 (All)				Περίπτωση 1.2 Excl. 300			
Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i	Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i
100%	229.85	0.4	0.98	100%	229.92	0.4	0.98
75%	172.82	0.4	0.96	75%	172.87	0.4	0.97
50%	115.79	0.39	0.91	50%	115.82	0.39	0.93
25%	58.76	0.39	0.91	25%	58.77	0.39	0.93
Interior	1.7	0.42	0.79	Interior	1.7	0.42	0.79
Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος
300W	198	150W	8	300W	0	150W	8
250W	4	100W	16	250W	240	100W	14
200W	4	50W	50	200W	6	50W	50
Sym.	44			Sym	44		
Ισχύς Adapt (kW)	66.5	Συν Ισχύς (kW)	68.7	Ισχύς Adapt (kW)	66.3	Συν Ισχύς (kW)	68.5
Περίπτωση 1.3 Excl. 250				Περίπτωση 1.4 Excl. 200			
Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i	Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i
100%	229.85	0.4	0.98	100%	229.85	0.4	0.98
75%	172.82	0.4	0.96	75%	172.82	0.4	0.96
50%	115.79	0.39	0.91	50%	115.79	0.39	0.91
25%	58.76	0.39	0.91	25%	58.76	0.39	0.91
Interior	1.7	0.42	0.79	Interior	1.7	0.42	0.79
Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος
300W	198	150W	6	300W	198	150W	14
250W	0	100W	16	250W	4	100W	14
200W	10	50W	52	200W	0	50W	52
Sym.	44			Sym	44		
Ισχύς Adapt (kW)	66.5	Συν Ισχύς (kW)	68.7	Ισχύς Adapt (kW)	66.5	Συν Ισχύς (kW)	68.7
Περίπτωση 1.5 Excl. 150				Περίπτωση 1.6 Excl. 100			
Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i	Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i
100%	229.85	0.4	0.98	100%	229.85	0.4	0.98
75%	172.82	0.4	0.96	75%	172.82	0.4	0.96
50%	115.79	0.39	0.91	50%	115.79	0.39	0.91
25%	58.76	0.39	0.91	25%	58.76	0.39	0.91
Interior	1.7	0.42	0.79	Interior	1.7	0.42	0.79
Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος
300W	198	150W	0	300W	198	150W	8
250W	4	100W	28	250W	4	100W	0
200W	4	50W	50	200W	4	50W	82
Sym.	44			Sym	44		
Ισχύς Adapt (kW)	66.5	Συν Ισχύς (kW)	68.7	Ισχύς Adapt (kW)	66.5	Συν Ισχύς (kW)	68.7

Πίνακας Α.2: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Ασύμ. χρήσης Φακού τύπου 1 σε φωτιστικά σώματα 6 ή 5 διαφορετικών επιπέδων ισχύος (συνέχεια).

Περίπτωση 1.7 Excl. 50			
Επίπεδο	L(cd/m²)	U_o	U_i
100%	229.85	0.4	0.98
75%	172.82	0.4	0.96
50%	115.79	0.39	0.91
25%	58.76	0.39	0.91
Interior	1.7	0.42	0.79
Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος
300W	198	150W	8
250W	4	100W	54
200W	4	50W	0
Sym.	44		
Ισχύς Adapt (kW)	67.8	Συν Ισχύς (kW)	70

Πίνακας Α.3: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Ασύμ. χρήσης Φακού τύπου 1 σε φωτιστικά σώματα 4 διαφορετικών επιπέδων ισχύος.

Περίπτωση 2.1 Excl. 300&250				Περίπτωση 2.2 Excl. 300&200			
Επίπεδο	L(cd/m²)	U_o	U_i	Επίπεδο	L(cd/m²)	U_o	U_i
100%	229.09	0.4	0.99	100%	229.54	0.4	0.98
75%	172.31	0.4	0.99	75%	172.59	0.4	0.97
50%	115.54	0.4	0.97	50%	115.65	0.39	0.94
25%	58.63	0.4	0.97	25%	58.68	0.39	0.94
Interior	1.7	0.42	0.79	Interior	1.7	0.42	0.79
Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος
300W	0	150W	8	300W	0	150W	16
250W	0	100W	16	250W	240	100W	14
200W	304	50W	50	200W	0	50W	50
Sym.	44			Sym	44		
Ισχύς Adapt (kW)	66.1	Συν Ισχύς (kW)	68.3	Ισχύς Adapt (kW)	66.3	Συν Ισχύς (kW)	68.5
Περίπτωση 2.3 Excl. 300&150				Περίπτωση 2.4 Excl. 300&100			
Επίπεδο	L(cd/m²)	U_o	U_i	Επίπεδο	L(cd/m²)	U_o	U_i
100%	229.54	0.4	0.98	100%	229.54	0.4	0.98
75%	172.59	0.4	0.97	75%	172.59	0.4	0.97
50%	115.65	0.39	0.94	50%	115.65	0.39	0.94
25%	58.68	0.39	0.94	25%	58.68	0.39	0.94
Interior	1.7	0.42	0.79	Interior	1.7	0.42	0.79
Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος
300W	0	150W	0	300W	0	150W	8
250W	240	100W	26	250W	240	100W	0
200W	6	50W	50	200W	6	50W	78
Sym.	44			Sym	44		
Ισχύς Adapt (kW)	66.3	Συν Ισχύς (kW)	68.5	Ισχύς Adapt (kW)	66.3	Συν Ισχύς (kW)	68.5

Πίνακας Α.3: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Ασύμ. χρήσης Φακού τύπου 1 σε φωτιστικά σώματα 4 διαφορετικών επιπέδων ισχύος (συνέχεια).

Περίπτωση 2.5 Excl. 300&50				Περίπτωση 2.6 Excl. 250&200			
Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i	Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i
100%	229.54	0.4	0.98	100%	229.85	0.4	0.98
75%	172.59	0.4	0.97	75%	172.82	0.4	0.96
50%	115.65	0.39	0.94	50%	115.79	0.39	0.91
25%	58.68	0.39	0.94	25%	58.76	0.39	0.91
Interior	1.7	0.42	0.79	Interior	1.7	0.42	0.79
Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος
300W	0	150W	8	300W	198	150W	20
250W	240	100W	52	250W	0	100W	16
200W	6	50W	0	200W	0	50W	50
Sym.	44			Sym	44		
Ισχύς Adapt (kW)	67.6	Συν Ισχύς (kW)	69.8	Ισχύς Adapt (kW)	66.5	Συν Ισχύς (kW)	68.7
Περίπτωση 2.7 Excl. 250&150				Περίπτωση 2.8 Excl. 250&100			
Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i	Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i
100%	229.85	0.4	0.98	100%	229.85	0.4	0.98
75%	172.82	0.4	0.96	75%	172.82	0.4	0.96
50%	115.79	0.39	0.91	50%	115.79	0.39	0.91
25%	58.76	0.39	0.91	25%	58.76	0.39	0.91
Interior	1.7	0.42	0.79	Interior	1.7	0.42	0.79
Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος
300W	198	150W	0	300W	198	150W	6
250W	0	100W	26	250W	0	100W	0
200W	10	50W	50	200W	10	50W	84
Sym.	44			Sym	44		
Ισχύς Adapt (kW)	66.5	Συν Ισχύς (kW)	68.7	Ισχύς Adapt (kW)	66.5	Συν Ισχύς (kW)	68.7
Περίπτωση 2.9 Excl. 250&50				Περίπτωση 2.10 Excl. 200&150			
Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i	Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i
100%	229.85	0.4	0.98	100%	229.85	0.4	0.98
75%	172.82	0.4	0.96	75%	172.82	0.4	0.96
50%	115.79	0.39	0.91	50%	115.79	0.39	0.91
25%	58.76	0.39	0.91	25%	58.76	0.39	0.91
Interior	1.7	0.42	0.79	Interior	1.7	0.42	0.79
Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος
300W	198	150W	6	300W	198	150W	0
250W	0	100W	56	250W	4	100W	36
200W	10	50W	0	200W	0	50W	50
Sym.	44			Sym	44		
Ισχύς Adapt (kW)	67.9	Συν Ισχύς (kW)	70.1	Ισχύς Adapt (kW)	66.5	Συν Ισχύς (kW)	68.7

Πίνακας Α.3: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Ασύμ. χρήσης Φακού τύπου 1 σε φωτιστικά σώματα 4 διαφορετικών επιπέδων ισχύος (συνέχεια).

Περίπτωση 2.11 Excl. 200&100				Περίπτωση 2.12 Excl. 200&50			
Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i	Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i
100%	229.85	0.4	0.98	100%	229.85	0.4	0.98
75%	172.82	0.4	0.96	75%	172.82	0.4	0.96
50%	115.79	0.39	0.91	50%	115.79	0.39	0.91
25%	58.76	0.39	0.91	25%	58.76	0.39	0.91
Interior	1.7	0.42	0.79	Interior	1.7	0.42	0.79
Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος
300W	198	150W	14	300W	198	150W	14
250W	4	100W	0	250W	4	100W	54
200W	0	50W	80	200W	0	50W	0
Sym.	44			Sym	44		
Ισχύς Adapt (kW)	66.5	Συν Ισχύς (kW)	68.7	Ισχύς Adapt (kW)	67.9	Συν Ισχύς (kW)	70.1
Περίπτωση 2.13 Excl. 150&100				Περίπτωση 2.14 Excl. 150&50			
Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i	Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i
100%	229.85	0.4	0.98	100%	229.85	0.4	0.98
75%	172.82	0.4	0.96	75%	172.82	0.4	0.96
50%	115.79	0.39	0.91	50%	115.79	0.39	0.91
25%	58.76	0.39	0.91	25%	58.76	0.39	0.91
Interior	1.7	0.42	0.79	Interior	1.7	0.42	0.79
Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος
300W	198	150W	0	300W	198	150W	0
250W	4	100W	0	250W	4	100W	66
200W	4	50W	106	200W	4	50W	0
Sym.	44			Sym	44		
Ισχύς Adapt (kW)	66.5	Συν Ισχύς (kW)	68.7	Ισχύς Adapt (kW)	67.8	Συν Ισχύς (kW)	70
Περίπτωση 2.15 Excl. 100&50							
Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i				
100%	229.85	0.4	0.98				
75%	172.82	0.4	0.96				
50%	115.79	0.39	0.91				
25%	58.76	0.39	0.91				
Interior	1.7	0.42	0.79				
Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος				
300W	198	150W	60				
250W	4	100W	0				
200W	4	50W	0				
Sym.	44						
Ισχύς Adapt (kW)	70.2	Συν Ισχύς (kW)	72.4				

Πίνακας Α.4: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Ασύμ. χρήσης Φακού τύπου 1 σε φωτιστικά σώματα 3 διαφορετικών επιπέδων ισχύος.

Περίπτωση 3.1 300&250&200				Περίπτωση 3.2 300&250&150			
Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i	Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i
100%	229.85	0.4	0.98	100%	229.92	0.4	0.98
75%	172.82	0.4	0.96	75%	172.87	0.4	0.97
50%	115.79	0.39	0.91	50%	115.82	0.39	0.93
25%	58.76	0.39	0.91	25%	58.77	0.39	0.93
Interior	1.7	0.42	0.79	Interior	1.7	0.42	0.79
Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος
300W	198	150W	0	300W	198	150W	64
250W	4	100W	0	250W	4	100W	0
200W	62	50W	0	200W	0	50W	0
Sym.	44			Sym	44		
Ισχύς Adapt (kW)	72.8	Συν Ισχύς (kW)	75	Ισχύς Adapt (kW)	70	Συν Ισχύς (kW)	72.2
Περίπτωση 3.3 300&250&100				Περίπτωση 3.4 300&250&50			
Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i	Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i
100%	229.85	0.4	0.98	100%	229.85	0.4	0.98
75%	172.82	0.4	0.96	75%	172.82	0.4	0.96
50%	115.79	0.39	0.91	50%	115.79	0.39	0.91
25%	58.76	0.39	0.91	25%	58.76	0.39	0.91
Interior	1.7	0.42	0.79	Interior	1.7	0.42	0.79
Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος
300W	198	150W	0	300W	198	150W	0
250W	4	100W	74	250W	4	100W	0
200W	0	50W	0	200W	0	50W	122
Sym.	44			Sym	44		
Ισχύς Adapt (kW)	67.8	Συν Ισχύς (kW)	70	Ισχύς Adapt (kW)	66.5	Συν Ισχύς (kW)	68.7
Περίπτωση 3.5 300&200&150				Περίπτωση 3.6 300&200&100			
Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i	Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i
100%	229.85	0.4	0.98	100%	229.85	0.4	0.98
75%	172.82	0.4	0.96	75%	172.82	0.4	0.96
50%	115.79	0.39	0.91	50%	115.79	0.39	0.91
25%	58.76	0.39	0.91	25%	58.76	0.39	0.91
Interior	1.7	0.42	0.79	Interior	1.7	0.42	0.79
Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος
300W	198	150W	58	300W	198	150W	0
250W	0	100W	0	250W	0	100W	64
200W	10	50W	0	200W	10	50W	0
Sym.	44			Sym	44		
Ισχύς Adapt (kW)	70.1	Συν Ισχύς (kW)	72.3	Ισχύς Adapt (kW)	67.8	Συν Ισχύς (kW)	70

Πίνακας Α.4: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Ασύμ. χρήσης Φακού τύπου 1 σε φωτιστικά σώματα 3 διαφορετικών επιπέδων ισχύος (συνέχεια).

Περίπτωση 3.7 300&200&50				Περίπτωση 3.8 300&150&100			
Επίπεδο	L(cd/m ²)	Επίπεδο	L(cd/m ²)	Επίπεδο	L(cd/m ²)	Επίπεδο	L(cd/m ²)
100%	229.85	100%	229.85	100%	229.85	100%	229.85
75%	172.82	75%	172.82	75%	172.82	75%	172.82
50%	115.79	50%	115.79	50%	115.79	50%	115.79
25%	58.76	25%	58.76	25%	58.76	25%	58.76
Interior	1.7	0.42	0.79	Interior	1.7	0.42	0.79
Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος
300W	198	150W	0	300W	198	150W	20
250W	0	100W	0	250W	0	100W	54
200W	10	50W	102	200W	0	50W	0
Sym.	44			Sym.	44		
Ισχύς Adapt (kW)	66.5	Συν Ισχύς (kW)	68.7	Ισχύς Adapt (kW)	67.8	Συν Ισχύς (kW)	70
Περίπτωση 3.9 300&150&50				Περίπτωση 3.10 300&100&50			
Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i	Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i
100%	229.85	0.4	0.98	100%	229.85	0.4	0.98
75%	172.82	0.4	0.96	75%	172.82	0.4	0.96
50%	115.79	0.39	0.91	50%	115.79	0.39	0.91
25%	58.76	0.39	0.91	25%	58.76	0.39	0.91
Interior	1.7	0.42	0.79	Interior	1.7	0.42	0.79
Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος
300W	198	150W	20	300W	198	150W	0
250W	0	100W	0	250W	0	100W	46
200W	0	50W	82	200W	0	50W	50
Sym.	44			Sym	44		
Ισχύς Adapt (kW)	66.5	Συν Ισχύς (kW)	68.7	Ισχύς Adapt (kW)	66.5	Συν Ισχύς (kW)	68.7
Περίπτωση 3.11 250&200&150				Περίπτωση 3.12 250&200&100			
Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i	Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i
100%	229.54	0.4	0.98	100%	229.54	0.4	0.98
75%	172.59	0.4	0.97	75%	172.59	0.4	0.97
50%	115.65	0.39	0.94	50%	115.65	0.39	0.94
25%	58.68	0.39	0.94	25%	58.68	0.39	0.94
Interior	1.7	0.42	0.79	Interior	1.7	0.42	0.79
Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος
300W	0	150W	58	300W	0	150W	0
250W	240	100W	0	250W	240	100W	64
200W	6	50W	0	200W	6	50W	0
Sym.	44			Sym	44		
Ισχύς Adapt (kW)	69.9	Συν Ισχύς (kW)	72.1	Ισχύς Adapt (kW)	67.6	Συν Ισχύς (kW)	69.8

Πίνακας Α.4: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Ασύμ. χρήσης Φακού τύπου 1 σε φωτιστικά σώματα 3 διαφορετικών επιπέδων ισχύος (συνέχεια).

Περίπτωση 3.13 250&200&50				Περίπτωση 3.14 250&150&100			
Επίπεδο	L(cd/m ²)	Επίπεδο	L(cd/m ²)	Επίπεδο	L(cd/m ²)	Επίπεδο	L(cd/m ²)
100%	229.54	0.4	0.98	100%	229.54	0.4	0.98
75%	172.59	0.4	0.97	75%	172.59	0.4	0.97
50%	115.65	0.39	0.94	50%	115.65	0.39	0.94
25%	58.68	0.39	0.94	25%	58.68	0.39	0.94
Interior	1.7	0.42	0.79	Interior	1.7	0.42	0.79
Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος
300W	0	150W	0	300W	0	150W	16
250W	240	100W	0	250W	240	100W	52
200W	6	50W	102	200W	0	50W	0
Sym.	44			Sym.	44		
Ισχύς Adapt (kW)	66.3	Συν Ισχύς (kW)	68.5	Ισχύς Adapt (kW)	67.6	Συν Ισχύς (kW)	69.8
Περίπτωση 3.15 250&150&50				Περίπτωση 3.16 250&100&50			
Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i	Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i
100%	229.54	0.4	0.98	100%	229.54	0.4	0.98
75%	172.59	0.4	0.97	75%	172.59	0.4	0.97
50%	115.65	0.39	0.94	50%	115.65	0.39	0.94
25%	58.68	0.39	0.94	25%	58.68	0.39	0.94
Interior	1.7	0.42	0.79	Interior	1.7	0.42	0.79
Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος
300W	0	150W	16	300W	0	150W	0
250W	240	100W	0	250W	240	100W	38
200W	0	50W	78	200W	0	50W	50
Sym.	44			Sym	44		
Ισχύς Adapt (kW)	66.3	Συν Ισχύς (kW)	68.5	Ισχύς Adapt (kW)	66.3	Συν Ισχύς (kW)	68.5
Περίπτωση 3.17 200&150&100				Περίπτωση 3.18 200&150&50			
Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i	Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i
100%	229.09	0.4	0.99	100%	229.85	0.4	0.98
75%	172.31	0.4	0.99	75%	172.82	0.4	0.96
50%	115.54	0.4	0.97	50%	115.79	0.39	0.91
25%	58.63	0.4	0.97	25%	58.76	0.39	0.91
Interior	1.7	0.42	0.79	Interior	1.7	0.42	0.79
Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος
300W	0	150W	8	300W	0	150W	8
250W	0	100W	54	250W	0	100W	0
200W	304	50W	0	200W	304	50W	82
Sym.	44			Sym	44		
Ισχύς Adapt (kW)	67.4	Συν Ισχύς (kW)	69.6	Ισχύς Adapt (kW)	66.1	Συν Ισχύς (kW)	68.3

Πίνακας Α.4: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Ασύμ. χρήσης Φακού τύπου 1 σε φωτιστικά σώματα 3 διαφορετικών επιπέδων ισχύος (συνέχεια).

Περίπτωση 3.19 200&100&50				Περίπτωση 3.20 150&100&50			
Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i	Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i
100%	229.09	0.4	0.99	100%	231.34	0.4	1
75%	172.31	0.4	0.99	75%	173.5	0.4	0.99
50%	115.54	0.4	0.97	50%	115.67	0.4	0.98
25%	58.63	0.4	0.97	25%	57.83	0.4	0.98
Interior	1.7	0.42	0.79	Interior	1.7	0.42	0.79
Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος
300W	0	150W	0	300W	0	150W	418
250W	0	100W	28	250W	0	100W	14
200W	304	50W	50	200W	0	50W	50
Sym.	44			Sym	44		
Ισχύς Adapt (kW)	66.1	Συν Ισχύς (kW)	68.3	Ισχύς Adapt (kW)	66.6	Συν Ισχύς (kW)	68.8

Πίνακας Α.5: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Ασύμ. χρήσης Φακού τύπου 1 σε φωτιστικά σώματα 2 διαφορετικών επιπέδων ισχύος.

Περίπτωση 4.1 300&250				Περίπτωση 4.2 300&200			
Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i	Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i
100%	229.85	0.4	0.98	100%	229.85	0.4	0.98
75%	172.82	0.4	0.96	75%	172.82	0.4	0.96
50%	115.8	0.39	0.91	50%	115.8	0.39	0.91
25%	58.76	0.39	0.91	25%	58.76	0.39	0.91
Interior	1.7	0.42	0.79	Interior	1.7	0.42	0.79
Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος
300W	198	150W	0	300W	198	150W	0
250W	66	100W	0	250W	0	100W	0
200W	0	50W	0	200W	68	50W	0
Sym.	44			Sym	44		
Ισχύς Adapt (kW)	75.9	Συν Ισχύς (kW)	78.1	Ισχύς Adapt (kW)	75.2	Συν Ισχύς (kW)	73

Περίπτωση 4.3 300&150				Περίπτωση 4.4 300&100			
Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i	Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i
100%	229.85	0.4	0.98	100%	229.85	0.4	0.98
75%	172.82	0.4	0.96	75%	172.82	0.4	0.96
50%	115.8	0.39	0.91	50%	115.8	0.39	0.91
25%	58.76	0.39	0.91	25%	58.76	0.39	0.91
Interior	1.7	0.42	0.79	Interior	1.7	0.42	0.79
Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος
300W	198	150W	72	300W	198	150W	0
250W	0	100W	0	250W	0	100W	84
200W	0	50W	0	200W	0	50W	0
Sym.	44			Sym	44		
Ισχύς Adapt (kW)	70.2	Συν Ισχύς (kW)	72.4	Ισχύς Adapt (kW)	67.8	Συν Ισχύς (kW)	70

Πίνακας Α.5: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Ασύμ. χρήσης Φακού τύπου 1 σε φωτιστικά σώματα 2 διαφορετικών επιπέδων ισχύος (συνέχεια).

Περίπτωση 4.5 300&50				Περίπτωση 4.6 250&200			
Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i	Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i
100%	229.85	0.4	0.98	100%	229.55	0.4	0.98
75%	172.82	0.4	0.96	75%	172.6	0.4	0.97
50%	115.8	0.39	0.91	50%	115.65	0.39	0.94
25%	58.76	0.39	0.91	25%	58.69	0.39	0.94
Interior	1.7	0.42	0.79	Interior	1.7	0.42	0.79
Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος
300W	198	150W	0	300W	0	150W	0
250W	0	100W	0	250W	240	100W	0
200W	0	50W	142	200W	64	50W	0
Sym.	44			Sym	44		
Ισχύς Adapt (kW)	66.5	Συν Ισχύς (kW)	68.7	Ισχύς Adapt (kW)	72.8	Συν Ισχύς (kW)	75
Περίπτωση 4.7 250&150				Περίπτωση 4.8 250&100			
Επίπεδο	L(cd/m ²)	Επίπεδο	L(cd/m ²)	Επίπεδο	L(cd/m ²)	Επίπεδο	L(cd/m ²)
100%	229.55	0.4	0.98	100%	229.55	0.4	0.98
75%	172.6	0.4	0.97	75%	172.6	0.4	0.97
50%	115.65	0.39	0.94	50%	115.65	0.39	0.94
25%	58.69	0.39	0.94	25%	58.69	0.39	0.94
Interior	1.7	0.42	0.79	Interior	1.7	0.42	0.79
Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος
300W	0	150W	66	300W	0	150W	0
250W	240	100W	0	250W	240	100W	76
200W	0	50W	0	200W	0	50W	0
Sym.	44			Sym.	44		
Ισχύς Adapt (kW)	69.9	Συν Ισχύς (kW)	72.1	Ισχύς Adapt (kW)	67.6	Συν Ισχύς (kW)	69.8
Περίπτωση 4.9 250&50				Περίπτωση 4.10 200&150			
Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i	Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i
100%	229.55	0.4	0.98	100%	229.09	0.4	0.99
75%	172.6	0.4	0.97	75%	172.32	0.4	0.99
50%	115.65	0.39	0.94	50%	115.54	0.4	0.97
25%	58.69	0.39	0.94	25%	58.63	0.4	0.97
Interior	1.7	0.42	0.79	Interior	1.7	0.42	0.79
Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος
300W	0	150W	0	300W	0	150W	60
250W	240	100W	0	250W	0	100W	0
200W	0	50W	126	200W	304	50W	0
Sym.	44			Sym	44		
Ισχύς Adapt (kW)	66.3	Συν Ισχύς (kW)	68.5	Ισχύς Adapt (kW)	69.8	Συν Ισχύς (kW)	72

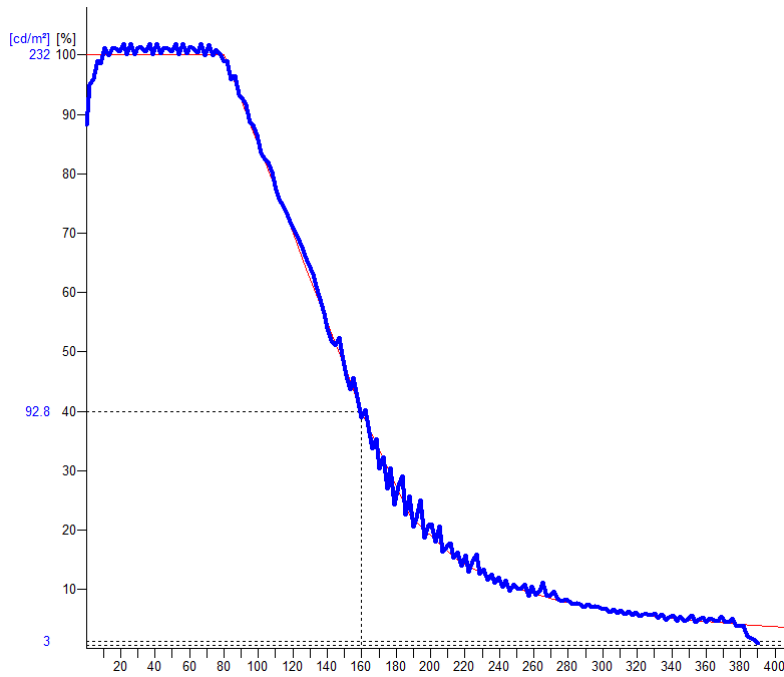
Πίνακας Α.5: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Ασύμ. χρήσης Φακού τύπου 1 σε φωτιστικά σώματα 2 διαφορετικών επιπέδων ισχύος (συνέχεια).

