



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

**Πρόταση εξοικονόμησης ενέργειας σε οδικές σήραγγες υπό
τη νέα θεώρηση του προτύπου ΕΛΟΤ CR 14380 και με την
εφαρμογή τεχνολογιών προσαρμοστικού φωτισμού**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αθανασία Κ. Τσιάτσιου

Κωνσταντίνα Κ. Τσιάτσιου

Επιβλέπων Καθηγητής : Φραγκίσκος Β. Τοπαλής

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Επιβλέπων : Λάμπρος Θ. Δούλος

Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2014



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

**Πρόταση εξοικονόμησης ενέργειας σε οδικές σήραγγες υπό
τη νέα θεώρηση του προτύπου ΕΛΟΤ CR 14380 και με την
εφαρμογή τεχνολογιών προσαρμοστικού φωτισμού**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αθανασία Κ. Τσιάτσιου

Κωνσταντίνα Κ. Τσιάτσιου

Επιβλέπων Καθηγητής: Φραγκίσκος Β. Τοπαλής

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Επιβλέπων : Λάμπρος Θ. Δούλος

Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την Οκτωβρίου 2014

.....
Φ. Β. Τοπαλής

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Πάυλος Σ. Γεωργιάκης

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννης Φ. Γκόνος

Λέκτορας Ε.Μ.Π.

.....

Αθανασία Κ. Τσιάτσιου

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός

και Μηχανικός Υπολογιστών

.....

Κωνσταντίνα Κ. Τσιάτσιου

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός

και Μηχανικός Υπολογιστών

Copyright © Αθανασία Τσιάτσιου, Κωνσταντίνα Τσιάτσιου, 2014

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 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 τους συγγραφείς.

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

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η πρόταση εξοικονόμησης ενέργειας σε οδικές σήραγγες, σύμφωνα με τη νέα θεώρηση του προτύπου ΕΛΟΤ CR 14380, το οποίο ορίζει νέα επίπεδα λαμπρότητας, με βάση την κυκλοφοριακή ροή των οχημάτων μέσα στη σήραγγα.

Αντικείμενο της εργασίας αποτελεί μια οδική σήραγγα της Εγνατίας Οδού, η εγκατάσταση φωτισμού της οποίας πραγματοποιήθηκε με βάση το πρότυπο ΕΛΟΤ CR 14380 και περιλαμβάνει φωτιστικά νατρίου υψηλής πίεσης. Αρχικά, εξετάζεται το ενδεχόμενο αντικατάστασης των φωτιστικών της εν λόγω οδικής σήραγγας με φωτιστικά LED τόσο στις υπάρχουσες θέσεις εγκατάστασης όσο και σε νέες. Εν συνεχεία, εκτιμώνται τα απαιτούμενα επίπεδα λαμπρότητας που ορίζει η νέα θεώρηση του προτύπου ΕΛΟΤ CR 14380 και εξετάζονται οι περιπτώσεις αντικατάστασης με φωτιστικά LED και νατρίου υψηλής πίεσης σε νέες θέσεις τοποθέτησης, καθώς και η παρέμβαση στην υφιστάμενη εγκατάσταση φωτισμού με αφαίρεση φωτιστικών σωμάτων από αυτή. Μελετάται, επίσης, η επίδραση της ταχύτητας των οχημάτων, για την οποία έχει σχεδιασθεί το σύστημα φωτισμού της σήραγγας, στην εξοικονόμηση ενέργειας.

Τέλος, υπολογίζεται η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας φωτισμού ανά περίπτωση και εξάγονται, μέσω συγκρίσεων, συμπεράσματα σύμφωνα με τα οποία προκύπτει ότι επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας στο φωτισμό οδικών σηράγγων, με τον ορισμό νέων, χαμηλότερων επιπέδων λαμπρότητας, σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ CR 14380 με βάση την κυκλοφοριακή ροή.

Λέξεις κλειδιά: φωτισμός οδικής σήραγγας, εξωτερική λαμπρότητα, ταχύτητα σχεδιασμού, τεχνολογία Led, λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης, εξοικονόμηση ενέργειας, οικονομοτεχνική μελέτη φωτισμού.

Abstract

The aim of this diploma thesis is the electrical energy saving in tunnel lighting, according to the new consideration of ELOT CR 14380 standard, which defines new luminance levels, based on the traffic flow of the tunnel.

The objective of this thesis is a tunnel at Egnatia Motorway, the lighting system of which was fulfilled in accordance to ELOT CR 14380 standard and includes high pressure sodium luminaires. First of all, the possibility of replacing the existing tunnel luminaires both at the existing and new positions is evaluated. Afterwards, the required luminance levels of the new consideration of ELOT CR 14380 standard are calculated and the possibility of replacement by LED and high pressure sodium luminaires in new positions is estimated, as well as the intervention at the subsistent lighting system through the removal of some luminaires. Furthermore, the effect of the traffic speed on energy consumption is appreciated.

Finally, the energy saving on each of the above cases is calculated and through comparisons, conclusions about energy saving in tunnel lighting systems are exported, according to which energy saving in tunnel lighting is achieved if new, lower luminance levels are applied, as defined in ELOT CR 14380 standard.

Key words: tunnel lighting, external luminance, design speed, Led technology, high pressure sodium lamps, energy saving, lighting techno-economic study.

Ευχαριστίες

Θα θέλαμε να εκφράσουμε τις ειλικρινείς ευχαριστίες μας στον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας Φραγκίσκο Β. Τοπαλή, Καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, ο οποίος μας εμπιστεύτηκε αναθέτοντάς μας την παρούσα εργασία και παράλληλα μας έδωσε τη δυνατότητα να ασχοληθούμε με ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον πεδίο εφαρμογών φωτισμού και εξοικονόμησης ενέργειας.

Οφείλουμε, επίσης, θερμές ευχαριστίες στο διδάκτορα του Ε.Μ.Π. Λάμπρο Θ. Δούλο για τη ζωτικής σημασίας βοήθεια και καθοδήγησή του, καθώς και για την υπομονή του στην επίλυση των αποριών μας κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, πολλές ευχαριστίες οφείλουμε στην οικογένειά μας που μας στήριξε κατά τη διάρκεια των σπουδών μας και σε φίλους μας, οι οποίοι μας συμπαραστάθηκαν και μας εμπύχωναν κατά τη διεκπεραίωση της παρούσας εργασίας.

Περιεχόμενα

| | |
|--|-----------|
| Περίληψη | 7 |
| Abstract | 9 |
| Ευχαριστίες | 11 |
| Εισαγωγή | 19 |
| <u>Κεφάλαιο 1^ο : Φωτισμός οδικών σηράγγων και εξοικονόμηση ενέργειας</u> | 21 |
| 1.1 Σημασία της εξοικονόμησης ενέργειας στο φωτισμό | 21 |
| 1.2 Κατανάλωση Ενέργειας σε οδοφωτισμό και σήραγγες | 21 |
| 1.3 Στατιστικά στοιχεία για την ηλεκτρική κατανάλωση του οδοφωτισμού στην Ελλάδα για πέντε συναπτά έτη | 22 |
| 1.4 Προτάσεις για εξοικονόμηση ενέργειας σε σήραγγες | 22 |
| 1.4.1 Διευθυνσιοδοτούμενα (Addressable) φωτιστικά | 23 |
| 1.4.2 Σύστημα αυξομείωσης φωτισμού (dimming) | 24 |
| 1.4.2.1 Σύστημα dimming δύο επιπέδων(50% -100%) | 24 |
| 1.4.2.2 Σύστημα συνεχούς dimming | 24 |
| 1.4.3 Συντήρηση και καθαρισμός φωτιστικών σωμάτων | 25 |
| 1.4.4 Χρήση του φυσικού φωτισμού ημέρας στις σήραγγες | 25 |
| 1.4.5 Παρεμβάσεις στην αρχιτεκτονική του στομίου της σήραγγας | 26 |
| 1.4.6 Εξοικονόμηση ενέργειας με χρήση μετρητών λαμπρότητας και ισχύος φωτισμού | 27 |
| 1.4.7 Αξιοποίηση τοίχων και οδοστρώματος σηράγγων | 28 |
| 1.4.7.1 Λαμπρότητα τοιχωμάτων | 28 |
| 1.4.7.2 Τύπος οδοστρωμάτων | 29 |
| <u>Κεφάλαιο 2^ο : Φωτισμός οδικών σηράγγων</u> | 31 |
| 2.1 Η σημασία του φωτισμού στις οδικές σήραγγες | 31 |
| 2.2 Ζώνες διαχωρισμού οδικών σηράγγων | 31 |
| 2.3 Τα μεγέθη της λαμπρότητας (L) και της έντασης φωτισμού (E) σε μια οδική σήραγγα | 32 |
| 2.4 Φωτισμός ημέρας και νύχτας | 33 |
| 2.4.1 Συνθήκες φωτισμού ημέρας, εξωτερικά και εσωτερικά της σήραγγας | 33 |
| 2.4.2 Συνθήκες φωτισμού νύχτας | 34 |
| 2.5 Βασικοί παράμετροι σχεδιασμού του φωτισμού μιας σήραγγας | 35 |
| 2.5.1 Ασφαλής Απόσταση Πέδησης (S.S.D.) | 35 |
| 2.5.2 Διαχωρισμός σηράγγων μεγάλου και μικρού μήκους | 37 |
| 2.5.2.1 Μέθοδος «όρασης από άκρη σε άκρη» ή «Look Through Percentage Method_ LTP» | 37 |
| 2.5.2.2 Χρήση του LTP | 39 |
| 2.5.3 Η ψυχοσύνθεση των οδηγών και τα προβλήματα όρασης | 40 |
| 2.5.4 Κυκλοφοριακή σύνθεση | 41 |
| 2.5.5 Άλλες σχεδιαστικές συνιστώσες φωτισμού | 41 |

| | |
|--|----|
| <u>Κεφάλαιο 3^ο : Μέθοδοι υπολογισμού των φωτομετρικών απαιτήσεων σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ CR 14380</u> | 43 |
| 3.1 Εισαγωγή | 43 |
| 3.2 Μέθοδος υπολογισμού του L₂₀ | 43 |
| 3.2.1 Επίπεδα λαμπρότητας στις διάφορες ζώνες της σήραγγας | 44 |
| 3.2.2 Φωτισμός της εσωτερικής ζώνης και φωτισμός των τοίχων | 45 |
| 3.2.3 Ομοιομορφία της λαμπρότητας στην επιφάνεια του δρόμου και των τοίχων | 45 |
| 3.2.4 Φωτισμός νύχτας | 46 |
| 3.2.5 Φωτεινή Πάλμωση (Flicker Effect) | 46 |
| 3.2.6 Θάμβωση (Glare) | 47 |
| 3.2.7 Καθορισμός της λαμπρότητας στη ζώνη προσέγγισης | 47 |
| 3.3 Μέθοδος υπολογισμού L₂₀ σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ CR 14380 με βάση την κυκλοφοριακή ροή | 48 |
| 3.3.1 Τιμές των διάφορων λειτουργικών παραμέτρων της σήραγγας | 48 |
| | |
| <u>Κεφάλαιο 4^ο : Το σύστημα φωτισμού σε μια οδική σήραγγα και η τεχνολογία LED</u> | 51 |
| 4.1 Τα φωτιστικά σώματα μιας οδικής σήραγγας | 51 |
| 4.1.1 Εισαγωγή | 51 |
| 4.1.2 Το συμμετρικό σύστημα φωτισμού | 51 |
| 4.1.3 Το ασύμμετρο σύστημα φωτισμού | 53 |
| 4.1.4 Ο τύπος των φωτιστικών σε σχέση με τη ζώνη και το είδος της σήραγγας | 53 |
| 4.2 Τεχνικές προδιαγραφές των φωτιστικών σωμάτων μιας σήραγγας | 54 |
| 4.3 Τοποθέτηση των φωτιστικών σωμάτων σε μια σήραγγα | 55 |
| 4.4 Η ταξινόμηση των φωτιστικών σωμάτων σε βαθμίδες και το σύστημα ελέγχου τους | 56 |
| 4.5 Συντήρηση της εγκατάστασης φωτισμού μιας σήραγγας και ο συντελεστής συντήρησης | 57 |
| 4.6 Η ηλεκτροδότηση της σήραγγας και ο φωτισμός ασφαλείας | 58 |
| 4.7 Φωτοεκπέμπουσες Δίοδοι (Light Emitting Diodes, LED) | 59 |
| 4.7.1 Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των λαμπτήρων LED | 59 |
| 4.7.2 Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των λαμπτήρων LED | 60 |
| 4.7.3 Οι λαμπτήρες LED στον οδοφωτισμό | 61 |
| 4.7.4 Φωτεινή σηματοδότηση και σήμανση σήραγγας με χρήση τεχνολογίας LED | 62 |
| | |
| <u>Κεφάλαιο 5^ο : Προτάσεις αναβάθμισης του συστήματος φωτισμού της υπό μελέτη σήραγγας</u> | 63 |
| 5.1 Εισαγωγή | 63 |
| 5.2 Γενική περιγραφή της υπό μελέτη σήραγγας | 64 |
| 5.2.1 Χαρακτηριστικά της κατασκευής και σημαντικά μεγέθη | 64 |
| 5.2.2 Περιγραφή του υφιστάμενου συστήματος φωτισμού της σήραγγας | 66 |
| 5.2.3 Υφιστάμενη εγκατεστημένη ισχύς φωτισμού | 67 |
| 5.2.4 Προτάσεις αναβάθμισης της υφιστάμενης εγκατάστασης φωτισμού της υπό μελέτη σήραγγας | 67 |

| | |
|---|-----|
| 5.3 Προτάσεις αναβάθμισης του συστήματος φωτισμού της υπό μελέτης σήραγγας σύμφωνα με την υφιστάμενη μελέτη φωτισμού | 68 |
| 5.3.1 Εισαγωγή | 68 |
| 5.3.2 <u>ΣΕΝΑΡΙΟ 1</u> : Αντικατάσταση των υφιστάμενων φωτιστικών νατρίου υψηλής πίεσης με φωτιστικά LED στις ήδη υπάρχουσες θέσεις της εγκατάστασης. | 69 |
| 5.3.2.1 Αντικατάσταση με φωτιστικά LED τύπου A. | 69 |
| 5.3.2.2 Αντικατάσταση με φωτιστικά LED τύπου B | 74 |
| 5.3.2.3 Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων του Σεναρίου 1 | 76 |
| 5.3.3 <u>ΣΕΝΑΡΙΟ 2</u> : Αντικατάσταση των υφιστάμενων φωτιστικών Ν.Υ.Π. με Φωτιστικά LED σε νέες θέσεις εγκατάστασης. | 76 |
| 5.3.3.1 Αντικατάσταση με φωτιστικά LED τύπου A. | 77 |
| 5.3.3.2 Αντικατάσταση με φωτιστικά LED τύπου B. | 79 |
| 5.3.3.3 Συνοπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων του 2 ^{ου} Σεναρίου | 79 |
| 5.4 Αναβάθμιση του υφιστάμενου συστήματος φωτισμού με καθορισμό νέων επιπέδων φωτισμού, σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ CR 14380 με βάση την κυκλοφοριακή ροή | 81 |
| 5.4.1 Εισαγωγή | 81 |
| 5.4.2 <u>ΣΕΝΑΡΙΟ 3</u> : Αντικατάσταση των υφιστάμενων φωτιστικών νατρίου υψηλής πίεσης σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ CR 14380 με βάση την κυκλοφοριακή ροή, με φωτιστικά LED σε νέες θέσεις εγκατάστασης | 82 |
| 5.4.2.1 Αντικατάσταση με φωτιστικά LED τύπου A | 82 |
| 5.4.2.2 Αντικατάσταση με φωτιστικά LED τύπου B | 84 |
| 5.4.2.3 Συνοπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων του 3 ^{ου} Σεναρίου | 87 |
| 5.4.3 <u>ΣΕΝΑΡΙΟ 4</u> : Αντικατάσταση των υφιστάμενων φωτιστικών Ν.Υ.Π. με νέα φωτιστικά νατρίου υψηλής πίεσης σε νέες θέσεις εγκατάστασης, σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ CR 14380 με βάση την κυκλοφοριακή ροή | 87 |
| 5.4.3.1 Συνοπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων του 4 ^{ου} Σεναρίου | 87 |
| 5.4.4 <u>ΣΕΝΑΡΙΟ 5</u> : Παρεμβάινοντας στην υφιστάμενη εγκατάσταση φωτισμού με χρήση του πρότυπου ΕΛΟΤ CR 14380 με βάση την κυκλοφοριακή ροή | 90 |
| 5.5 Συγκρίσεις αποτελεσμάτων | 92 |
| <u>Κεφάλαιο 6^ο: Οικονομοτεχνική μελέτη των προτεινόμενων σεναρίων</u> | 97 |
| 6.1 Εισαγωγή | 97 |
| 6.2 Υπολογισμός της τιμής της κιλοβατώρας | 97 |
| 6.3 Μέθοδος υπολογισμού του συνολικού κόστους επένδυσης μιας νέας εγκατάστασης | 97 |
| 6.4 Οικονομοτεχνική μελέτη της υφιστάμενης εγκατάστασης φωτισμού της υπό μελέτη σήραγγας | 98 |
| 6.4.1 Υπολογισμός ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας | 98 |
| 6.4.2 Υπολογισμός ετήσιου κόστους συντήρησης του συνολικού πλήθους των φωτιστικών Ν.Υ.Π. | 99 |
| 6.4.2.1 Υπολογισμός του ετήσιου κόστους συντήρησης των φωτιστικών Ν.Υ.Π του νυχτερινού φωτισμού της υφιστάμενης εγκατάστασης | 101 |
| 6.4.3 Υπολογισμός ετήσιου λειτουργικού κόστους | 102 |

| | |
|---|------------|
| 6.4.4 Οικονομοτεχνικά μεγέθη υφιστάμενης εγκατάστασης | 102 |
| 6.5 Οικονομοτεχνική μελέτη για το Σενάριο 1 | 103 |
| 6.5.1 Οικονομοτεχνική μελέτη για το νυχτερινό φωτισμό με φωτιστικά LED A, Σενάριο 1 | 103 |
| 6.5.1.1 Υπολογισμός του κόστους επένδυσης εγκατάστασης νυχτερινού φωτισμού | 103 |
| 6.5.1.2 Υπολογισμός ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας του νυχτερινού φωτισμού | 104 |
| 6.5.1.3 Υπολογισμός του χρόνου απόσβεσης του νυχτερινού φωτισμού | 105 |
| 6.5.2 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της οικονομοτεχνικής μελέτης του Σεναρίου 1 για το νυχτερινό φωτισμό | 105 |
| 6.6 Οικονομοτεχνική μελέτη για το Σενάριο 2 | 106 |
| 6.6.1 Οικονομοτεχνική μελέτη με τη χρήση των LED A, Σενάριο 2 | 107 |
| 6.6.1.1 Υπολογισμός του κόστους επένδυσης της νέας εγκατάστασης | 107 |
| 6.6.1.2 Υπολογισμός ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας | 108 |
| 6.6.2 Οικονομοτεχνική μελέτη με τη χρήση των LED B, Σενάριο 2 | 109 |
| 6.6.2.1 Υπολογισμός του κόστους επένδυσης της νέας εγκατάστασης | 109 |
| 6.6.2.2 Υπολογισμός Ετήσιας Κατανάλωσης Ενέργειας | 109 |
| 6.6.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της οικονομοτεχνικής μελέτης του Σεναρίου 2 | 110 |
| 6.7 Οικονομοτεχνική μελέτη για το Σενάριο 3 | 111 |
| 6.7.1 Οικονομοτεχνική μελέτη με χρήση των LED A, Σενάριο 3 | 112 |
| 6.7.1.1 Υπολογισμός του κόστους επένδυσης της νέας εγκατάστασης | 112 |
| 6.7.1.2 Υπολογισμός ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας | 112 |
| 6.7.1.3 Υπολογισμός του χρόνου απόσβεσης | 113 |
| 6.7.2 Οικονομοτεχνική μελέτη με χρήση των LED B, Σενάριο 3 | 113 |
| 6.7.2.1 Υπολογισμός του κόστους επένδυσης της νέας εγκατάστασης | 114 |
| 6.7.2.2 Υπολογισμός ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας | 114 |
| 6.7.2.3 Υπολογισμός του χρόνου απόσβεσης | 115 |
| 6.7.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της οικονομοτεχνικής μελέτης του Σεναρίου 3 | 116 |
| 6.8 Οικονομοτεχνική μελέτη για το Σενάριο 4 | 116 |
| 6.8.1 Υπολογισμός κόστους επένδυσης της νέας εγκατάστασης | 117 |
| 6.8.2 Υπολογισμός ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας | 117 |
| 6.8.3 Υπολογισμός του ετήσιου κόστους συντήρησης των νέων φωτιστικών Ν.Υ.Π. | 118 |
| 6.8.4 Υπολογισμός του ετήσιου λειτουργικού κόστους των νέων φωτιστικών Ν.Υ.Π. | 119 |
| 6.8.5 Υπολογισμός χρόνου απόσβεσης των νέων φωτιστικών Ν.Υ.Π | 119 |
| 6.8.6 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της οικονομοτεχνικής μελέτης για τα φωτιστικά Ν.Υ.Π. του Σεναρίου 4 | 120 |
| 6.9 Οικονομοτεχνική μελέτη για το Σενάριο 5 | 120 |
| 6.9.1 Υπολογισμός κόστους επένδυσης | 120 |
| 6.9.2 Υπολογισμός του ετήσιου κόστους συντήρησης του νέου αριθμού φωτιστικών Ν.Υ.Π. | 121 |
| 6.9.3 Υπολογισμός ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας και ετήσιου | |

| | |
|---|-----|
| λειτουργικού κόστους της νέας εγκατάστασης | 121 |
| 6.9.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της οικονομοτεχνικής μελέτης για τα φωτιστικά Ν.Υ.Π. του Σεναρίου 5 | 123 |
| 6.10 Πίνακες αποτελεσμάτων οικονομοτεχνικής μελέτης | 123 |
| 6.10.1 Εξοικονόμηση ενέργειας και αντίστοιχου οικονομικού οφέλους | 124 |
| 6.10.2 Οικονομικό όφελος από συντήρηση φωτιστικών και συνολικό οικονομικό όφελος | 127 |
| 6.10.3 Συνολικό κόστος επένδυσης ανά προτεινόμενο σενάριο | 128 |
| 6.10.4 Χρόνος απόσβεσης των προτεινόμενων αναβαθμίσεων | 129 |
| <u>Κεφάλαιο 7^ο: Επίδραση της ταχύτητας των οχημάτων για την οποία έχει σχεδιασθεί η σήραγγα στην κατανάλωση ενέργειας</u> | 131 |
| 7.1 Εισαγωγή | 131 |
| 7.2 Μελέτη φωτισμού για ταχύτητα οχημάτων 80 km/h | 131 |
| 7.2.1 Αντικατάσταση με φωτιστικά LED τύπου A | 131 |
| 7.2.2 Αντικατάσταση με φωτιστικά LED τύπου B | 134 |
| 7.3 Μελέτη φωτισμού για ταχύτητα οχημάτων 120 km/h | 136 |
| 7.3.1 Αντικατάσταση με φωτιστικά LED τύπου A | 137 |
| 7.3.2 Αντικατάσταση με φωτιστικά LED τύπου B | 139 |
| 7.4 Υπολογισμός κόστους αγοράς φωτιστικών και κατανάλωσης ενέργειας | 141 |
| 7.4.1 Υπολογισμός κόστους για την ταχύτητα οχημάτων 80 km/h | 141 |
| 7.4.2 Υπολογισμός κόστους για την ταχύτητα οχημάτων 120 km/h | 144 |
| 7.5 Συνοπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων για τις ταχύτητες που μελετήθηκαν | 146 |
| <u>Κεφάλαιο 8: Σύνοψη αποτελεσμάτων και τελικά συμπεράσματα</u> | 153 |
| Βιβλιογραφία | 157 |
| Παράρτημα Α | 159 |

Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία μελετάται το θέμα της εξοικονόμησης ενέργειας στο φωτισμό οδικών σηράγγων. Για τον σκοπό αυτό προτείνονται αναβαθμίσεις της εγκατάστασης φωτισμού μιας υφιστάμενης σήραγγας, που αφορούν στον καθορισμό χαμηλότερων επιπέδων φωτισμού, με αντικατάσταση των υφιστάμενων φωτιστικών νατρίου υψηλής πίεσης, με φωτιστικά τεχνολογίας LED και νατρίου υψηλής πίεσης. Πιο αναλυτικά:

Στο **κεφάλαιο 1** παρουσιάζονται στατιστικά στοιχεία της κατανάλωσης ενέργειας στον οδοφωτισμό και προτάσεις εξοικονόμησης ενέργειας στο φωτισμό σηράγγων.