Περίπτωση 4.11 200&100				Περίπτωση 4.12 200&50			
Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i	Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i
100%	229.09	0.4	0.99	100%	229.09	0.4	0.99
75%	172.32	0.4	0.99	75%	172.32	0.4	0.99
50%	115.54	0.4	0.97	50%	115.54	0.4	0.97
25%	58.63	0.4	0.97	25%	58.63	0.4	0.97
Interior	1.7	0.42	0.79	Interior	1.7	0.42	0.79
Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος
300W	0	150W	0	300W	0	150W	0
250W	0	100W	66	250W	0	100W	0
200W	304	50W	0	200W	304	50W	106
Sym.	44			Sym	44		
Ισχύς Adapt (kW)	67.4	Συν Ισχύς (kW)	69.6	Ισχύς Adapt (kW)	66.1	Συν Ισχύς (kW)	68.3
Περίπτωση 4.13 150&100				Περίπτωση 4.14 150&50			
Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i	Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i
100%	231.35	0.4	1	100%	231.35	0.4	1
75%	173.94	0.4	0.99	75%	173.94	0.4	0.99
50%	116.53	0.4	0.98	50%	116.53	0.4	0.98
25%	59.13	0.4	0.98	25%	59.13	0.4	0.98
Interior	1.7	0.42	0.79	Interior	1.7	0.42	0.79
Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος
300W	0	150W	418	300W	0	150W	418
250W	0	100W	52	250W	0	100W	0
200W	0	50W	0	200W	0	50W	78
Sym.	44			Sym	44		
Ισχύς Adapt (kW)	67.9	Συν Ισχύς (kW)	70.1	Ισχύς Adapt (kW)	66.6	Συν Ισχύς (kW)	68.8
Περίπτωση 4.15 100&50							
Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i				
100%	218.39	0.4	1				
75%	164.28	0.4	1				
50%	110.16	0.4	1				
25%	55.94	0.4	0.99				
Interior	1.7	0.42	0.79				
Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος				
300W	0	150W	0				
250W	0	100W	602				
200W	0	50W	52				
Sym.	44						
Ισχύς Adapt (kW)	62.8	Συν Ισχύς (kW)	65				

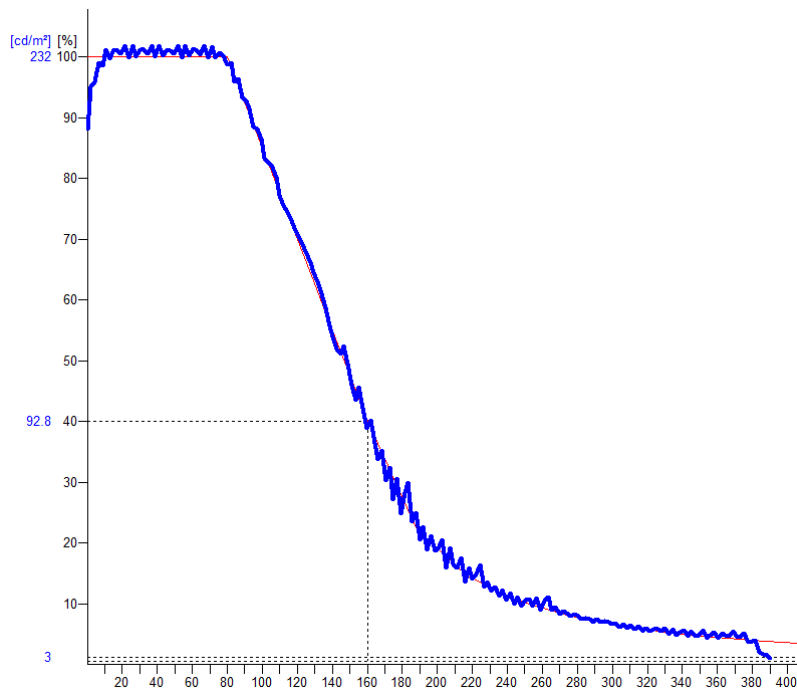
Πίνακας Α6: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα Ασύμ. χρήσης Φακού τύπου 1 σε φωτιστικά σώματα 1 επιπέδου ισχύος.

Περίπτωση 5.1 300				Περίπτωση 5.2 250			
Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i	Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i
100%	229.85	0.4	0.98	100%	229.54	0.4	0.98
75%	172.82	0.4	0.96	75%	172.59	0.4	0.97
50%	115.79	0.39	0.91	50%	115.65	0.39	0.94
25%	58.76	0.39	0.91	25%	58.68	0.39	0.94
Interior	1.7	0.42	0.79	Interior	1.7	0.42	0.79
Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος
300W	264	150W	0	300W	0	150W	0
250W	0	100W	0	250W	304	100W	0
200W	0	50W	0	200W	0	50W	0
Sym.	44			Sym	44		
Ισχύς Adapt (kW)	79.2	Συν Ισχύς (kW)	81.4	Ισχύς Adapt (kW)	76	Συν Ισχύς (kW)	78.2
Περίπτωση 5.3 200				Περίπτωση 5.4 150			
Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i	Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i
100%	229.09	0.4	0.99	100%	231.34	0.4	1
75%	172.31	0.4	0.99	75%	173.94	0.4	0.99
50%	115.54	0.4	0.97	50%	116.53	0.4	0.98
25%	58.63	0.4	0.97	25%	59.13	0.4	0.98
Interior	1.7	0.42	0.79	Interior	1.7	0.42	0.79
Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος
300W	0	150W	0	300W	0	150W	468
250W	0	100W	0	250W	0	100W	0
200W	362	50W	0	200W	0	50W	0
Sym.	44			Sym	44		
Ισχύς Adapt (kW)	72.4	Συν Ισχύς (kW)	74.6	Ισχύς Adapt (kW)	70.2	Συν Ισχύς (kW)	72.4
Περίπτωση 5.5 100				Περίπτωση 5.6 50			
Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i	Επίπεδο	L(cd/m ²)	U _o	U _i
100%	218.39	0.4	1	100%	110.06	0.4	1
75%	164.27	0.4	1	75%	83	0.4	1
50%	110.16	0.4	1	50%	55.94	0.4	0.99
25%	55.94	0.4	1	25%	28.83	0.4	0.99
Interior	1.7	0.42	0.79	Interior	1.7	0.42	0.79
Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος	Φ/Σ	Πλήθος
300W	0	150W	0	300W	0	150W	0
250W	0	100W	642	250W	0	100W	0
200W	0	50W	0	200W	0	50W	642
Sym.	44			Sym	44		
Ισχύς Adapt (kW)	64.2	Συν Ισχύς (kW)	66.4	Ισχύς Adapt (kW)	32.1	Συν Ισχύς (kW)	34.3

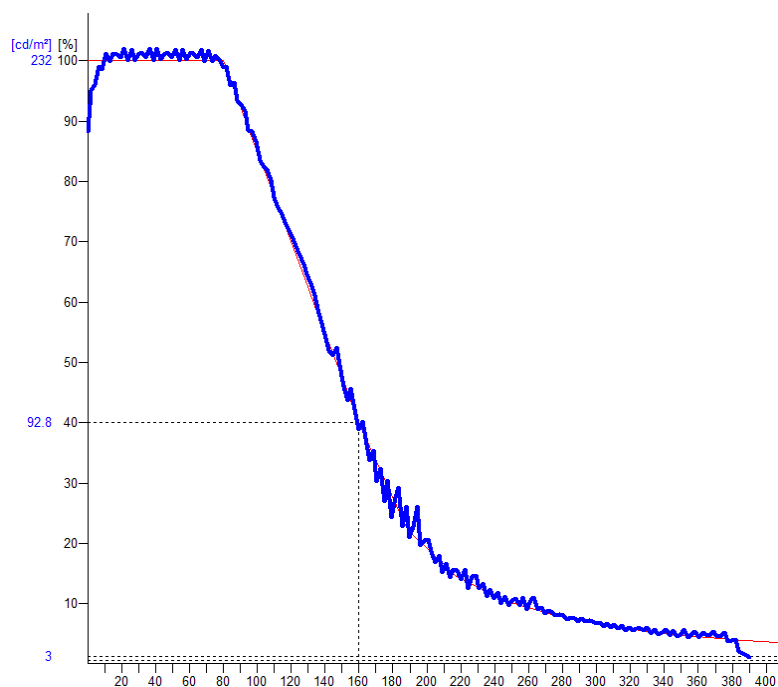
Α.3 Ενδεικτικές Γραφικές Παραστάσεις Αποτελεσμάτων



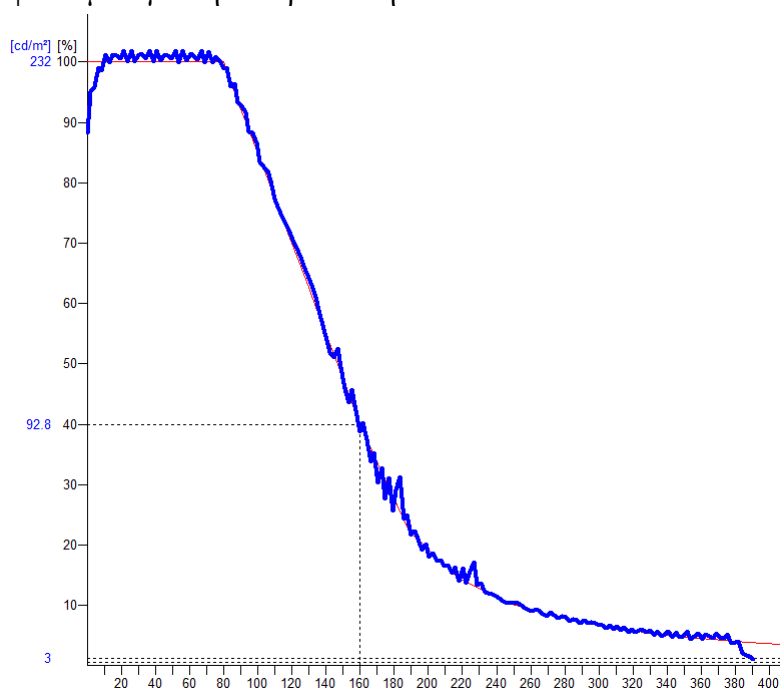
Διάγραμμα Α.1: Μεταβολή της μέσης λαμπρότητας οδοστρώματος στην ενισχυμένη ζώνη φωτισμού για την Περίπτωση 1.1.



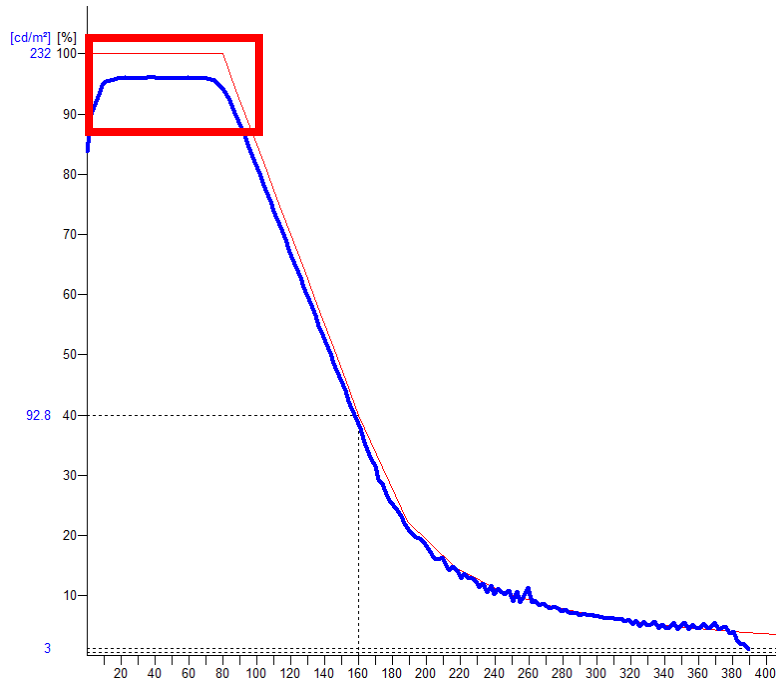
Διάγραμμα Α.2: Μεταβολή της μέσης λαμπρότητας οδοστρώματος στην ενισχυμένη ζώνη φωτισμού για την Περίπτωση 1.3.



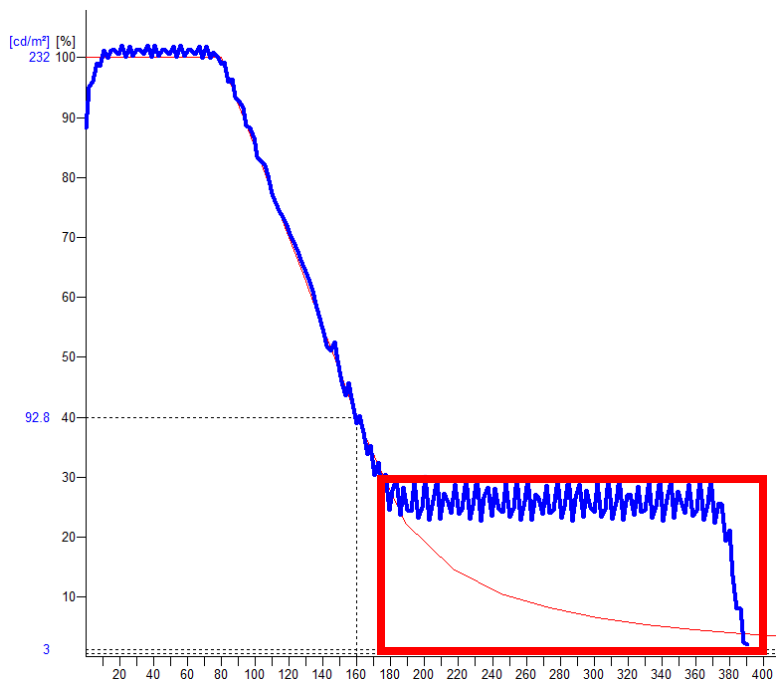
Διάγραμμα Α.3: Μεταβολή της μέσης λαμπρότητας οδοστρώματος στην ενισχυμένη ζώνη φωτισμού για την Περίπτωση 1.4.



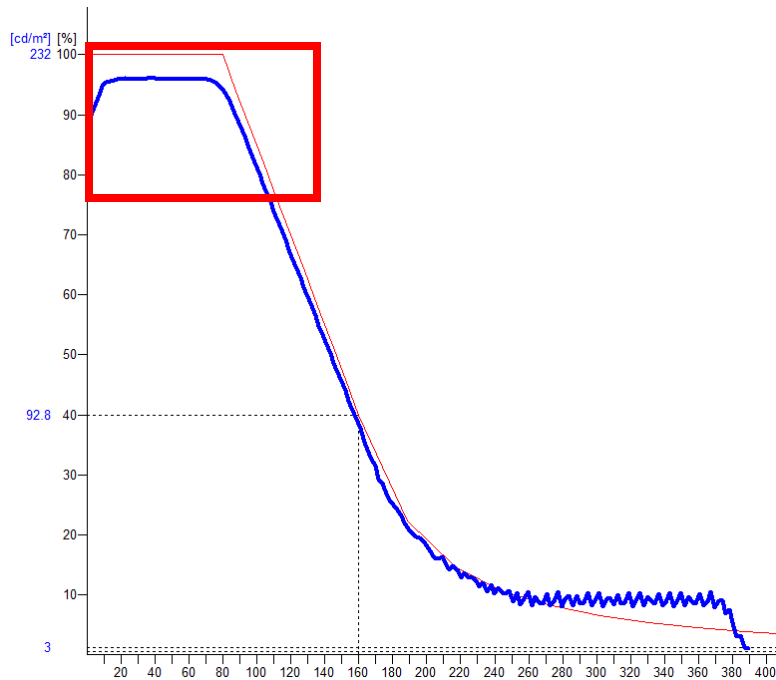
Διάγραμμα Α.4: Μεταβολή της μέσης λαμπρότητας οδοστρώματος στην ενισχυμένη ζώνη φωτισμού για την Περίπτωση 3.9.



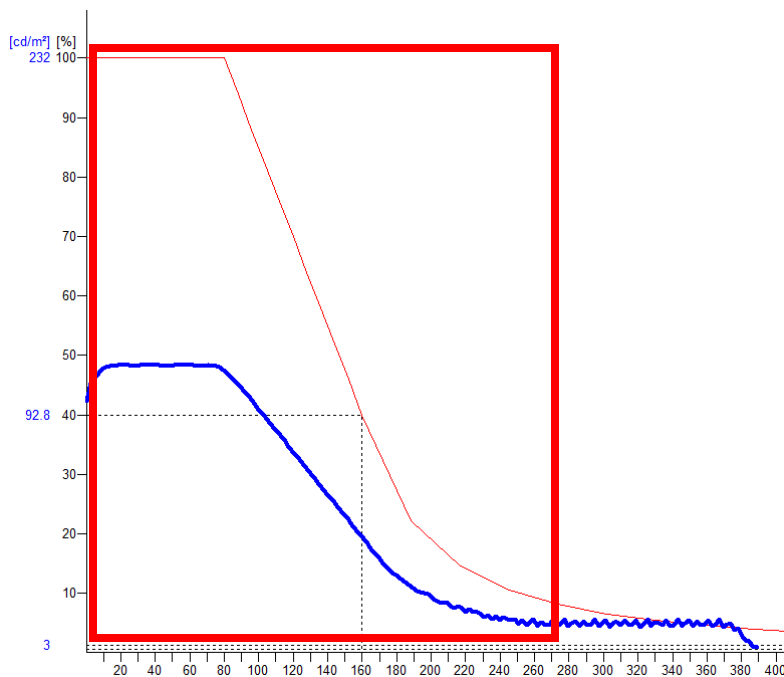
Διάγραμμα Α.5: Μεταβολή της μέσης λαμπρότητας οδοστρώματος στην ενισχυμένη ζώνη φωτισμού για την Περίπτωση 4.15 (με κόκκινο η περιοχή για την οποία υπήρξε αδυναμία λύσης λόγω περιορισμού της ισχύος των διαθέσιμων φωτιστικών σωμάτων).



Διάγραμμα Α.6: Μεταβολή της μέσης λαμπρότητας οδοστρώματος στην ενισχυμένη ζώνη φωτισμού για την Περίπτωση 5.1 (με κόκκινο η περιοχή για την οποία υπήρξε αδυναμία λύσης λόγω περιορισμού της ισχύος των διαθέσιμων φωτιστικών σωμάτων).



Διάγραμμα Α.7: Μεταβολή της μέσης λαμπρότητας οδοστρώματος στην ενισχυμένη ζώνη φωτισμού για την Περίπτωση 5.5 (με κόκκινο η περιοχή για την οποία υπήρξε αδυναμία λύσης λόγω περιορισμού της ισχύος των διαθέσιμων φωτιστικών σωμάτων).



Διάγραμμα Α.8: Μεταβολή της μέσης λαμπρότητας οδοστρώματος στην ενισχυμένη ζώνη φωτισμού για την Περίπτωση 5.6 (με κόκκινο η περιοχή για την οποία υπήρξε αδυναμία λύσης λόγω περιορισμού της ισχύος των διαθέσιμων φωτιστικών σωμάτων).

Παράρτημα Β: Αποτελέσματα Τελικών Μελετών

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μελετών του κεφαλαίου 5. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται η κατανομή των φωτιστικών μέσα στη σήραγγα για κάθε περίπτωση, καθώς και οι γραφικές παραστάσεις για κάθε επίπεδο ισχύος του κάθε οπτικού.

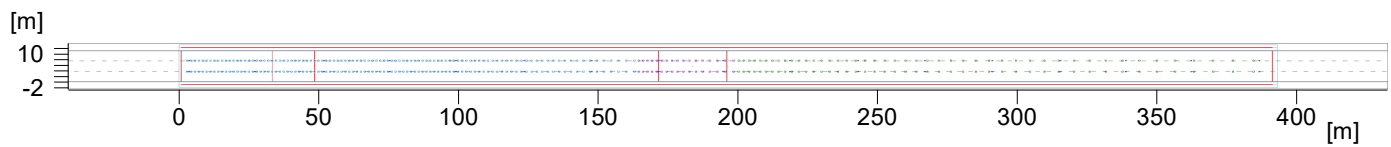
Object : Μαύρη Ωρα (Α)
Installation : Εναλλακτική Α1
Project number :
Date : 06.01.2019

RELUX®

1 Tunnel A

1.1 Description, Tunnel A

1.1.2 Floor plan



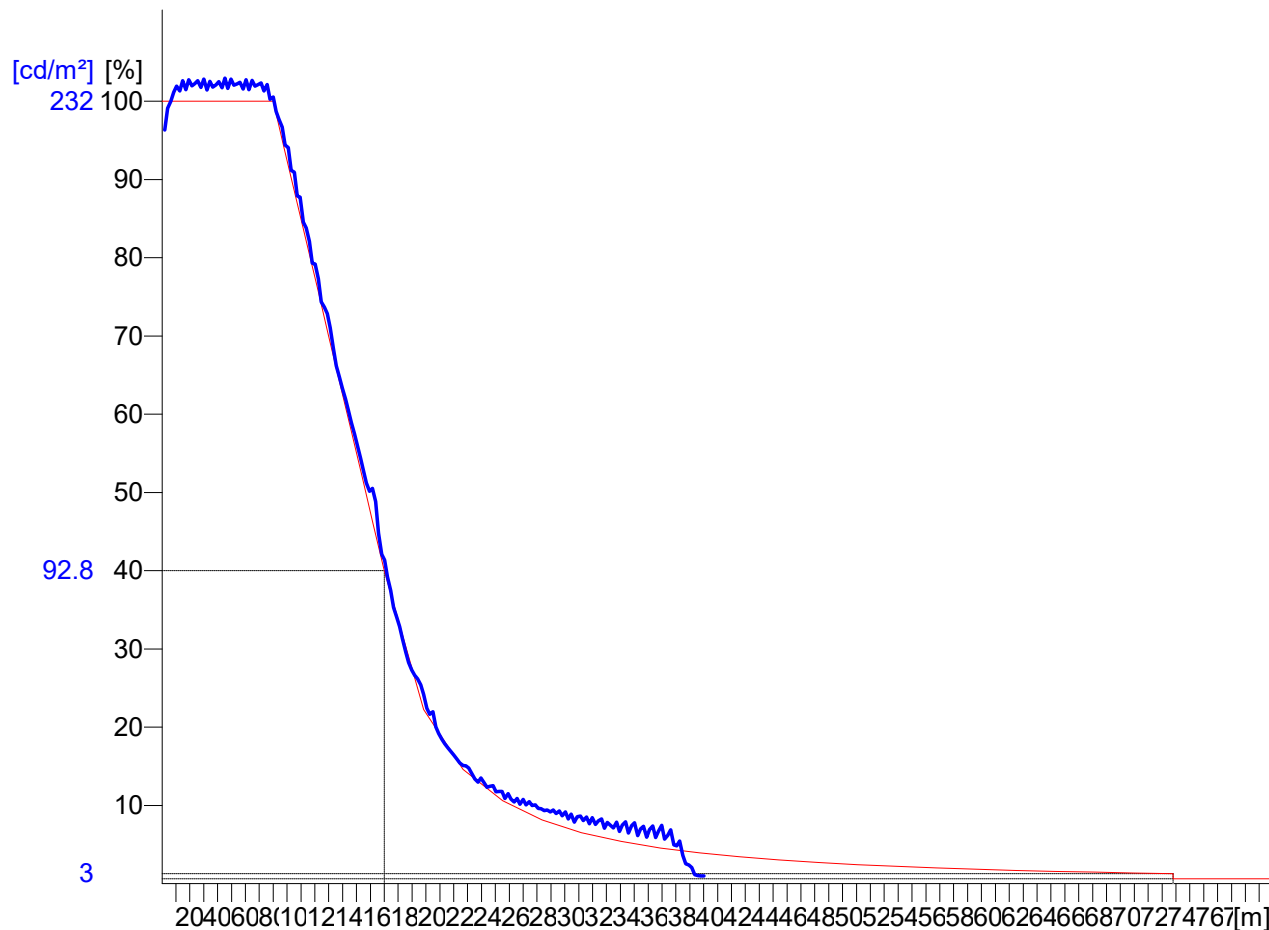
Object : Μαύρη Ωρα (A)
Installation : Εναλλακτική Α1
Project number :
Date : 06.01.2019