Στο **κεφάλαιο 2** αναλύονται η σημασία, τα βασικά μεγέθη και οι παράμετροι σχεδιασμού του συστήματος φωτισμού οδικών σηράγγων.

Στο **κεφάλαιο 3** παρουσιάζονται δύο μέθοδοι υπολογισμού των φωτομετρικών απαιτήσεων μιας σήραγγας, σύμφωνα με το πρότυπο φωτισμού σηράγγων ΕΛΟΤ CR 14380.

Στο **κεφάλαιο 4** γίνεται λόγος για τις προδιαγραφές των φωτιστικών σωμάτων που προορίζονται για φωτισμό σηράγγων, καθώς και για την τεχνολογία των λαμπτήρων LED και την οδοσήμανση των σηράγγων με λυχνίες LED.

Στο **κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται οι προτάσεις αναβάθμισης του συστήματος φωτισμού της υπό μελέτη σήραγγας, καθώς και τα φωτομετρικά αποτελέσματα του λογισμικού Relux Tunnel.

Στο **κεφάλαιο 6** πραγματοποιείται η οικονομοτεχνική μελέτη των προτεινόμενων αναβαθμίσεων και η σύγκριση μεταξύ αυτών καθώς και με την υφιστάμενη εγκατάσταση φωτισμού της υπό μελέτη σήραγγας.

Στο **κεφάλαιο 7** εξετάζεται κατά πόσο η ταχύτητα οχημάτων για την οποία σχεδιάζεται η σήραγγα επιδρά στην κατανάλωση ενέργειας του φωτισμού, χρησιμοποιώντας ως ταχύτητες τα 80 km/h, 100 km/h και 120 km/h.

Στο **8^ο** και τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας επιχειρείται μια σύνοψη των αποτελεσμάτων των προτεινόμενων αναβαθμίσεων του συστήματος φωτισμού της υπό μελέτη σήραγγας. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται μεταξύ τους και με την υφιστάμενη εγκατάσταση.

Κεφάλαιο 1^ο

Φωτισμός οδικών σηράγγων και εξοικονόμηση ενέργειας

1.1 Σημασία της εξοικονόμησης ενέργειας στο φωτισμό

Διανύοντας τον 21^ο αιώνα, τα προειδοποιητικά σημάδια της φύσης για την επικείμενη οικολογική καταστροφή έχουν ήδη κάνει την εμφάνισή τους, προκαλώντας ανυπολόγιστες ζημιές στον πλανήτη. Σε καιρούς περιβαλλοντικής ευαισθητοποίησης, όπως είναι η τρέχουσα δεκαετία, η ανάληψη δράσεων για την ελαχιστοποίηση των καταστροφικών για τη φύση παραγόντων απασχολούν ολοένα και περισσότερο την παγκόσμια κοινότητα. Ένας από τους καταστροφικούς παράγοντες του περιβάλλοντος είναι αυτός της αυξανόμενης ενεργειακής κατανάλωσης. Η παραγωγή της ενέργειας, παρόλο που τα τελευταία χρόνια πραγματοποιείται και με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, στο μεγαλύτερο ποσοστό της πραγματοποιείται με τη χρήση συμβατικών καυσίμων, με άμεσο επακόλουθο τη ρύπανση της ατμόσφαιρας λόγω της εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου. Το γεγονός αυτό καθιστά αναγκαία την εύρεση τρόπων τόσο για τη σωστή διαχείριση της ενέργειας όσο και για την εξοικονόμησή της.

Ένας σημαντικός τομέας στον οποίο υπάρχουν μεγάλα περιθώρια διορθωτικών κινήσεων, ούτως ώστε να επιτευχθεί εξοικονόμηση ικανοποιητικών ποσών ενέργειας παγκοσμίως, είναι ο φωτισμός. Σύμφωνα με στοιχεία έρευνας που πραγματοποιήθηκε από το Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (International Energy Agency), περίπου το 20% της ενέργειας που καταναλώνεται παγκοσμίως αποδίδεται στο φωτισμό, ποσοστό το οποίο αντιστοιχεί στο ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται παγκοσμίως από πυρηνική ενέργεια. Κατάλληλη διαχείριση στο βιομηχανικό και εμπορικό φωτισμό, καθώς και στο φωτισμό δρόμων, σηράγγων και εξωτερικών χώρων μπορεί να εξοικονομήσει δισεκατομμύρια ευρώ, όπως και εκατομμύρια τόνους ορυκτών καυσίμων και εκπομπών CO₂ κάθε χρόνο [16].

1.2 Κατανάλωση Ενέργειας σε οδοφωτισμό και σήραγγες

Το σύστημα οδοφωτισμού αποτελεί στην εποχή μας ένα αναπόσπαστο κομμάτι της υποδομής κάθε σύγχρονης πόλης και οδικής αρτηρίας. Η καταναλισκόμενη ενέργεια στον οδοφωτισμό, η οποία αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται σε μία πόλη, καθώς και τα κόστη συντήρησης και λειτουργίας του συστήματος, καθιστούν τον οδοφωτισμό ως έναν τεράστιο καταναλωτή ηλεκτρικής ενέργειας, με μεγάλο οικονομικό και περιβαλλοντικό κόστος. Ειδικά στις σήραγγες, όπου ο φωτισμός λειτουργεί επί εικοσιτέσσερις ώρες ημερησίως, και την ημέρα είναι ιδιαίτερα ενισχυμένος, γίνεται αντιληπτή η ανάγκη λήψης των απαραίτητων μέτρων για εξοικονόμηση ενέργειας.

Στις σήραγγες ενσωματώνεται ένα μεγάλο πλήθος ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων που αφορούν κυρίως στην ασφάλεια των χρηστών. Αυτές είναι ο φωτισμός, ο αερισμός, η ανίχνευση καυσαερίων, η πυρανίχνευση, η πυρόσβεση, το κλειστό κύκλωμα τηλεόρασης, τα τηλέφωνα έκτακτης ανάγκης, η σηματοδότηση και ο έλεγχος ύψους των οχημάτων. Από αυτές, η πιο ενεργοβόρα εγκατάσταση είναι ο φωτισμός, ενώ για τις σήραγγες μεγάλου μήκους είναι επιπλέον και ο αερισμός. Ο φωτισμός μιας σήραγγας

καταλαμβάνει περίπου το 40% με 50% της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνει η σήραγγα συνολικά [15].

1.3 Στατιστικά στοιχεία για την ηλεκτρική κατανάλωση του οδοφωτισμού στην Ελλάδα για πέντε συναπτά έτη

Στο διάγραμμα που ακολουθεί, παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της Ελληνικής Στατιστικής Υπηρεσίας (ΕΛ.ΣΤΑΤ.) για την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στον οδοφωτισμό σε όλη την Ελλάδα από το έτος 2008 έως και 2012.



Σχήμα 1.1: Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σε MWh στον οδοφωτισμό της Ελλάδας (2008-2012)[26].

Με βάση το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται απότομη αύξηση στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στον οδοφωτισμό της Ελλάδας το έτος 2008-2009, ενώ στη συνέχεια μια σταδιακή μείωση έως το έτος 2012, γεγονός που οφείλεται στην έναρξη της οικονομικής κρίσης. Η μείωση αυτή προέκυψε λόγω της αντικατάστασης των λαμπτήρων εκκένωσης υψηλής έντασης με λαμπτήρες φθορισμού, της ανεπαρκούς συντήρησης του δικτύου και της ελάττωσης του χρόνου λειτουργίας του οδοφωτισμού σε ορισμένους δήμους της χώρας.

1.4 Προτάσεις για εξοικονόμηση ενέργειας σε σήραγγες

Ο φωτισμός παρέχει τη δυνατότητα, τόσο από οικονομική όσο και από ενεργειακή και περιβαλλοντική άποψη, να μειωθεί η ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας στο εθνικό ηλεκτρικό δίκτυο.

Ειδικότερα στις σήραγγες, οι οποίες αποτελούν το πιο ενεργοβόρο κομμάτι των αυτοκινητόδρομων, με τον φωτισμό της σήραγγας να αντιστοιχεί στο 70% της συνολικής κατανάλωσης ενός αυτοκινητόδρομου[21], ενώ μεμονωμένα στη σήραγγα ο φωτισμός να

καταλαμβάνει γύρω στο 40% με 50% της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνει η σήραγγα συνολικά, κρίνεται απαραίτητη η εφαρμογή μεθόδων με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας [15].

Οι γενικές κατευθύνσεις που πρέπει να τηρηθούν για την εξοικονόμηση ενέργειας είναι οι εξής [21]:

- Φωτιστικά με λαμπτήρες υψηλής απόδοσης
- Φωτιστικά με ballast υψηλής απόδοσης
- Χρήση ευφυών συστημάτων
- Φωτιστικά υψηλής απόδοσης
- Φωτισμός με βάση τα πρότυπα και όχι υπερβολές
- Έξυπνος σχεδιασμός τοποθέτησης φωτιστικών

Παρακάτω αναπτύσσονται μέθοδοι με τις οποίες επιτυγχάνεται σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, με ταυτόχρονη διατήρηση και βελτίωση των επιπέδων ασφαλείας για τους χρήστες των σηράγγων.

1.4.1 Διευθυνσιοδοτούμενα (Addressable) φωτιστικά

Με τις συμβατικές μεθόδους ο σχεδιασμός ενός συστήματος φωτισμού στις σήραγγες γίνεται με έναν περιορισμένο αριθμό τμημάτων για κάθε ζώνη της σήραγγας (π.χ. Threshold 1, 2..., Transition 1, 2 κτλ.). Αυτό συμβαίνει γιατί για τον έλεγχο των φωτιστικών σωμάτων πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένας περιορισμένος αριθμός κυκλωμάτων φωτισμού. Εάν αυτός ο αριθμός είναι πολύ μεγάλος, τότε ο σχεδιασμός του συστήματος παρουσιάζει δυσκολίες, ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται αισθητά το κόστος εγκατάστασης, αφού κάθε κύκλωμα φωτισμού τροφοδοτείται με καλώδια τα οποία αναχωρούν από κάθε υποπίνακα και είναι ίσα σε αριθμό με τα επίπεδα λαμπρότητας που έχουν σχεδιαστεί. Επίσης χρησιμοποιούνται ισάριθμα ρελαί σε κάθε υποπίνακα ώστε να ελέγχονται τα αντίστοιχα φωτιστικά σώματα.

Η εναλλακτική λύση είναι η χρησιμοποίηση ενός συστήματος διευθυνσιοδοτούμενων φωτιστικών σωμάτων. Το συγκεκριμένο σύστημα διαθέτει μια κεντρική μονάδα ελέγχου που έχει τη δυνατότητα να επικοινωνεί και να δίνει εντολές σε κάθε ένα φωτιστικό ξεχωριστά. Αυτό επιτυγχάνεται με ένα απλό καλώδιο εντολών (bus cable) το οποίο διατρέχει όλο το μήκος της σήραγγας και μεταφέρει τις εντολές του συστήματος ελέγχου σε όλα τα φωτιστικά σώματα. Έτσι, με την χρήση του συγκεκριμένου συστήματος είναι δυνατό να τροφοδοτηθούν όλα τα φωτιστικά με τα ελάχιστα απαιτούμενα καλώδια τροφοδοσίας και ταυτόχρονα να ελεγχθούν πλήρως μέσω των σημάτων του καλωδίου ελέγχου.

Η χρήση του συστήματος διευθυνσιοδοτούμενων φωτιστικών μειώνει σε μεγάλο βαθμό τον αριθμό των καλωδίων τροφοδοσίας, ενώ εξαλείφει το κόστος των ρελαί, περιορίζοντας έτσι σημαντικά το κόστος της εγκατάστασης φωτισμού. Το βασικό όμως πλεονέκτημα του συστήματος αυτού είναι η ευελιξία σχεδιασμού που παρέχεται στο σχεδιαστή της εγκατάστασης. Ο σχεδιαστής δεν υποχρεώνεται να χωρίσει την σήραγγα σε έναν περιορισμένο, μικρό αριθμό τμημάτων για κάθε ζώνη, αλλά έχει την ευχέρεια να εφαρμόσει περισσότερα τμήματα με το κατάλληλο μήκος το καθένα [14].

1.4.2 Σύστημα αυξομείωσης φωτισμού (Dimming)

Το σύστημα αυξομείωσης φωτισμού μειώνει το φωτισμό μιας εγκατάστασης με στόχο την μεγαλύτερη ευελιξία στο σχεδιασμό επιπέδων φωτισμού και την εξοικονόμηση ενέργειας. Η τεχνική του dimming για λαμπτήρες εκκένωσης υψηλής πίεσης (HID) εφαρμόζεται με δύο συστήματα: το σύστημα δύο επιπέδων (50%-100%) και το συνεχές σύστημα.

- Το σύστημα dimming δύο επιπέδων είναι απλούστερο, φθηνότερο και επιτρέπει μείωση της φωτιστικής απόδοσης του λαμπτήρα στο 50% (λειτουργία στο 100% ή στο 50%).
- Το συνεχές σύστημα dimming μεταβάλλει την φωτιστική απόδοση του λαμπτήρα επιτρέποντας συνεχή μείωση μέχρι το 30%, 50% ή 60% ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο υλοποίησης του συστήματος.

1.4.2.1 Σύστημα dimming δύο επιπέδων (50% - 100%)

Η προσαρμογή του επιπέδου φωτισμού των σηράγγων στις εκάστοτε εξωτερικές συνθήκες φωτισμού επιτυγχάνεται με ένα προκαθορισμένο αριθμό επιπέδων λαμπρότητας που κυμαίνεται συνήθως από 6 έως 8. Είναι αυτονόητο ότι όσο περισσότερα επίπεδα φωτισμού υπάρχουν, τόσο καλύτερη θα είναι η προσαρμογή αυτή και δε θα καταναλώνεται περιττή ενέργεια. Ο σχεδιασμός όμως ενός συστήματος με αριθμό επιπέδων πάνω από 8 είναι αρκετά περίπλοκος και η κατασκευαστική υλοποίησή του παρουσιάζει αυξημένες δυσκολίες.

Με τη χρήση του συστήματος dimming δύο επιπέδων (50% - 100%) μπορούν να επιτευχθούν περισσότερα επίπεδα φωτισμού χωρίς να παρουσιάζονται τα παραπάνω προβλήματα. Συγκεκριμένα, τα φωτιστικά σώματα κάθε επιπέδου μπορούν πλέον να λειτουργούν και στο 50% της φωτιστικής απόδοσής τους με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται διπλάσιος αριθμός επιπέδων σε σχέση με τον κλασικό σχεδιασμό. Παρόλα αυτά, θα πρέπει να σημειωθεί ότι όταν ένας λαμπτήρας λειτουργεί στο 50% της απόδοσής του δεν καταναλώνει αντίστοιχα το 50% της ονομαστικής του ισχύος αλλά περίπου το 65% αυτής.[14]

1.4.2.2 Σύστημα συνεχούς dimming

Εξέλιξη της τεχνολογίας dimming δύο επιπέδων (50% - 100%) αποτελεί το σύστημα συνεχούς dimming. Με το σύστημα αυτό επιτυγχάνονται όλες οι τιμές από το 100% μέχρι και το 50% της απόδοσης του λαμπτήρα καταναλώνοντας 100%-65% της ονομαστικής του ισχύος αντίστοιχα. Ο περιορισμός του 50% τίθεται στους λαμπτήρες εκκένωσης υψηλής πίεσης, επειδή περαιτέρω μείωση της φωτιστικής απόδοσης του λαμπτήρα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του χρόνου ζωής του. Με το σύστημα αυτό ο κάθε λαμπτήρας δεν λειτουργεί πλέον μόνο σε δύο διακριτές τιμές αλλά και σε όλες τις ενδιάμεσες.

Είναι φανερό ότι με τη παραπάνω τεχνολογία δεν υπάρχουν πλέον επίπεδα φωτισμού με αποτέλεσμα η λαμπρότητα που επιτυγχάνεται, και κατά συνέπεια και η κατανάλωση ενέργειας, να προσαρμόζονται συνεχώς στις αναγκαίες τιμές. Επίσης το σύστημα φωτισμού αποκτά μεγάλη ευελιξία όσον αφορά την προσαρμογή του σε εξωτερικές μεταβολές μικρής διάρκειας (π.χ. παροδικά σύννεφα), σε αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα που αναγκαστικά παρουσιάζουν μεγάλη αδράνεια.[14]

1.4.3 Συντήρηση και καθαρισμός φωτιστικών σωμάτων

Ένας άλλος παράγοντας που συμβάλλει στην εξοικονόμηση ενέργειας είναι η τακτική της συντήρησης των φωτιστικών σωμάτων, των οποίων η απόδοση μπορεί να μειωθεί για διάφορους λόγους, οι κυριότεροι από τους οποίους είναι οι εξής:

- Πτώση της απόδοσης του φωτιστικού λόγω γήρανσης. Μετά από κάποιες χιλιάδες ώρες λειτουργίας η απόδοση του φωτιστικού αρχίζει σταδιακά να μειώνεται φτάνοντας τελικά στο 0.8 της αρχικής του τιμής, όπου καθίσταται ακατάλληλο και επιβάλλεται η αντικατάστασή του.
- Λαμπτήρες που μετά από κάποιο διάστημα αποτυγχάνουν να ανάψουν (αστοχία έναυσης των λαμπτήρων).
- Συσσώρευση σκόνης και καυσαερίων -ακαθαρσιών γενικότερα- που επικαθονται στα φωτιστικά σώματα, λόγω των αυξημένων ποσοστών ρύπων που επικρατούν μέσα σε μια σήραγγα.

Όλοι οι παραπάνω λόγοι έχουν σαν αποτέλεσμα τα φωτιστικά με την πάροδο του χρόνου να εκπέμπουν λιγότερο φως από αυτό που αναλογεί στις βέλτιστες αρχικές συνθήκες, καθιστώντας τις συνθήκες μέσα στη σήραγγα λιγότερο ασφαλείς για τους χρήστες, καταναλώνοντας άσκοπα ενέργεια χωρίς να επιτυγχάνονται τα επιθυμητά επίπεδα φωτισμού και οι λαμπρότητες του αρχικού σχεδιασμού. Κρίνεται, λοιπόν, απαραίτητη η συντήρηση αλλά και ο καθαρισμός των φωτιστικών σωμάτων σε τακτά χρονικά διαστήματα. Τέλος, αν έχει παρέλθει σημαντικό χρονικό διάστημα από την τοποθέτηση των φωτιστικών σωμάτων, η γήρανσή τους δε μπορεί να αναχαιτισθεί με συντήρηση μόνο, αλλά επιβάλλεται η αντικατάστασή τους με νέα [14].

1.4.4 Χρήση του φυσικού φωτισμού ημέρας στις σήραγγες

Η κατάλληλη αξιοποίηση του φυσικού φωτισμού της ημέρας αποτελεί ένα ακόμη μέσο που μπορεί να συμβάλλει στην εξοικονόμηση ενέργειας στις σήραγγες.

Στις σήραγγες μικρού μήκους η χρήση του φυσικού φωτισμού ημέρας μπορεί να γίνει με τους εξής τρόπους:

- Κατασκευή φωταγωγών στην οροφή τους
- Κατασκευή περσίδων (ανοίγματα στις πλαϊνές όψεις της σήραγγας)

A. Με χρήση του φυσικού φωτός, το οποίο εισερχόμενο μέσα στη σήραγγα από τις εισόδους της ανακλάται από τα τοιχώματα και την οροφή και διαχέεται στο εσωτερικό της σήραγγας.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί μια σήραγγα 120m στην Ελβετία, η οποία φωτίζεται με φυσικό φωτισμό σε μήκος συνολικά 80m. Συγκεκριμένα, αξιοποιήθηκε ο φυσικός φωτισμός, μέσω της διείσδυσης και της διάχυσης του φωτός κατά 40m σε κάθε είσοδο της σήραγγας. Χρειάστηκε, δηλαδή, τεχνητός φωτισμός μόνο για το ένα τρίτο της σήραγγας, κάτι το οποίο συνεπάγεται σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας.

B. Με χρήση σκέπαστρων στην είσοδο των σηράγγων.

Αναλυτικότερα, το τμήμα της σήραγγας που καταναλώνει τη μεγαλύτερη ισχύ είναι το αρχικό τμήμα, στο οποίο τα επίπεδα λαμπρότητας πρέπει να είναι αρκετά υψηλά κατά τη διάρκεια της μέρας, ώστε να μην υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ της εξωτερικής και της εσωτερικής λαμπρότητας, το οποίο απαιτεί από τον οδηγό ένα σημαντικό οπτικό έργο για την προσαρμογή του ματιού σε αυτές τις απότομες μεταβολές του φωτός. Για την επίτευξη της ομαλής προσαρμογής των οδηγών και την παράλληλη εξοικονόμηση ενέργειας απαιτείται η μείωση των επιπέδων λαμπρότητας στο τμήμα του δρόμου αμέσως πριν την είσοδο στη σήραγγα.