RELUX®

1 Tunnel A

1.2 Calculation results, Tunnel A

1.2.4 Evolution, Adaptation (L), S1: 100%, Obs. 2



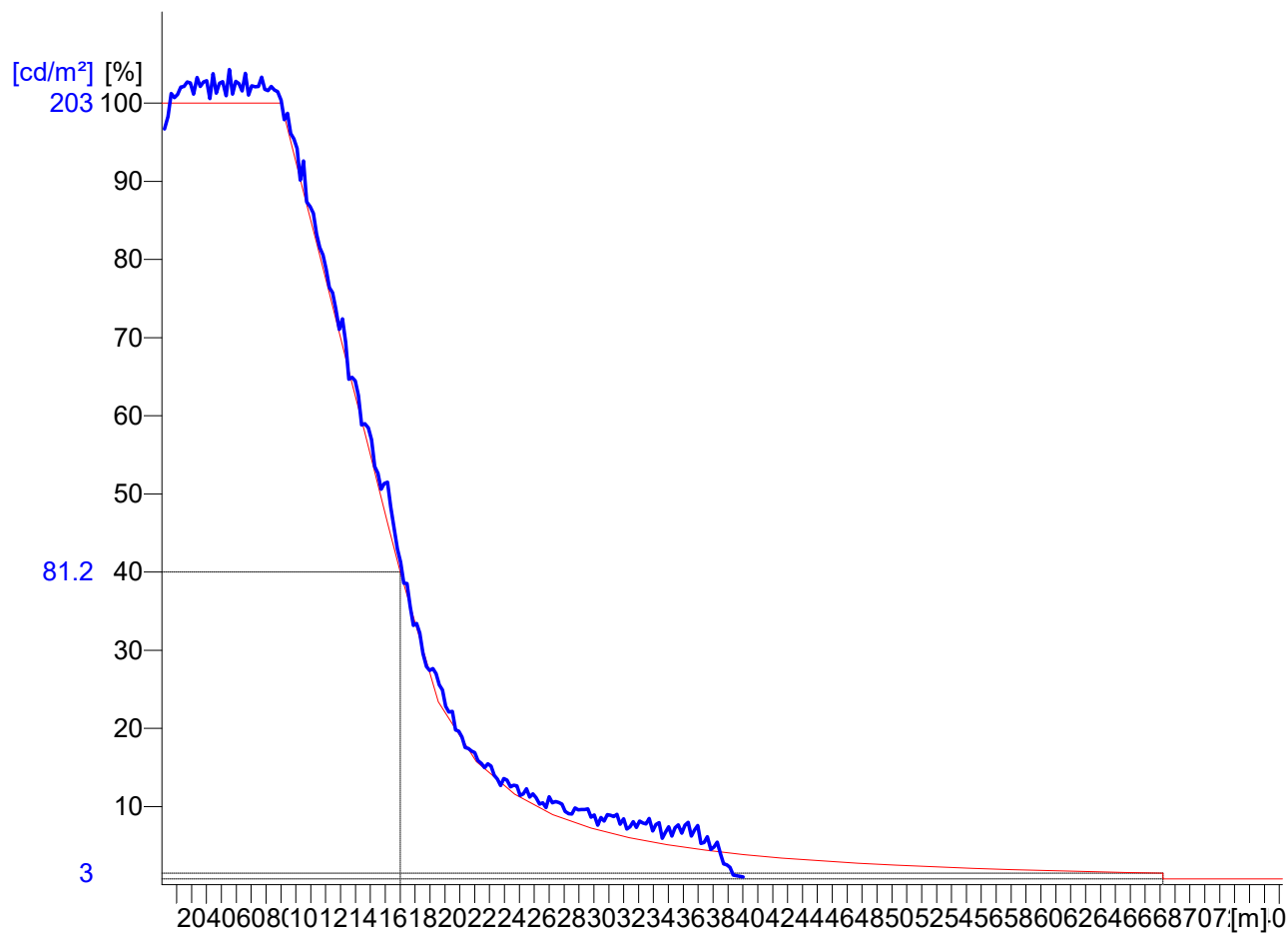
Observer location 2 : x = -84, y = 5.63, z = 1.5 (dx = 85.93)
Evaluation of L on whole width of road

Object : Μαύρη Ωρα (A)
Installation : Εναλλακτική A1
Project number :
Date : 06.01.2019

RELUX®

1.2 Calculation results, Tunnel A

1.2.5 Evolution, Adaptation (L), S2: 87.5%, Obs. 2



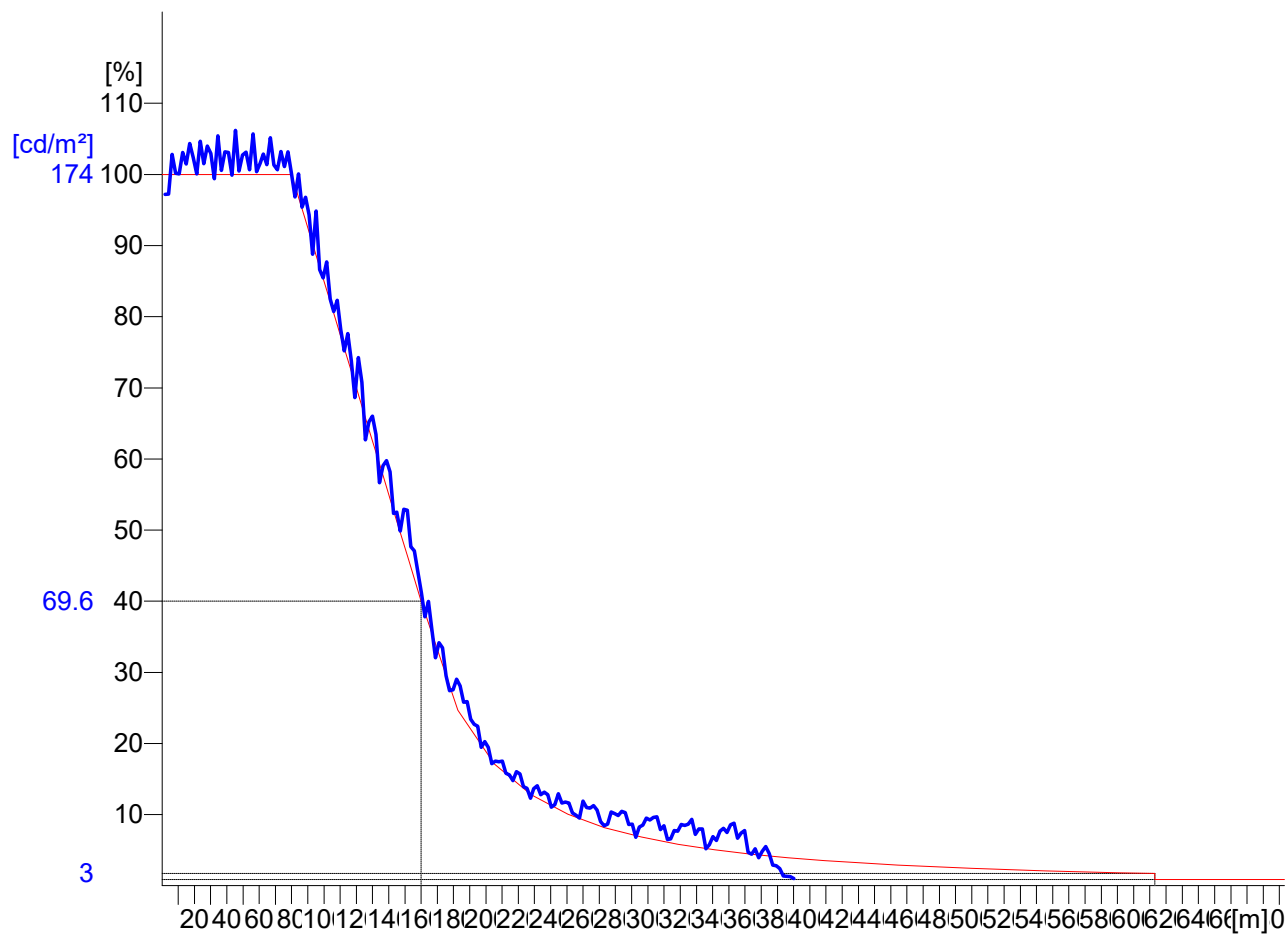
Observer location 2 : $x = -84$, $y = 5.63$, $z = 1.5$ ($dx = 85.93$)
Evaluation of L on whole width of road

Object : Μαύρη Ωρα (Α)
Installation : Εναλλακτική Α1
Project number :
Date : 06.01.2019

RELUX®

1.2 Calculation results, Tunnel A

1.2.6 Evolution, Adaptation (L), S3: 75%, Obs. 2



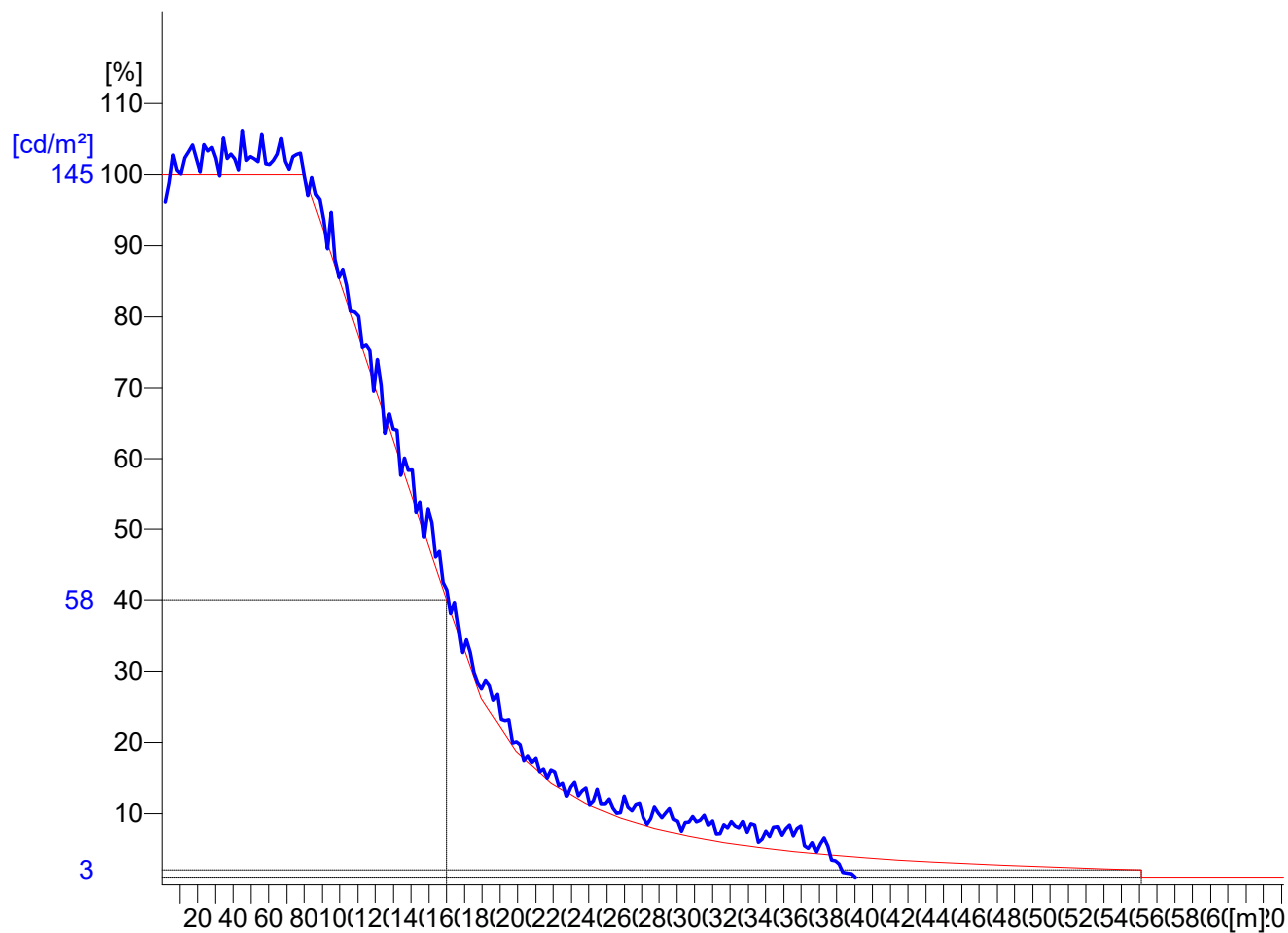
Observer location 2 : x = -84, y = 5.63, z = 1.5 (dx = 85.93)
Evaluation of L on whole width of road

Object : Μαύρη Ωρα (A)
Installation : Εναλλακτική Α1
Project number :
Date : 06.01.2019

RELUX®

1.2 Calculation results, Tunnel A

1.2.7 Evolution, Adaptation (L), S4: 62.5%, Obs. 2



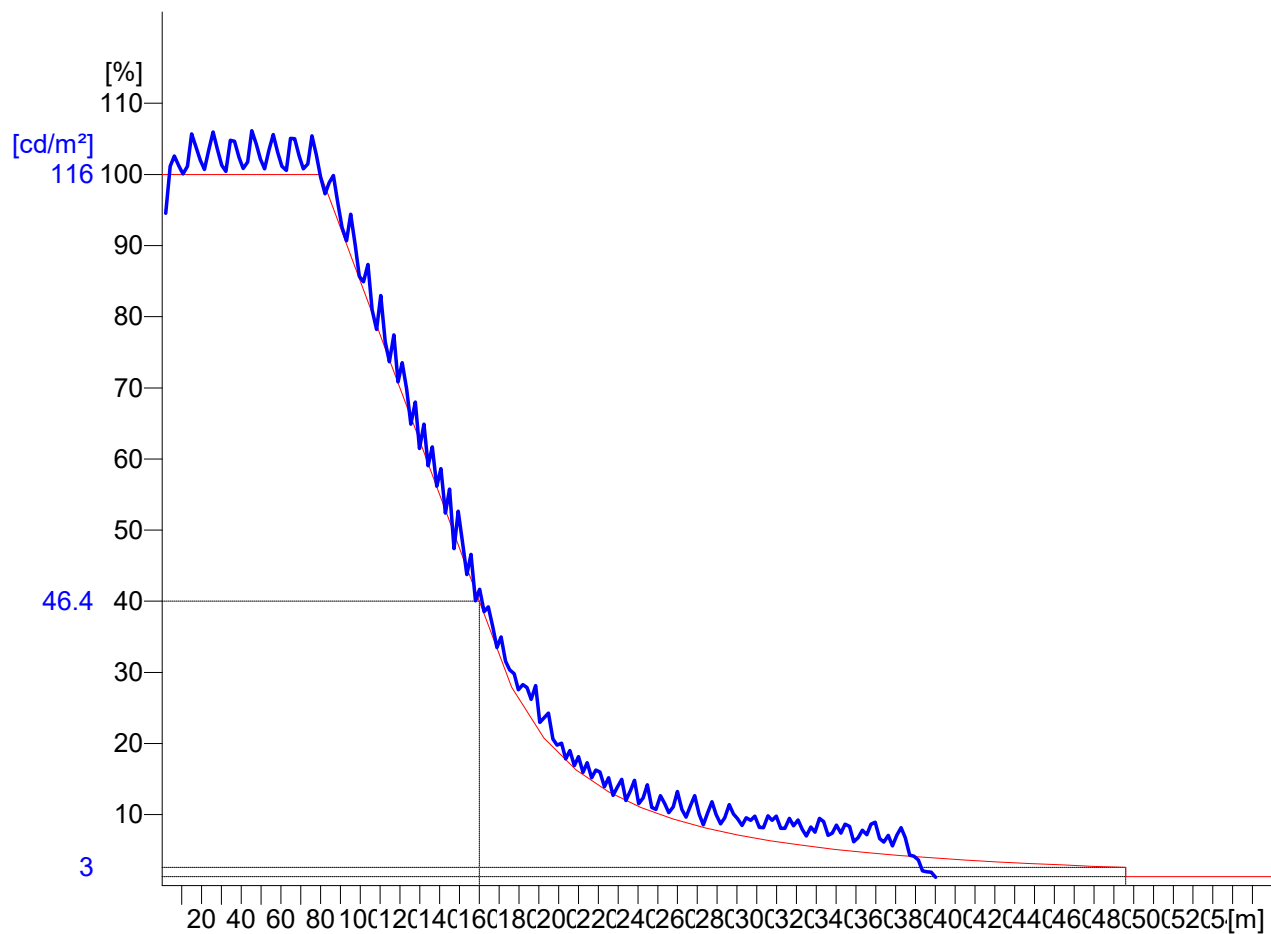
Observer location 2 : x = -84, y = 5.63, z = 1.5 (dx = 85.93)
Evaluation of L on whole width of road

Object : Μαύρη Ωρα (A)
Installation : Εναλλακτική Α1
Project number :
Date : 06.01.2019

RELUX®

1.2 Calculation results, Tunnel A

1.2.8 Evolution, Adaptation (L), S5: 50%, Obs. 2



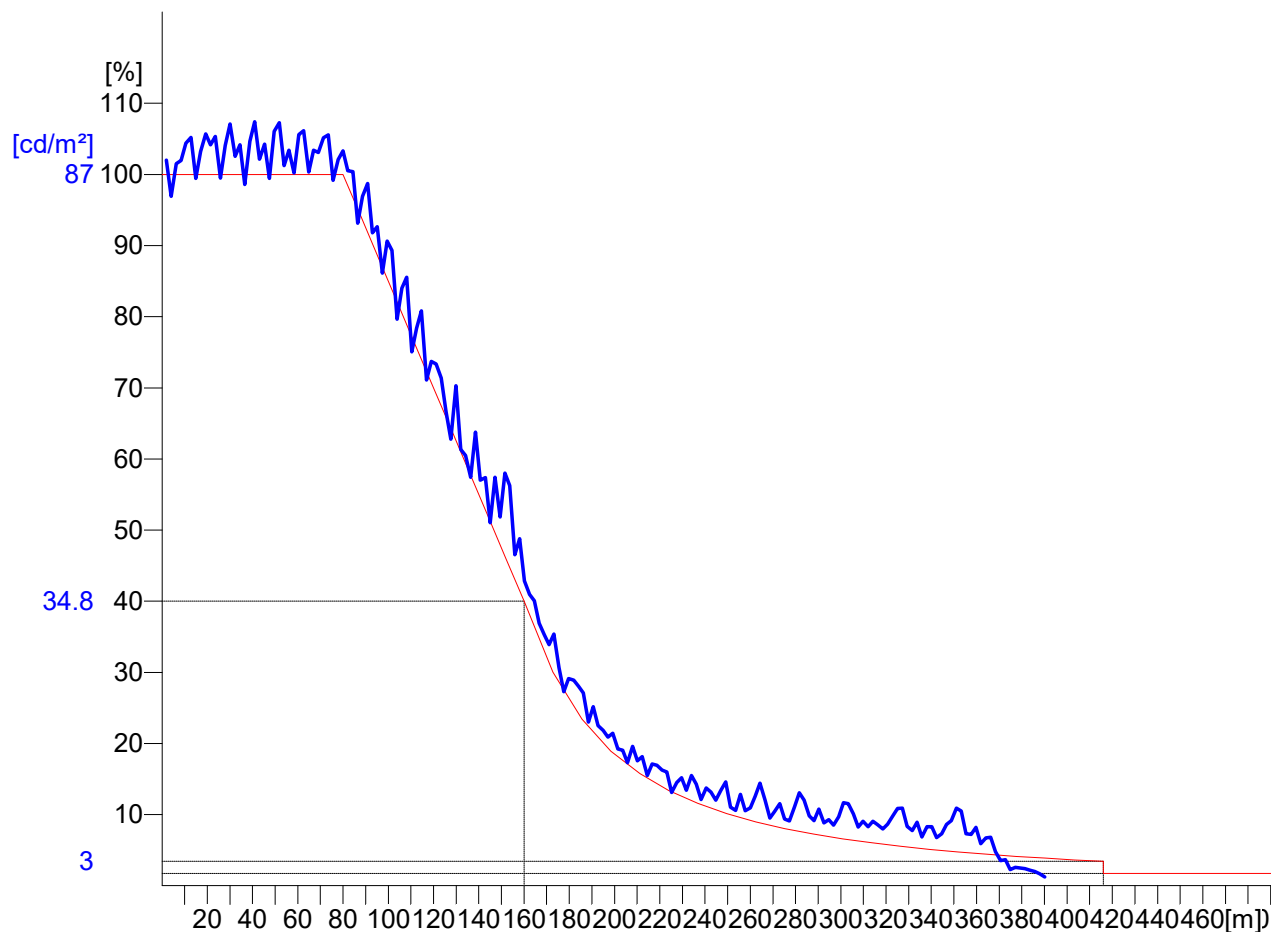
Observer location 2 : x = -84, y = 5.63, z = 1.5 (dx = 85.93)
Evaluation of L on whole width of road

Object : Μαύρη Ωρα (A)
Installation : Εναλλακτική Α1
Project number :
Date : 06.01.2019

RELUX®

1.2 Calculation results, Tunnel A

1.2.9 Evolution, Adaptation (L), S6: 37.5%, Obs. 2



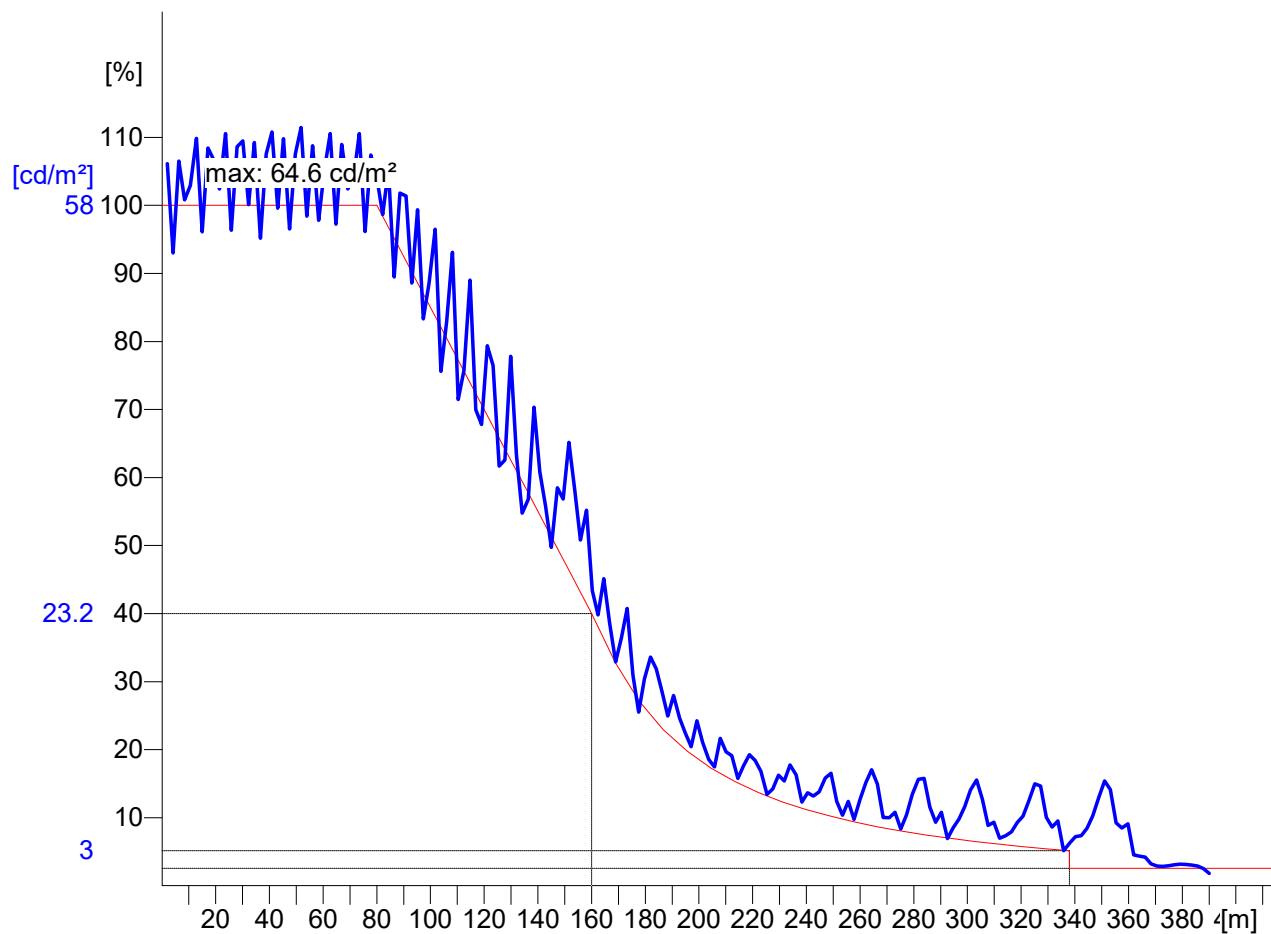
Observer location 2 : x = -84, y = 5.63, z = 1.5 (dx = 85.93)
Evaluation of L on whole width of road