Ένας τρόπος μείωσης των επιπέδων λαμπρότητας στο αρχικό τμήμα της σήραγγας (ζώνη κατωφλίου) είναι η δημιουργία μιας τεχνητής ζώνης κατωφλίου ακριβώς πριν από την είσοδο στη σήραγγα, στην οποία το ποσό του φωτός ημέρας που θα φθάνει στο οδόστρωμα θα ελέγχεται με κατάλληλο σύστημα περσίδων. Ο πιο κοινός τύπος τεχνητής ζώνης κατωφλίου είναι η κατασκευή φεγγίτη οροφής (σκέπαστρου), συνήθως από αλουμίνιο, ο οποίος τοποθετείται πάνω από το δρόμο και είναι έτσι σχεδιασμένος ώστε να μην επιτρέπει την άμεση διείσδυση του φωτός ημέρας στο δρόμο κάτω από αυτόν. Ο σχεδιασμός τέτοιου σκέπαστρου εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος και τον προσανατολισμό της σήραγγας, ωστόσο παρουσιάζει αρκετά μειονεκτήματα. Καταρχήν, τα σκέπαστρα θα πρέπει να έχουν ανοίγματα τουλάχιστον 2mm, ώστε να αποφεύγεται η απόφραξή τους από το χιόνι, γεγονός το οποίο θα μείωνε την αποτελεσματικότητά τους. Επίσης, σε συνθήκες όπου η βροχή ή το χιόνι διέρχονται από το σκέπαστρο και φθάνουν στο οδόστρωμα, σε συνδυασμό με συνθήκες ψύχους, υπάρχει κίνδυνος δημιουργίας παγετού στο οδόστρωμα εξαιτίας της απουσίας άμεσου φωτός ηλίου, γεγονός που θα μειώσει την ασφάλεια και την άνεση κυκλοφορίας στη σήραγγα. Ακόμη, τα σκέπαστρα μπορεί να δυσκολεύουν την απαγωγή των καυσαερίων που εξέρχονται από τη σήραγγα, αυξάνοντας έτσι τα ποσοστά ρύπων εντός της σήραγγας. Τέλος, η μεταφορά του φωτός ποικίλει ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες, την ύπαρξη ηλιοφάνειας ή συννεφιάς.

Λόγω των προβλημάτων που παρουσιάζει η χρήση σκέπαστρων, μια εναλλακτική πρόταση θα ήταν η κατασκευή κλειστού σκέπαστρου από υαλότουβλο ή διαφανές πλαστικό. Επειδή, όμως, η χρήση αυτού του είδους σκέπαστρου βασίζεται εξ' ολοκλήρου στη μεταφορά του φωτός με διάχυση, η αποδοτικότητά τους εξαρτάται από το αν θα διατηρηθούν καθαρά, ενώ η κατασκευή τους έχει ιδιαίτερα μεγάλο κόστος [14].

1.4.5 Παρεμβάσεις στην αρχιτεκτονική του στομίου της σήραγγας

Μεγάλη σημασία στο φωτισμό μιας σήραγγας αποτελεί το στόμιο αυτής, ως προς το χρώμα του περιβάλλοντος χώρου και ως προς το ύψος του. Το ύψος αυτό του

περιβάλλοντος χώρου καθορίζει το ποσοστό του ουρανού το οποίο φαίνεται σε ένα κωνικό πεδίο ανοίγματος 20° ληφθέν από απόσταση ίση με την ασφαλή απόσταση πέδησης.

Προκειμένου, λοιπόν, να επιτευχθεί εξοικονόμηση ενέργειας όσον αφορά στον ενεργοβόρο φωτισμό των οδικών σηράγγων προτείνεται η μέθοδος εφαρμογής παρεμβάσεων στην αρχιτεκτονική του περιβάλλοντα χώρου της σήραγγας. Με εφαρμογή γεωφυσικών παρεμβάσεων στο στόμιο μιας σήραγγας, δηλαδή αλλάζοντας το χρώμα και όσο είναι δυνατόν το ύψος του περιγύρου της, μπορεί να επιτευχθεί σημαντική μείωση στην κατανάλωση ενέργειας. Επεμβάσεις μπορούν να γίνουν με φύτευση δένδρων ή με τοποθέτηση κάποιου υλικού, όπως τσιμέντο, καθώς και με επιχρωματώσεις. Με αυτές τις παρεμβάσεις προκύπτει μεταβολή της εξωτερικής λαμπρότητας L20 της σήραγγας, μεταβολή η οποία επιδρά στις τιμές των επιπέδων λαμπρότητας του φωτισμού στο εσωτερικό της σήραγγας. Συγκεκριμένα, από μελέτες έχει παρατηρηθεί μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε περιπτώσεις σκούρου περίγυρου σε σχέση με τον ανοιχτόχρωμο, ενώ σε περιπτώσεις με το ίδιο χρώμα περίγυρου παρατηρείται αύξηση κατανάλωσης όταν το ποσοστό του φαινόμενου ουρανού είναι πάνω από 50%. Αυτό είναι λογικό καθώς μεγαλύτερο ποσοστό ουρανού συνεπάγεται ισχυρότερη διείσδυση ηλιακού φωτός στο κωνικό πεδίο παρατήρησης, άρα αυξάνεται η εξωτερική L20 και αναπόφευκτα σημειώνεται αύξησης της ηλεκτρικής κατανάλωσης φωτισμού[15].

1.4.6 Εξοικονόμηση ενέργειας με χρήση μετρητών λαμπρότητας και ισχύος φωτισμού

Ο σχεδιασμός της εγκατάστασης φωτισμού μιας σήραγγας γίνεται με βάση μια θεωρητική προεργασία με σκοπό την επίτευξη συγκεκριμένων τιμών λαμπρότητας μέσα στη σήραγγα. Κατά τη λειτουργία, ωστόσο, της εγκατάστασης οι τιμές αυτές αποκλίνουν από τις θεωρητικές που έχουν οριστεί κατά τη φάση του σχεδιασμού. Η απόκλιση αυτή οφείλεται σε κάποιους εξωγενείς παράγοντες οι οποίοι αφορούν στο συντελεστή συντήρησης, καθώς και στην κατάσταση της ασφάλτου η οποία μεταβάλλεται με το χρόνο και επηρεάζει άμεσα την τιμή της ανακλώμενης λαμπρότητας. Οι παράγοντες αυτοί είναι δύσκολο να ληφθούν υπόψη στη φάση του σχεδιασμού, γι' αυτό περιλαμβάνονται κατά το δυνατόν στο συνολικό συντελεστή συντήρησης.

Όσο, λοιπόν, η συντήρηση της σήραγγας γίνεται σωστά δεν τίθεται κανένα θέμα ασφάλειας, γεγονός που σημαίνει ότι η απόδοση της εγκατάστασης δε μειώνεται ποτέ κάτω από το γενικό συντελεστή συντήρησης. Τίθεται, όμως, θέμα επιπλέον κατανάλωσης ενέργειας. Συγκεκριμένα, στην αρχή λειτουργίας της σήραγγας, που έχει σχεδιαστεί με συνολικό συντελεστή συντήρησης 0,7 το σύστημα θα μπορεί να λειτουργεί σχεδόν στο 100% της θεωρητικής απόδοσής του, ενώ οι απαιτήσεις για την ασφάλεια θα είναι κοντά στο 70% της λαμπρότητας η οποία θα επιτυγχάνεται. Γίνεται, λοιπόν, σαφές ότι ένα σημαντικό ποσοστό ενέργειας μπορεί να εξοικονομηθεί με κατάλληλο προγραμματισμό του συστήματος φωτισμού.

Ο προγραμματισμός αυτός, ωστόσο, προαπαιτεί να υπάρχει ανάδραση στο σύστημα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση ενός μετρητή λαμπρότητας της ζώνης προσέγγισης L20, καθώς και αισθητήρων λαμπρότητας ή ισχύος φωτισμού, οι έξοδοι των οποίων θα οδηγούνται στο κεντρικό σύστημα ελέγχου, το οποίο και θα κάνει τις απαραίτητες διορθώσεις. Πιο συγκεκριμένα, μια υλοποίηση το συστήματος ανάδρασης είναι η χρήση ενός μετρητή λαμπρότητας L20, καθώς και ενός αριθμού αισθητήρων ισχύος φωτισμού σε

κάθε ζώνη της σήραγγας. Ο λόγος που προτιμώνται οι αισθητήρες ισχύος φωτισμού έναντι των αισθητήρων λαμπρότητας έγκειται στο χαμηλότερο κόστος των πρώτων. Με αυτόν τον τρόπο καθίσταται γνωστή η απόδοση του συνόλου των φωτιστικών σωμάτων. Με τη χρήση μάλιστα και ενός αισθητήρα λαμπρότητας σε κάποιο σημείο εσωτερικά της σήραγγας το σύστημα θα έχει και την πληροφορία για την κατάσταση του οδοστρώματος. Έτσι, με τρία αισθητήρια ισχύος φωτισμού και ένα λαμπρότητας δίνεται η δυνατότητα επαρκούς εποπτείας του τι πραγματικά συμβαίνει μέσα στη σήραγγα, καθώς και η δυνατότητα να προγραμματίζεται η συντήρηση της σήραγγας με τον καλύτερο δυνατό τρόπο και, άρα, να εξοικονομούνται σημαντικά ποσά καταναλισκόμενης ενέργειας [14].

1.4.7 Αξιοποίηση τοίχων και οδοστρώματος σηράγγων

Σημαντικό ρόλο στην επίτευξη των επιθυμητών επιπέδων λαμπρότητας, και στην ταυτόχρονη εξοικονόμηση ενέργειας στο φωτισμό μιας οδικής σήραγγας, παίζει η κατάλληλη αξιοποίηση των τοιχωμάτων και του οδοστρώματος αυτής.

1.4.7.1 Λαμπρότητα τοιχωμάτων

Σύμφωνα με το κανονισμό της Διεθνούς Επιτροπής Φωτισμού CIE 88-1990, αναφέρεται ότι η μέση λαμπρότητα των τοιχωμάτων της σήραγγας μέχρι ύψους 2m, δεν πρέπει να είναι μικρότερη από τη μέση λαμπρότητα της επιφάνειας του δρόμου. Για να ικανοποιηθεί η παραπάνω απαίτηση υπολογίζεται η ισχύς φωτισμού (lux) στα τοιχώματα με την χρήση του κατάλληλου πλέγματος (grid) και κατόπιν η τιμή του συντελεστή ανάκλασης των τοιχωμάτων c με χρήση του τύπου:

$$L = \frac{E \times c}{\pi}$$

Όπου L : μέση λαμπρότητα (cd/m^2)

E : φωτεινή ισχύς (lux)

c : συντελεστής αντανάκλασης τοιχωμάτων

$\pi = 3.14$

Ο παραπάνω συντελεστής c είναι ενδεικτικός για τον τύπο του χρώματος που θα πρέπει να βαφούν τα τοιχώματα, ώστε να εξασφαλίσουμε μέση λαμπρότητα τουλάχιστον ίση με τη λαμπρότητα της επιφάνειας του δρόμου.

Σύμφωνα, λοιπόν, με τα παραπάνω και για την επίτευξη ενός συντελεστή ανάκλασης ίσου με 0,6, οι τοίχοι βάφονται με ανοιχτόχρωμη βαφή π.χ. γκρι χρώματος τύπου RAL 9002. Επίσης, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τα τοιχώματα θα πρέπει να βαφούν κατάλληλα ώστε κατά τον καθαρισμό τους να αντέχουν σε πλύση με δέσμη νερού υψηλής πίεσης.

Σε κάθε μελέτη θα πρέπει να υπολογίζεται η προσαύξηση της μέσης λαμπρότητας της επιφάνειας του δρόμου εξαιτίας της ανάκλασης των τοιχωμάτων της σήραγγας, και αυτό γιατί η ανάκλαση συμβάλλει σημαντικά στην επίτευξη του κατάλληλου επιπέδου μέσης λαμπρότητας και κατά συνέπεια στην εξοικονόμηση ενέργειας. Συγκεκριμένα, για την

επιλογή της τιμής του συντελεστή ανάκλασης των τοιχωμάτων λαμβάνεται υπόψη ότι τα τοιχώματα βάφονται μέχρι το ύψος των 4 μέτρων και ότι το βαμμένο αυτό τμήμα των τοιχωμάτων έχει συντελεστή ανάκλασης τουλάχιστον 0,6 [14].

1.4.7.2 Τύπος οδοστρωμάτων

Για τον υπολογισμό της λαμπρότητας κατά το σχεδιασμό της εγκατάστασης φωτισμού οι επιφάνειες των δρόμων ταξινομούνται ανάλογα με τις ιδιότητες ανάκλασης που παρουσιάζουν. Ένα σύστημα κατάταξης των επιφανειών των δρόμων ομαδοποιεί τις διάφορες επιφάνειες ανάλογα με την τιμή του κατοπτρικού συντελεστή S1. Όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.1, επιφάνειες δρόμου με τιμές S1 μικρότερες του 0.4 ανήκουν στην πρώτη κλάση (CI), ενώ οι επιφάνειες με τιμές S1 ίσες ή μεγαλύτερες από 0.4 ανήκουν στη δεύτερη κλάση (CII). Μία παλαιότερη κατάταξη, πάλι με βάση το συντελεστή S1, διαχωρίζει τα οδοστρώματα σε τέσσερις κατηγορίες οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.2.

Πίνακας 1.1: Πρότυπο Σύστημα Κατάταξη

| Κλάση | Όριο συντελεστή S1 | Τιμή Qo |
|-------|--------------------|---------|
| CI | $S1 < 0.4$ | 0.10 |
| CII | $S1 \geq 0.4$ | 0.07 |

Πίνακας 1.2: Σύστημα Κατάταξης R

| Κλάση | Όριο συντελεστή S1 | Τιμή Qo |
|-------|-----------------------|---------|
| RI | $S1 < 0.42$ | 0.10 |
| RII | $0.42 \leq S1 < 0.85$ | 0.07 |
| RIII | $0.85 \leq S1 < 1.35$ | 0.07 |
| RIV | $1.35 \leq S1$ | 0.08 |

Όπως είναι φανερό από τους παραπάνω πίνακες, η κλάση RI είναι σχεδόν ίδια με την κλάση CI, ενώ οι RII, RIII, RIV μαζί ανταποκρίνονται στην κλάση CII. Ένα οδόστρωμα είναι τόσο φωτεινότερο και με μεγαλύτερη ανάκλαση όσο ο συντελεστής S1 είναι μικρότερος. Έτσι ένα ασφαλτικό οδόστρωμα (μαύρη άσφαλτος) ανήκει στην κλάση RIII και κατά συνέπεια στην κλάση CII σύμφωνα με το πρότυπο σύστημα κατάταξης. Ένα οδόστρωμα από σκυρόδεμα ανήκει στην κλάση CI.

Ένα ασφαλτικό οδόστρωμα είναι ιδιαίτερα σκοτεινό μετά την επίστρωσή του. Με το πέρασμα του χρόνου όμως και τη χρησιμοποίηση του οδοστρώματος το υλικό της ασφάλτου αποκολλάται από την επιφάνεια και αποκαλύπτονται τα αδρανή συστατικά. Με στόχο την επίτευξη ενός φωτεινότερου ασφαλτικού οδοστρώματος κάποιες χώρες, όπως η Δανία, καθόρισαν ένα ποσοστό λευκών αδρανών στο ασφαλτικό μείγμα. Στο Βέλγιο η

χρήση φωτεινών αδρανών για τον τύπο οδοστρώματος CII είναι υποχρεωτική για τους κύριους δρόμους του οδικού δικτύου. Ελάχιστη τιμή ανάκλασης που απαιτείται είναι 45%.

Για την οπτική καθοδήγηση του οδηγού μέσα στις σήραγγες είναι απαραίτητο ο οδικός φωτισμός να μετατρέπει την επιφάνεια του δρόμου σε μια φωτεινή ζώνη στο πεδίο όρασης. Για αυτό το λόγο είναι σημαντικό να επιτυγχάνεται μία υψηλή μέση λαμπρότητα της επιφάνειας του δρόμου, καθώς αυτή αυξάνει την ορατότητα των αντικειμένων πάνω στο δρόμο. Έτσι οι επιφάνειες των δρόμων έχουν τις επιθυμητές ανακλαστικές ιδιότητες όταν επιτυγχάνεται υψηλή μέση λαμπρότητα με τη χρήση σχετικά λίγης ενέργειας. Η εφαρμογή επιφανειών με καλές ανακλαστικές ιδιότητες μπορεί να οδηγήσει στην επιδείνωση της παρατήρησης των συνηθισμένων υλικών διαγράμμισης του δρόμου. Παρόλα αυτά, υπάρχουν υλικά για την επίτευξη καλής ορατότητας των διαγραμμίσεων σε φωτεινές επιφάνειες δρόμων σε στεγνές συνθήκες. Πρέπει να σημειωθεί, όμως, ότι η αντανάκλαση πρέπει να είναι τέτοια ώστε να καλύπτονται οι απαιτήσεις σε σχέση με την ομοιομορφία της λαμπρότητας.

Η λαμπρότητα της επιφάνειας του δρόμου αυξάνει με τη μείωση του συντελεστή $S1$. Διαμορφώνονται έτσι δύο ομάδες οδοστρωμάτων σε σχέση με την τιμή του συντελεστή $S1$ η μία με $S1 < 0.4$ και η άλλη με $S1 > 0.4$. Η τιμή 0.4 είναι το όριο μεταξύ των κατηγοριών CI και CII, στο σύστημα κατάταξης δύο κλάσεων και μεταξύ των RI και RII στο σύστημα κατάταξης 4 κλάσεων. Οι επιφάνειες των δρόμων των κλάσεων CI και RI, δηλαδή με συντελεστή $S1 < 0.4$, πρέπει να προτιμώνται εξαιτίας της ομοιομορφίας [14].

Κεφάλαιο 2^ο

Φωτισμός οδικών σηράγγων

2.1 Η σημασία του φωτισμού στις οδικές σήραγγες

Η ασφάλεια των σηράγγων συνδέεται άμεσα με το φωτισμό τους. Ο φωτισμός μιας οδικής σήραγγας τόσο κατά τη διάρκεια της ημέρας όσο και της νύχτας θα πρέπει να δίνει στον οδηγό την αίσθηση της ασφάλειας και της άνεσης την οποία έχει και στο τμήμα του δρόμου εκτός της σήραγγας. Αυτό σημαίνει ότι ο οδηγός θα πρέπει να έχει ικανοποιητική πληροφόρηση σχετικά με την κατεύθυνση του δρόμου, τη συμπεριφορά των άλλων οδηγών και την εμφάνιση τυχόν εμποδίων στο οδόστρωμα. Η πιθανότητα ατυχήματος κατά την είσοδο σε μια σήραγγα την ημέρα είναι μεγαλύτερη, λόγω των εντελώς διαφορετικών συνθηκών φωτισμού που επικρατούν μεταξύ του εξωτερικού περιβάλλοντος και του εσωτερικού περιβάλλοντος της σήραγγας. Γι' αυτό, σκοπός του φωτισμού είναι να δημιουργήσει τις κατάλληλες συνθήκες στο εσωτερικό, ώστε να προσαρμοστεί σταδιακά η όραση του οδηγού κατά την είσοδο και τη διέλευσή του μέσα από αυτή. Με το σωστό φωτισμό, οι οδηγοί μπορούν να εντοπίζουν έγκαιρα και με ακρίβεια τα όρια του δρόμου, καθώς και τυχόν εμπόδια και αντικείμενα που θα βρεθούν μπροστά τους.

Μια εγκατάσταση φωτισμού πρέπει να παρέχει στον οδηγό τη δυνατότητα να καθορίζει:

- την κατάσταση του δρόμου στο τμήμα που θα διανύσει στα επόμενα 5 με 10 δευτερόλεπτα
- τη θέση και την κίνηση των άλλων οχημάτων τα οποία ήδη χρησιμοποιούν ή πρόκειται να χρησιμοποιήσουν το τμήμα αυτό
- την ύπαρξη εμποδίων στο συγκεκριμένο τμήμα
- την οδοσήμανση

Με αυτό τον τρόπο, ο οδηγός έχει τη δυνατότητα να προσλαμβάνει επαρκή οπτική πληροφορία για τη συνεχώς διαφοροποιούμενη θέα μπροστά του και, έτσι, να προχωρήσει με ασφάλεια και να αντιδράσει εγκαίρως στη σήμανση, κάνοντας τους σωστούς ελιγμούς.

2.2 Ζώνες διαχωρισμού οδικών σηράγγων

Κατά τον σχεδιασμό του φωτισμού μιας σήραγγας, θεωρούμε πέντε περιοχές-ζώνες [1]:

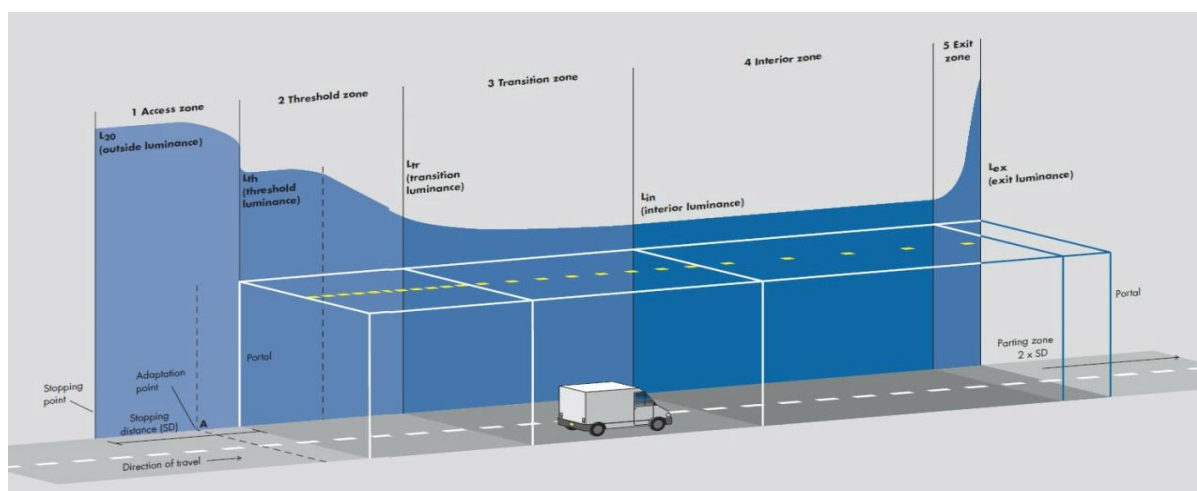
Ζώνη προσέγγισης (access zone): Είναι το κομμάτι του ανοιχτού δρόμου που βρίσκεται ακριβώς έξω από την είσοδο της σήραγγας, από το οποίο ο οδηγός πρέπει να είναι σε θέση να διακρίνει τι υπάρχει μέσα στη σήραγγα. Το μήκος αυτής της ζώνης ισούται με την απόσταση ασφαλούς πέδησης (Stopping Distance ή S.D). Στην αρχή της ζώνης αυτής μετράται με την μέθοδο L20 η φωτεινότητα στην είσοδο της σήραγγας, όπως ορίζεται από τη CIE 88.

Ζώνη κατωφλίου (threshold zone): Πρόκειται για το αρχικό μέρος της σήραγγας, αμέσως μετά την είσοδο. Το μήκος της ζώνης αυτής είναι ίσο με την απόσταση ασφαλούς πέδησης(S.D).

Μεταβατική ζώνη (transition zone): Είναι το κομμάτι της σήραγγας που εκτείνεται από το τέλος της ζώνης κατωφλίου μέχρι την αρχή της εσωτερικής ζώνης. Στη μεταβατική ζώνη το επίπεδο φωτισμού μειώνεται σταδιακά από το επίπεδο φωτισμού που υπάρχει στο τέλος της ζώνης κατωφλίου έως το επίπεδο της εσωτερικής ζώνης.

Εσωτερική Ζώνη (interior zone): Πρόκειται για το κομμάτι της σήραγγας που ξεκινά από το τέλος της μεταβατικής ζώνης και φτάνει ως την αρχή της ζώνης εξόδου.