Object : Μαύρη Ωρα (A)
Installation : Εναλλακτική Α1
Project number :
Date : 06.01.2019

RELUX®

1.2 Calculation results, Tunnel A

1.2.10 Evolution, Adaptation (L), S7: 25%, Obs. 2



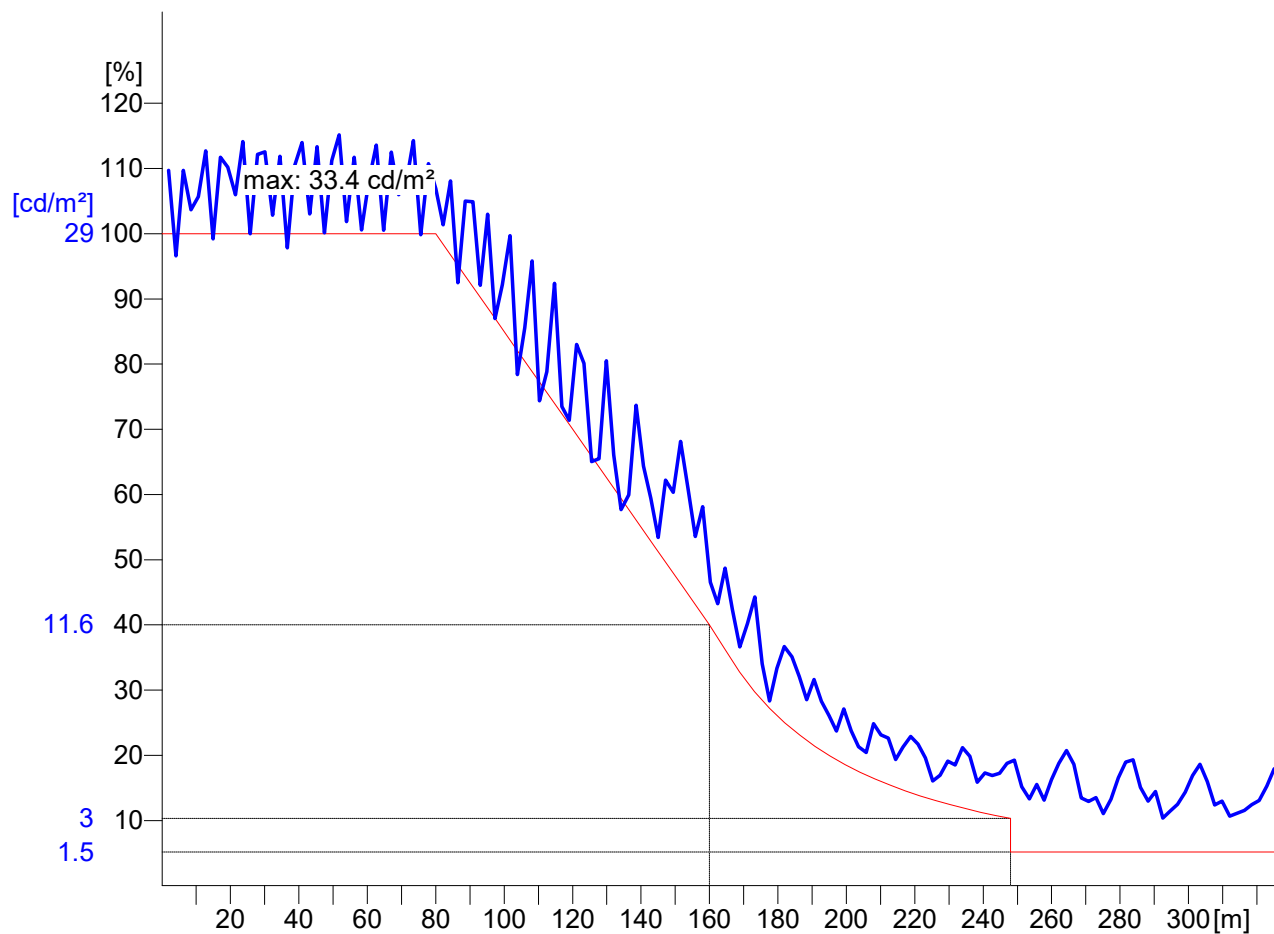
Observer location 2 : $x = -84, y = 5.63, z = 1.5$ ($dx = 85.93$)
Evaluation of L on whole width of road

Object : Μαύρη Ωρα (A)
Installation : Εναλλακτική Α1
Project number :
Date : 06.01.2019

RELUX®

1.2 Calculation results, Tunnel A

1.2.11 Evolution, Adaptation (L), S8: 12.5%, Obs. 2



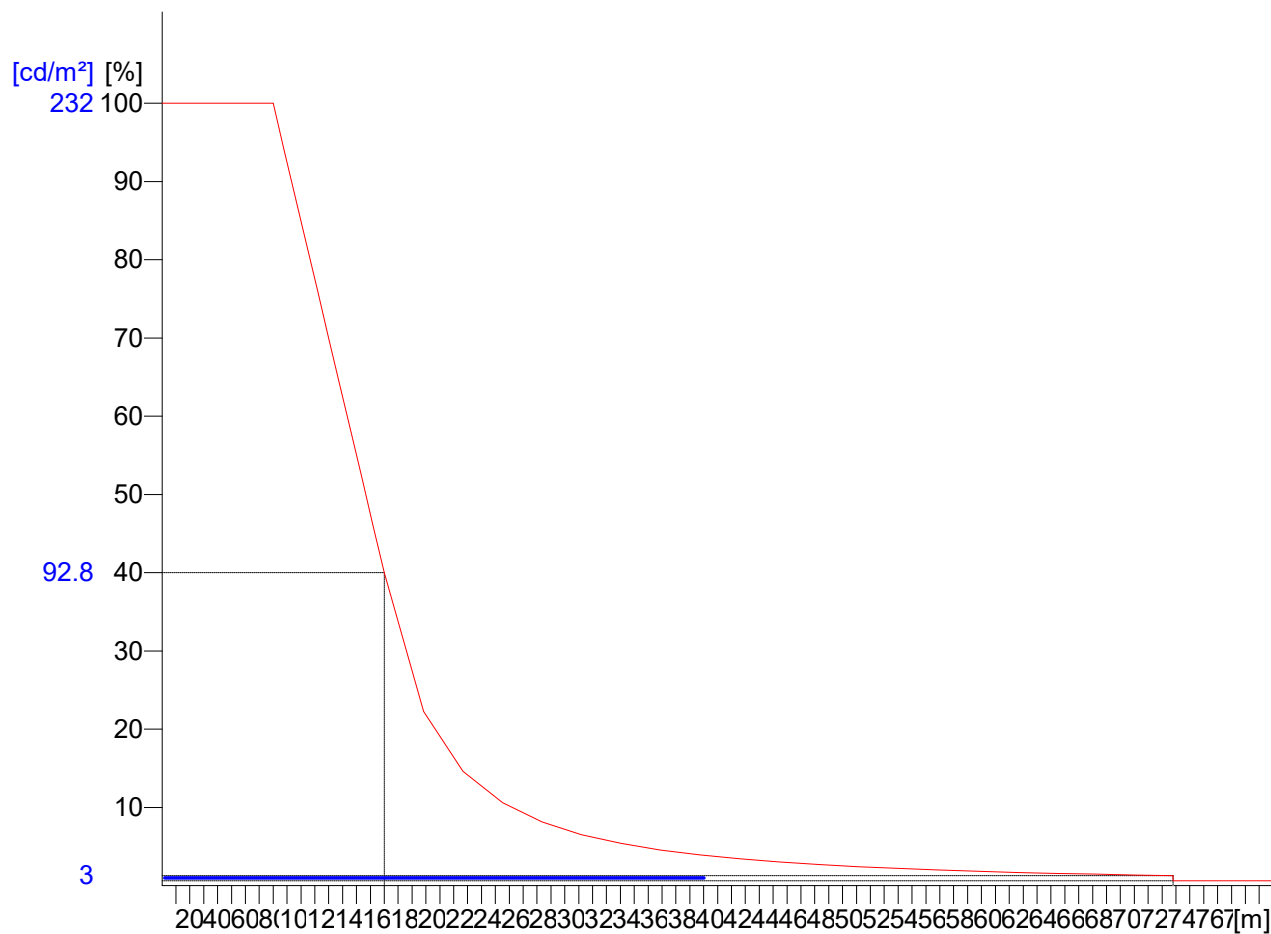
Observer location 2 : x = -84, y = 5.63, z = 1.5 (dx = 85.93)
Evaluation of L on whole width of road

Object : Μαύρη Ωρα (A)
Installation : Εναλλακτική Α1
Project number :
Date : 06.01.2019

RELUX®

1.2 Calculation results, Tunnel A

1.2.12 Evolution, Adaptation (L), Int.1, Obs. 2



Observer location 2 : $x = -84, y = 5.63, z = 1.5$ ($dx = 85.93$)
Evaluation of L on whole width of road

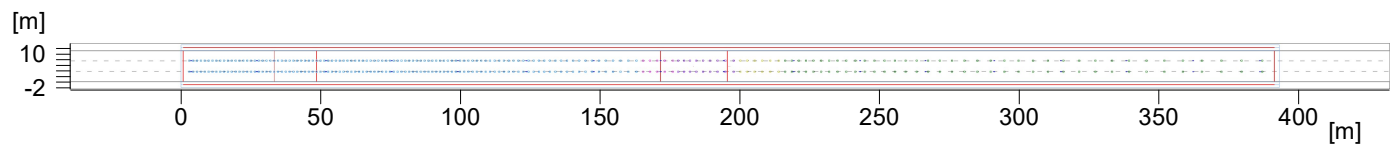
Object : Μαύρη Ωρα (Α)
Installation : Εναλλακτική Α2
Project number :
Date : 06.01.2019

RELUX®

1 Tunnel A

1.1 Description, Tunnel A

1.1.2 Floor plan



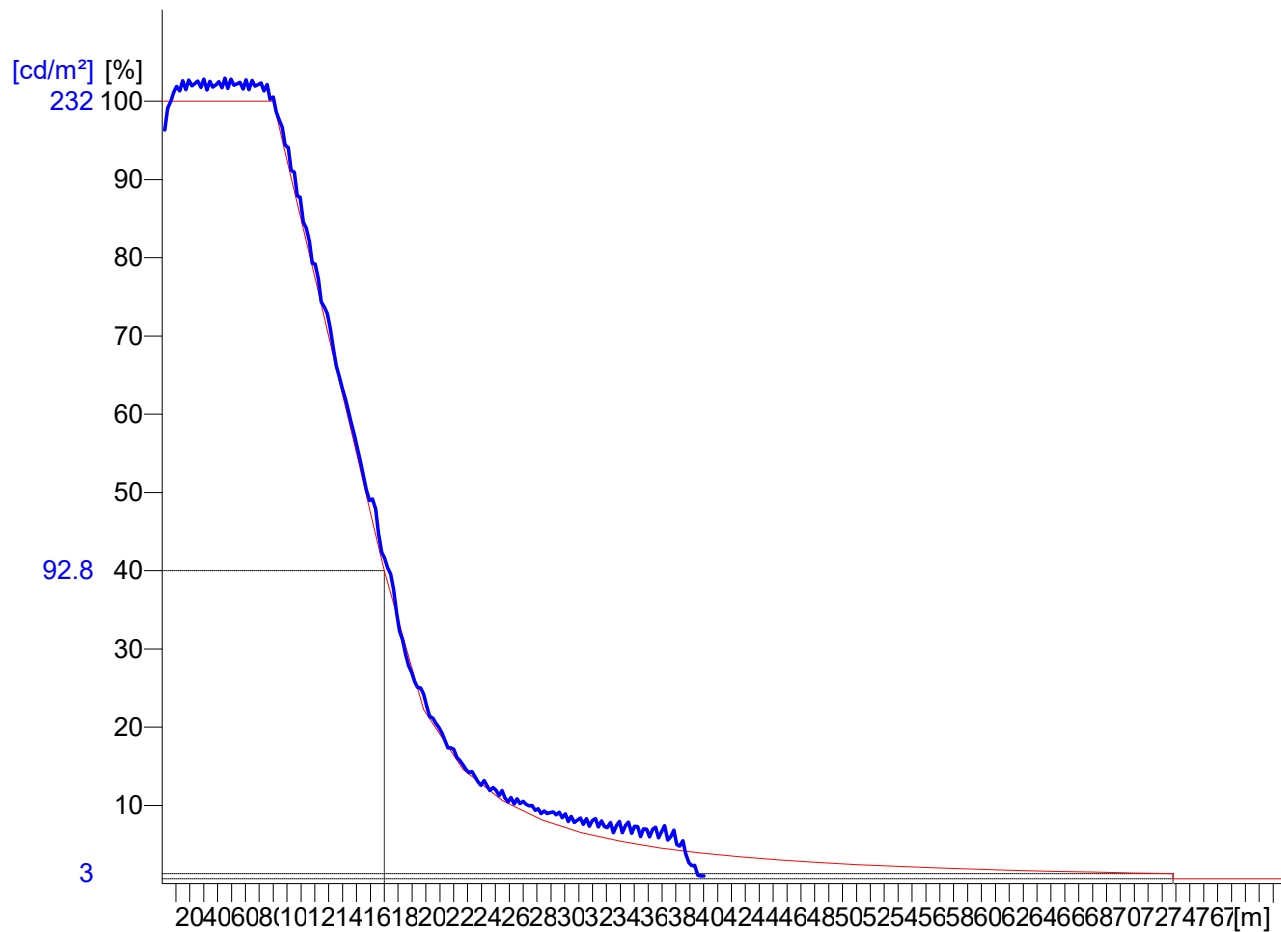
Object : Μαύρη Ωρα (A)
Installation : Εναλλακτική Α2
Project number :
Date : 06.01.2019

RELUX®

1 Tunnel A

1.2 Calculation results, Tunnel A

1.2.4 Evolution, Adaptation (L), S1: 100%, Obs. 2



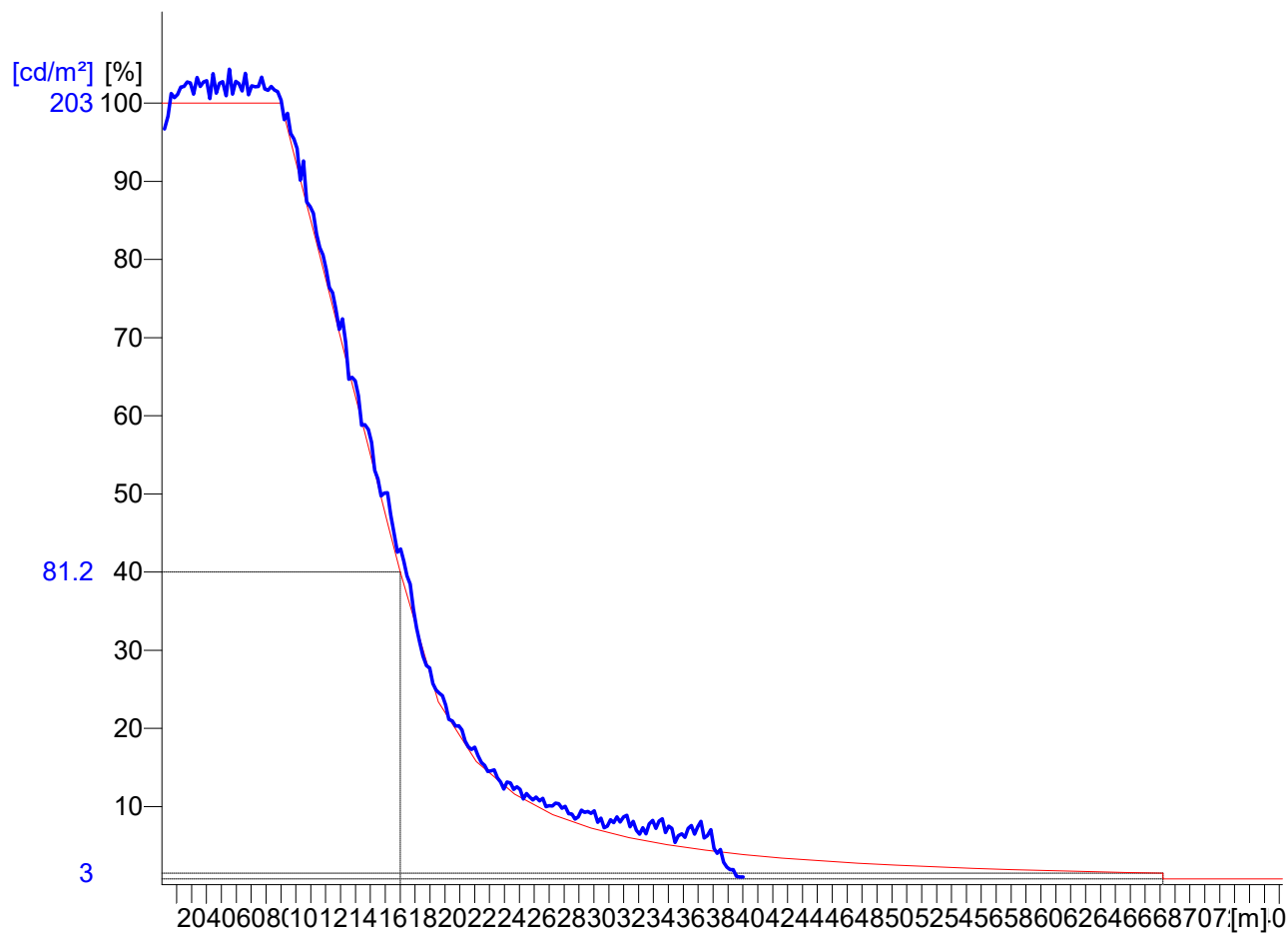
Observer location 2 : x = -84, y = 5.63, z = 1.5 (dx = 85.93)
Evaluation of L on whole width of road

Object : Μαύρη Ωρα (A)
Installation : Εναλλακτική A2
Project number :
Date : 06.01.2019

RELUX®

1.2 Calculation results, Tunnel A

1.2.5 Evolution, Adaptation (L), S2: 87.5%, Obs. 2



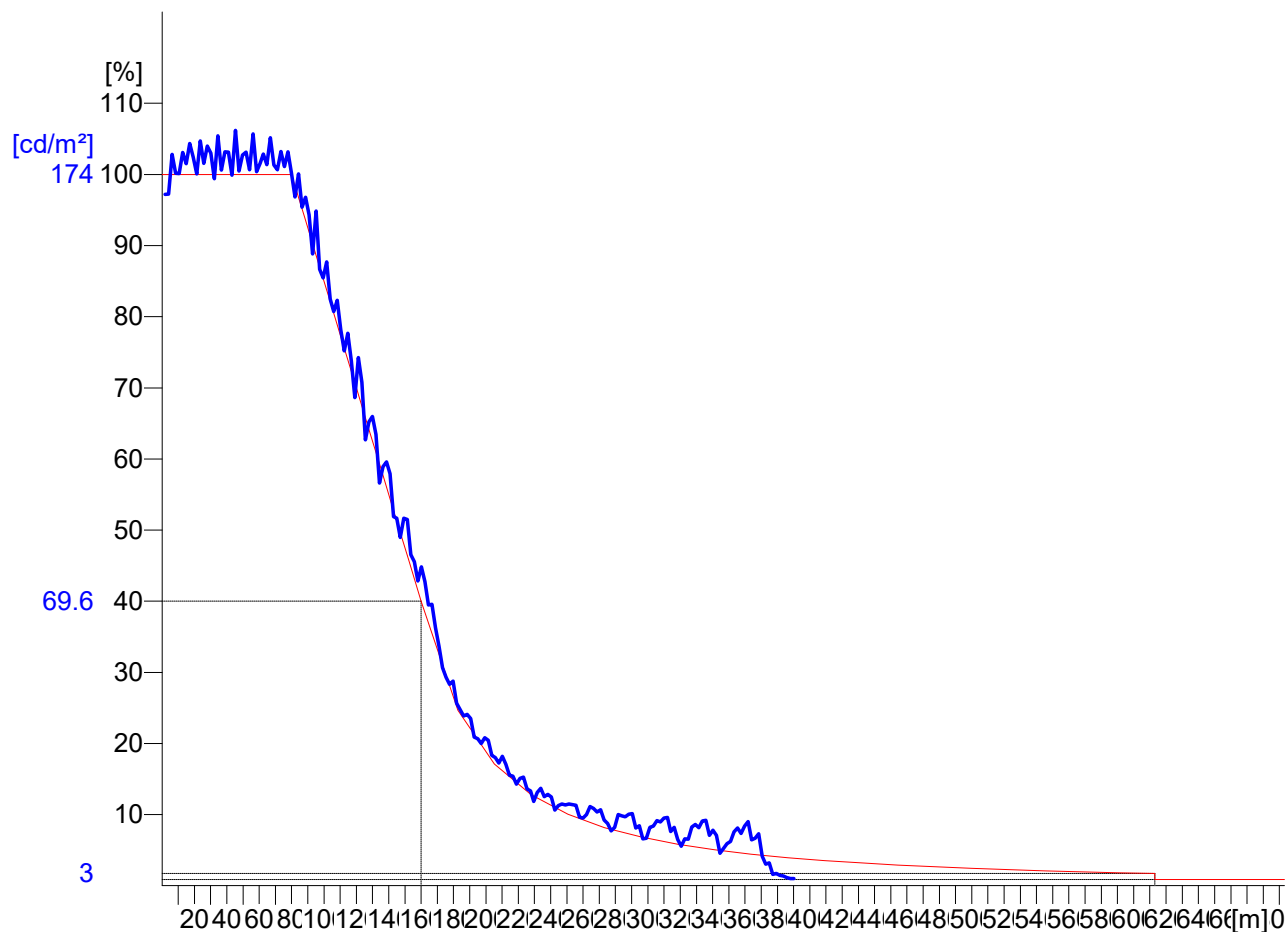
Observer location 2 : x = -84, y = 5.63, z = 1.5 (dx = 85.93)
Evaluation of L on whole width of road

Object : Μαύρη Ωρα (A)
Installation : Εναλλακτική Α2
Project number :
Date : 06.01.2019

RELUX®

1.2 Calculation results, Tunnel A

1.2.6 Evolution, Adaptation (L), S3: 75%, Obs. 2



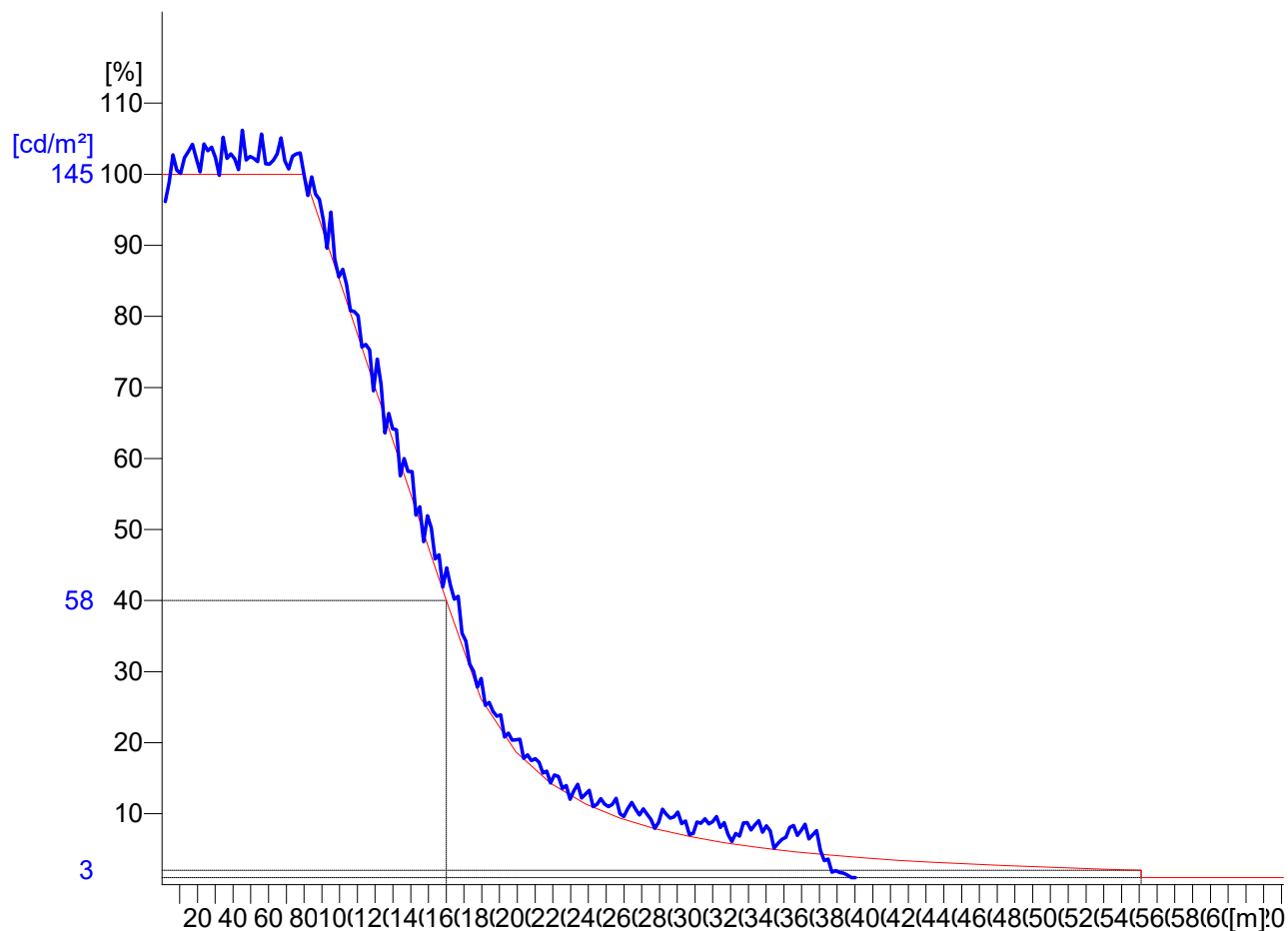
Observer location 2 : x = -84, y = 5.63, z = 1.5 (dx = 85.93)
Evaluation of L on whole width of road

Object : Μαύρη Ωρα (Α)
Installation : Εναλλακτική Α2
Project number :
Date : 06.01.2019

RELUX®

1.2 Calculation results, Tunnel A

1.2.7 Evolution, Adaptation (L), S4: 62.5%, Obs. 2



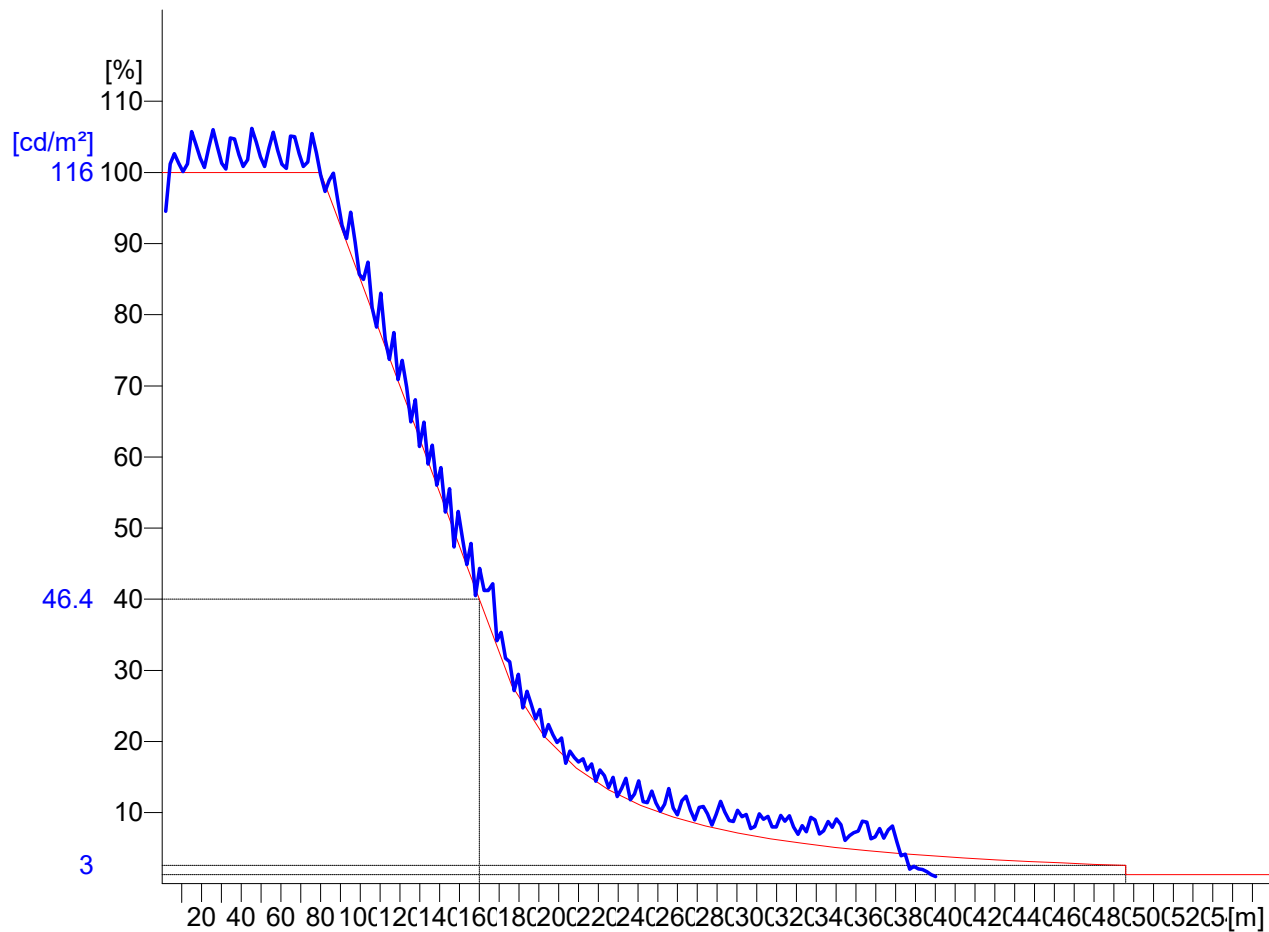
Observer location 2 : x = -84, y = 5.63, z = 1.5 (dx = 85.93)
Evaluation of L on whole width of road

Object : Μαύρη Ωρα (A)
Installation : Εναλλακτική A2
Project number :
Date : 06.01.2019

RELUX®

1.2 Calculation results, Tunnel A

1.2.8 Evolution, Adaptation (L), S5: 50%, Obs. 2



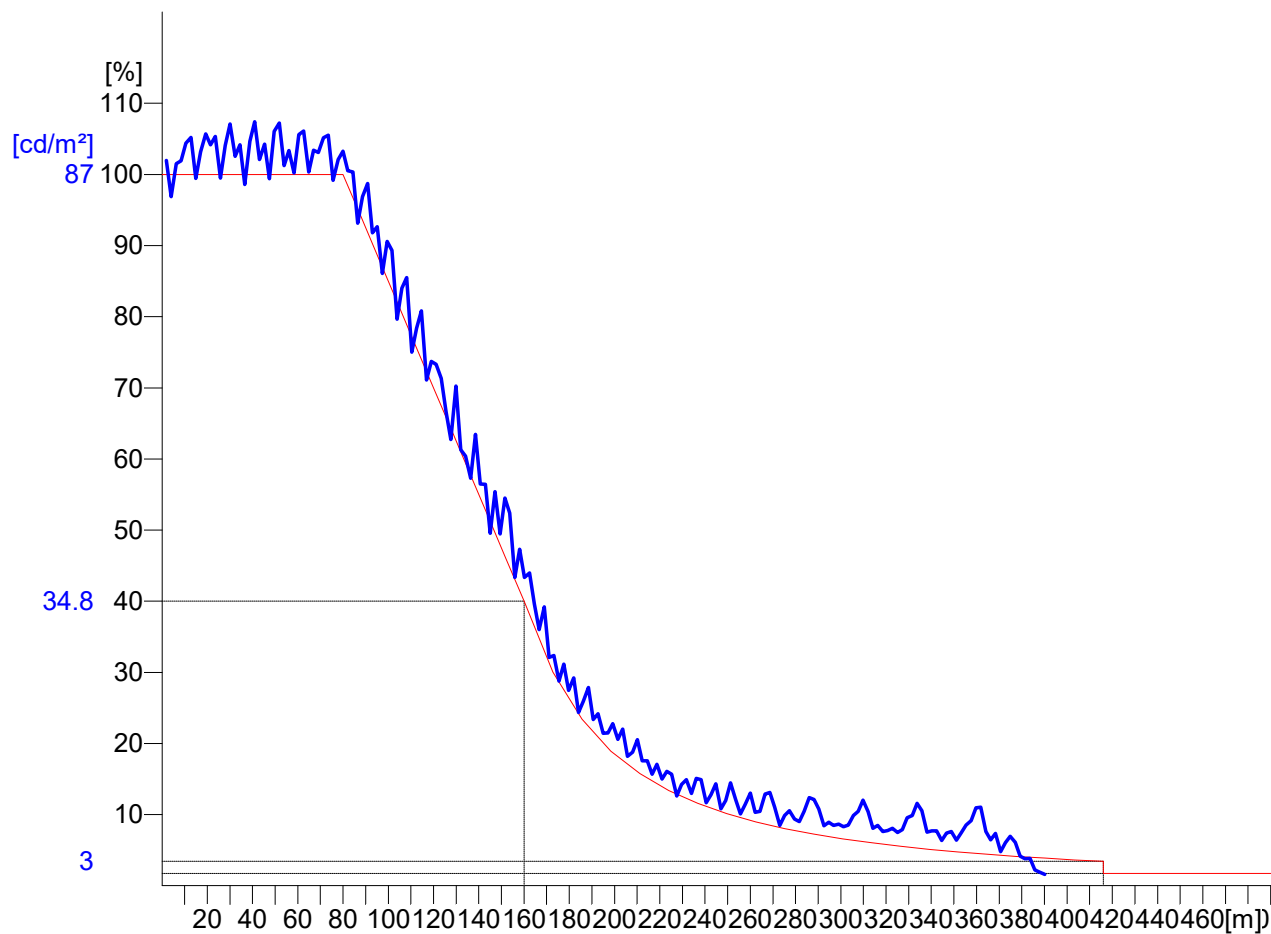
Observer location 2 : x = -84, y = 5.63, z = 1.5 (dx = 85.93)
Evaluation of L on whole width of road

Object : Μαύρη Ωρα (A)
Installation : Εναλλακτική A2
Project number :
Date : 06.01.2019

RELUX®

1.2 Calculation results, Tunnel A

1.2.9 Evolution, Adaptation (L), S6: 37.5%, Obs. 2



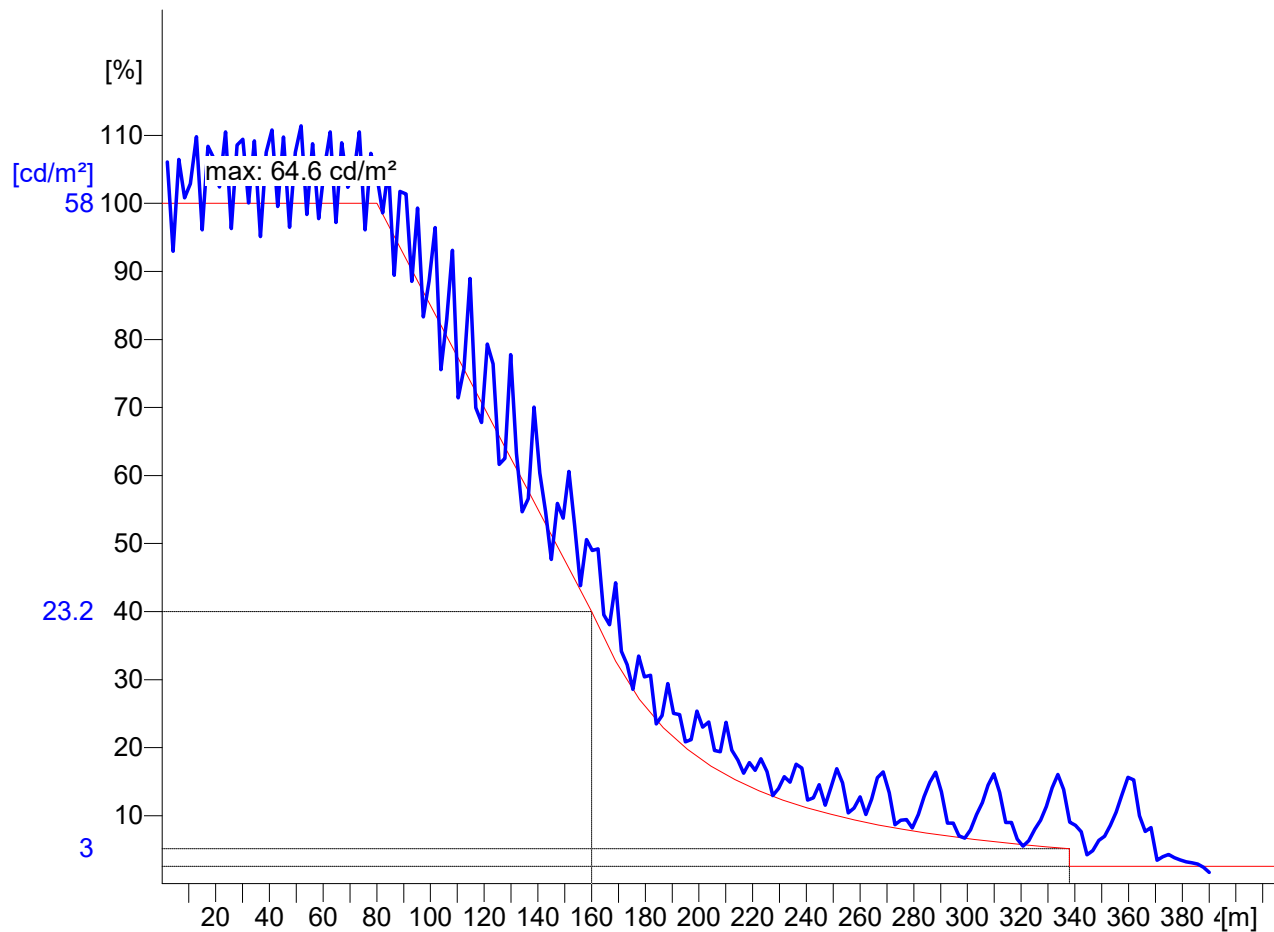
Observer location 2 : x = -84, y = 5.63, z = 1.5 (dx = 85.93)
Evaluation of L on whole width of road

Object : Μαύρη Ωρα (A)
Installation : Εναλλακτική Α2
Project number :
Date : 06.01.2019

RELUX®

1.2 Calculation results, Tunnel A

1.2.10 Evolution, Adaptation (L), S7: 25%, Obs. 2



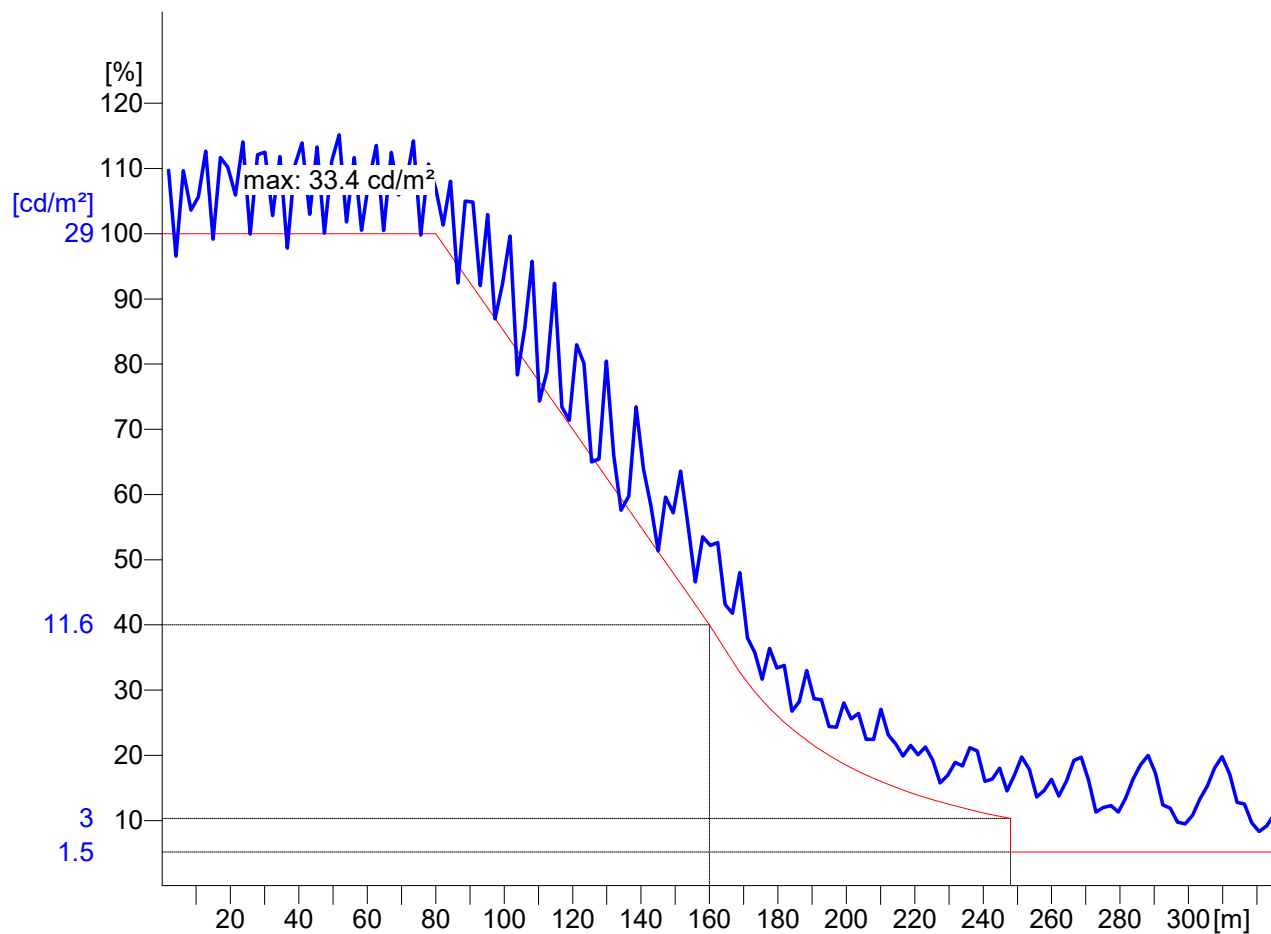
Observer location 2 : $x = -84, y = 5.63, z = 1.5$ ($dx = 85.93$)
Evaluation of L on whole width of road

Object : Μαύρη Ωρα (A)
Installation : Εναλλακτική Α2
Project number :
Date : 06.01.2019

RELUX®

1.2 Calculation results, Tunnel A

1.2.11 Evolution, Adaptation (L), S8: 12.5%, Obs. 2



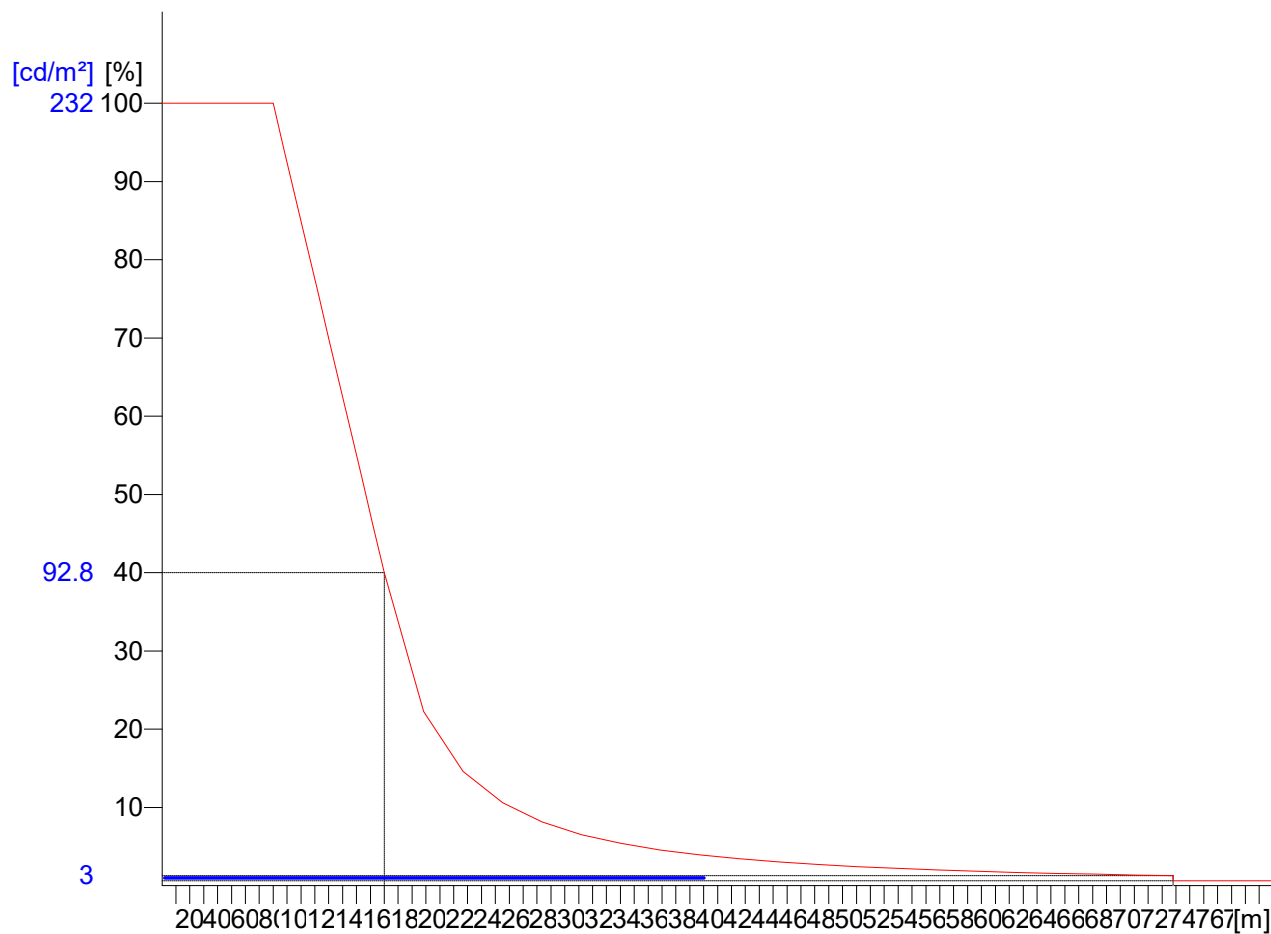
Observer location 2 : x = -84, y = 5.63, z = 1.5 (dx = 85.93)
Evaluation of L on whole width of road

Object : Μαύρη Ωρα (A)
Installation : Εναλλακτική Α2
Project number :
Date : 06.01.2019

RELUX®

1.2 Calculation results, Tunnel A

1.2.12 Evolution, Adaptation (L), Int.1, Obs. 2



Observer location 2 : $x = -84, y = 5.63, z = 1.5$ ($dx = 85.93$)
Evaluation of L on whole width of road

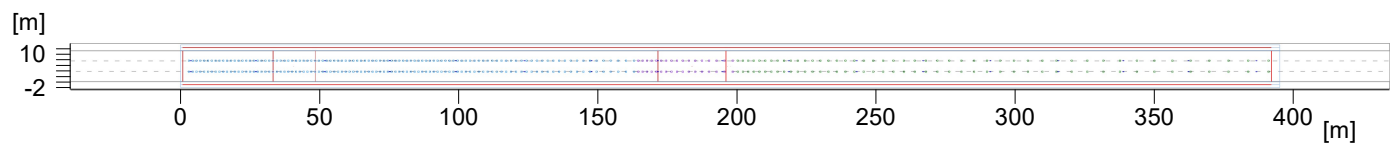
Object : Μαύρη Ωρα (Ε)
Installation : Εναλλακτική Ε1
Project number :
Date : 06.01.2019