Ζώνη εξόδου (exit zone): Αφορά στο τελευταίο κομμάτι της σήραγγας, το οποίο εκτείνεται από το τέλος της εσωτερικής ζώνης μέχρι το πέρας της σήραγγας, και στο οποίο, κατά τη διάρκεια της ημέρας, η όραση του οδηγού που προσεγγίζει την έξοδο επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τη φωτεινότητα που σημειώνεται στο εξωτερικό της σήραγγας.



Εικόνα 2.1: Ο διαχωρισμός της σήραγγας σε ζώνες [20].

2.3 Τα μεγέθη της λαμπρότητας (L) και της έντασης φωτισμού (E) σε μια οδική σήραγγα

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα μεγέθη λαμπρότητας και έντασης φωτισμού που εξετάζονται κατά τη μελέτη φωτισμού μιας οδικής σήραγγας.[1]

Λαμπρότητα της ζώνης προσέγγισης L_{20} : Αφορά στη μέση λαμπρότητα που περιέχεται σε ένα κωνικό πεδίο, το οποίο εκτείνεται σε γωνία 20° , με κορυφή το μάτι του οδηγού που πλησιάζει τη σήραγγα, το οποίο στοχεύει στο κέντρο της εισόδου της σήραγγας. Η L_{20} προσδιορίζεται από σημείο το οποίο απέχει από την είσοδο της σήραγγας απόσταση ίση με την απόσταση ασφαλούς πέδησης (Safe Stopping Distance ή S.S.D) και βρίσκεται στο μέσον του οδοστρώματος.

Λαμπρότητα της ζώνης κατωφλίου L_{th} : Η μέση λαμπρότητα της επιφάνειας του δρόμου σε μια εγκάρσια λωρίδα, σε μια δεδομένη θέση της ζώνης κατωφλίου της σήραγγας.

Λαμπρότητα της μεταβατικής ζώνης L_{tr} : Η μέση λαμπρότητας της επιφάνειας του δρόμου σε μια εγκάρσια λωρίδα, σε μια δεδομένη θέση της μεταβατικής ζώνης της σήραγγας.

Λαμπρότητα της εσωτερικής ζώνης L_{int} : Η μέση λαμπρότητας της επιφάνειας του δρόμου σε μια εγκάρσια λωρίδα, σε μια δεδομένη θέση της εσωτερικής ζώνης της σήραγγας.

Κάθετη ένταση φωτισμού (vertical illuminance E_{v+}): Πρόκειται για την ένταση φωτισμού σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία, σε ύψος συνήθως 0,1 m πάνω από την επιφάνεια του δρόμου, σε κατακόρυφο επίπεδο προς την κατεύθυνση της εισερχόμενης κίνησης. Το ύψος 0,1 m πάνω από την επιφάνεια του δρόμου αντιπροσωπεύει το κέντρο ενός αντικειμένου 0,2 m x 0,2 m.

Συντελεστής αντίθεσης (contrast revealing coefficient q_c): Είναι το πηλίκο της λαμπρότητας της επιφάνειας του δρόμου προς την ένταση φωτισμού E_{v+} στο σημείο αυτό : $q_c = L / E_{v+}$ σε cd/m^2 .

Λόγος λαμπρότητας της ζώνης κατωφλίου (k): Είναι ο λόγος ανάμεσα στη λαμπρότητα της ζώνης κατωφλίου L_{th} και στη λαμπρότητα της ζώνης προσέγγισης L_{20} , $k = L_{th} / L_{20}$.

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.

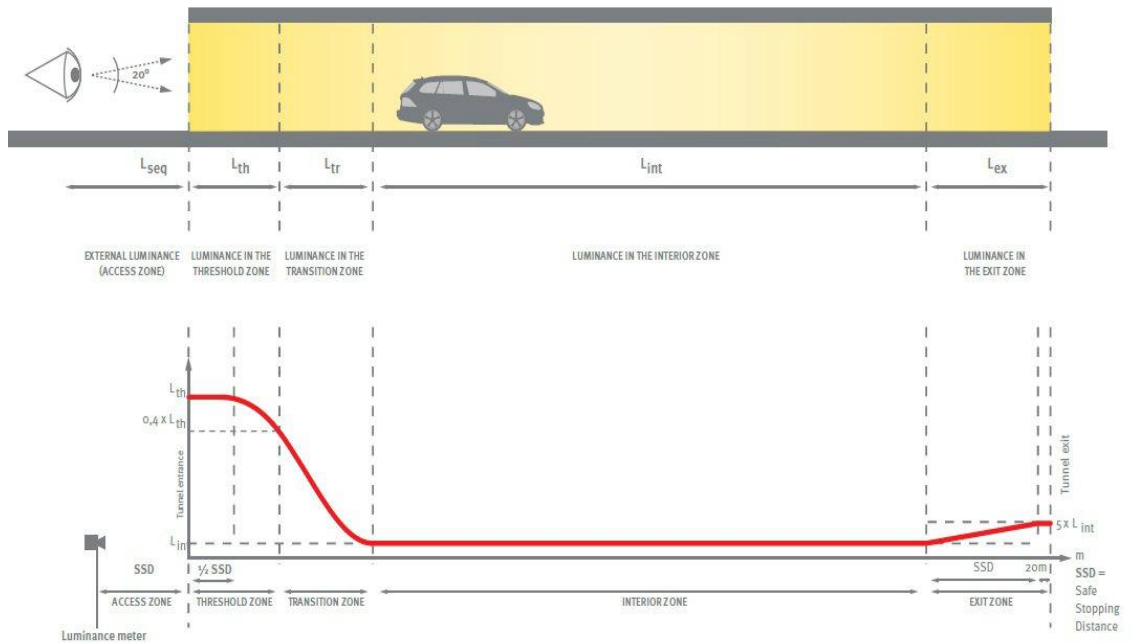
Διαμήκης ομοιομορφία (της λαμπρότητας της επιφάνειας του δρόμου) (U_l): Ο λόγος της χαμηλότερης προς την υψηλότερη λαμπρότητα της επιφάνειας του δρόμου που συναντάται κατά μήκος μιας γραμμής στο κέντρο κάθε λωρίδας του δρόμου.

2.4 Φωτισμός ημέρας και νύχτας

2.4.1 Συνθήκες φωτισμού ημέρας, εξωτερικά και εσωτερικά της σήραγγας

Ένας λόγος που καθιστά τον φωτισμό μιας οδικής σήραγγας ως μια ιδιαίτερη και απαιτητική μελέτη σε σχέση με τον φωτισμό των συμβατικών δρόμων, είναι η ανάγκη να είναι φωτισμένη και κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Τα υψηλά επίπεδα φωτισμού εξωτερικά της σήραγγας, κατά την ημέρα, απαιτούν υψηλά επίπεδα φωτισμού στην είσοδό της προκειμένου να αποφευχθεί το φαινόμενο της «μαύρης τρύπας» και η όραση του οδηγού να προσαρμοστεί ομαλά στο νέο, πιο «σκοτεινό», περιβάλλον. Η προσαρμογή είναι μια συνεχής διαδικασία που ακολουθεί τη σταδιακή μείωση των επιπέδων φωτεινότητας, κατά τη διάσχιση του τούνελ, μέχρις ότου σταθεροποιηθούν στην εσωτερική ζώνη, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 2.2: Η βαθμιαία πτώση των επιπέδων της λαμπρότητας κατά τη διάσχιση μιας σήραγγας [8].

Όσον αφορά στην έξοδο από τη σήραγγα, τα πράγματα είναι πιο απλά καθώς τα μάτια προσαρμόζονται γρήγορα σε υψηλότερα επίπεδα φωτισμού.

Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι η προς τα πίσω ορατότητα είναι εξίσου σημαντική και πρέπει να μελετάται, έτσι ώστε ο οδηγός που διασχίζει ή εξέρχεται της σήραγγας να έχει επαρκή ορατότητα των οχημάτων που ακολουθούν για ασφαλείς ελιγμούς.



Εικόνα 2.3: Το φαινόμενο της «μαύρης τρύπας».

2.4.2 Συνθήκες φωτισμού νύχτας

Κατά τη διάρκεια της νύχτας, το φαινόμενο της «μαύρης τρύπας» δεν υφίσταται καθώς οι τιμές της εξωτερικής λαμπρότητας είναι χαμηλές. Χαμηλότερα επίπεδα φωτισμού απαιτούνται κατά μήκος όλης της σήραγγας, η οποία αντιμετωπίζεται τη νύχτα ως μία ενιαία εσωτερική ζώνη. Εάν η σήραγγα αποτελεί τμήμα ενός φωτισμένου

δρόμου, τα επίπεδα λαμπρότητας κατά τη διάρκεια της νύχτας στο εσωτερικό της θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίσα με τα επίπεδα λαμπρότητας του δρόμου που προηγείται και έπεται αυτής.

Εάν η σήραγγα αποτελεί τμήμα ενός μη φωτισμένου δρόμου, τότε σύμφωνα με το βρετανικό πρότυπο [2], ισχύει:

- i. Για τούνελ μήκους μικρότερου των 25 μέτρων δεν είναι απαραίτητος ο νυχτερινός φωτισμός.
- ii. Για τούνελ μήκους μεταξύ των 25 και 200 μέτρων η απόφαση για την παροχή νυχτερινού φωτισμού είναι θέμα των αρχών του αυτοκινητόδρομου. Αν ωστόσο υπάρχει φωτισμός ημέρας, τότε παρέχεται και νυχτερινός φωτισμός.
- iii. Για τούνελ μήκους μεγαλύτερου των 200 μέτρων ο νυχτερινός φωτισμός είναι απαραίτητος, με επίπεδα λαμπρότητας τα οποία δεν θα πέφτουν κάτω από 1cd/m^2 .

2.5 Βασικοί παράμετροι σχεδιασμού του φωτισμού μιας σήραγγας

2.5.1 Ασφαλής Απόσταση Πέδησης (S.S.D.)

Ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες κατά τον σχεδιασμό φωτισμού είναι η ταχύτητα των διερχόμενων οχημάτων. Στην πράξη, οι δρόμοι και οι σήραγγες σχεδιάζονται ούτως ώστε η ταχύτητα να είναι ανάλογη της ροής των οχημάτων. Υψηλή ταχύτητα σχεδιασμού επιλέγεται για δρόμους μεγάλης κυκλοφοριακής ροής. Υψηλές ταχύτητες απαιτούν καλύτερη ορατότητα και κατά συνέπεια υψηλότερη φωτεινότητα.

Η απόσταση πέδησης (Stopping Distance) είναι θεωρητικά η απόσταση που πρέπει να διανύσει ένα όχημα που κινείται με την ταχύτητα σχεδιασμού μέχρι να ακινητοποιηθεί πλήρως, στην περίπτωση επιβράδυνσης λόγω ύπαρξης κινδύνου ή εμποδίου κατά την πορεία του.

Η S.D είναι απαραίτητη σχεδιαστική παράμετρος που υπολογίζεται ως άθροισμα των δύο παρακάτω τμημάτων του δρόμου :

- απόσταση x_0 , που καλύπτεται κατά τον χρόνο αντίδρασης του οδηγού
- απόσταση x , που καλύπτεται κατά τη διάρκεια του φρεναρίσματος του οχήματος και μέχρι να ακινητοποιηθεί εντελώς.

Ισχύει ότι: $x_0 = u \cdot t_0$ (Σχέση 2.1)

Όπου,

t_0 : ο χρόνος αντίδρασης του οδηγού σε sec (συνήθως 1s)

u : η ταχύτητα σχεδιασμού (design speed) σε m/s

Η απόσταση x υπολογίζεται από τη σχέση:

$$x = \frac{u^2}{2 \cdot g \cdot (f \pm s)} \quad (\text{Σχέση 2.2})$$

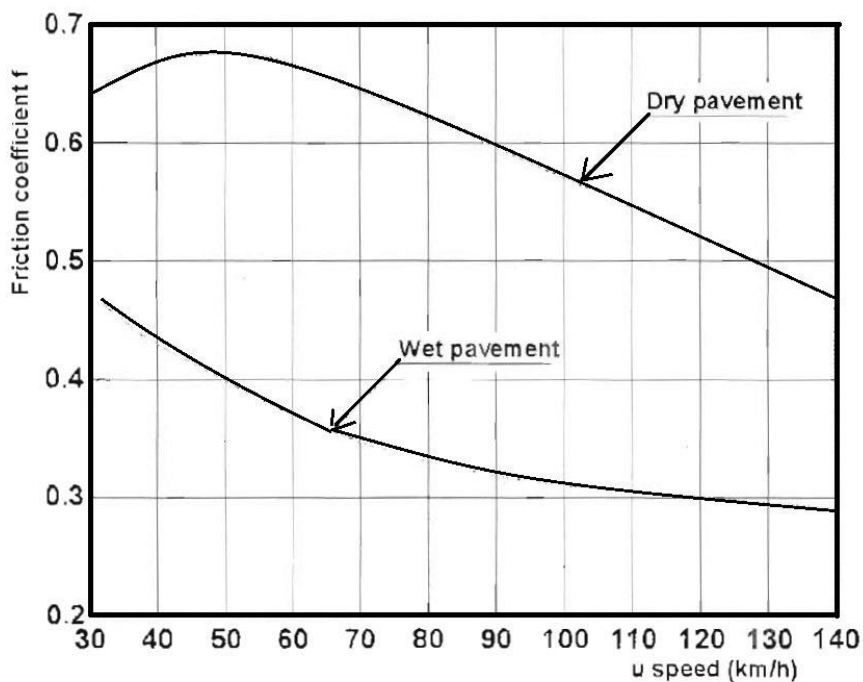
Όπου,

F: συντελεστής τριβής λάστιχου- οδοστρώματος

G: επιτάχυνση της βαρύτητας (9, 81m/s²)

S: κλίση οδοστρώματος (σε °)

Ο συντελεστής τριβής f, λαμβάνεται συναρτήσει της ταχύτητας σχεδιασμού από το παρακάτω διάγραμμα :



Εικόνα 2.4: Τυπικό διάγραμμα του συντελεστή τριβής συναρτήσει της ταχύτητας στις περιπτώσεις υγρού και στεγνού οδοστρώματος [1].

Η S.D προκύπτει από το άθροισμα των αποστάσεων 1 και 2 ως εξής:

$$SD = u \cdot t_0 + \frac{u^2}{2 \cdot g \cdot (f \pm s)} \quad (\text{m}) \quad (\text{Σχέση 2.3})$$

Σε απόσταση ίση με την απόσταση πέδησης μπροστά από την είσοδο της σήραγγας, λαμβάνονται οι μετρήσεις της εξωτερικής λαμπρότητας L20.

2.5.2 Διαχωρισμός σήραγγων μεγάλου και μικρού μήκους

Ο σχεδιασμός φωτισμού για σήραγγες μεγάλου και μικρού μήκους διαφέρει ανάλογα με τον βαθμό στον οποίο ο οδηγός του οχήματος που πλησιάζει, μπορεί να διακρίνει την έξοδο της σήραγγας όταν βρίσκεται σε απόσταση ίση με την S.D μπροστά από το στόμιό της. Η ικανότητα του να βλέπει κάποιος μέσα από τη σήραγγα εξαρτάται πρωτίστως από το μήκος της, αλλά και από άλλες σχεδιαστικές παραμέτρους (πλάτος, ύψος, οριζόντιες ή/και κάθετες καμπυλώσεις, κτλ).

Όταν το στόμιο εξόδου καταλαμβάνει μεγάλο μέρος του ορατού σκηνικού σε σχέση με το στόμιο εισόδου, τότε οι 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 μην φαίνονται. Κάτι τέτοιο μπορεί να συμβεί όταν η μικρή σήραγγα είναι σχετικά «μεγάλη» ή όταν η σήραγγα έχει καμπύλη τέτοια, που ένα μόνο μέρος της εξόδου να είναι ορατό ή όταν η έξοδος δεν είναι καθόλου ορατή.

Σήραγγες μικρότερες των 25 μέτρων, συνήθως, δεν χρειάζονται φωτισμό ημέρας. Τέτοιες απαντώνται συχνά όταν ένας δρόμος περνάει κάτω από έναν άλλον δρόμο ή από γραμμή τρένου, ή όταν ένα μικρό κομμάτι δρόμου καλύπτεται σε αστικές περιοχές.

Σήραγγες μεγαλύτερες των 200 μέτρων πρέπει πάντα να φωτίζονται την ημέρα, ώστε να αποφεύγονται προβλήματα οπτικής προσαρμογής των οδηγών.

Για σήραγγες μήκους μεταξύ 25 και 200 μέτρων δίνεται παρακάτω η LTP method (Look Through Percentage), σύμφωνα με την οποία καθορίζεται αν χρειάζονται τεχνητό φωτισμό ή όχι.

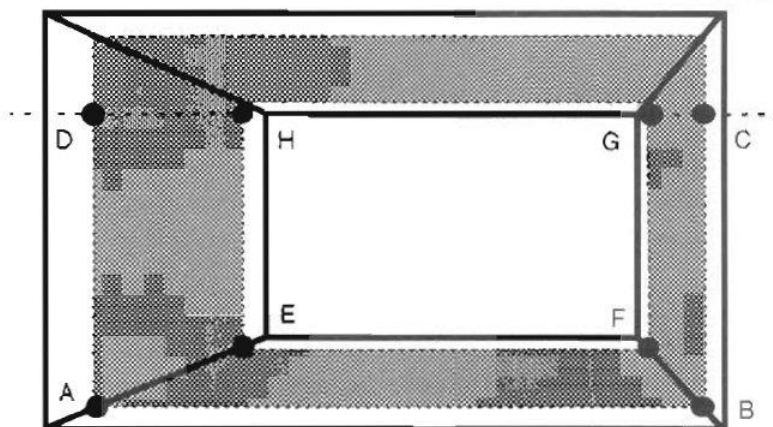
2.5.2.1 Μέθοδος «όρασης από άκρη σε άκρη» ή «Look Through Percentage Method_ LTP»

Τη μέθοδο «όρασης από άκρη σε άκρη» τη χρησιμοποιούμε για να καθορίσουμε την ανάγκη ύπαρξης τεχνητού φωτισμού μέσα σε μια σήραγγα και ορίζεται ως το ποσοστό της ορατής εξόδου σε σχέση με την ορατή είσοδο της σήραγγας.

Η αναλογία αυτή βασίζεται :

- στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σήραγγας (πλάτος, ύψος, μήκος)
- στις οριζόντιες και κάθετες καμπύλες της σήραγγας
- στην απόσταση πέδησης (SD)
- στην επίδραση του φωτός της ημέρας στα δύο στόμια (εισόδου –εξόδου)

$$\text{Ορίζεται ως: } LTP = 100 \cdot \frac{\text{εμβαδόν επιφάνειας } EFGH}{\text{εμβαδόν επιφάνειας } ABCD} \quad [1]$$



Εικόνα 2.5: Σκίτσο πρόσοψης σήραγγας για τον υπολογισμό του LTP [1].

Η παραπάνω μέτρηση γίνεται με κέντρο

- που απέχει 1,2 m από το επίπεδο του οδοστρώματος
- βρίσκεται στα μέσα της λωρίδας κυκλοφορίας (στην περίπτωση που υπάρχουν δύο λωρίδες, πρέπει να γίνεται υπολογισμός σε κάθε μια ξεχωριστά)
- και απέχει απόσταση ίση με την SD από το στόμιο εισόδου.

Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να σημειωθούν τα εξής:

- Η οροφή δεν λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό των επιφανειών, καθώς πρόκειται για μια περιοχή που δεν κρύβει πιθανά εμπόδια ή χρήστες.
- Η διείσδυση του φωτός της ημέρας μικραίνει το πρόδηλο οπτικό μήκος της σήραγγας και επομένως, μια φαινόμενη πύλη εισόδου και εξόδου θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί για να καθορίσουμε το LTP. Η φαινόμενη πύλη εισόδου βρίσκεται συνήθως στα 5m εντός της σήραγγας, ενώ η πύλη εξόδου στα 10m. Η διαφορά ανάμεσα σε μία πραγματική και μία φαινόμενη πύλη μπορεί να γίνει κατανοητή παρατηρώντας την επιφάνεια του δρόμου μιας σήραγγας από απόσταση. Από αυτή την απόσταση θα είναι εμφανές ότι η φωτεινότητα της επιφάνειας του οδοστρώματος στις πύλες είναι μεγαλύτερη από ότι μέσα στη σήραγγα. Στην πράξη, ωστόσο, είναι δύσκολο να υπολογιστούν ακριβώς οι εσωτερικές αποστάσεις, και οι τιμές των 5m και 10m αποτελούν καλές εκτιμήσεις και πρέπει να χρησιμοποιούνται υπό φυσιολογικές συνθήκες.

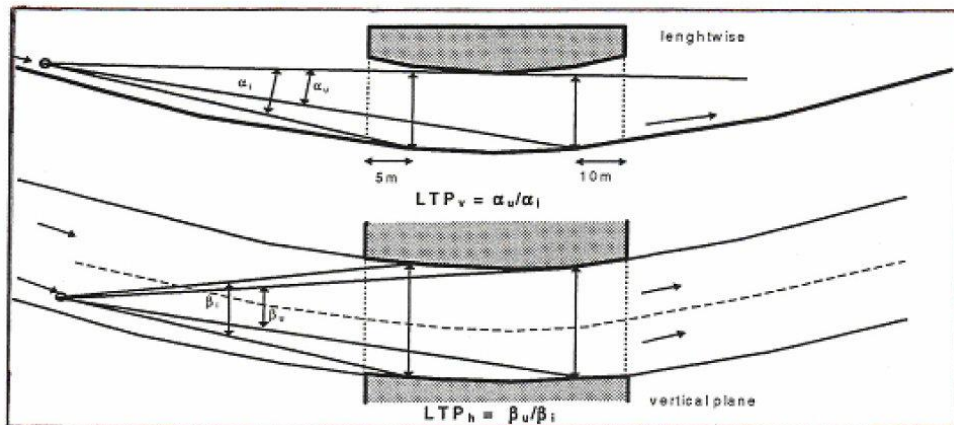
Η προοπτική κατάσταση της σήραγγας μπορεί να βασιστεί σε σχέδια ή σε φωτογραφίες μιας υπαρκτής σήραγγας. Σε ορισμένες περιπτώσεις, είναι δύσκολο να δημιουργηθεί το προοπτικό σχέδιο της σήραγγας, ειδικά όταν πρόκειται για σήραγγα με οριζόντιες και κάθετες καμπύλες. Σε αυτές τις περιπτώσεις παρέχεται αρκετή ακρίβεια, όταν το σκοτεινό πλαίσιο βασίζεται σε σχέδια της οριζόντιας και κάθετης τομής της σήραγγας.

Το LTP μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο [1]:

$$\begin{aligned} \text{LTP} &= 100 \cdot (\text{επιφάνεια EFGH}) / (\text{επιφάνεια ABCD}) = \\ &= 100 \cdot (EF \cdot FG) / (AB \cdot BC) = 100 \cdot (EF) / (AB) \cdot (FG) / (BC) = 100 \cdot (b_u / b_i) \cdot (a_u / a_i) \quad (\text{Σχέση 2.4}) \end{aligned}$$

Όπου, a_u και b_u , οι οπτικές γωνίες για το ορατό μέρος της φαινόμενης πύλης εξόδου και a_i και b_i , οι οπτικές γωνίες για τη φαινόμενη πύλη εισόδου.