RELUX®

1 Tunnel E

1.1 Description, Tunnel E

1.1.2 Floor plan



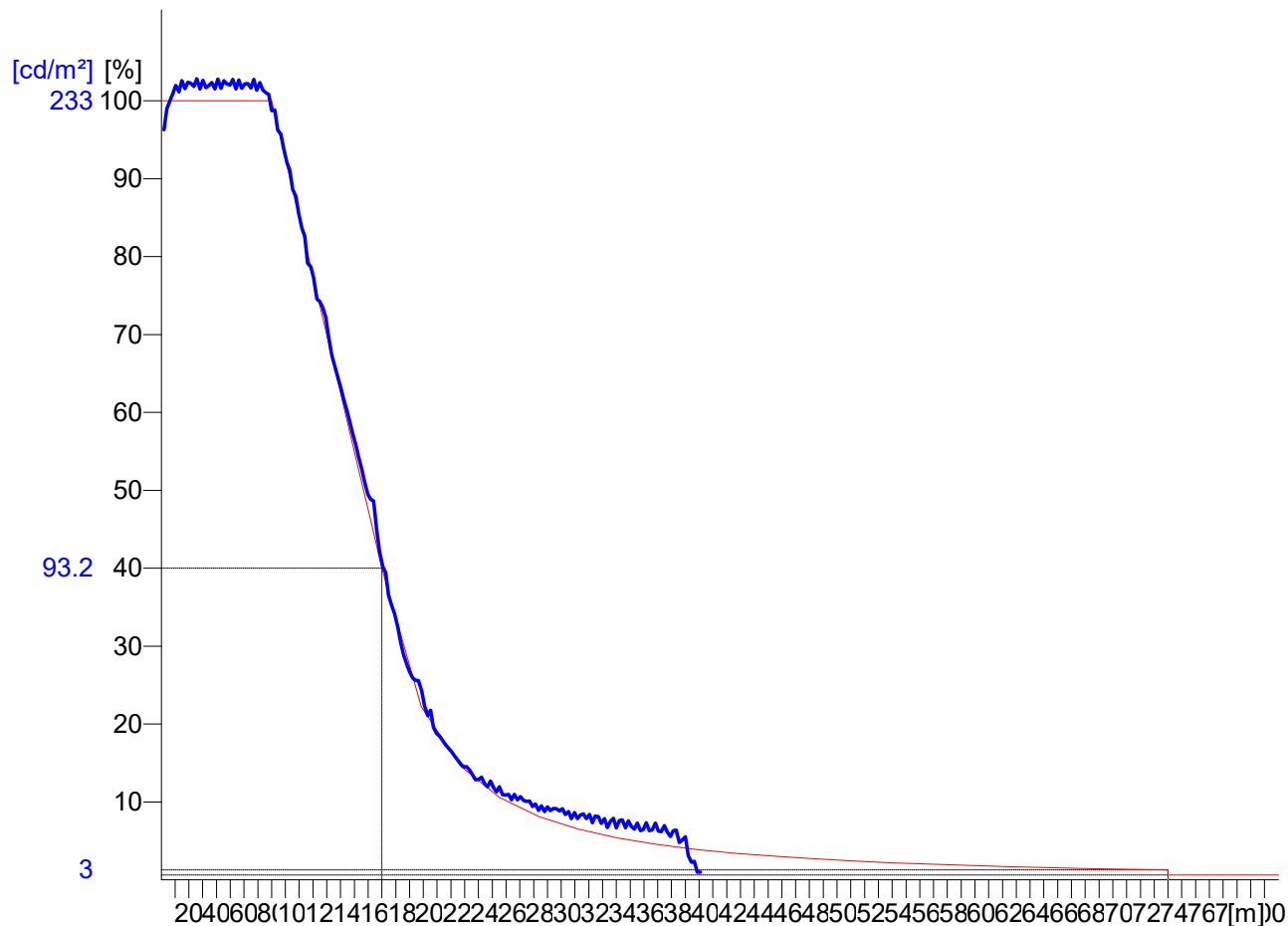
Object : Μαύρη Ωρα (E)
Installation : Εναλλακτική E1
Project number :
Date : 06.01.2019

RELUX®

1 Tunnel E

1.2 Calculation results, Tunnel E

1.2.4 Evolution, Adaptation (L), S1: 100%, Obs. 2



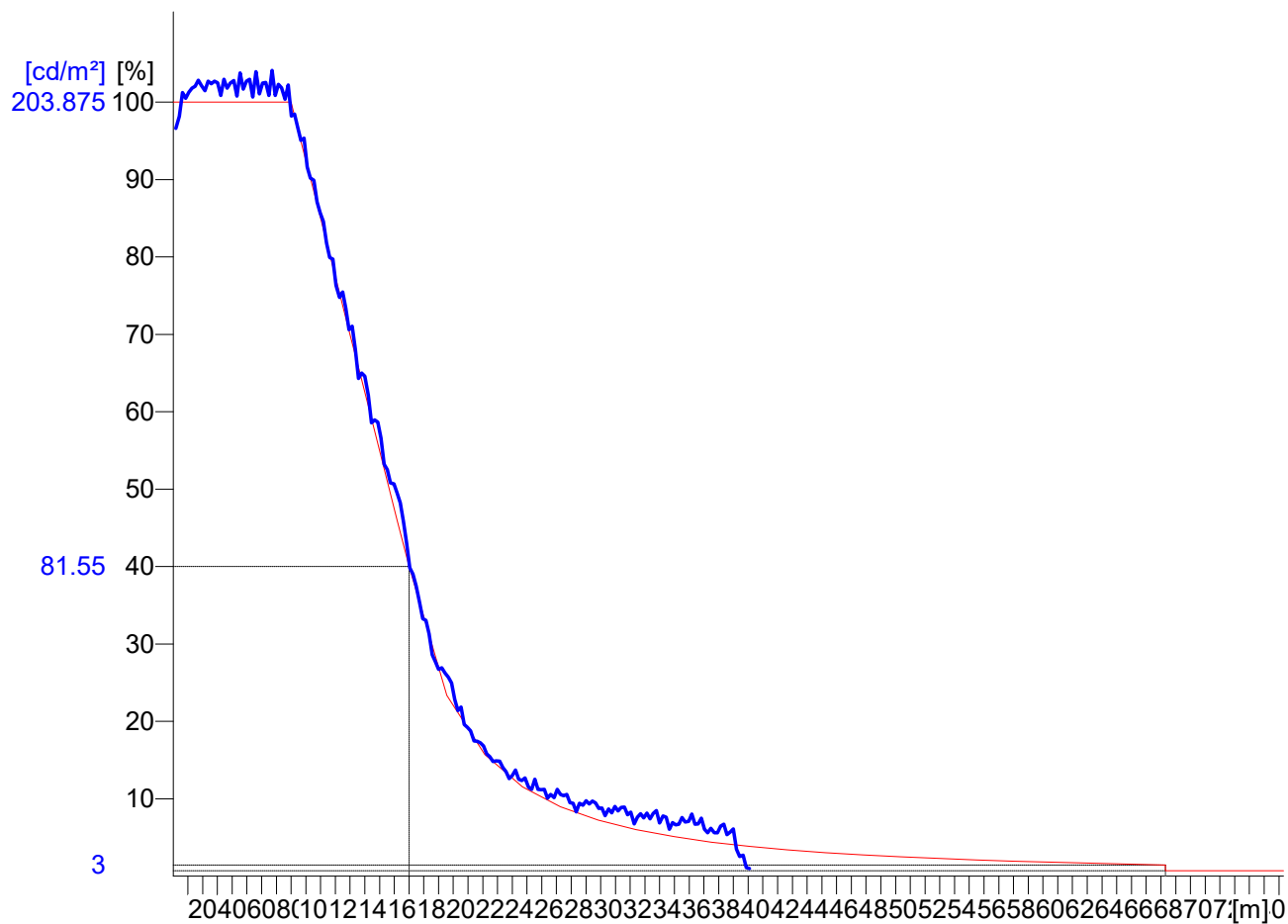
Observer location 2 : x = -84, y = 5.63, z = 1.5 (dx = 85.93)
Evaluation of L on whole width of road

Object : Μαύρη Ωρα (E)
Installation : Εναλλακτική E1
Project number :
Date : 06.01.2019

RELUX®

1.2 Calculation results, Tunnel E

1.2.5 Evolution, Adaptation (L), S2: 87.5%, Obs. 2



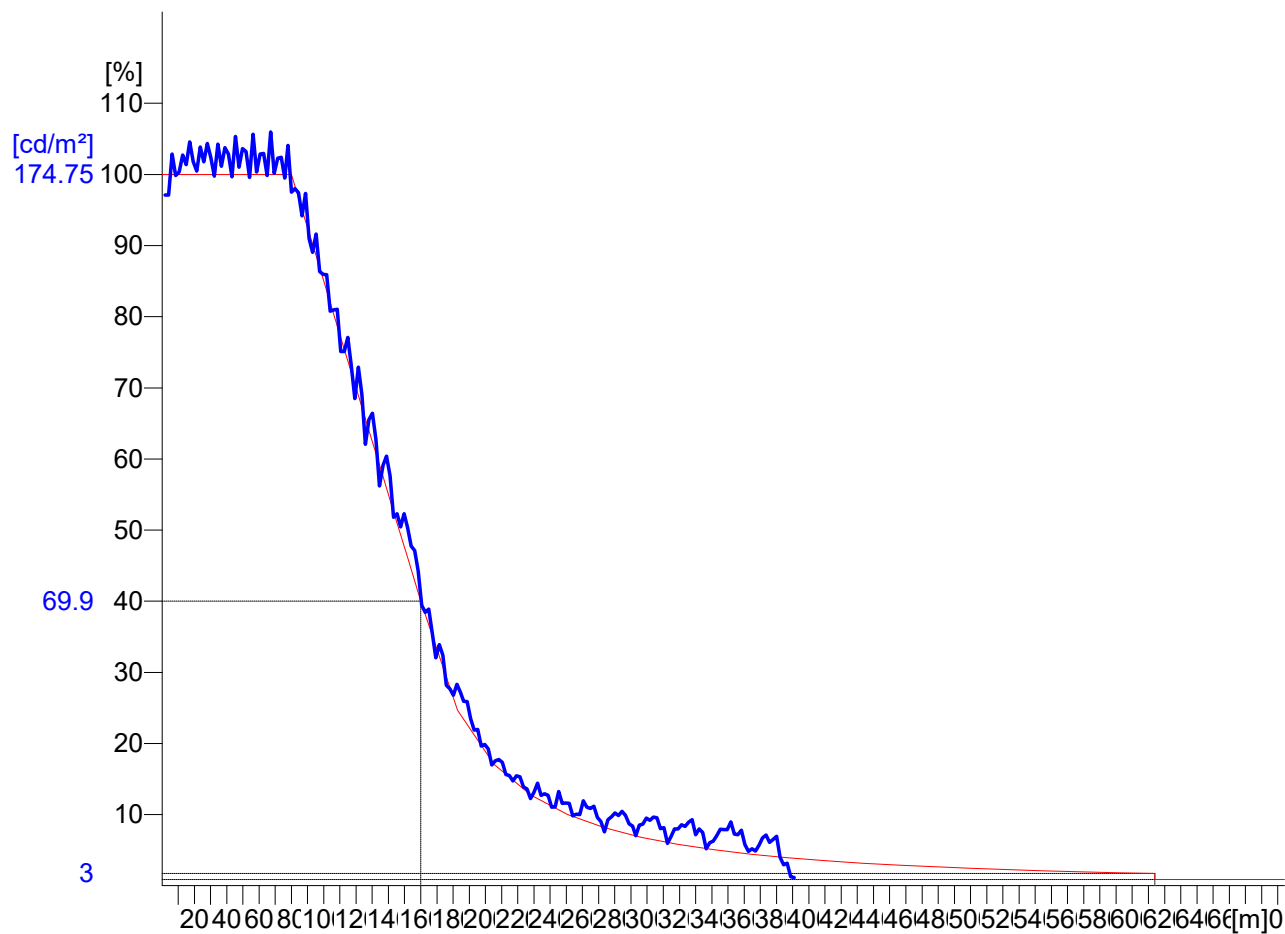
Observer location 2 : x = -84, y = 5.63, z = 1.5 (dx = 85.93)
Evaluation of L on whole width of road

Object : Μαύρη Ωρα (E)
Installation : Εναλλακτική E1
Project number :
Date : 06.01.2019

RELUX®

1.2 Calculation results, Tunnel E

1.2.6 Evolution, Adaptation (L), S3: 75%, Obs. 2



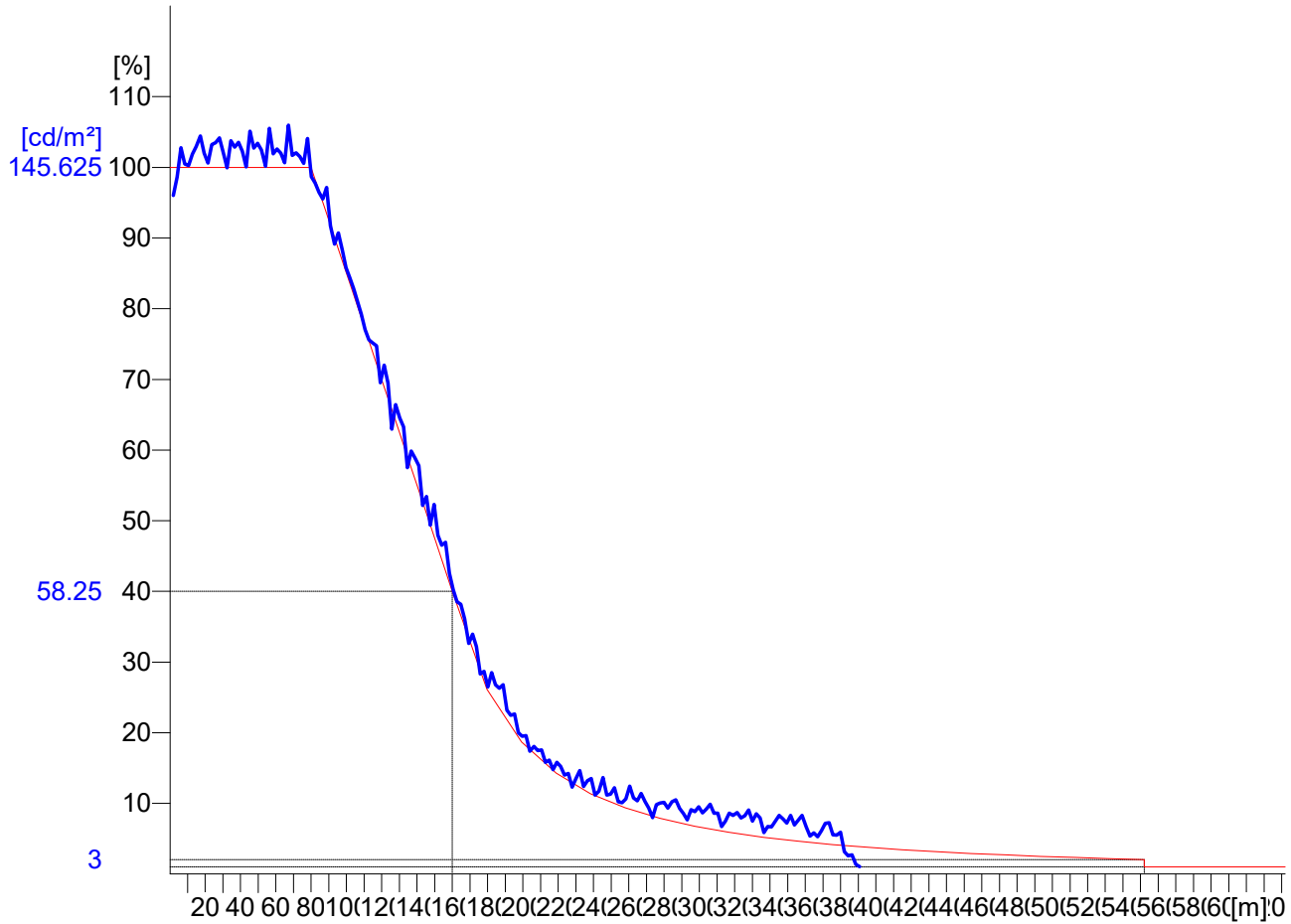
Observer location 2 : x = -84, y = 5.63, z = 1.5 (dx = 85.93)
Evaluation of L on whole width of road

Object : Μαύρη Ωρα (E)
Installation : Εναλλακτική E1
Project number :
Date : 06.01.2019

RELUX®

1.2 Calculation results, Tunnel E

1.2.7 Evolution, Adaptation (L), S4: 62.5%, Obs. 2



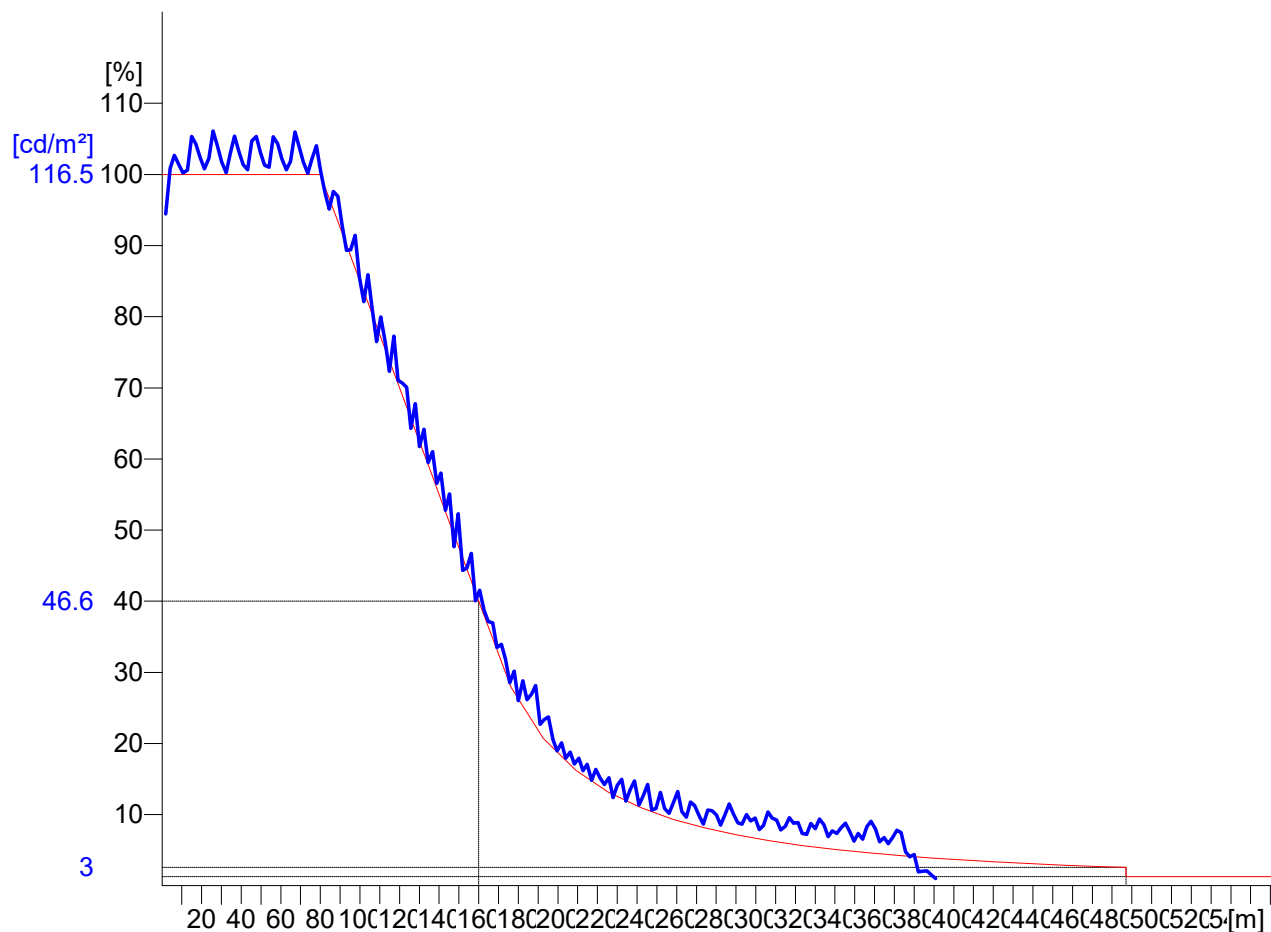
Observer location 2 : x = -84, y = 5.63, z = 1.5 (dx = 85.93)
Evaluation of L on whole width of road

Object : Μαύρη Ωρα (E)
Installation : Εναλλακτική E1
Project number :
Date : 06.01.2019

RELUX®

1.2 Calculation results, Tunnel E

1.2.8 Evolution, Adaptation (L), S5: 50%, Obs. 2



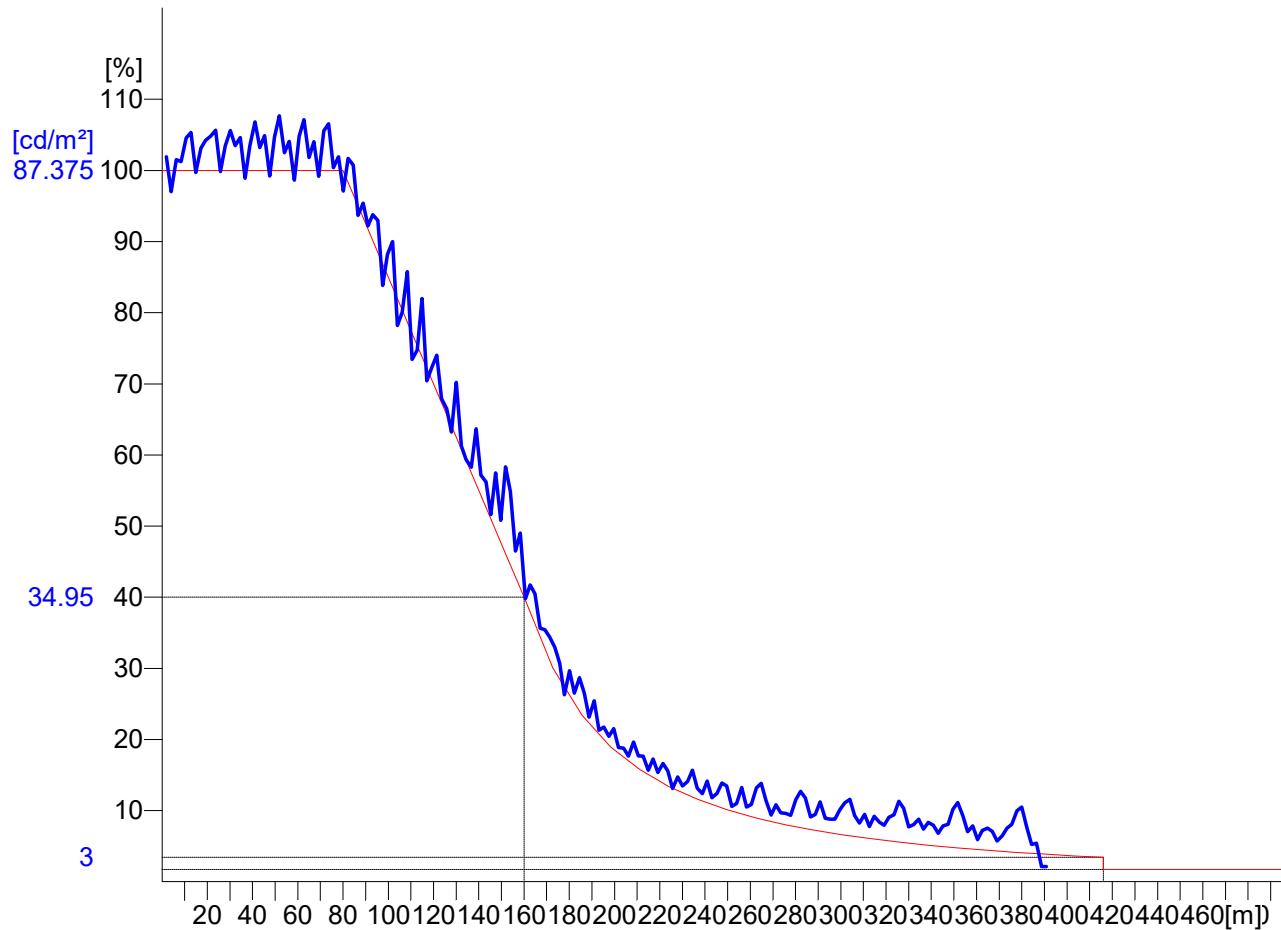
Observer location 2 : x = -84, y = 5.63, z = 1.5 (dx = 85.93)
Evaluation of L on whole width of road

Object : Μαύρη Ωρα (Ε)
Installation : Εναλλακτική Ε1
Project number :
Date : 06.01.2019