Ο παραπάνω τύπος εξηγείται στην ακόλουθη εικόνα:



Εικόνα 2.6: Πλάγια και πανοραμική όψη μιας σήραγγας με οριζόντια και κάθετη καμπύλη. Υπολογισμός του LTP [1].

2.5.2.2 Χρήση του LTP

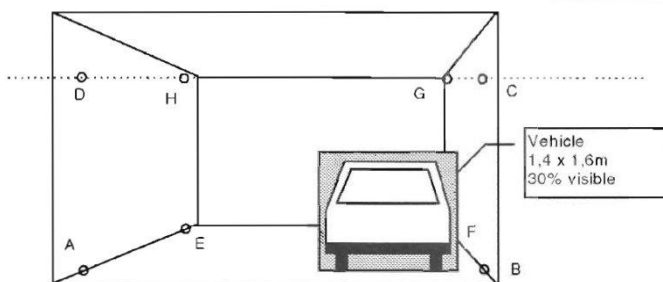
Μελέτες κατέληξαν στα εξής συμπεράσματα σχετικά με το LTP :

- αν $LTP < 20\%$ χρειάζεται πάντα τεχνητός φωτισμός ημέρας
- αν $LTP > 50\%$ δεν χρειάζεται τεχνητός φωτισμός ημέρας
- αν $20\% < LTP < 50\%$ ίσως χρειάζεται τεχνητός φωτισμός ημέρας

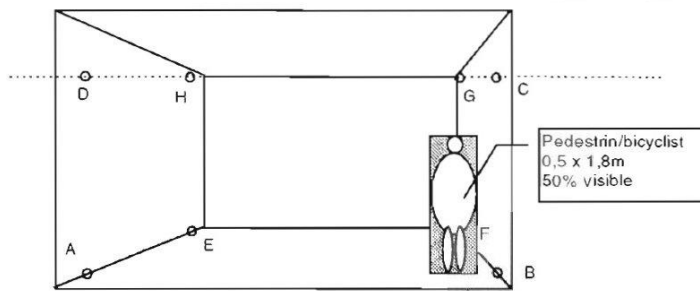
Στην περίπτωση που είναι $20\% < LTP < 50\%$, πρόσθετη μελέτη απαιτείται η οποία αφορά το ποσοστό της επιφάνειας των πιθανών αντικειμένων που είναι ορατό σε σχέση με την επιφάνεια εξόδου. Πιο συγκεκριμένα, θεωρώντας ως πιθανούς χρήστες της σήραγγας οχήματα και πεζούς ή/και ποδηλάτες, προκύπτει το παρακάτω συμπέρασμα:

Τεχνητός φωτισμός κατά τη διάρκεια της ημέρας χρειάζεται όταν:

- πάνω από το 30% της επιφάνειας ενός οχήματος δεν είναι ορατό μπροστά από την έξοδο και/ή
- πάνω από το 30% του πεζού ή ποδηλάτη δεν είναι ορατό μπροστά από την έξοδο.



Εικόνα 2.7: Τρόπος υπολογισμού για την απαίτηση ή όχι ημερήσιου τεχνητού φωτισμού, όταν $20\% < LTP < 50\%$ (περίπτωση αυτοκινήτου) [1].



Εικόνα 2.8: Τρόπος υπολογισμού για την απαίτηση ή όχι ημερήσιου τεχνητού φωτισμού, όταν $20\% <LTP < 50\%$ (περίπτωση πεζού ή δικυκλιστή) [1].

2.5.3 Η ψυχосύνθεση των οδηγών και τα προβλήματα όρασης

Η οπτική άνεση ενός οδηγού σε ένα τούνελ μειώνεται σημαντικά σε σχέση με τον ανοιχτό δρόμο, κυρίως όσον αφορά στην ικανότητα αντίληψης των αποστάσεων, των χρωμάτων και του χρόνου. Οι τοίχοι προκαλούν την αίσθηση της συστολής του χώρου, το οποίο τείνει να κάνει τους οδηγούς περισσότερο επιφυλακτικούς καθώς διασχίζουν το τούνελ. Παράλληλα, η αντίληψη του χρόνου μπορεί να αλλάξει καθώς οι οδηγοί διασχίζουν μια σήραγγα, και συγκεκριμένα μπορεί να αυξηθεί στο διπλάσιο της πραγματικής χρονικής διάρκειας, αίσθηση η οποία γίνεται ιδιαίτερα δυσάρεστη σε άτομα που πάσχουν από κλειστοφοβία. Απότομες και ξαφνικές μειώσεις στην ταχύτητα μπορούν να προκαλέσουν μείωση της κυκλοφοριακής χωρητικότητας, και κάποτε μοτοιλιάρισμα ή και ατυχήματα.

Έχει παρατηρηθεί ότι η οδήγηση μέσα σε μια οδική σήραγγα μπορεί να προκαλέσει στον οδηγό [10]:

- άγχος,
- αποπροσανατολισμό,
- κούραση ή υπνηλία λόγω της μονοτονίας του τοπίου, και
- ατυχήματα.

Τα παραπάνω μπορούν να επηρεάσουν την όραση οπτικά υγιών οδηγών, πόσο μάλλον οδηγών με προβλήματα όρασης και ιδίως ηλικιωμένων. Στατιστικές μελέτες έχουν δείξει ότι:

- Το 13% του πληθυσμού είναι άνω των 65,
- Το 25% του πληθυσμού είναι άνω των 50 (ηλικία στην οποία η όραση αρχίζει να μειώνεται),
- Σε 30 χρόνια ο άνω των 65 χρόνων πληθυσμός θα διπλασιαστεί,
- Το προσδόκιμο όριο ζωής διαρκώς ανεβαίνει.

Αξιοσημείωτο είναι ότι στους παραπάνω αριθμούς δεν περιλαμβάνεται το μεγάλο τμήμα του πληθυσμού των νέων που πάσχουν από προβλήματα όρασης.

Κατά τη διάσχιση ενός τούνελ την ημέρα, η μετάβαση από το φωτεινό εξωτερικό περιβάλλον σε ένα οπτικό περιβάλλον στο οποίο υπάρχουν διακυμάνσεις στα επίπεδα φωτισμού, απαιτεί γρήγορη οπτική προσαρμογή. Με την ηλικία η ταχύτητα οπτικής

προσαρμογής μειώνεται σημαντικά με αποτέλεσμα ένας ηλικιωμένος οδηγός να είναι σχεδόν τυφλός σε τέτοιες μεταβάσεις. Αντίθετα τη νύχτα, η μετάβαση από το σκοτεινό περιβάλλον του δρόμου στο φωτισμένο τούνελ μπορεί να προκαλέσει θάμβωση.

Εκτός από την οπτική προσαρμογή, από την ηλικία επηρεάζονται επίσης :

- Η ευαισθησία αντίθεσης, η οποία μειώνεται με την ηλικία και «χειροτερεύει» σε περιβάλλοντα με χαμηλό φωτισμό.
- Η αντίληψη κίνησης.
- Η αντίληψη χρώματος.
- Το οπτικό πεδίο, το οποίο περιορίζεται.
- Ο χρόνος αντίδρασης, ο οποίος αυξάνεται με την ηλικία.

Στατιστικές μελέτες έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι :

- Ένας άνθρωπος 40 χρόνων χρειάζεται 4 φορές περισσότερο φως για να βλέπει τόσο καλά όσο και ένας 20 χρονών, ενώ
- Ένας άνθρωπος 60 χρόνων χρειάζεται 8 φορές περισσότερο από έναν 20 χρονών.

Ένα σύστημα, λοιπόν, φωτισμού το οποίο βοηθά να ξεπεραστούν τα αρνητικά συναισθήματα που προκαλεί σε πολλούς οδηγούς η θέα μια οδικής σήραγγας, και βελτιώνει κατά το δυνατόν την οπτική άνεση και προσαρμογή τους, μπορεί αυτομάτως να συμβάλει στην οδική ασφάλεια και στην ομαλή διεξαγωγή της κυκλοφορίας ([22], [23]).

2.5.4 Κυκλοφοριακή σύνθεση

Η σύσταση της κυκλοφορίας σχετίζεται άμεσα με τον φωτισμό μιας οδικής σήραγγας από πολλές απόψεις :

- Το ποσοστό των φορτηγών.
- Την παρουσία/απουσία ποδηλάτων ή/και μοτοποδηλάτων.
- Την παρουσία/απουσία οδικών αρχών που να επιτρέπουν τη διέλευση από τη σήραγγα επικίνδυνων υλικών.

Ο φωτισμός θα πρέπει να συμμορφώνεται στις εκάστοτε συνθήκες, που είναι διαφορετικές για κάθε σήραγγα, και συνεπώς απαιτείται υψηλότερος και καλύτερης ποιότητας φωτισμός για τους τοίχους ή τον δρόμο όταν οι συνθήκες κρίνονται δύσκολες ή επικίνδυνες.

2.5.5 Άλλες σχεδιαστικές συνιστώσες φωτισμού

Σημαντικές σχεδιαστικές συνιστώσες φωτισμού για μια σήραγγα αποτελούν η σήμανση, τα υλικά και οι αποχρώσεις τους, καθώς και κάποιες γεωμετρικές ιδιαιτερότητες της κατασκευής [1]. Πιο αναλυτικά:

1. Πριν από την είσοδο στη σήραγγα

- Πρέπει να υπάρχουν ειδικές σημάνσεις ώστε να γίνεται ξεκάθαρο στους οδηγούς ότι πλησιάζουν σε σήραγγα.

- Οι προσόψεις των σηράγγων πρέπει να είναι κατασκευασμένες με σκούρα υλικά, ενώ ο περιβάλλον χώρος τους να σχεδιάζεται έτσι ώστε να περιορίζεται η θάμβωση από τον ήλιο υπό χαμηλή γωνία (κυρίως για τούνελ που έχουν ανατολικό - δυτικό προσανατολισμό) και να μην είναι ορατό μεγάλο ποσοστό ουρανού

- Το χρώμα του οδοστρώματος πρέπει επίσης να είναι σκούρο έως και την είσοδο της σήραγγας, ώστε να επιτυγχάνονται χαμηλότερα επίπεδα λαμπρότητας στη ζώνη πρόσβασης.

2. Μέσα στη σήραγγα.

- Εάν υπάρχουν ασυνέχειες, ράμπες και διασταυρώσεις στο γεωμετρικό σχέδιο, θα πρέπει να αντιμετωπίζονται ξεχωριστά και με ειδικό σύστημα φωτισμού.

- Το χρώμα του οδοστρώματος και των τοίχων θα πρέπει να είναι ανοιχτό .

- Υιοθέτηση και διατήρηση καλών κατευθυντήριων σημάνσεων κατά μήκος της σήραγγας κρίνεται απαραίτητη.

3. Στην έξοδο της σήραγγας.

- Όταν μια εκτυφλωτική κατάσταση αναμένεται ακριβώς έξω από την πύλη εξόδου θα πρέπει να μειωθεί η απευθείας έκθεση στο φως του ήλιου είτε μέσω του κατάλληλου σχεδιασμού είτε δενδροφύτεψης.

- Εάν υπάρχουν ασυνέχειες, ράμπες και διασταυρώσεις την έξοδο, θα πρέπει να αντιμετωπίζονται με τρόπο που να επιτρέπει στον εξερχόμενο οδηγό να έχει ορατότητα προς τα πίσω.

Κεφάλαιο 3^ο

Μέθοδοι υπολογισμού των φωτομετρικών απαιτήσεων σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ CR 14380

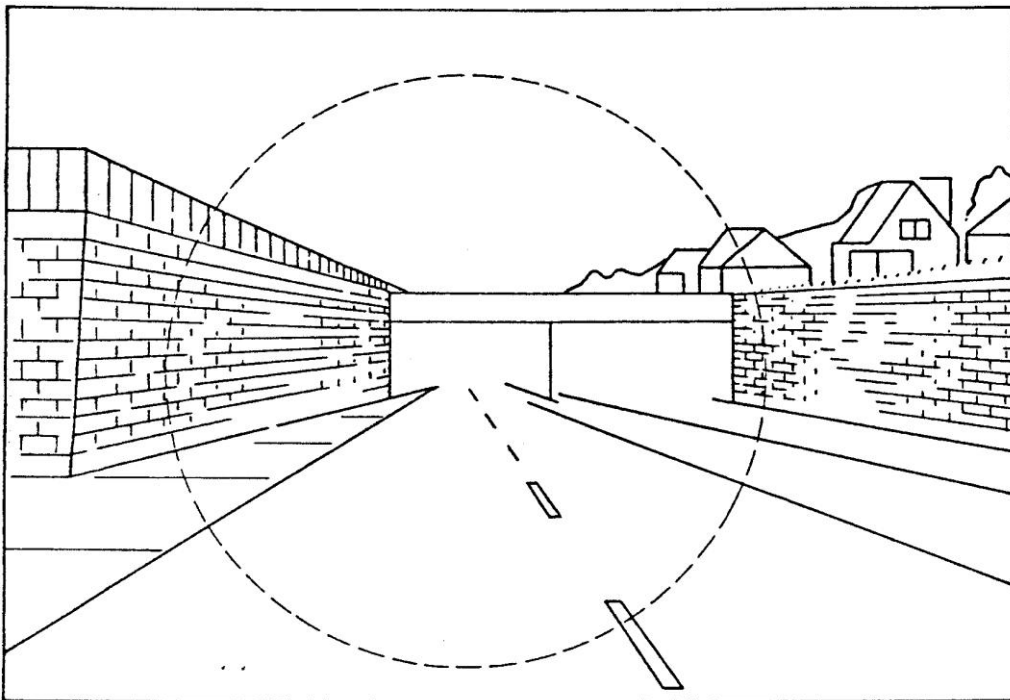
3.1 Εισαγωγή

Ιδιαίτερη σημασία στο σχεδιασμό του φωτισμού μιας σήραγγας έχει η γνώση των επιπέδων λαμπρότητας που επικρατούν στη ζώνη προσέγγισης (L_{20}), ώστε να καθοριστούν τα επίπεδα της λαμπρότητας στη ζώνη κατωφλίου.

Ακολουθεί η παρουσίαση μιας από τις επικρατέστερες μεθόδους για τον υπολογισμό της εξωτερικής λαμπρότητας L_{20} .

3.2 Μέθοδος υπολογισμού του L_{20}

Αυτή η μέθοδος βασίζεται στη μεθοδολογία για τον υπολογισμό της L_{20} , όπως αυτή περιγράφεται στο πρότυπο CIE 88-1990 [28].



Εικόνα 3.1: Άποψη της εισόδου της σήραγγας μέσα από το κωνικό πεδίο των 20^ο.

Προκειμένου να αποφευχθεί το φαινόμενο της μαύρης τρύπας και να αναπτυχθούν οι συνθήκες ελάχιστης λαμπρότητας που θα εξασφαλίζουν επαρκή ορατότητα των αντικειμένων στη ζώνη κατωφλίου, η λαμπρότητα στη ζώνη κατωφλίου θα πρέπει να λαμβάνει συγκεκριμένες κατώτατες τιμές. Αυτές οι τιμές εξαρτώνται από τη λαμπρότητα στη ζώνη προσέγγισης, L_{20} . Στην πράξη είναι απαραίτητο να διακρίνεται το πρώτο μισό της ζώνης κατωφλίου, όπου η λαμπρότητα του δρόμου είναι σταθερή και ονομάζεται λαμπρότητα κατωφλίου L_{th} . Η λαμπρότητα κατωφλίου εκφράζεται ως ποσοστό k της L_{20} :

$$L_{th} = k * L_{20}$$

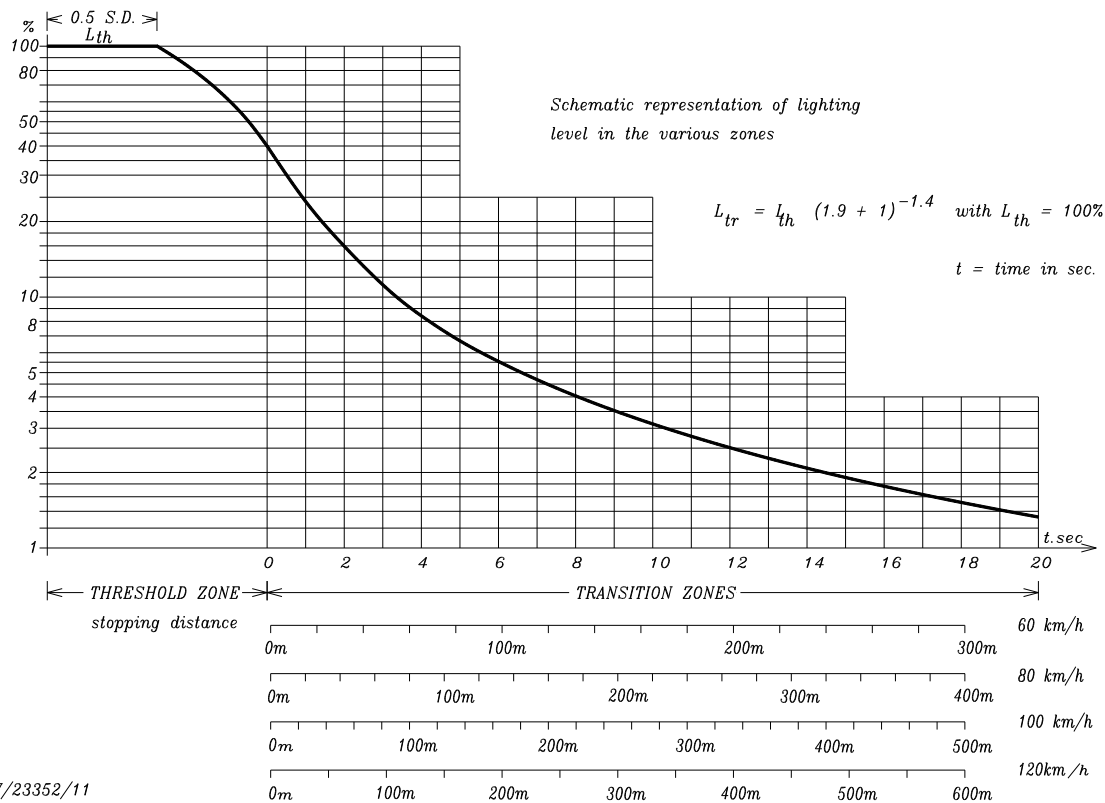
Η ελάχιστη τιμή του k εξαρτάται από την ταχύτητα, σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 3.1: Συντελεστής λαμπρότητας της ζώνης κατωφλίου k για διάφορες ταχύτητες.

| Ταχύτητα(km/h) | $K=L_{th} / L_{20}$ |
|-----------------|---------------------|
| <=60 km/h | 0.05 |
| 80 km/h | 0.06 |
| 120 km/h | 0.10 |

3.2.1 Επίπεδα λαμπρότητας στις διάφορες ζώνες της σήραγγας

Το συνολικό μήκος της ζώνης κατωφλίου θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίσο με την απόσταση ασφαλούς πέδησης. Κατά το πρώτο ήμισυ της απόστασης, η λαμπρότητα θα πρέπει να είναι ίση με την L_{th} . Από το ήμισυ της απόστασης ασφαλούς πέδησης και μετά, το επίπεδο φωτισμού θα πρέπει σταδιακά και γραμμικά να μειώνεται σε μια τιμή, που στο τέλος της ζώνης κατωφλίου θα γίνει ίση με το 0,4 L_{th} . Η σταδιακή μείωση κατά το δεύτερο μισό του μήκους της ζώνης κατωφλίου μπορεί επίσης να γίνεται σε βήματα. Η ζώνη μετάβασης ξεκινά από το τέλος της ζώνης κατωφλίου ($t=0$). Η μεταβολή της λαμπρότητας στις διάφορες ζώνες της σήραγγας ακολουθεί την καμπύλη που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



PV/23352/11

Σχήμα 3.1: Διάγραμμα μείωσης λαμπρότητας στις διάφορες ζώνες της σήραγγας (CIE No 88-1990).

3.2.2 Φωτισμός της εσωτερικής ζώνης και φωτισμός των τοίχων

Η μέση λαμπρότητα του δρόμου της εσωτερικής ζώνης μιας σήραγγας δίνεται παρακάτω σαν συνάρτηση της απόστασης πέδησης SD και της κυκλοφοριακής ροής.

Πίνακας 3.2: Επίπεδα κυκλοφοριακής ροής.

| Κυκλοφοριακή ροή | Δρόμος μονής κυκλοφορίας (οχήματα/ώρα/λωρίδα) | Δρόμος διπλής κυκλοφορίας (οχήματα/ώρα/λωρίδα) |
|------------------|---|--|
| Υψηλή | >1500 | >400 |
| Μέση | 500-1500 | 100-400 |
| Χαμηλή | <500 | <100 |

Πίνακας 3.3 : Επίπεδα λαμπρότητας της εσωτερικής ζώνης.

| Απόσταση πέδησης (Stopping Distance SD) | Κυκλοφοριακή ροή | | |
|---|---------------------|----------------------|----------------------|
| | Χαμηλή | Μέση | Υψηλή |
| 160 m | 5 cd/m ² | 10 cd/m ² | 15 cd/m ² |
| 100 m | 2 cd/m ² | 4 cd/m ² | 6 cd/m ² |
| 60 m | 1 cd/m ² | 2 cd/m ² | 3 cd/m ² |

Οι τοίχοι στις σήραγγες αποτελούν μέρος του φόντου πάνω στο οποίο ανιχνεύονται πιθανά εμπόδια, και συνεισφέρουν στην προσαρμογή και στην οπτική καθοδήγηση. Επομένως η λαμπρότητα των τοίχων αποτελεί ένα σημαντικό στοιχείο για την ποιότητα του φωτισμού. Η μέση λαμπρότητα των τοίχων σε ύψος μέχρι 2 m, θα πρέπει να είναι περίπου ίση με τη μέση λαμπρότητα της επιφάνειας του δρόμου στο αντίστοιχο σημείο.

3.2.3 Ομοιομορφία της λαμπρότητας στην επιφάνεια του δρόμου και των τοίχων

Καλή ομοιομορφία λαμπρότητας θα πρέπει να παρέχεται τόσο στην επιφάνεια του δρόμου όσο και στους τοίχους μέχρι το ύψος των 2 m. Τα χαμηλότερα τμήματα των τοίχων λειτουργούν σαν φόντο για την κυκλοφορία των οχημάτων, όπως ακριβώς και η επιφάνεια του δρόμου. Έτσι και τα δύο πρέπει να αντιμετωπίζονται με τον ίδιο τρόπο. Συνίσταται ο λόγος της ελάχιστης προς τη μέση λαμπρότητα της επιφάνειας του δρόμου U_0 και των τοίχων μέχρι το ύψος των 2 m σε καθαρές συνθήκες να είναι 0,4. Επίσης, συνίσταται η διαμήκης ομοιομορφία στο κέντρο της κάθε κυκλοφοριακής λωρίδας να είναι 0,6.

Πίνακας 3.4: Ελάχιστες απαιτούμενες τιμές ομοιομορφίας για οδόστρωμα και τοίχους.

| Ελάχιστες απαιτούμενες τιμές ομοιομορφίας για οδόστρωμα και τοίχους | |
|---|-------|
| U _o | ≥ 0,4 |
| U _i | ≥ 0,6 |

3.2.4 Φωτισμός νύχτας

Κατά τη διάρκεια της νύχτας ολόκληρη η σήραγγα αντιμετωπίζεται σαν μια ενιαία εσωτερική ζώνη.