1.2 Calculation results, Tunnel E

1.2.9 Evolution, Adaptation (L), S6: 37.5%, Obs. 2



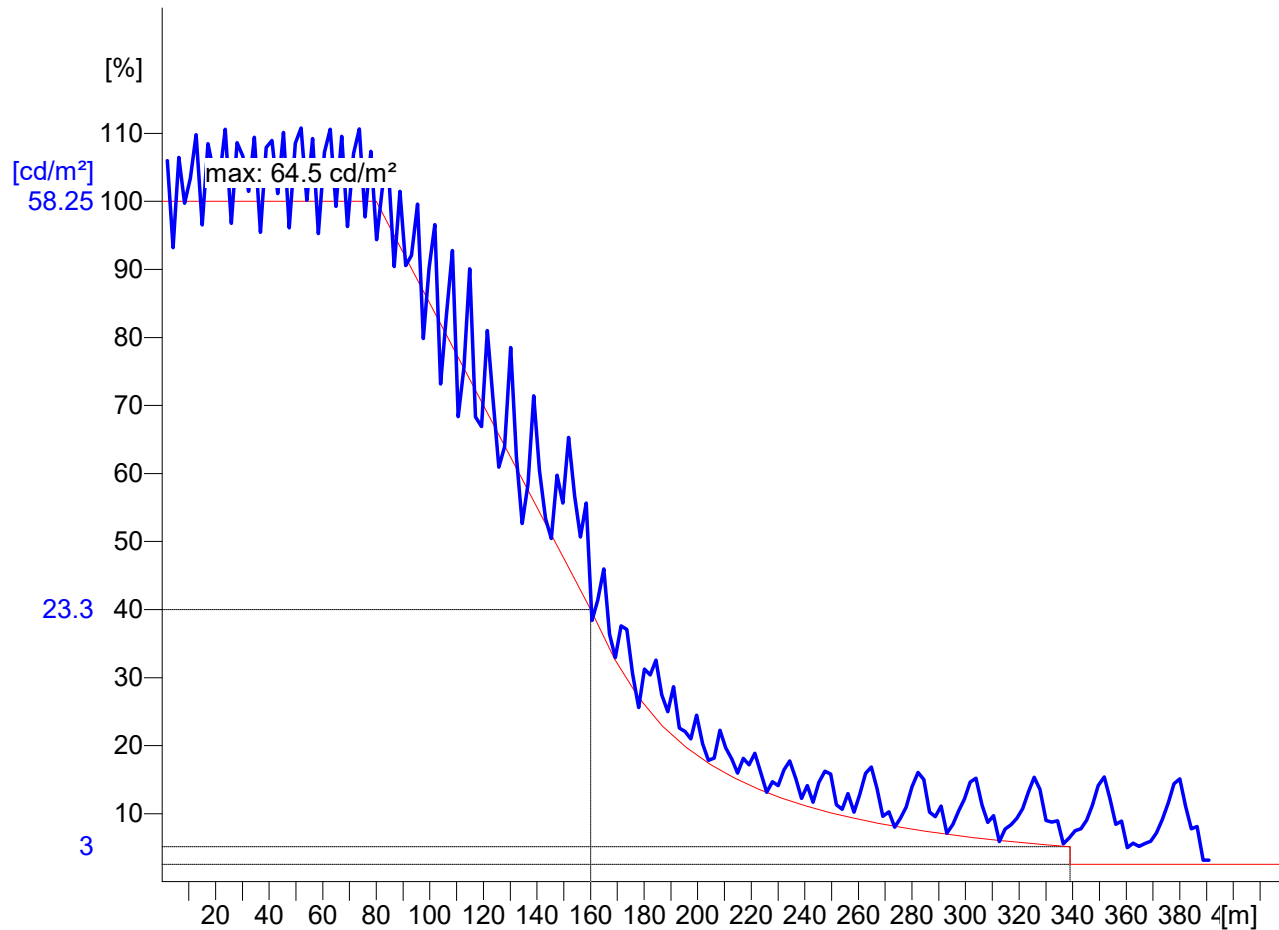
Observer location 2 : x = -84, y = 5.63, z = 1.5 (dx = 85.93)
Evaluation of L on whole width of road

Object : Μαύρη Ωρα (E)
Installation : Εναλλακτική E1
Project number :
Date : 06.01.2019

RELUX®

1.2 Calculation results, Tunnel E

1.2.10 Evolution, Adaptation (L), S7: 25%, Obs. 2



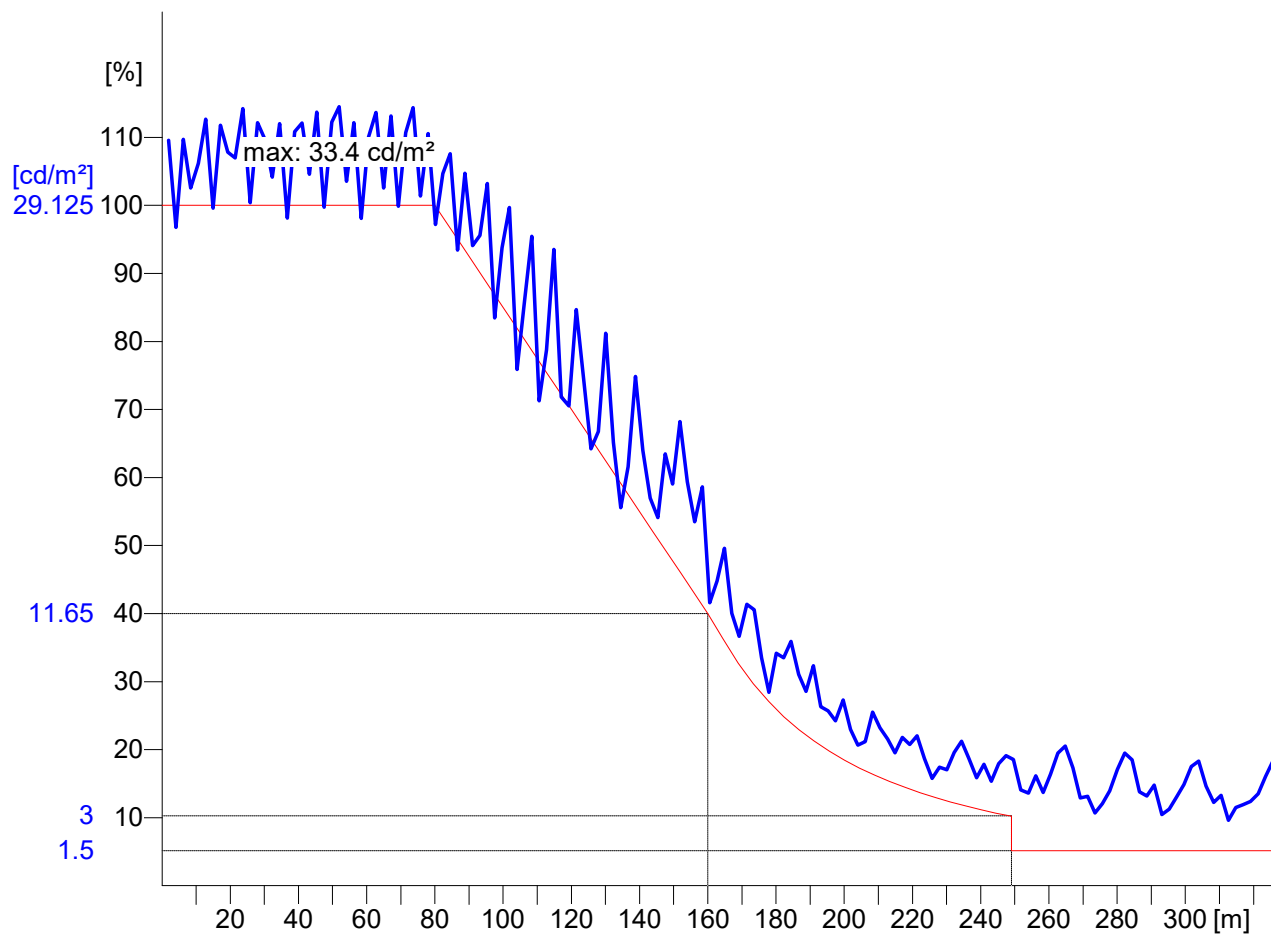
Observer location 2 : $x = -84, y = 5.63, z = 1.5$ ($dx = 85.93$)
Evaluation of L on whole width of road

Object : Μαύρη Ωρα (E)
Installation : Εναλλακτική E1
Project number :
Date : 06.01.2019

RELUX®

1.2 Calculation results, Tunnel E

1.2.11 Evolution, Adaptation (L), S8: 12.5%, Obs. 2



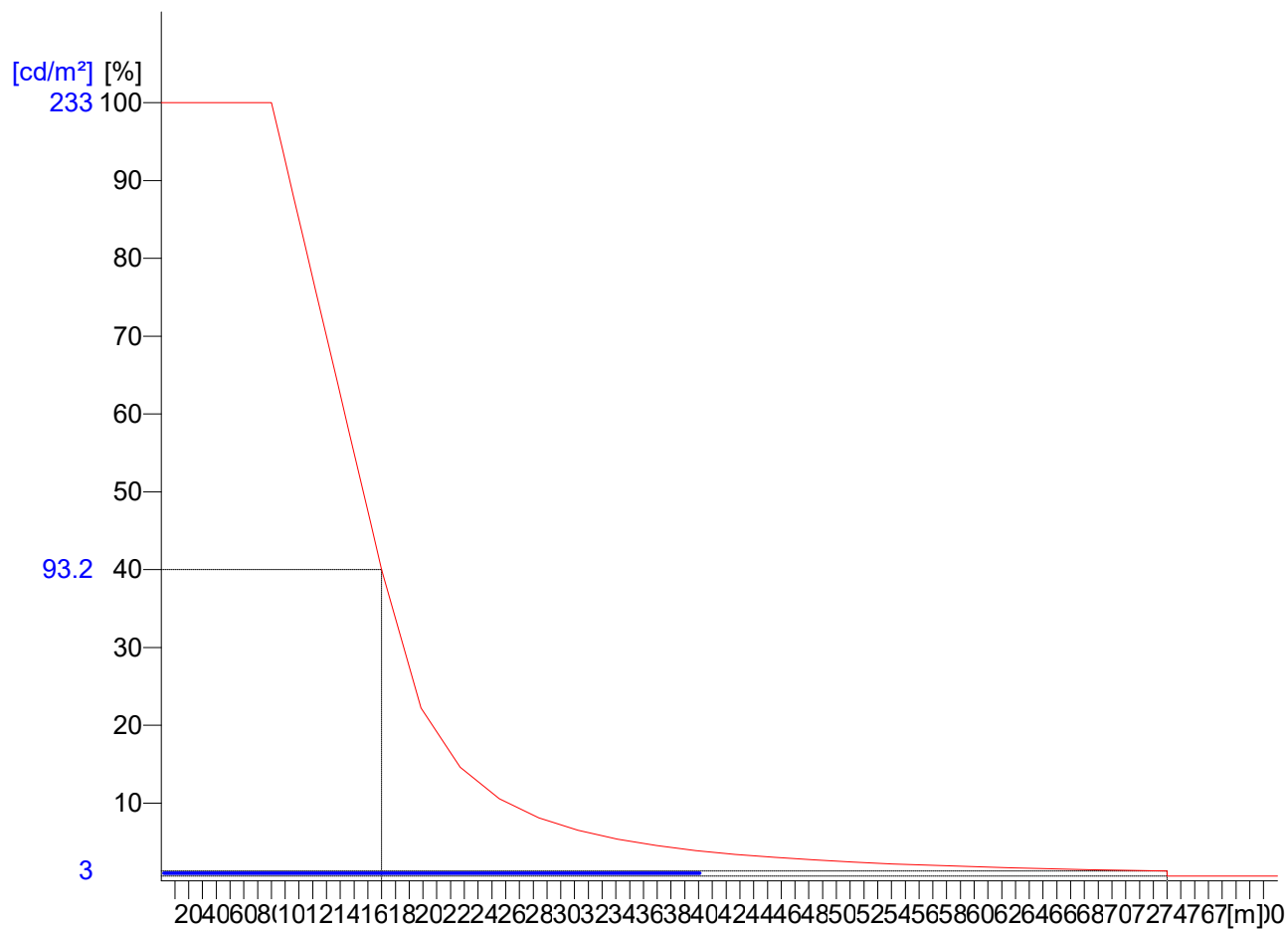
Observer location 2 : x = -84, y = 5.63, z = 1.5 (dx = 85.93)
Evaluation of L on whole width of road

Object : Μαύρη Ωρα (E)
Installation : Εναλλακτική E1
Project number :
Date : 06.01.2019

RELUX®

1.2 Calculation results, Tunnel E

1.2.12 Evolution, Adaptation (L), Int.1, Obs. 2



Observer location 2 : x = -84, y = 5.63, z = 1.5 (dx = 85.93)
Evaluation of L on whole width of road

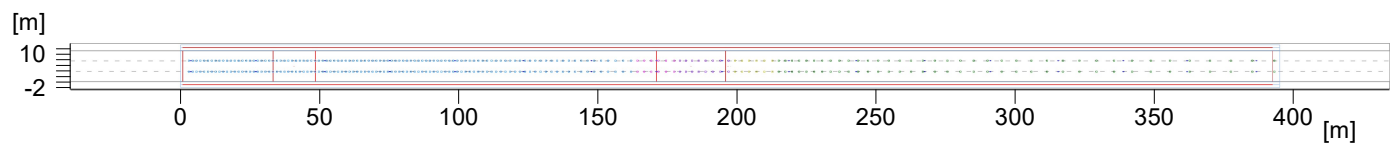
Object : Μαύρη Ωρα (Ε)
Installation : Εναλλακτική Ε2
Project number :
Date : 06.01.2019

RELUX®

1 Tunnel E

1.1 Description, Tunnel E

1.1.2 Floor plan



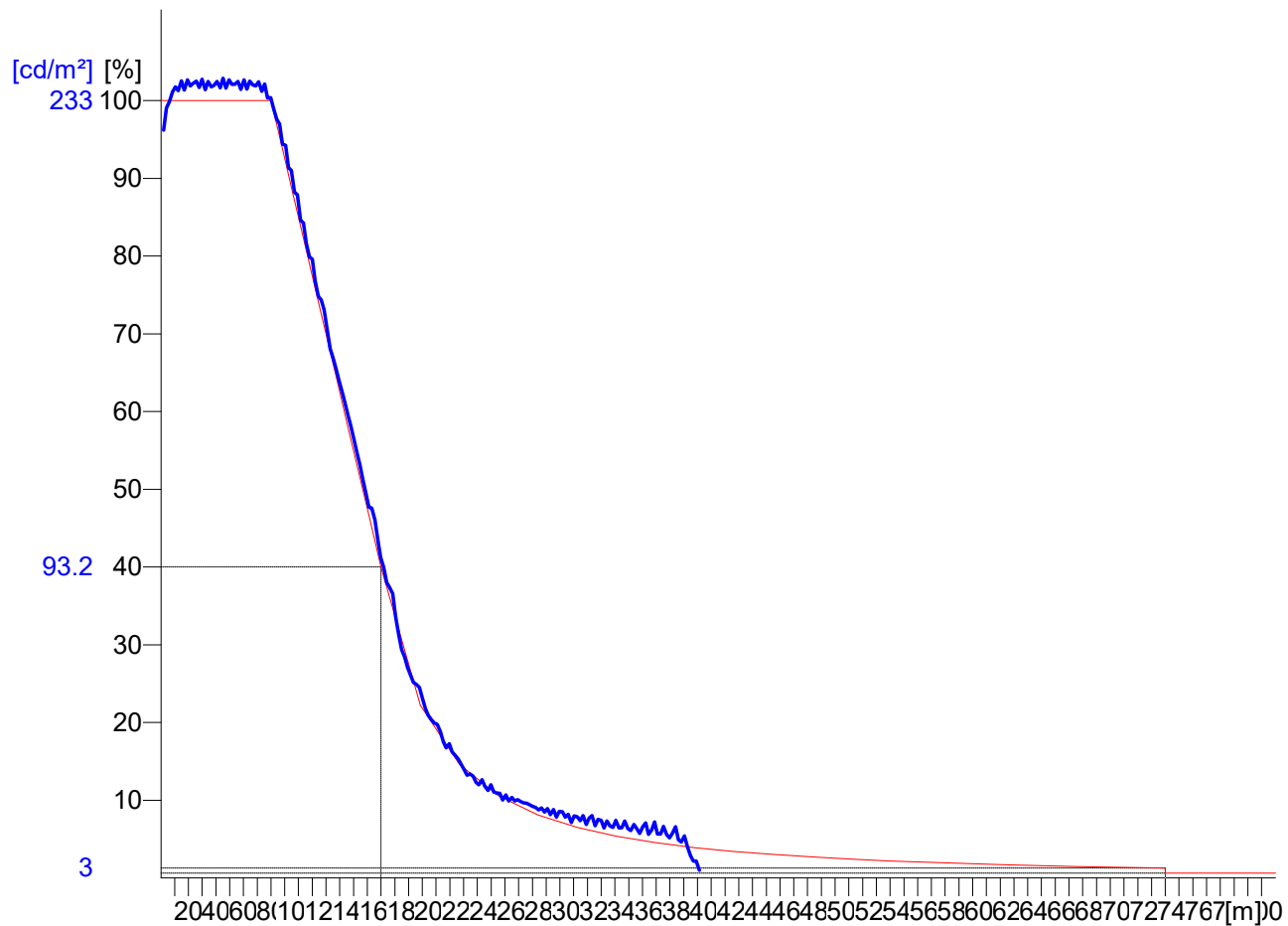
Object : Μαύρη Ωρα (E)
Installation : Εναλλακτική E2
Project number :
Date : 06.01.2019

RELUX®

1 Tunnel E

1.2 Calculation results, Tunnel E

1.2.4 Evolution, Adaptation (L), S1: 100%, Obs. 2



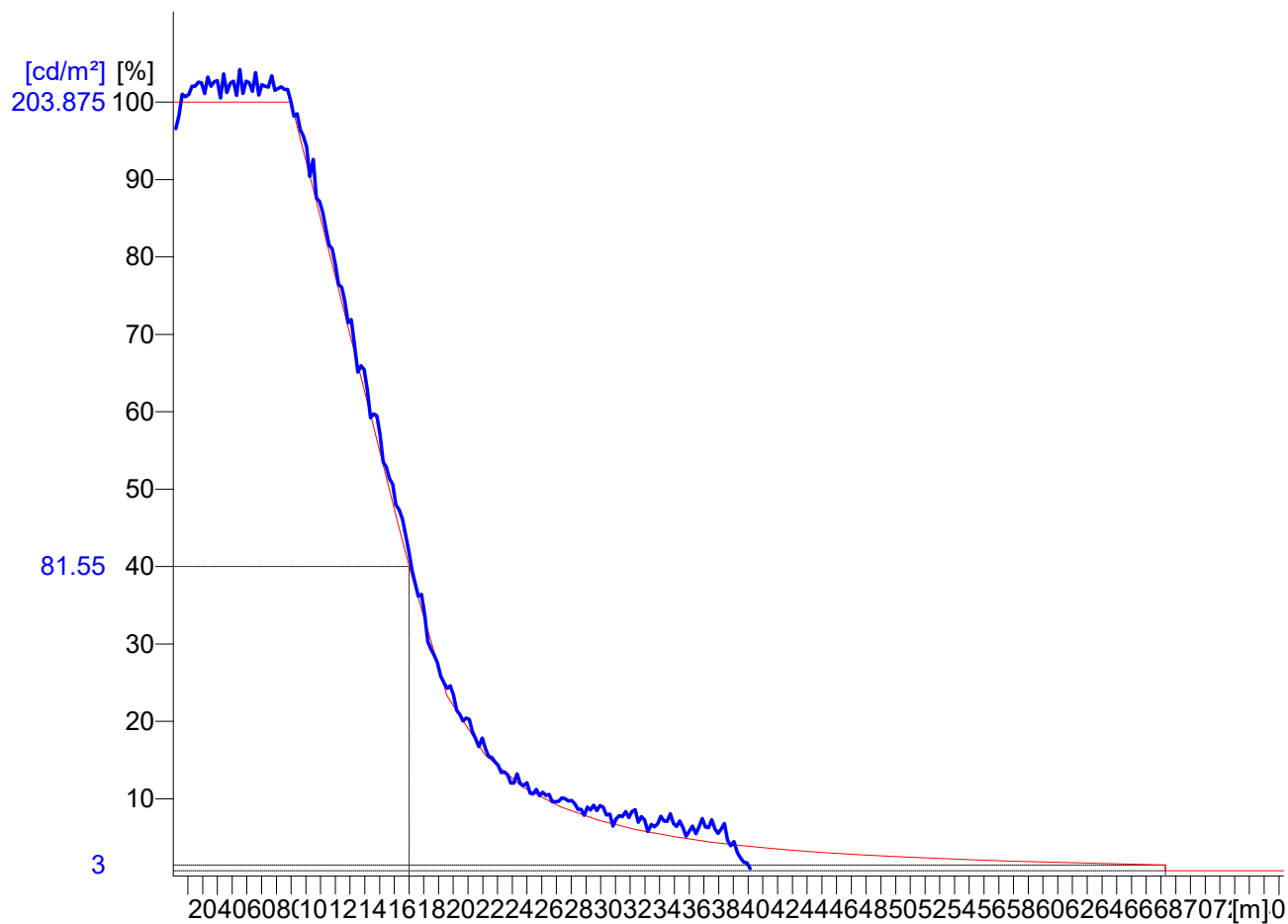
Observer location 2 : x = -84.1, y = 5.63, z = 1.5 (dx = 85.93)
Evaluation of L on whole width of road

Object : Μαύρη Ωρα (E)
Installation : Εναλλακτική E2
Project number :
Date : 06.01.2019

RELUX®

1.2 Calculation results, Tunnel E

1.2.5 Evolution, Adaptation (L), S2: 87.5%, Obs. 2



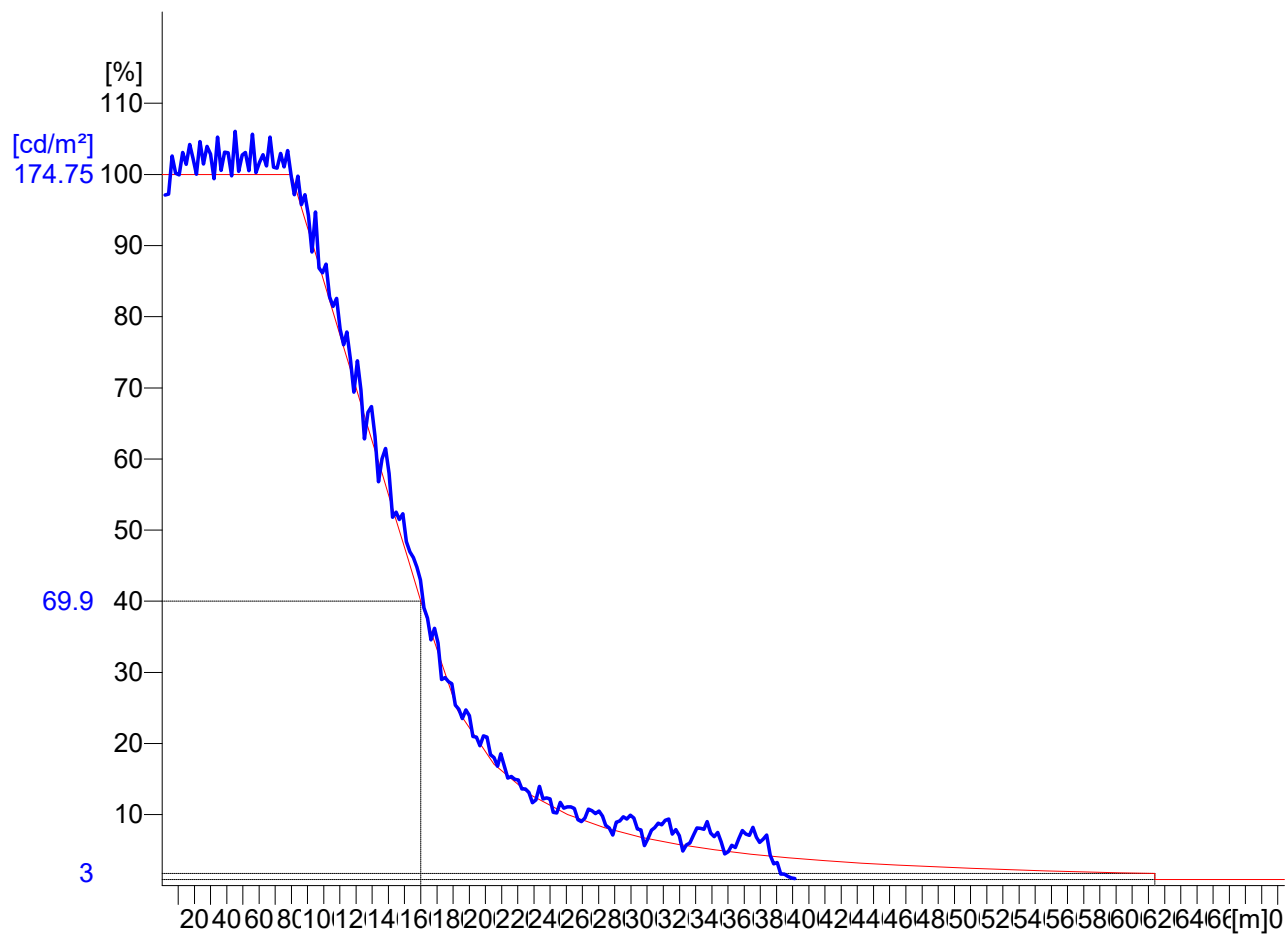
Observer location 2 : x = -84.1, y = 5.63, z = 1.5 (dx = 85.93)
Evaluation of L on whole width of road

Object : Μαύρη Ωρα (E)
Installation : Εναλλακτική E2
Project number :
Date : 06.01.2019