- Εάν η σήραγγα αποτελεί τμήμα ενός φωτισμένου δρόμου, η ποιότητα του φωτισμού μέσα στη σήραγγα θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ισοδύναμη με τα επίπεδα φωτισμού, τις ομοιομορφίες και τη θάμβωση του δρόμου προσέγγισης. Η λαμπρότητα κατά τη διάρκεια της νύχτας δε θα πρέπει να είναι υψηλότερη από τη λαμπρότητα της εσωτερικής ζώνης κατά τη διάρκεια της ημέρας.
- Εάν η σήραγγα αποτελεί τμήμα ενός μη φωτισμένου δρόμου, η μέση λαμπρότητα της επιφάνειας του δρόμου στο εσωτερικό της σήραγγας δε θα πρέπει να είναι κάτω από 1 cd/m², η ολική ομοιομορφία τουλάχιστον 40% και η διαμήκης ομοιομορφία τουλάχιστον 60%.

3.2.5 Φωτεινή Πάλμωση (Flicker Effect)

Η αίσθηση του flicker- του τρεμοσβύσματος δηλαδή του φωτισμού – μπορεί να προκαλέσει οπτική δυσφορία σε ορισμένους οδηγούς, ενώ σε κάποιους να προκαλέσει ακόμη και επιληπτικές κρίσεις. Οφείλεται σε περιοδικές μεταβολές στη λαμπρότητα στο οπτικό πεδίο. Η οδήγηση μέσα σε μια σήραγγα με διάσπαρτα, μη σωστά τοποθετημένα φωτιστικά, ή η διέλευση μέσα από ζώνες που διαθέτουν γρίλιες, μπορεί να κάνει πιο έντονο το φαινόμενο της ζέβρας.

Ο βαθμός της δυσφορίας εξαρτάται από :

- Τη συχνότητα της πάλμωσης (flicker frequency f.f)
- Το ρυθμό μεταβολής της λαμπρότητας
- Τη συνολική διάρκεια της πάλμωσης

Το φαινόμενο της φωτεινής πάλμωσης πρέπει να ελαχιστοποιείται, παρέχοντας μεγαλύτερη ασφάλεια και άνεση για τους οδηγούς. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί εξασφαλίζοντας ότι:

- Η διάρκεια της φωτεινής πάλμωσης δεν θα ξεπερνά τα 20 sec
- Η συχνότητα φωτεινής πάλμωσης θα πρέπει να είναι εκτός του διαστήματος 2,5 Hz έως 15 Hz, όπου,

$$f.f = \frac{\text{ταχύτητα μελέτης } \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)}{\text{απόσταση μεταξύ φωτιστικών σωμάτων(m)}}$$

3.2.6 Θάμβωση (Glare)

Καθώς η θάμβωση μειώνει την ορατότητα, είναι πολύ σημαντικό να την περιορίζουμε. Στον φωτισμό σήραγγων, το μέγεθος που αφορά στον περιορισμό της θάμβωσης είναι η «προσαύξηση κατωφλίου» ή Threshold Increment (T.I.) και πρέπει να ισχύουν τα παρακάτω:

Πίνακας 3.4: Ζώνες σήραγγας όπου πρέπει να ισχύει T.I. ≤ 15%.

| T.I. ≤ 15% | Ζώνη Σήραγγας |
|----------------|-----------------------|
| Κατά την ημέρα | Κατωφλίου & Εσωτερική |
| Κατά τη νύχτα | Για όλες τις ζώνες |

*Για τη ζώνη εξόδου, δεν δίνεται κανένας περιορισμός.

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

$$T.I.=65L_v/L_{road}^{1.05} \text{ εάλ } L_{road}< 5 \text{ cd/m}^2$$

$$T.I.=95L_v/L_{road}^{1.05} \text{ εάλ } L_{road}\geq 5 \text{ cd/m}^2$$

Όπου,

L_{road} : η μέση λαμπρότητα της επιφάνειας του δρόμου

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

3.2.7 Καθορισμός της λαμπρότητας στη ζώνη προσέγγισης

Εάν είναι διαθέσιμη μια τρισδιάστατη άποψη της εισόδου της σήραγγας, ο υπολογισμός του L_{20} επιτυγχάνεται από ένα σκαρίφημα του περιβάλλοντα χώρου της εισόδου της σήραγγας και υπολογίζεται με τη βοήθεια της παρακάτω εξίσωσης:

$$L_{20} = \gamma L_c + \rho L_R + \varepsilon L_E + \tau L_{th} \quad (3.1)$$

Όπου,

γ = % του ουρανού

L_c = η λαμπρότητα του ουρανού

ρ = % του δρόμου

L_R = Λαμπρότητα του δρόμου

ε = % του περιβάλλοντα χώρου

L_E = Λαμπρότητα του περιβάλλοντα χώρου

τ = % της εισόδου της σήραγγας

L_{th} = η λαμπρότητα της ζώνης κατωφλίου της σήραγγας

και $\gamma + \rho + \varepsilon + \tau = 1$

Οι τιμές των L_c , L_R , L_E εκφρασμένες σε kcd/m^2 που παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περίπτωση που δεν είναι διαθέσιμες οι ακριβείς τοπικές συνθήκες.

Πίνακας 3.5: Τιμές λαμπρότητας για διάφορες επιφάνειες.

| Κατεύθυνση οδήγησης (Β. Ημισφαίριο) | L_c (ουρανός) kcd/m^2 | L_R (δρόμος) kcd/m^2 | L_E (περιβάλλον) kcd/m^2 | | | |
|-------------------------------------|---------------------------|--------------------------|------------------------------|--------|------------------|--------|
| | | | Βράχος | Κτίρια | Χιόνι | Λιβάδι |
| Βορράς | 8 | 3 | 3 | 8 | 15 (Β) 15 (Π) | 2 |
| Ανατολή-Δύση | 12 | 4 | 2 | 6 | 10(Β) 15(Π) | 2 |
| Νότος | 16 | 5 | 1 | 4 | 5(Β) 15(π) | 2 |

(Β): Βραχώδης χώρα με κατεξοχήν οξείες επιφάνειες

(Π): Πεδινή χώρα, πολύ ή λίγο οριζόντια

3.3 Μέθοδος υπολογισμού L20 σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ CR 14380 με βάση την κυκλοφοριακή ροή

Η μέθοδος αυτή εισηγείται ένα σύστημα κατηγοριοποίησης, ώστε να δοθούν κάποιες τιμές-κριτήρια για λειτουργικές παραμέτρους, όπως η ροή της κυκλοφορίας, το είδος της κυκλοφορίας, η οπτική καθοδήγηση και η άνεση κατά την οδήγηση, και με βάση αυτές ορίζονται νέα επίπεδα λαμπρότητας στις ζώνες της σήραγγας.

3.3.1 Τιμές των διάφορων λειτουργικών παραμέτρων της σήραγγας

Η νέα μέθοδος υπολογισμού του L20 με βάση την κυκλοφοριακή βαρύτητα βασίζεται στα χαρακτηριστικά χρήσης της σήραγγας, όπως είναι:

- Η κυκλοφοριακή ροή
- Το είδος και η σύσταση της κυκλοφορίας
- Η οπτική καθοδήγηση

Προκειμένου να βρεθεί η κατάλληλη κατηγορία φωτισμού της σήραγγας, θεωρούμε τις εξής δύο περιπτώσεις ως προς το είδος και τη σύσταση της κυκλοφορίας:

A: μηχανοκίνητα οχήματα

M: μικτή κίνηση, συμπεριλαμβανομένων ποδηλάτων

Η πυκνότητα της κυκλοφοριακής ροής ταξινομείται σε τρία επίπεδα σύμφωνα με τον πίνακα 3.2 επιπέδων της κυκλοφοριακής ροής. Συνδυάζοντας τα παραπάνω προκύπτουν τέσσερις κατηγορίες σηράγγων:

Πίνακας 3.6: Κατηγορίες φωτισμού σηράγγων.

| Πυκνότητα Κυκλοφορίας | Υψηλή | | Μέτρια | | Χαμηλή | |
|-----------------------|-------|---|--------|---|--------|---|
| Είδος κίνησης | M | A | M | A | M | A |
| Κλάση σήραγγας | 4 | 3 | 3 | 2 | 2 | 1 |

Γίνεται η παραδοχή ότι η λαμπρότητα στη ζώνη προσέγγισης έχει υπολογιστεί με τη μέθοδο L20 που περιγράψαμε στην ενότητα 3.2.

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές του λόγου $k=L_{th}/L_{20}$. Η τιμή του k εξαρτάται από την απόσταση πέδησης (S.D.) και την κλάση της σήραγγας.

Πίνακας 3.7: Προτεινόμενες τιμές του $k=L_{th}/L_{20}$ για διάφορες αποστάσεις πέδησης και κλάσεις σηράγγων.

| S.D. (m) | 60 | 100 | 160 |
|----------------|--|------|------|
| Κλάση σηράγγων | | | |
| 4 | 0,05 | 0,06 | 0,10 |
| 3 | 0,04 | 0,05 | 0,07 |
| 2 | 0,03 | 0,04 | 0,05 |
| 1 | Χωρίς απαιτήσεις (μόνο επαρκής φωτισμός) | | |

Οι τιμές της λαμπρότητας του δρόμου στην εσωτερική ζώνη δίνονται στον παρακάτω πίνακα για διάφορες αποστάσεις πέδησης και κλάσεις σήραγγας:

Πίνακας 3.8: Μέση λαμπρότητα της επιφάνειας του δρόμου στην εσωτερική ζώνη σε cd/m^2 .

| S.D. (m) | 60 | 100 | 160 |
|-----------------------|------------------|-----|-----|
| Κλάση σηράγγων | | | |
| 4 | 3 | 6 | 10 |
| 3 | 2 | 4 | 6 |
| 2 | 1.5 | 2 | 4 |
| 1 | Χωρίς απαιτήσεις | 0.5 | 1.5 |

Η ομοιομορφία της λαμπρότητας του δρόμου πρέπει να είναι συμβατή με τις τιμές που δίνονται στον επόμενο πίνακα για διάφορες κλάσεις σηράγγων.

Πίνακας 3.9: Ελάχιστες τιμές ομοιομορφίας της επιφάνειας του δρόμου στη ζώνη κατωφλίου, στην εσωτερική ζώνη και στη ζώνη εξόδου.

| Κλάση σήραγγας | U _o (ολική ομοιομορφία) | U _l (διαμήκης ομοιομορφία) |
|----------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| 4 | 0.4 | 0.7 |
| 3 | 0.4 | 0.6 |
| 2 | 0.3 | 0.5 |
| 1 | - | - |

Για σήραγγες της κλάσης 4, η μέση λαμπρότητα στους τοίχους μέχρι ύψος 2 m θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με τη μέση λαμπρότητα του οδοστρώματος στο συγκεκριμένο σημείο. Για σήραγγες της κλάσης 2 και 3, η μέση λαμπρότητα στους τοίχους θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με το 60% της λαμπρότητας του οδοστρώματος στο συγκεκριμένο σημείο. Για σήραγγες της κλάσης 1 δε δίνονται απαιτήσεις λαμπρότητας, ωστόσο προτείνεται η ένταση φωτισμού στους τοίχους να μην είναι κάτω από το 25% αυτής του οδοστρώματος.

Όσον αφορά τις απαιτήσεις της θάμβωσης και της φωτεινής πάλμωσης είναι ίδιες με αυτές που ισχύουν και στη μέθοδο υπολογισμού του L20, όπως περιγράφονται στην ενότητα 3.2.

Κεφάλαιο 4^ο

Το σύστημα φωτισμού σε μια οδική σήραγγα και η τεχνολογία LED

4.1 Τα φωτιστικά σώματα μιας οδικής σήραγγας

4.1.1 Εισαγωγή

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 που χρησιμοποιείται. Στο φωτισμό οδικών σιηράγγων επικρατεί η χρήση δύο τύπων φωτιστικών σωμάτων, τα φωτιστικά συμμετρικής και τα φωτιστικά ασύμμετρης φωτεινής δέσμης. Οι όροι «συμμετρική» και «ασύμμετρη» αναφέρονται στην κατανομή της φωτεινής έντασης των φωτιστικών που χρησιμοποιούνται για τα δύο συστήματα. Ο τύπος του συστήματος φωτισμού καθορίζεται από τον συντελεστή αντίθεσης Q_c , δηλαδή το λόγο της λαμπρότητας προς την κατακόρυφη ένταση φωτισμού L/E_v , όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα :

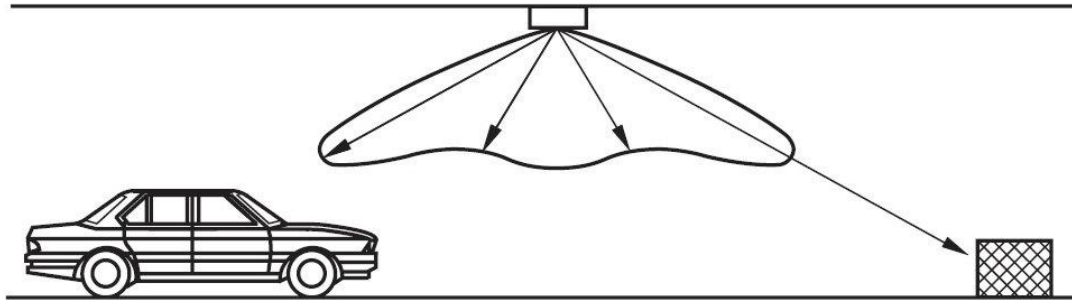
Πίνακας 4.1: Συντελεστής αντίθεσης, Q_c .

| Σύστημα Φωτισμού | Συντελεστής Αντίθεσης Q_c |
|--------------------|-----------------------------|
| Συμμετρικό σύστημα | ≤ 0.2 |
| Ασύμμετρο σύστημα | ≥ 0.6 |

Σε κάθε περίπτωση, πρέπει να υπολογίζεται ο συντελεστής αντίθεσης q_c και να ελέγχεται η τήρηση των παραπάνω ορίων για το εκάστοτε χρησιμοποιούμενο σύστημα, ώστε να διασφαλίζεται ότι είναι σύμφωνο με τις απαιτήσεις (CIE 88).

4.1.2 Το συμμετρικό σύστημα φωτισμού

Ένα συμμετρικό σύστημα φωτισμού χρησιμοποιεί φωτιστικά με κατανομή φωτεινής έντασης συμμετρική ως προς το C-επίπεδο 90/270 (το επίπεδο το οποίο είναι κάθετο στην κατεύθυνση της κυκλοφορίας), με αποτέλεσμα η λαμπρότητα του δρόμου να είναι ίδια προς οποιαδήποτε κατεύθυνση κι αν κινείται ο οδηγός.

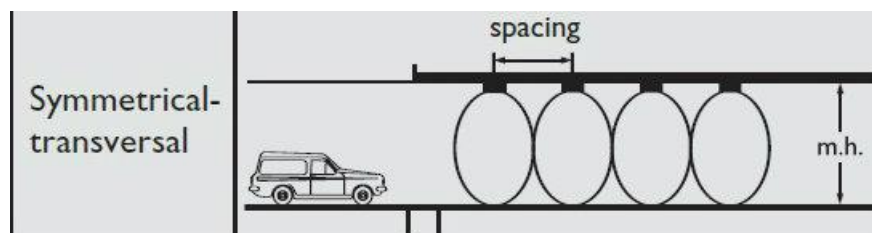


Εικόνα 4.1: Το συμμετρικό σύστημα φωτισμού [15].

Ο συμμετρικός φωτισμός μπορεί να είναι εγκάρσιος ή διαμήκης:

1. Συμμετρικός εγκάρσιος φωτισμός

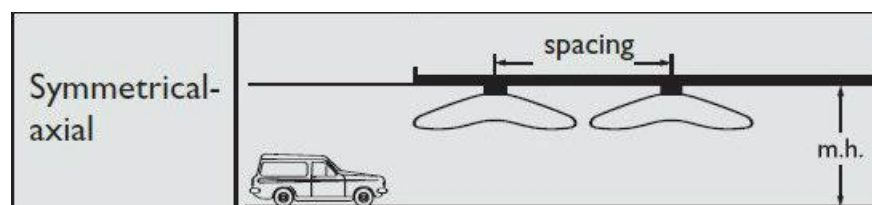
Το φως κατευθύνεται εγκάρσια προς τον άξονα της σήραγγας. Τα φωτιστικά τοποθετούνται σε μικρές αποστάσεις μεταξύ τους και σχηματίζονται συνεχείς σειρές δίνοντας πολύ καλή οπτική καθοδήγηση, ενώ παράλληλα δεν δημιουργούν σκιές μεταξύ των αυτοκινήτων. Είναι ο **επικρατέστερος** τύπος φωτιστικών σωμάτων **για οδικές σήραγγες**.



Εικόνα 4.2: Συμμετρικός εγκάρσιος φωτισμός [9].

2. Συμμετρικός διαμήκης φωτισμός

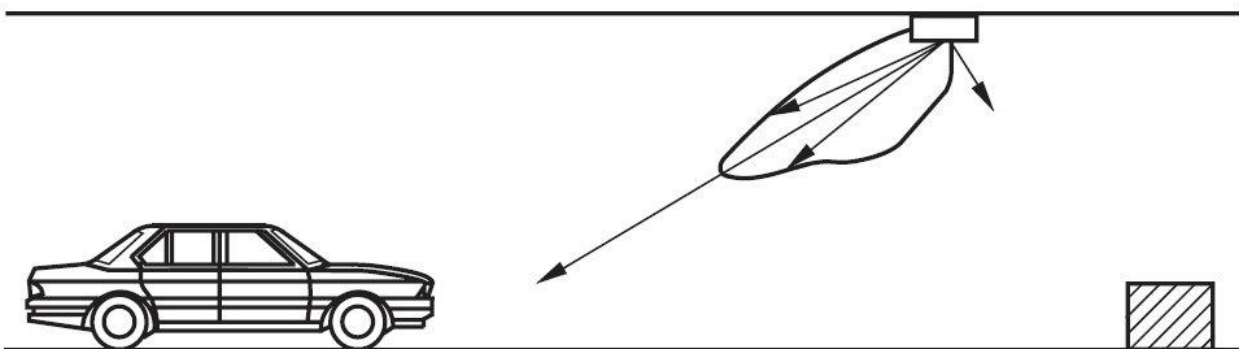
Το φως κατευθύνεται παράλληλα προς τον άξονα της σήραγγας προς τις δύο κατευθύνσεις προσφέροντας υψηλή απόδοση και επιτρέποντας την τοποθέτηση των φωτιστικών σε μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ τους. Χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο **σε υπόγειες διαβάσεις**.



Εικόνα 4.3: Συμμετρικός διαμήκης φωτισμός [9].

4.1.3 Το ασύμμετρο σύστημα φωτισμού

Στο συμμετρικό σύστημα φωτισμού, το φως κατευθύνεται παράλληλα προς τον άξονα της σήραγγας, αλλά αντίθετα με τη ροή της κυκλοφορίας, προσφέροντας υψηλή απόδοση και δημιουργώντας έντονες αντιθέσεις φωτισμού (counter beam). Ο ασύμμετρος φωτισμός χρησιμοποιείται κυρίως στις πρώτες ζώνες, σε σήραγγες μεγάλου μήκους, προκαλώντας αυξημένη αρνητική αντίθεση σε αντικείμενα του δρόμου και βελτιώνοντας την οπτική προσαρμογή, καθώς η ένταση φωτισμού στα επίπεδα τα οποία βλέπουν οι εισερχόμενοι οδηγοί είναι χαμηλή.



Εικόνα 4.4 : Το ασύμμετρο σύστημα φωτισμού (counter beam).[15]

Σε ορισμένες περιπτώσεις θετική αντίθεση μπορεί να είναι επιθυμητή στη ζώνη εξόδου, όταν η έξοδος είναι ορατή. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ασύμμετρο σύστημα φωτισμού, που όμως η κατεύθυνση της δέσμης είναι προς την κατεύθυνση της κυκλοφορίας και ονομάζεται "pro-beam". Ωστόσο αυτή η τεχνική δεν συνιστάται, καθώς μπορεί να δημιουργήσει έντονη ανομοιομορφία μεταξύ της ζώνης εξόδου και του τμήματος του δρόμου που ακολουθεί, ενώ είναι απαγορευτικός σε περιπτώσεις δρόμων διπλής κατεύθυνσης, όπου φωτιστικά counter beam στην είσοδο της μιας κατεύθυνσης θα λειτουργούν σαν pro beam στην έξοδο της αντίθετης κατεύθυνσης.

4.1.4 Ο τύπος των φωτιστικών σε σχέση με τη ζώνη και το είδος της σήραγγας

Στις σήραγγες μονής κατεύθυνσης ο φωτισμός των ζωνών κατωφλίου και προσαρμογής επιτυγχάνεται με φωτιστικά ασύμμετρου τύπου, με την μέγιστη ένταση αντίθετη προς την κατεύθυνση κυκλοφορίας των οχημάτων, ενώ ο φωτισμός εσωτερικής ζώνης επιτυγχάνεται με συμμετρικού τύπου φωτιστικά. Σε περίπτωση, όμως, που στην τελευταία από τις ζώνες προσαρμογής δεν είναι δυνατός ο περιορισμός του flicker effect (κατά CIE 88/90), η υπόψη ζώνη θα φωτίζεται από συμμετρικά φωτιστικά. Συμμετρικός φωτισμός χρησιμοποιείται

επίσης σε όλες τις ζώνες σηράγγων μικρού μήκους και σηράγγων των οποίων η ταχύτητα διέλευσης έχει οριστεί χαμηλή.

Στις σήραγγες διπλής κατεύθυνσης χρησιμοποιούνται αποκλειστικά φωτιστικά συμμετρικού τύπου για λόγους ομοιομορφίας και αποφυγής φαινομένων θάμβωσης και σκιάσεων στους οδηγούς των δύο κατευθύνσεων.

Πίνακας 4.1: Είδος φωτισμού συναρτήσει της ζώνης και της κυκλοφοριακής λειτουργίας της σήραγγας.

| Κυκλοφοριακή λειτουργία σήραγγας | Συμμετρικός φωτισμός (symmetric) | Ασύμμετρος φωτισμός (counter beam) |
|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| Μονής κατεύθυνσης | Εσωτερική ζώνη | Ζώνες κατωφλίου και προσαρμογής |
| Διπλής κατεύθυνσης | Σε όλες τις ζώνες | ----- |

4.2 Τεχνικές προδιαγραφές των φωτιστικών σωμάτων μιας σήραγγας([8],[17])

Τα τούνελ αποτελούν συχνά εχθρικά περιβάλλοντα για τα φωτιστικά σώματα. Η κίνηση παράγει ένα σημαντικό υψηλό ποσοστό ρύπανσης και η ατμόσφαιρα μέσα σε αυτά είναι ιδιαίτερα διαβρωτική (υγρασία, καυσαέρια, αλκαλικό ή όξινο PH, διαφοροποιήσεις στη θερμοκρασία).

Ένα αυστηρό μηχανικό σχέδιο απαιτείται που να διασφαλίζει την αντοχή των φωτιστικών στις αντίξοες συνθήκες ενός τούνελ, ώστε να διατηρείται το επιθυμητό φωτιστικό αποτέλεσμα.