RELUX®

1.2 Calculation results, Tunnel E

1.2.6 Evolution, Adaptation (L), S3: 75%, Obs. 2



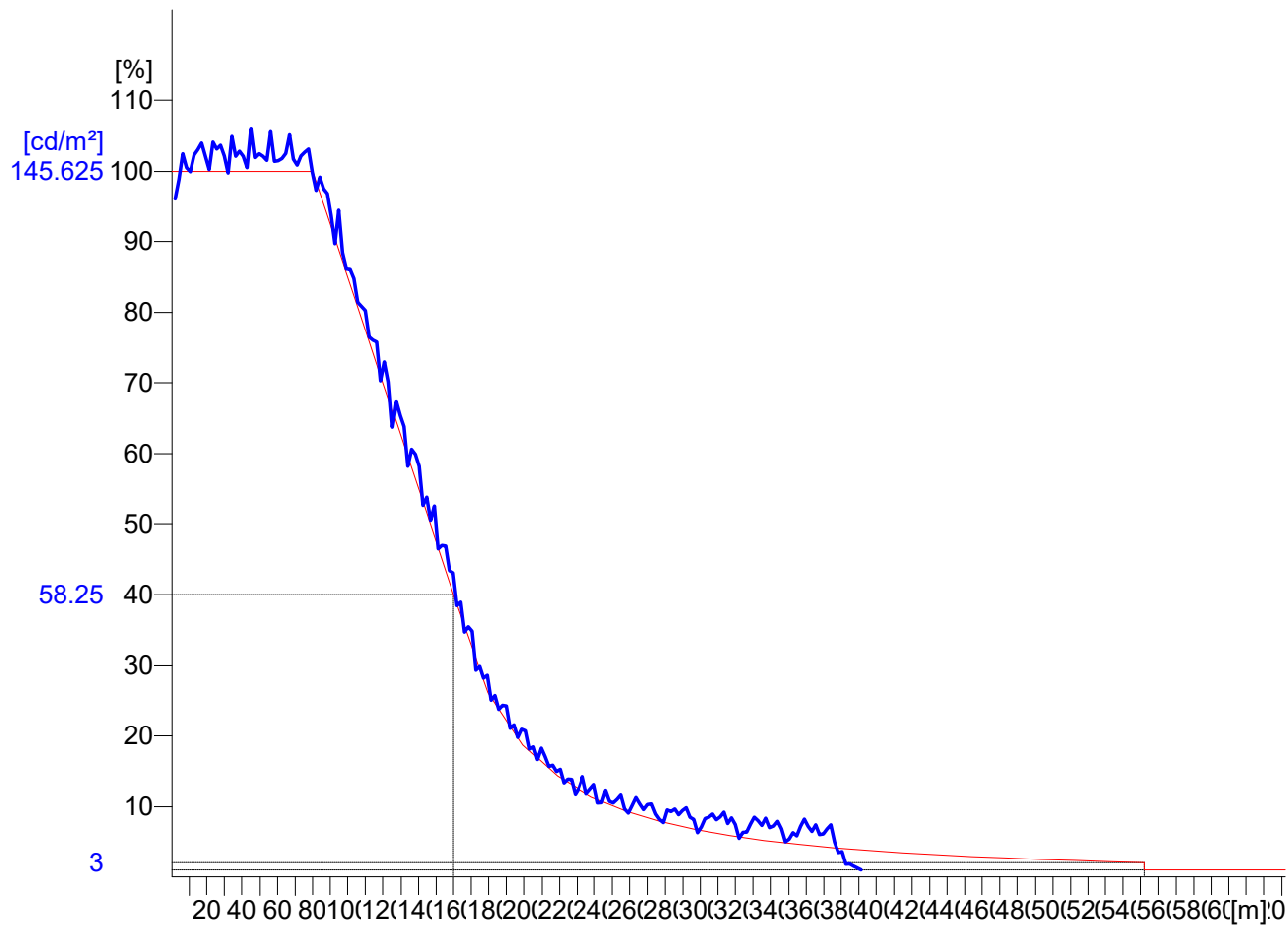
Observer location 2 : x = -84.1, y = 5.63, z = 1.5 (dx = 85.93)
Evaluation of L on whole width of road

Object : Μαύρη Ωρα (Ε)
Installation : Εναλλακτική Ε2
Project number :
Date : 06.01.2019

RELUX®

1.2 Calculation results, Tunnel E

1.2.7 Evolution, Adaptation (L), S4: 62.5%, Obs. 2



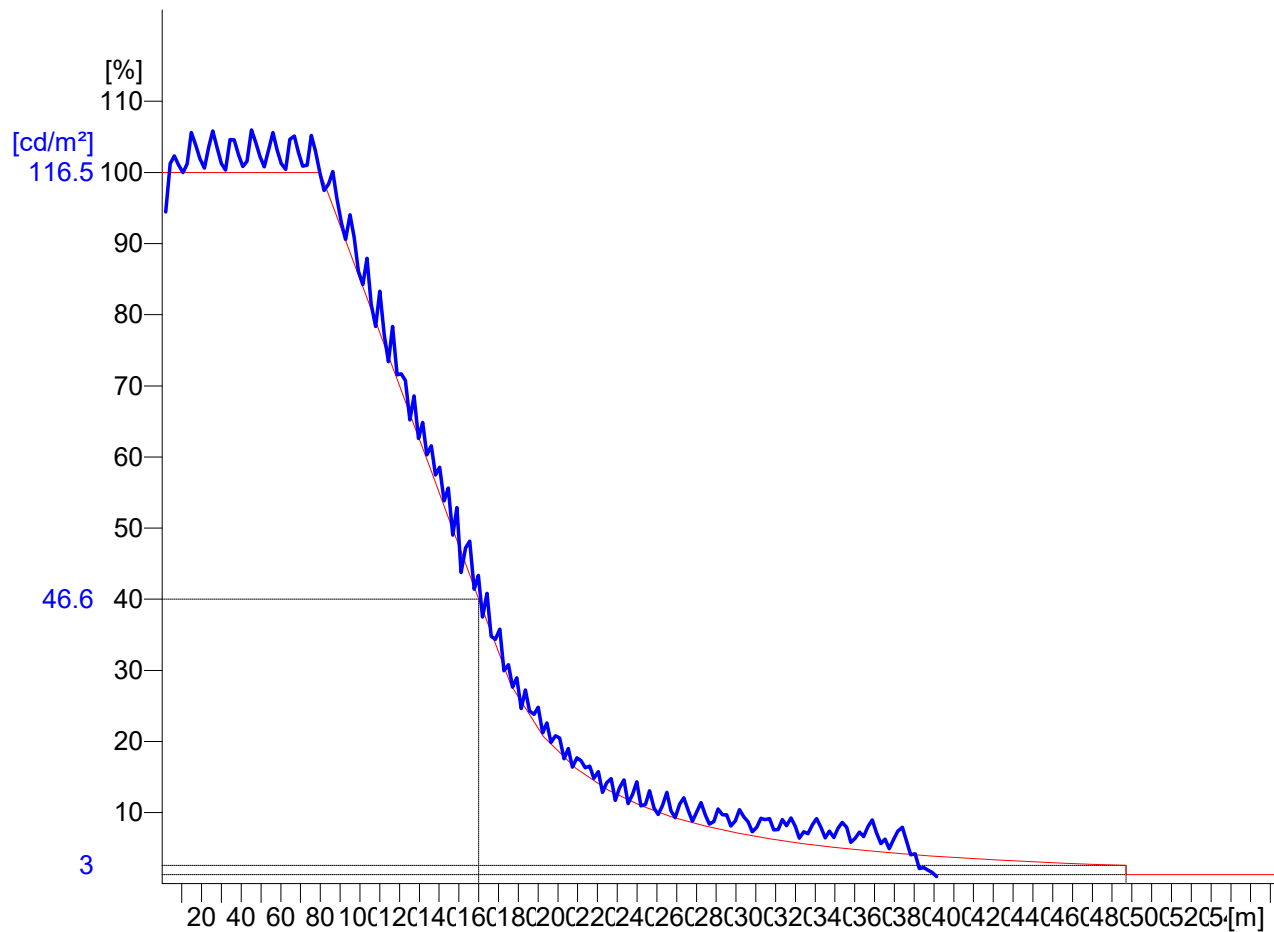
Observer location 2 : x = -84.1, y = 5.63, z = 1.5 (dx = 85.93)
Evaluation of L on whole width of road

Object : Μαύρη Ωρα (E)
Installation : Εναλλακτική E2
Project number :
Date : 06.01.2019

RELUX®

1.2 Calculation results, Tunnel E

1.2.8 Evolution, Adaptation (L), S5: 50%, Obs. 2



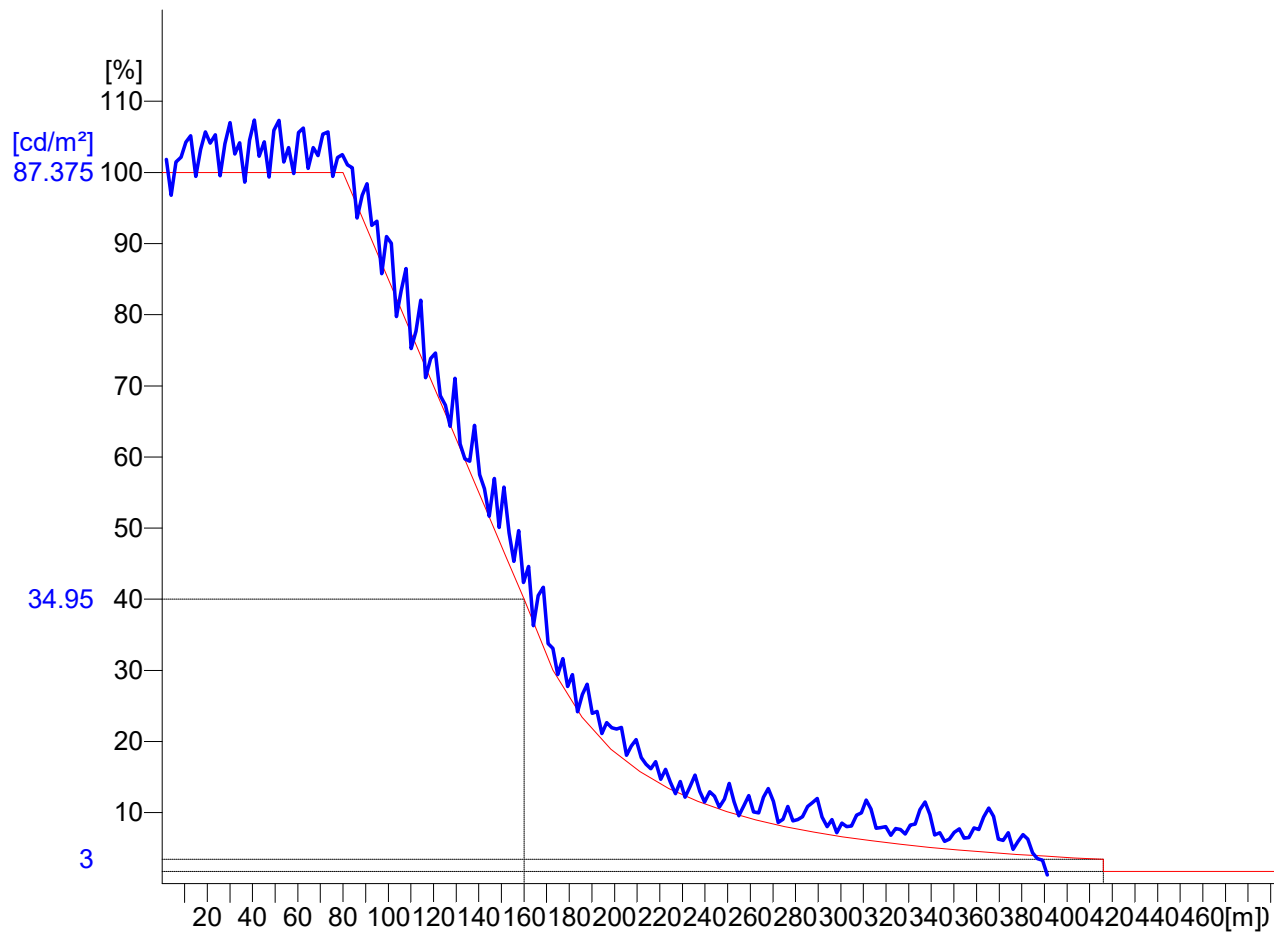
Observer location 2 : x = -84.1, y = 5.63, z = 1.5 (dx = 85.93)
Evaluation of L on whole width of road

Object : Μαύρη Ωρα (E)
Installation : Εναλλακτική E2
Project number :
Date : 06.01.2019

RELUX®

1.2 Calculation results, Tunnel E

1.2.9 Evolution, Adaptation (L), S6: 37.5%, Obs. 2



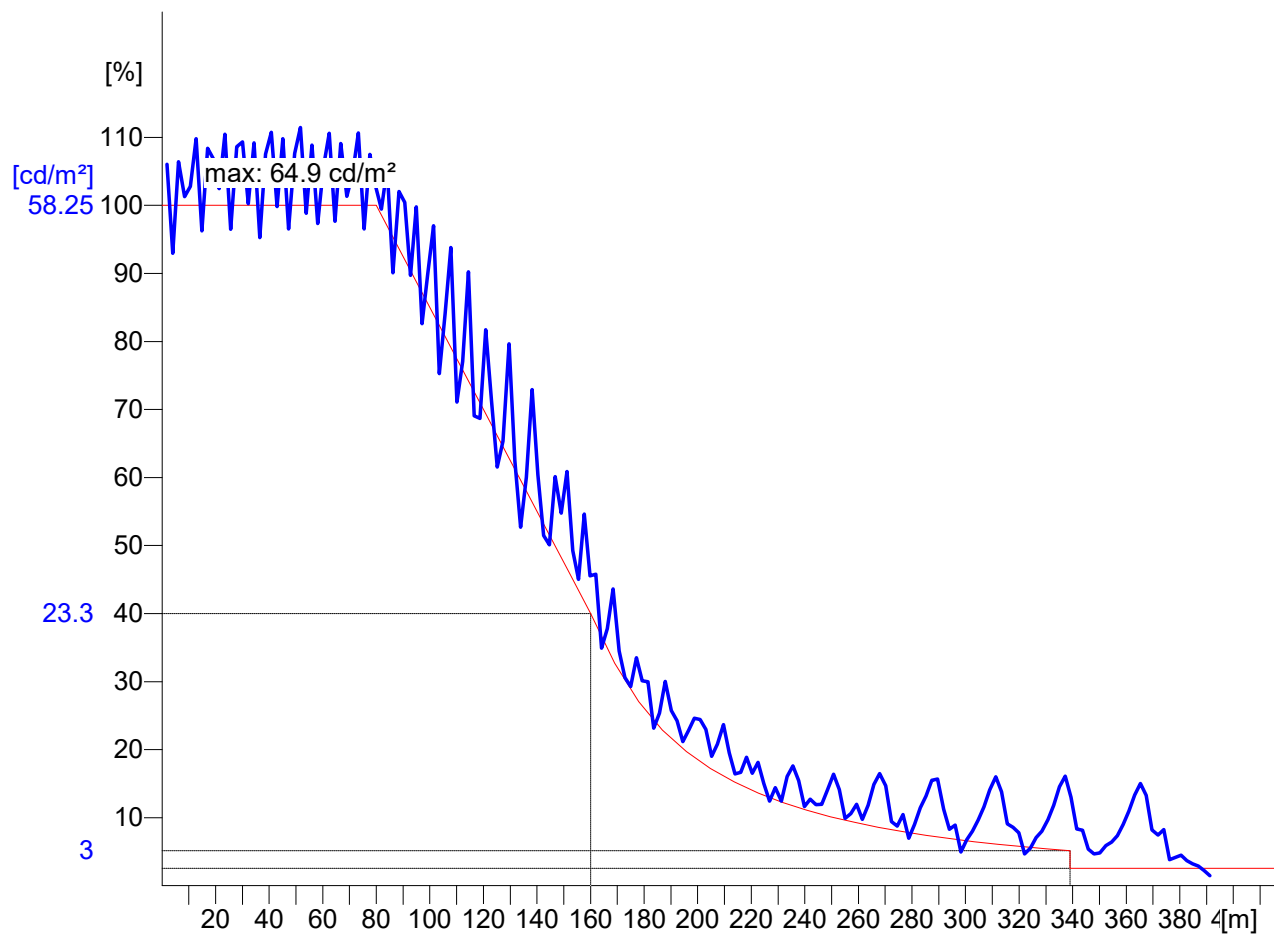
Observer location 2 : x = -84.1, y = 5.63, z = 1.5 (dx = 85.93)
Evaluation of L on whole width of road

Object : Μαύρη Ωρα (E)
Installation : Εναλλακτική E2
Project number :
Date : 06.01.2019

RELUX®

1.2 Calculation results, Tunnel E

1.2.10 Evolution, Adaptation (L), S7: 25%, Obs. 2



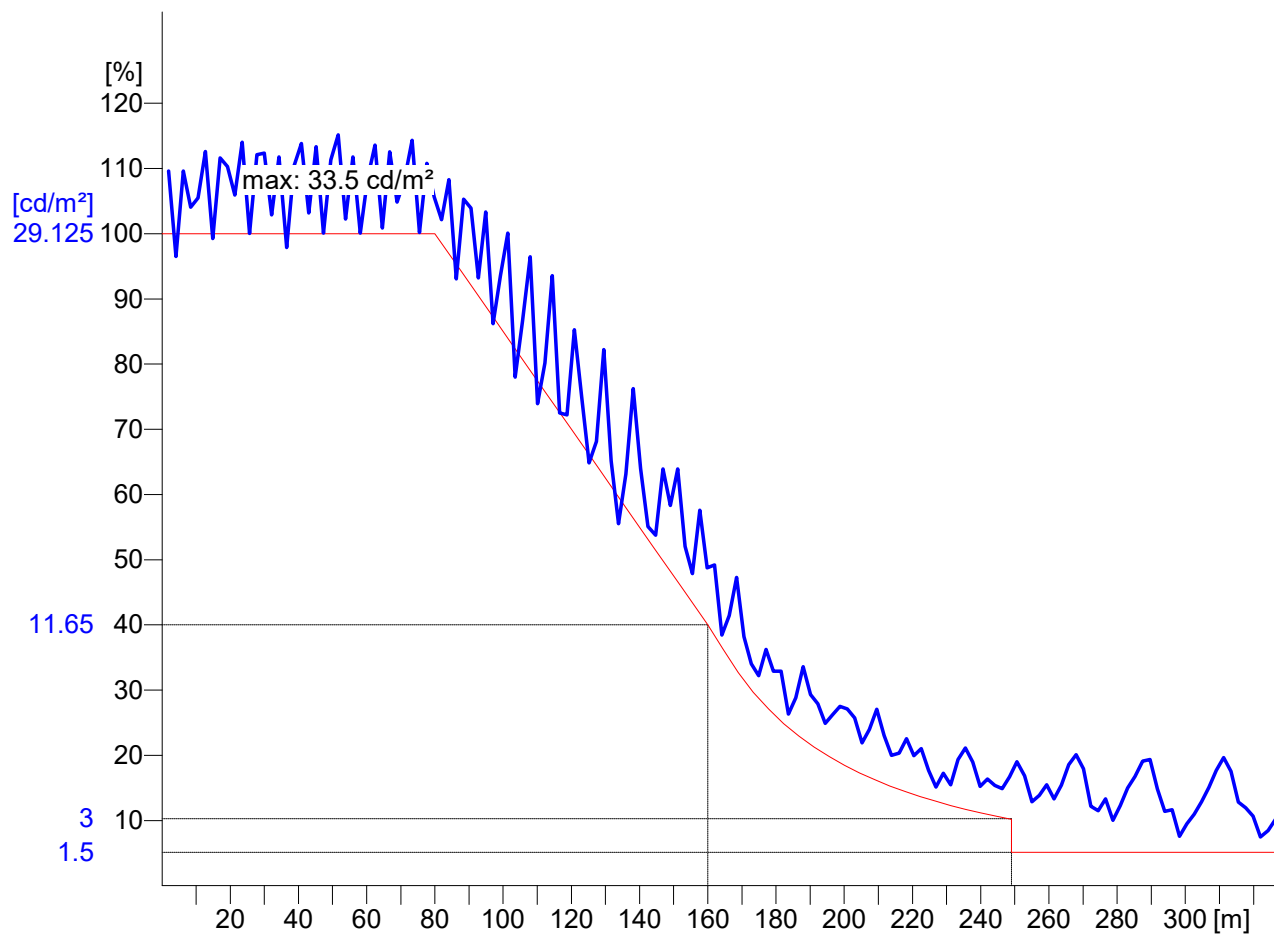
Observer location 2 : x = -84.1, y = 5.63, z = 1.5 (dx = 85.93)
Evaluation of L on whole width of road

Object : Μαύρη Ωρα (E)
Installation : Εναλλακτική Ε2
Project number :
Date : 06.01.2019

RELUX®

1.2 Calculation results, Tunnel E

1.2.11 Evolution, Adaptation (L), S8: 12.5%, Obs. 2



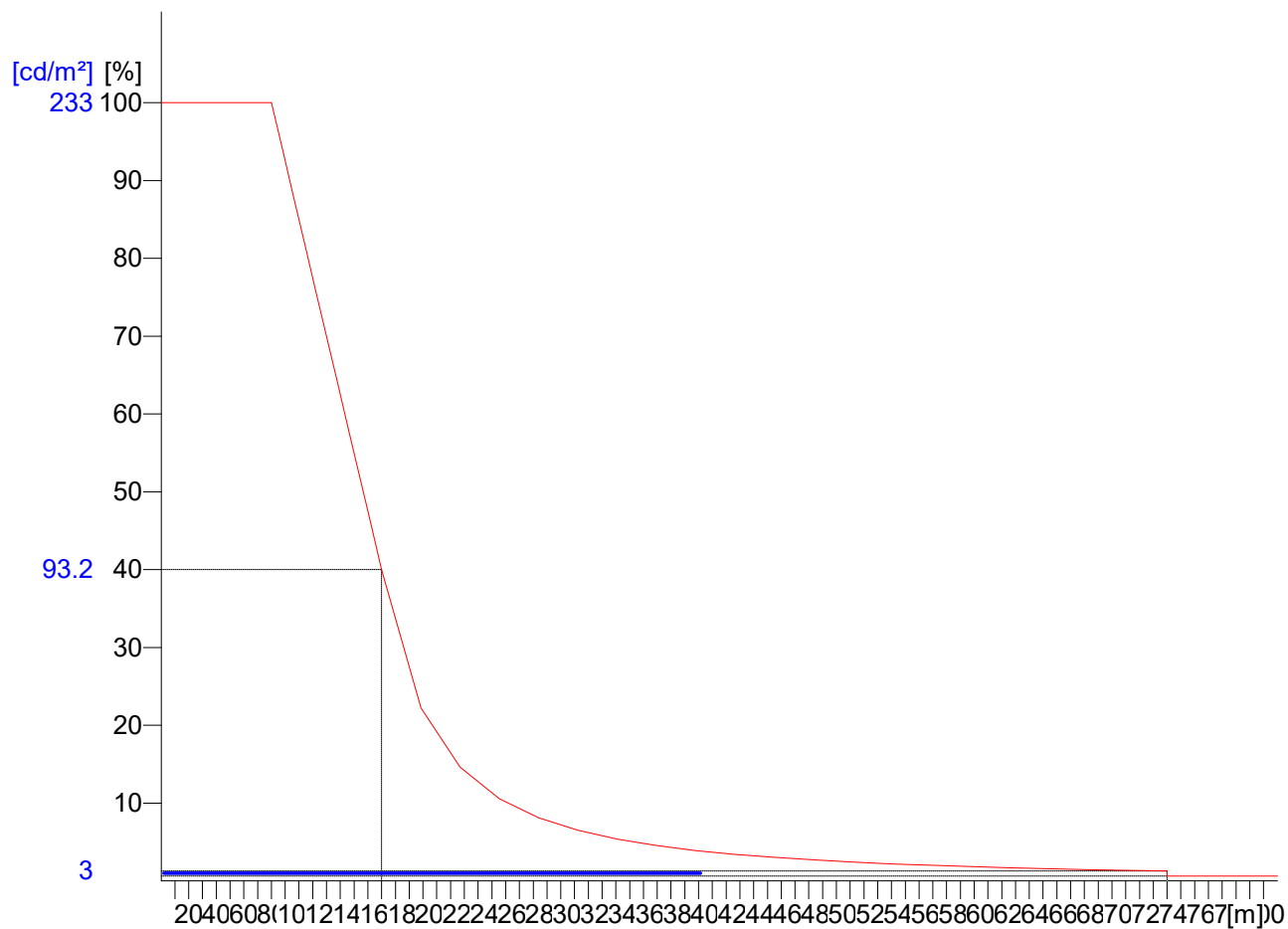
Observer location 2 : x = -84.1, y = 5.63, z = 1.5 (dx = 85.93)
Evaluation of L on whole width of road

Object : Μαύρη Ωρα (E)
Installation : Εναλλακτική E2
Project number :
Date : 06.01.2019

RELUX®

1.2 Calculation results, Tunnel E

1.2.12 Evolution, Adaptation (L), Int.1, Obs. 2



Observer location 2 : x = -84.1, y = 5.63, z = 1.5 (dx = 85.93)
Evaluation of L on whole width of road