Για τους λόγους αυτούς τα φωτιστικά σώματα τα οποία προορίζονται για χρήση σε τούνελ πρέπει εκτός των φωτομετρικών ελέγχων, να υπόκεινται και στους παρακάτω ελέγχους:

- Αντοχής σε συνθήκες διαβρώσεως και στο χρόνο.
- Αντοχής στο άνεμο υπό διαφορετικές ταχύτητες και κατευθύνσεις.
- Αντοχής σε περίπτωση πυρκαγιάς με χρήση μη εύφλεκτων υλικών.
- Στεγανότητας ενάντια στην σκόνη και το νερό .
- Αντοχής σε κραδασμούς που προκαλεί η διέλευση οχημάτων και ειδικά μεγάλων φορτηγών.
- Αντοχής κατά την εκτόξευση διαφόρων σωματιδίων, όπως πέτρες, άχρηστα μέταλλα και άλλα.

Επιπλέον, πρέπει να καλύπτουν τις ακόλουθες απαιτήσεις:

Ηλεκτρικές

- Άμεση σύνδεση – αποσύνδεση με ταχυσύνδεσμο.
- Ανασυρόμενη μονάδα χωρίς χρήση εργαλείων.
- Δυνατότητα εισόδου – εξόδου καλωδίων.
- Δυνατότητα dimming.

Φωτοτεχνικές

- Υψηλή απόδοση φωτισμού.
- Ποικιλία οπτικών συστημάτων.
- Εύκολη προσθαφαίρεση αυτών από το φωτιστικό.

Μηχανικές

- Στιβαρή, γερή κατασκευή.
- Εύκολη εγκατάσταση.
- Ασφαλής στερέωση.
- Γρήγορη και εύκολη συντήρηση.
- Αντοχή στο χρόνο και σε συνθήκες διάβρωσης.
- Υψηλή στεγανότητα.
- Ευκολία καθαρισμού.



Εικόνα 4.5: Διαδικασίες ελέγχου των φωτιστικών μιας σήραγγας [8].

4.3 Τοποθέτηση των φωτιστικών σωμάτων σε μια σήραγγα

Η επιλογή του σημείου τοποθέτησης των φωτιστικών στο θόλο της σήραγγας αποτελεί ένα σημαντικό σημείο κατά τη φάση σχεδιασμού της εγκατάστασης φωτισμού.

Υπάρχουν τρεις πρακτικές τοποθέτησης των φωτιστικών σωμάτων για σήραγγες μιας κατεύθυνσης με δύο λωρίδες κυκλοφορίας:

- στο κέντρο του θόλου, κοντά στον κεντρικό διαμήκη άξονα ή ελαφρά μετατοπισμένα προς την κάθε λωρίδα.
- πάνω από το κέντρο της κάθε λωρίδας κυκλοφορίας .
- πλευρικά τοποθετημένα στα τοιχώματα της σήραγγας.

Σύμφωνα με τους κανονισμούς του Ο.Σ.Μ.Ε.Ο.[17], η τοποθέτηση των φωτιστικών σωμάτων δεν πρέπει να γίνεται στο κέντρο της οροφής της σήραγγας, ούτως ώστε να είναι δυνατή η διέλευση των οχημάτων από τη μια λωρίδα κυκλοφορίας, όταν γίνεται συντήρηση

της εγκατάστασης φωτισμού. Όμως, η τοποθέτηση των φωτιστικών σωμάτων πάνω από το κέντρο της κάθε λωρίδας κυκλοφορίας ή πλευρικά στα τοιχώματα της σήραγγας, έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους εγκατάστασης (σχάρες στήριξης, καλώδια) αλλά και της κατανάλωσης ενέργειας.

Η διεθνής πρακτική που ακολουθείται είναι η τοποθέτηση των φωτιστικών σωμάτων στο κέντρο της σήραγγας, αλλά ελαφρά μετατοπισμένα προς την κάθε λωρίδα κυκλοφορίας, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται μείωση κόστους εγκατάστασης, κατανάλωσης ενέργειας και ταυτόχρονα να είναι εφικτή η συντήρηση του συστήματος φωτισμού, χωρίς να απαιτείται το κλείσιμο της σήραγγας και η διακοπή της κυκλοφορίας.

Μία άλλη πρακτική, θέλει την θέση τοποθέτησης των φωτιστικών να σχετίζεται άμεσα με τον τύπο σήραγγας. Συγκεκριμένα, σε σήραγγες που κατασκευάστηκαν με την μέθοδο της διάτρησης (κυκλική, πεταλοειδής διατομή) να τοποθετούνται τα φωτιστικά στο κέντρο του θόλου ελαφρά μετατοπισμένα, ενώ σε αυτές που κατασκευάστηκαν με την μέθοδο της εκσκαφής και επανεπίχωσης (cut&cover με τετραγωνική διατομή) να τοποθετούνται πάνω από το κέντρο κάθε λωρίδας κυκλοφορίας. Τα παραπάνω φυσικά δεν αποτελούν κανόνα, αλλά μια πρακτική που συνηθίζεται να ακολουθείται από τους μελετητές.

Τέλος, όσον αφορά την τοποθέτηση, θα πρέπει να δοθεί προσοχή στην εγκατάσταση του αερισμού που υπάρχει σε σήραγγες μέσου και μεγάλου μεγέθους, έτσι ώστε να είναι δυνατή η απρόσκοπτη τοποθέτηση και λειτουργία τόσο των ανεμιστήρων, όσο και των φωτιστικών σωμάτων.

4.4 Η ταξινόμηση των φωτιστικών σωμάτων σε βαθμίδες και το σύστημα ελέγχου τους

Η λαμπρότητα της ζώνης προσέγγισης ποικίλλει με τις αλλαγές στις συνθήκες φωτός της ημέρας. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, τα επίπεδα λαμπρότητας στις ζώνες κατωφλίου και μετάβασης πρέπει να είναι σταθερά ποσοστά της λαμπρότητας στη ζώνη πρόσβασης. Επομένως, είναι απαραίτητο να παρέχεται αυτόματος έλεγχος του τεχνητού φωτισμού σε αυτές τις ζώνες. Δύο συστήματα είναι δυνατά: ομάδες λαμπτήρων να τίθενται σε ή εκτός λειτουργίας, ή βαθμιαίος έλεγχος της απόδοσής τους (dimming), δηλαδή αυξομείωση των επιπέδων φωτισμού. Ο πρώτος είναι αυτός που συνήθως εφαρμόζεται, ιδιαίτερα σε υψηλά επίπεδα λαμπρότητας.

Για τον αυτόματο έλεγχο, η πιο εφαρμόσιμη λύση είναι να τοποθετηθεί ένας μετρητής λαμπρότητας με ένα μετρούμενο πεδίο 20° , στο κέντρο της εισόδου της σήραγγας, από απόσταση ίση με την απόσταση ασφαλούς πεδήσεως. Για πρακτικούς λόγους, ο μετρητής λαμπρότητας πρέπει συνήθως να τοποθετηθεί σε ένα μεγαλύτερο ύψος από τη θέση των ματιών του οδηγού (όπως καθορίζεται για το L_{20}). Επομένως, το όργανο πρέπει να βαθμολογηθεί χωριστά με μια μέτρηση του L_{20} στη σωστή θέση. Υποτίθεται ότι οι δύο λαμπρότητες είναι ανάλογες.

Το αναβόσβημα των λαμπτήρων μπορεί να γίνει με βήματα, αφού ταξινομηθούν πρώτα οι λαμπτήρες σε ομάδες και καθορισθούν οι βαθμίδες λαμπρότητας. Αναβοσβήνοντας, λοιπόν, σταδιακά τις απαραίτητες βαθμίδες, ανάλογα με την εξωτερική λαμπρότητα,

έχουμε και τα επιθυμητά επίπεδα λαμπρότητας εσωτερικά της σήραγγας. Το σύστημα ελέγχου πρέπει, ωστόσο, να έχει μια χρονική καθυστέρηση μερικών λεπτών για να αποφευχθεί το περιττό αναβόσβημα, εξαιτίας μιας παροδικής αλλαγής στο τοπικό επίπεδο φωτισμού, προκαλούμενο από μία στιγμιαία συννεφιά.

Ο βαθμιαίος έλεγχος της απόδοσής τους (dimming) μπορεί να εφαρμοστεί, αλλά η πραγματική εξοικονόμηση πρέπει να λάβει υπόψη το αυξημένο κόστος εξοπλισμού και μερικές φορές τη μείωση της απόδοσης των λαμπτήρων (I/W).

Για το σχεδιασμό μιας εγκατάστασης φωτισμού σήραγγων, πρέπει να είναι γνωστή η υψηλότερη τιμή L_{20} που εμφανίζεται με ικανοποιητική συχνότητα κατά τη διάρκεια του έτους. Συχνά, ως ασφαλής μέγιστη τιμή, χρησιμοποιείται η τιμή που καλύπτει περίπου το 80% του χρόνου λειτουργίας της σήραγγας. Για το σχεδιασμό και τον έλεγχο του φωτισμού, πρέπει να ακολουθηθούν οι εθνικοί κανονισμοί. Δεδομένου ότι η τιμή του L_{20} εξαρτάται από τις καθημερινές, εποχιακές και καιρικές συνθήκες, η ασφαλής μέγιστη τιμή δεν μπορεί πραγματικά να μετρηθεί. Έτσι συνήθως εφαρμόζονται εμπειρικές μέθοδοι για τον καθορισμό της τιμής σχεδιασμού του L_{20} . Το κατώτατο απαραίτητο επίπεδο στη ζώνη κατωφλίου μπορεί να καθορίζεται συνεχώς από τη στιγμιαία τιμή λαμπρότητας πολλαπλασιαζόμενη με το συντελεστή k ($L_{th}=k \cdot L_{20}$) [14].

4.5 Συντήρηση της εγκατάστασης φωτισμού μιας σήραγγας και ο συντελεστής συντήρησης

Ο συχνός καθαρισμός της σήραγγας έχει ιδιαίτερη σημασία καθώς, τα επίπεδα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης μέσα σ' αυτήν είναι πολύ υψηλά, με αποτέλεσμα τα φωτιστικά και οι τοίχοι να λερώνονται πολύ εύκολα. Το ακριβές πρόγραμμα καθαρισμού τους καθορίζεται στη φάση της σχεδίασης του φωτισμού και έχει άμεση σχέση με το συντελεστή συντήρησης που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό των επιπέδων φωτισμού. Επίσης, θα πρέπει να μελετηθεί εξαρχής ο τρόπος καθαρισμού, αφού έχει να κάνει άμεσα με την θέση των φωτιστικών.

Ο συντελεστής συντήρησης εκφράζει την μείωση του φωτεινού αποτελέσματος των φωτιστικών και των συντελεστών ανάκλασης των διαφόρων επιφανειών λόγω της σκόνης και των ρύπων που προκαλούνται από τα αυτοκίνητα. Μία λογική και συνηθισμένη τιμή είναι το 0,8. Αυτό σημαίνει ότι η λαμπρότητα του δρόμου μέσα στη σήραγγα, δεν πρέπει να πέσει κάτω από το 0,8 της αρχικής της τιμής και ο προγραμματισμός του καθαρισμού θα πρέπει να γίνει, έτσι ώστε να εξασφαλισθεί αυτή η προϋπόθεση.

Η συχνότητα του καθαρισμού εξαρτάται από τον συντελεστή συντήρησης, ο οποίος με τη σειρά του αποτελεί συνάρτηση των διαστάσεων της σήραγγας, της φύσης και της πυκνότητας της κυκλοφορίας και του κόστους της συντήρησης. Στην πράξη η συχνότητα αυτή μπορεί να κυμαίνεται από μία εβδομάδα έως και έξι μήνες. Πάντως, συνιστάται σε σήραγγα με μεγάλη πυκνότητα κυκλοφορίας, ο καθαρισμός των φωτιστικών και των τοίχων να γίνεται τουλάχιστον κάθε δύο μήνες. Η χρήση, όμως, ενός συντελεστή μικρότερου του 0,8 μπορεί να αυξήσει την κατανάλωση ενέργειας ιδιαίτερα σε σήραγγες με μεγάλες απαιτήσεις σε φωτισμό. Πρέπει να μελετηθούν παράλληλα το κόστος καθαρισμού με την εξοικονόμηση ενέργειας από αυτό, ώστε να βρεθεί η πλέον συμφέρουσα λύση.

Στις περισσότερες σήραγγες τα υψηλότερα επίπεδα φωτισμού χρησιμοποιούνται μόνο το καλοκαίρι με αποτέλεσμα αυξημένες απαιτήσεις σε ενέργεια. Επομένως για την εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί διαφορετικός συντελεστής συντήρησης για το καλοκαίρι από αυτόν για το χειμώνα. Με αυτόν τον τρόπο βρέθηκε ότι κατανάλωση ενέργειας μπορεί να μειωθεί μέχρι και 15% [14].

Ένας τρόπος ελέγχου της αποδοτικότητας του προγράμματος καθαρισμού είναι η μέτρηση της λαμπρότητας των τοίχων. Σε μεγάλες εγκαταστάσεις μπορεί αυτή η λαμπρότητα να μετρηθεί με ειδικό αισθητήριο, ώστε να έχουμε πάντα σταθερό συντελεστή $k = L_{th} / L_{20(SP)}$ ανεξάρτητα από το πόσο καιρό έχει να καθαριστεί η σήραγγα.

Σε περιπτώσεις όπου κάθε φωτιστικό έχει δύο λαμπτήρες και κατά τη νύχτα λειτουργεί μόνο ο ένας θα πρέπει η χρήση τους να γίνεται εναλλάξ, ώστε να αποφευχθεί η μείωση της απόδοσης του ενός λαμπτήρα νωρίτερα. Οι λαμπτήρες θα πρέπει να αντικαθίστανται αμέσως μόλις παρουσιάζουν προβλήματα, ώστε σε καμία περίπτωση να μην επηρεάζεται σημαντικά το συνολικό αποτέλεσμα φωτισμού από τους χαλασμένους λαμπτήρες. Καλό θα είναι να καταστρωθεί ένα πρόγραμμα αλλαγής των λαμπτήρων με βάση την καταγραφή του αριθμού των μεταβάσεων από το ένα επίπεδο φωτισμού στο άλλο και κατά συνέπεια τη συχνότητα χρήσης των λαμπτήρων.

Στις σήραγγες, το φόντο πάνω στο οποίο φαίνονται τα διάφορα αντικείμενα είναι συνήθως η επιφάνεια του δρόμου. Ανάλογα όμως με την καμπυλότητα μπορεί το φόντο αυτό να είναι οι τοίχοι ή ακόμα και η οροφή. Οι τοίχοι αποτελούν μεγάλο ποσοστό του οπτικού πεδίου του οδηγού, γι' αυτό και η λαμπρότητα τους δεν πρέπει να είναι μικρότερη από αυτή του δρόμου τουλάχιστον μέχρι και ύψος 2m από το οδόστρωμα. Θα πρέπει λοιπόν, να καλύπτονται από υλικά με υψηλή ανάκλαση π.χ. 0.7. Θα πρέπει, επίσης, να προσεχθεί η επιστρωση των τοίχων, ώστε να μην είναι από υλικό που από την αντανάκλαση των φωτιστικών ή του φωτός των προβολέων των αυτοκινήτων θα δημιουργεί λάμψη που θα τυφλώνει τους οδηγούς. Το υλικό αυτό θα πρέπει να είναι σκληρό και ανθεκτικό και κυρίως να καθαρίζεται εύκολα, ώστε να αποδίδει τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα λαμπρότητας με την προϋπόθεση μίας λογικής συχνότητας συντήρησης και καθαρισμού. Όσον αφορά την οροφή πρέπει να σημειωθεί ότι αυτή λερώνεται πιο εύκολα από κάθε άλλη επιφάνεια, καθώς όλα τα καυσαέρια κατευθύνονται εκεί. Αν είναι δυνατόν καλό θα ήταν ένα μικρό ποσοστό του φωτός να οδηγείται απευθείας από τα φωτιστικά στην οροφή [14].

4.6 Η ηλεκτροδότηση της σήραγγας και ο φωτισμός ασφαλείας

Μια οδική σήραγγα τροφοδοτείται με παροχή από την ΔΕΗ (υποσταθμός Μ/Τ), με παροχή από Ηλεκτροπαραγωγό Ζεύγος Η/Ζ και με παροχή από σύστημα αδιάλειπτης παροχής (UPS), ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια που απαιτούνται.

Σε περιπτώσεις διακοπής της ηλεκτροδότησης από το δίκτυο της σήραγγας προβλέπεται ότι το 25-30% του φωτισμού (όλων των βαθμίδων) της σήραγγας θα συνδέεται προς το Εφεδρικό Ηλεκτροπαραγωγό Ζεύγος. Σε περίπτωση αστοχίας της κύριας παροχής ηλεκτρισμού, το σύστημα ελέγχου της σήραγγας τίθεται σε κατάσταση συναγερμού. Αμέσως ενεργοποιείται το ΕΗΖ και το σύστημα ελέγχου κυκλοφορίας πριν και μέσα στη σήραγγα. Το τελευταίο, μέσω των πινακίδων ελέγχου της κυκλοφορίας προσδιορίζει την

ταχύτητα διέλευσης των οχημάτων μέσα και έξω από τη σήραγγα. Το όριο αυτό πρέπει να αντιστοιχεί στο επίπεδο φωτισμού των ζωνών κατωφλίου και προσαρμογής, το οποίο προκύπτει από τον προκαθορισμένο αριθμό φωτιστικών σωμάτων που ηλεκτροδοτούνται από το ΕΗΖ στις ζώνες αυτές.

Τα φωτιστικά του νυχτερινού φωτισμού προβλέπεται να λειτουργούν και σαν φωτισμός ασφαλείας τροφοδοτούμενα από σύστημα UPS. Πέραν του φωτισμού ασφαλείας αυτού υπάρχει και φωτισμός οδεύσεων διαφυγής σε περίπτωση φωτιάς. Για τον σκοπό αυτό, τοποθετούνται στην πλευρά των εξόδων διαφυγής φωτιστικά αναγνώρισης των οδεύσεων διαφυγής και ύπαρξης φωτιάς [17].

4.7 Φωτοεκπέμπουσες Δίοδοι (Light Emitting Diodes L.E.D)

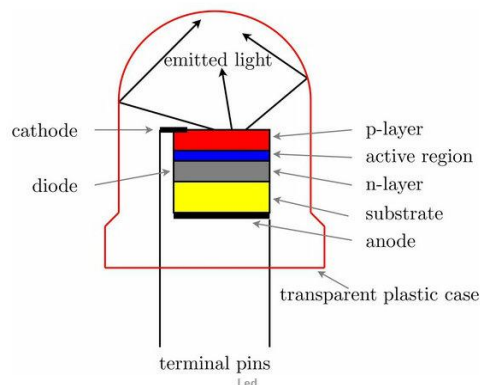
4.7.1 Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των λαμπτήρων LED

Οι φωτοεκπέμπουσες δίοδοι, ή LED, είναι συνδυασμός ημιαγωγών p-n, όπου όταν εφαρμοστεί τάση στους δύο ημιαγωγούς εκπέμπεται ακτινοβολία. Η εκπεμπόμενη ακτινοβολία μπορεί να είναι είτε υπέρυθη είτε ορατή. Το φως που εκπέμπεται από τους ημιαγωγούς εκτείνεται σε ένα μεγάλο εύρος μηκών κύματος, από το χαμηλό όριο ορατής ακτινοβολίας έως πολύ μεγάλα μήκη υπέρυθρης ακτινοβολίας.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τα στοιχεία των LED είναι ημιαγωγικά υλικά, υψηλής καθαρότητας με μικρές ποσότητες προσθέτων, ενώ το τελικό επιθυμητό χρωματικό αποτέλεσμα προκύπτει από το συνδυασμό ημιαγωγικών υλικών. Τα πρόσθετα που χρησιμοποιούνται είναι δύο:

- το ένα είναι υλικό τύπου n, το οποίο έχει συγκεντρωμένη περίσσεια ηλεκτρονίων, ενώ
- το άλλο είναι υλικό τύπου p, με συγκεντρωμένο έλλειμμα ηλεκτρονίων ή περίσσεια οπών, οι οποίες δρουν ως θετικά φορτία.

Τα δύο αυτά υλικά χωρίζονται μεταξύ τους από μία διεπιφάνεια (της τάξης των 0,25 mm²) δίνοντας τη δυνατότητα κατασκευής πολύ μικρών και λεπτών λαμπτήρων. Η διάταξη ενός led φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 4.6: Η διάταξη ενός led.

Με την εφαρμογή τάσης (1-3 V) στα δύο ηλεκτρόδια, προκαλείται μετακίνηση των ηλεκτρονίων και των οπών προς τη διεπιφάνεια, όπου κατά την επαφή τους προκαλείται παραγωγή φωτονίων. Η εφαρμοζόμενη τάση και το ρεύμα που τη διαρρέει (1-100 mA) είναι συνεχής μεγέθη. Κατά τη λειτουργία τους σε περιβάλλον υψηλής θερμοκρασίας απαιτείται ψύξη ή διακοπτόμενη λειτουργία, για να αποφευχθεί η υποβάθμιση του παραγόμενου φωτός.

Στην κατασκευή της ψηφίδας (chip) του LED, χρησιμοποιούνται μονωτική ανακλαστική επιφάνεια και ανακλαστήρες, η διάταξη των οποίων οδηγεί την εκπομπή της φωτεινής ροής προς τα επάνω (συμβατικά LED). Υπάρχει και μια διάταξη, η οποία επιτρέπει τη ροή και από τις έξι γεωμετρικές πλευρές της ψηφίδας και τα LED που λειτουργούν κατ'αυτόν τον τρόπο ονομάζονται *υψηλής φωτεινότητας* [11].

4.7.2 Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των λαμπτήρων LED

Η τεχνολογία LED αποτελεί την πιο προηγμένη τεχνολογία φωτός. Τα LED έγιναν αρχικά γνωστά στο ευρύ κοινό λόγω της χρήσης τους σε ηλεκτρικές συσκευές (τηλεοράσεις, ραδιόφωνα, στερεοφωνικά, υπολογιστές, ψυγεία, τηλέφωνα κ.α.) στη φωτεινή ένδειξη λειτουργίας της συσκευής. Στα επόμενα χρόνια σημειώθηκε εξαιρετική τεχνολογική αναβάθμιση στη λειτουργία τους και πλέον, λόγω των πλεονεκτημάτων τους στην εξοικονόμηση χρημάτων & ενέργειας και στις υψηλές προδιαγραφές ποιότητα φωτός, τα LED αντικαθιστούν σταδιακά τους συμβατικούς λαμπτήρες και χρησιμοποιούνται ως κύριος φωτισμός για κάθε εφαρμογή φωτισμού.

Τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα των LED είναι τα εξής:

- Η διάρκεια ζωής τους φτάνει και τις 50.000 – 100.000 ώρες.
- Εξοικονόμηση ενέργειας, άρα και χρημάτων, από 60% έως 90%.
- Προσφέρουν υψηλή ενεργειακή απόδοση σε αντίθεση με τους παραδοσιακούς λαμπτήρες πυρακτώσεως. Οι λάμπες πυρακτώσεως ξοδεύουν περισσότερο από το 75% της ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμότητα και μόλις το 25% για την παραγωγή του φωτός. Σε αντίθεση οι λαμπτήρες τεχνολογίας LED ξοδεύουν μόλις το 20% σε θερμότητα και το 80% χρησιμοποιείται για την παραγωγή του φωτός.
 - Είναι διαθέσιμα σε θερμοκρασίες χρώματος μεταξύ 2.700K (warm white) έως 6500K (cold white).
 - Είναι ανθεκτικά σε δύσκολες εξωτερικές συνθήκες και χαμηλές θερμοκρασίες, γεγονός που μειώνει τα κόστη συντήρησης.
 - Παρέχουν εξαιρετικές συνθήκες φωτισμού που αναδεικνύουν ένα χώρο ή/και τα προϊόντα.
 - Εξάλειψη UV ακτινοβολίας, καθώς οι λυχνίες LED παράγουν λίγη θερμότητα και καθόλου UV, όντας ιδανικές για τον φωτισμό αντικειμένων, όπως έργα τέχνης, που είναι ευαίσθητα στο υπεριώδες φως.
 - Είναι φιλικά προς το περιβάλλον (100% ανακυκλώσιμοι, δεν περιέχουν τοξικά ή χημικά υλικά, μείωση εκπομπών CO₂).
 - Παρέχουν ευελιξία στις μελέτες φωτισμού, λόγω των πολλαπλών δυνατοτήτων σε ένταση, χρώματα, εστίαση φωτός και δυνατότητα χειρισμού με ροοστάτη (dimming).

➤ Δεν "καίγονται" εύκολα όταν υπάρχουν μεταπτώσεις στο δίκτυο ηλεκτροδότησης (υπερτάσεις/βυθίσεις).

➤ Είναι αντικρηκτικά, και αυτό γιατί οι πλακέτες δεν εκρήγνυνται. Τα volt των λαμπτήρων LED, είναι πολύ χαμηλά και έτσι δεν υπάρχει θέμα έκρηξης, αλλά ακόμα και στις περιπτώσεις που μπορεί να είναι παραπάνω volt, έχουν πλακέτα που τα προστατεύει από έκρηξη (μέχρι 265V). Και να δημιουργηθεί σπινθήρας δε βγαίνει προς τα έξω, διότι δεν υπάρχει αέριο για να διαδοθεί η φλόγα. Επιπλέον, η πλακέτα των λαμπτήρων LED, είναι καλυμμένη από υλικό το οποίο έχει την ιδιότητα να μη μεταδίδει φλόγα προς τα έξω σε περίπτωση βραχυκυκλώματος.

Αν και οι λαμπτήρες LED έχουν αρκετά πλεονεκτήματα κατά τη χρήση τους, το μεγάλο κόστος αγοράς έρχεται να προστεθεί πρώτο στη λίστα των μειονεκτημάτων τους. Και όταν αναφερόμαστε στο κόστος, εννοούμε στο κόστος ανά μονάδα μέτρησης της αποδοτικότητας, στην προκειμένη περίπτωση τα lumen/watt. Όντας μια νέα τεχνολογία, το κόστος αγοράς παραμένει ακόμα αυξημένο και αποτελεί τον βασικότερο ανασταλτικό παράγοντα στη χρήση τους, ωστόσο, αντισταθμίζεται με την χαμηλή κατανάλωση ενέργειας που έχουν.

Πέραν ωστόσο, του υψηλού κόστους που τους χαρακτηρίζει, το γεγονός ότι παράγουν κατευθυνόμενο φως, ίσως να μην εξυπηρετεί πάντα τις εφαρμογές, και ιδίως εφαρμογές που απαιτούν μεγάλη και ομοιόμορφη διάχυση του φωτός. Επιπλέον, τα περισσότερα ψυχρού λευκού LED, έχουν φάσμα που διαφέρει σημαντικά από αυτό ενός ακτινοβολέα μελανού σώματος όπως ο ήλιος ή ο λαμπτήρας πυράκτωσης. Αυτό σημαίνει, ότι το χρώμα κάποιων αντικειμένων μπορεί να φαίνεται διαφορετικό κάτω από μια LED ψυχρού λευκού, απ' ότι θα φαινόταν κάτω από το φως του ήλιου ή κάτω από μια λάμπα πυράκτωσης. Το χαρακτηριστικό αυτό, προκειμένου να μην αποτελεί μειονέκτημα, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη από τον σχεδιαστή του εκάστοτε έργου, ώστε να αποφεύγονται λάθος αποτελέσματα [24].

4.7.3 Οι λαμπτήρες LED στον οδοφωτισμό

Σε ποσοστό 40% επί της συνολικής καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, ανέρχεται η δαπάνη ενός Δήμου για τον φωτισμό του οδικού δικτύου. Επιπλέον, δαπανώνται υπέρογκα ποσά ετησίως για την συντήρησή του. Αυτή η πραγματικότητα, οδήγησε πολλές πόλεις παγκοσμίως να αναβαθμίσουν τις τεχνολογίες των λαμπτήρων που χρησιμοποιούν στον οδικό φωτισμό, από παραδοσιακούς λαμπτήρες (πυράκτωσης, αλογόνου, νατρίου) σε λαμπτήρες LED. Η μεγάλη διάρκεια ζωής τους, η μειωμένη εκπομπή ρύπων και η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, συμβάλλουν στη μείωση των λειτουργικών εξόδων του δικτύου και στην απόσβεση, σε βάθος χρόνου, του υψηλού κόστους αγοράς τους [27].

Μελέτες αντικατάστασης των συμβατικών λαμπτήρων νατρίου υψηλής πίεσης με λαμπτήρες LED, πραγματοποιούνται με σκοπό την αναβάθμιση τους συστήματος φωτισμού και σε οδικές σήραγγες. Η μεγάλη κατανάλωση ισχύος σε αυτές και τα υψηλά κόστη συντήρησης καθιστούν τον φωτισμό σηράγγων ενεργοβόρο και πολυδάπανο έργο. Με τη χρήση λαμπτήρων LED, αναμένεται να μειωθούν οι δαπάνες αυτές και να επωφεληθούμε από τα σημαντικά πλεονεκτήματά τους. Το υψηλό, ωστόσο, κόστος αγοράς τους παραμένει αποτρεπτικός παράγοντας εφαρμογής τους.



Εικόνα 4.7: Τα LED στον οδοφωτισμό.



Εικόνα 4.8: Τα LED σε οδική σήραγγα.

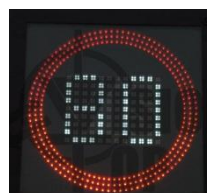
4.7.4 Φωτεινή σηματοδότηση και σήμανση σήραγγας με χρήση τεχνολογίας LED

Η εγκατάσταση φωτεινής σηματοδότησης και σήμανσης περιλαμβάνει την εισαγωγή δεδομένων από διάφορες πηγές δεδομένων, την επεξεργασία των πληροφοριών αυτών και την προώθηση και διάθεσή τους στους διερχόμενους οδηγούς των οχημάτων μέσα από:

- τις πινακίδες μεταβλητού μηνύματος (ΠΜΜ) και
- τους σηματοδότες ρύθμισης της κυκλοφορίας

Οι πινακίδες μεταβλητού μηνύματος είναι τύπου *πίνακα απεικόνισης* με δυνατότητα απεικόνισης αριθμού μηνυμάτων 3 θέσεων των 16 χαρακτήρων η καθεμία. Το μήνυμα μπορεί να είναι είτε μεταβλητό είτε να επιλέγεται από προκαθορισμένη σειρά μηνυμάτων που είναι αποθηκευμένο στην ίδια την πινακίδα. Οι ΠΜΜ είναι τεχνολογίας LED, καθώς χαρακτηρίζονται από την υψηλή φωτεινή ισχύ που αποδίδουν, παράλληλα με την χαμηλή κατανάλωση, τη ζωηρότητα των χρωμάτων και τη μεγάλη διάρκεια ζωής τους. Οι πινακίδες αυτής της τεχνολογίας είναι οι ιδανικότεροι για να αποσπούν αμέσως την προσοχή και να κάνουν έντονα αισθητή την παρουσία τους στο χώρο και να μεταδίδουν άμεσα τις επιθυμητές κυκλοφοριακές πληροφορίες [18].

Οι σηματοδότες ρύθμισης της κυκλοφορίας χρησιμοποιούν επίσης την τεχνολογία των LED, εκμεταλλευόμενοι τα σημαντικά πλεονεκτήματα της απόδοσης, της ευκρίνειας και της καλής ορατότητάς τους ακόμα και από απόσταση. Τέτοιοι σηματοδότες είναι οι πινακίδες ορίου ταχύτητας, οι πινακίδες διαθεσιμότητας λωρίδων κυκλοφορίας, οι προειδοποιητικοί σηματοδότες για ενδεχόμενους κινδύνους και οι σηματοδότες τριών οπτικών πεδίων (κόκκινο-πράσινο-κίτρινο) [25].



Εικόνα 4.9: Ενδεικτικοί σηματοδότες τεχνολογίας LED.

Κεφάλαιο 5ο

Προτάσεις αναβάθμισης του συστήματος φωτισμού της υπό μελέτη σήραγγας

5.1 Εισαγωγή

Κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος φωτισμού, η προσέγγιση που ακολουθείται εξαρτάται από το αν πρόκειται για σήραγγα υπό ανέγερση ή υφιστάμενη. Στην περίπτωση της υπό ανέγερση σήραγγας, υπάρχει δυνατότητα για μεγαλύτερο εύρος ενεργειών. Εφόσον η σήραγγα σχεδιάζεται εξ αρχής, μπορούν να πραγματοποιηθούν διάφορες τεχνικές σχεδιασμού (ορισμένες εκ των οποίων αναφέρονται στο κεφάλαιο 1), οι οποίες εκμεταλλεύονται σε μεγάλο βαθμό τον φυσικό φωτισμό και επομένως συμβάλλουν στην εξοικονόμηση ενέργειας.

Αντιθέτως, στην περίπτωση μιας υφιστάμενης σήραγγας, ενδέχεται να εμφανιστούν ορισμένοι περιορισμοί στη μελέτη φωτισμού, οι οποίοι αφορούν στο κόστος των παρεμβάσεων, όσο στην όχληση που θα προκληθεί στη λειτουργία της σήραγγας και κατ' επέκταση της κυκλοφορίας.

Ένας από τους βασικούς στόχους που λαμβάνεται υπόψη κατά τον σχεδιασμό ενός συστήματος φωτισμού, είναι η μείωση της εγκατεστημένης ισχύος, γεγονός που συνεπάγεται την εξοικονόμηση ενέργειας και κατά συνέπεια, τη μείωση του λειτουργικού κόστους της εγκατάστασης.

Στην παρούσα εργασία μελετάται η αναβάθμιση του συστήματος φωτισμού μιας οδικής σήραγγας μέσω αντικατάστασης των υφιστάμενων φωτιστικών της, με νέα φωτιστικά, λαμπτήρων τεχνολογίας LED και νατρίου υψηλής πίεσης.

Σκοπός είναι η ανάδειξη της πιο συμφέρουσας, από ενεργειακή άποψη, λύσης, με κριτήριο τα επίπεδα λαμπρότητας που επιτυγχάνονται, στην ημερήσια και νυχτερινή βαθμίδα, και κατά πόσο αυτά ικανοποιούν τα επίπεδα που ορίζει το πρότυπο φωτισμού με το οποίο διεξάγεται η εκάστοτε πρόταση εξοικονόμησης ενέργειας:

Η μελέτη αυτή θα διεξαχθεί με δύο τρόπους:

A) Σύμφωνα με την υφιστάμενη μελέτη φωτισμού,

B) Καθορίζοντας νέα επίπεδα λαμπρότητας σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ CR 14380, με βάση την κυκλοφοριακή ροή.

5.2 Γενική περιγραφή της υπό μελέτη σήραγγας

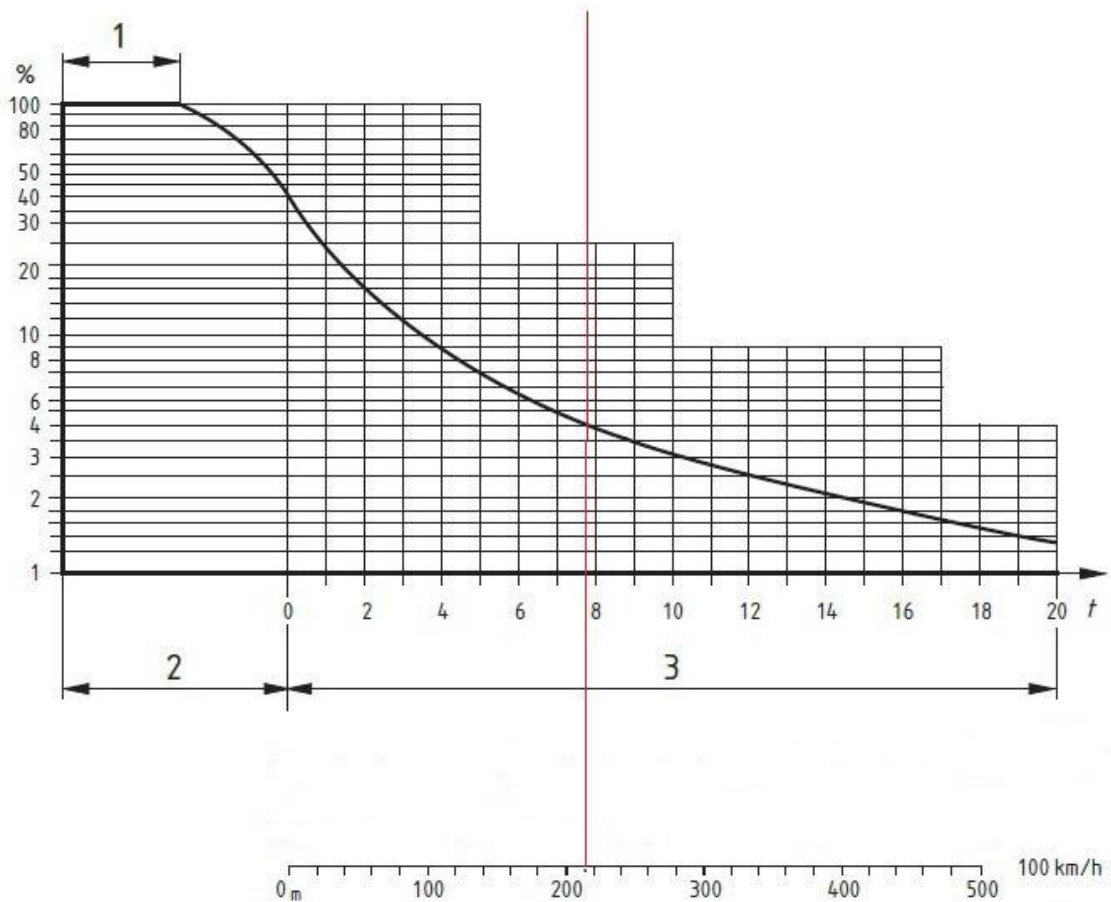
5.2.1 Χαρακτηριστικά της κατασκευής και σημαντικά μεγέθη

Στην παρούσα εργασία, αντικείμενο μελέτης αποτέλεσε μια υφιστάμενη οδική σήραγγα της Εγνατίας Οδού. Η σήραγγα αυτή είναι ήδη σε λειτουργία και το σύστημα φωτισμού της έχει σχεδιασθεί σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ CR 14380. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά της σήραγγας και τα μεγέθη που έχουν μετρηθεί κατά τη μελέτη της υφιστάμενης εγκατάστασης.

Πίνακας 5.1 : Βασικά χαρακτηριστικά και μεγέθη της υπό μελέτη σήραγγας.

| | | | |
|------------------------|------------|--------------------------------------|------------------------|
| Σχήμα | Ημικυκλικό | Ασφαλής Απόσταση Πέδησης (S.S.D) | 160 m |
| Μήκος | 212 m | Εξωτερική λαμπρότητα (L20) | 3900 cd/m ² |
| Πλάτος | 7,5 m | Συντελεστής $k = L_{th} / L20$ | 0,07 |
| Ύψος | 7,5 m | Λαμπρότητα ζώνης κατωφλίου (Lth) | 273 cd/m ² |
| Αριθμός λωρίδων | 2 | Λαμπρότητα νυχτερινής ζώνης (Lnight) | 2 cd/m ² |
| Κατεύθυνση κυκλοφορίας | Μονή | Αριθμός φωτιστικών φωτισμού ημέρας | 291 |
| Διαμήκης κλίση | 0% | Αριθμός φωτιστικών φωτισμού νύχτας | 18 |
| Ταχύτητα οχημάτων | 100 km/h | Εγκατεστημένη Ισχύς | 122,8 kW |

Χαρακτηριστικό της υπό μελέτη σήραγγας είναι το γεγονός ότι πρόκειται για μία σήραγγα μικρού σχετικά μήκους, η οποία αποτελείται μόνο από δύο ζώνες, τη ζώνη κατωφλίου και τη ζώνη μεταβάσεως, όπως ορίζεται και από την ακόλουθη καμπύλη.



Όπου:

- 1: το τμήμα της ζώνης κατωφλίου όπου το μήκος ισούται με το μισό της απόστασης πέδησης(S.D).
- 2: το συνολικό μήκος της ζώνης κατωφλίου= S.D(Stopping Distance).
- 3: το μήκος της ζώνης μετάβασης συναρτήσει της ταχύτητας σχεδιασμού.

*η κάθετη κόκκινη γραμμή ορίζει το πέρας της σήραγγας που είναι τα 212m

Εικόνα 5.1: Διάγραμμα μεταβολής λαμπρότητας στη ζώνη κατωφλίου και στη μεταβατική ζώνη.

Η ταχύτητα σχεδιασμού της υπό μελέτη σήραγγας είναι 100 km/h, επομένως σύμφωνα με την παραπάνω εικόνα, και λαμβάνοντας υπόψη ότι το συνολικό μήκος της σήραγγας είναι 212 m, προκύπτει ότι δεν υπάρχει εσωτερική ζώνη και ζώνη εξόδου. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται τα μήκη των ζωνών κατωφλίου και μετάβασης.

Πίνακας 5.2: Μήκη ζωνών της σήραγγας.

| Μήκος σήραγγας (m) | Ασφαλή απόσταση πέδησης (m) | Μήκος ζώνης κατωφλίου (m) | Μήκος ζώνης μετάβασης (m) |
|--------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|
| (1) | (2) | (3) = (2) | (4) = (1) - (2) |
| 212 | 160 | 160 | 52 |

Επομένως, γίνεται λόγος για τον νυχτερινό φωτισμό, ο οποίος διατηρείται σταθερός σε όλο το μήκος της σήραγγας, και για τον φωτισμό των ζωνών προσαρμογής, δηλαδή της

ζώνης κατωφλίου και της ζώνης μετάβασης, το διάγραμμα λαμπρότητας των οποίων θα έχει τη μορφή που φαίνεται στην εικόνα 5.1.

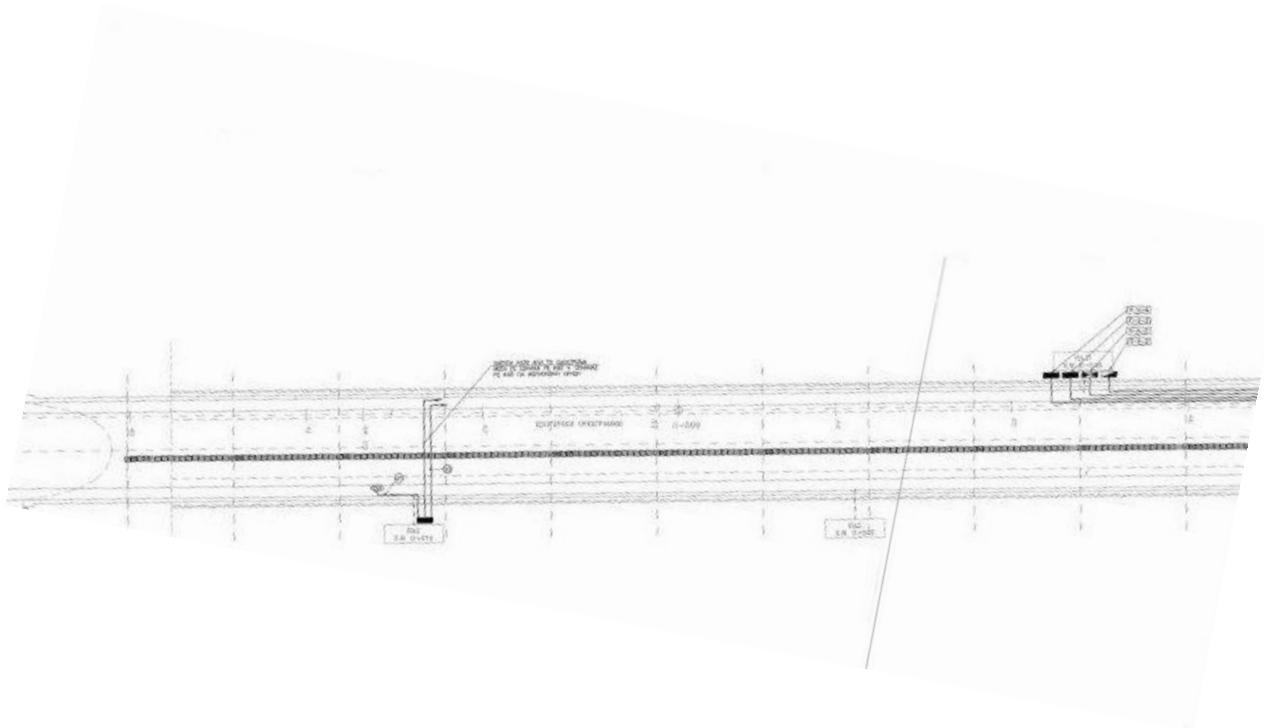
5.2.2 Περιγραφή του υφιστάμενου συστήματος φωτισμού της σήραγγας

Το υπάρχον σύστημα φωτισμού περιλαμβάνει φωτιστικά σώματα με λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης (N.Y.Π.) των 400/250/150/100 Watt, συμμετρικού και ασύμμετρου τύπου. Ο φωτισμός ημέρας γίνεται με ασύμμετρα φωτιστικά σώματα των 400W και των 250W, τύπου counter beam, και συμμετρικά σώματα των 250W και 150W, ενώ για τη νύχτα χρησιμοποιούνται συμμετρικά φωτιστικά των 100W. Τα φωτιστικά αυτά είναι ομαδοποιημένα σε 6 συνολικά βαθμίδες, εκ των οποίων η μία αφορά στο νυχτερινό φωτισμό. Το σύστημα ελέγχου του φωτισμού είναι τύπου “switch on-off” και είναι αυτόματο με δυνατότητα χειροκίνητης επέμβασης και εφοδιασμένο με μετρητή λαμπρότητας L20, ο οποίος είναι τοποθετημένος επί ιστού στην είσοδο της σήραγγας .

Πίνακας 5.3 : Φωτιστικά υφιστάμενης εγκατάστασης.

| Είδος λαμπτήρων : Νατρίου υψηλής πίεσης | | |
|---|------------|---------------------------------|
| Σύστημα ελέγχου εγκατάστασης φωτισμού : Switch ON-OFF | | |
| | Συμμετρικά | Ασύμμετρα |
| Φωτισμός ζωνών προσαρμογής-ημέρας | 250W, 150W | 400W, 250W (τύπου counter beam) |
| Φωτισμός νύχτας | 100W | – |

Τα φωτιστικά είναι τοποθετημένα στην οροφή της σήραγγας, πάνω στην ειδική σχάρα των ισχυρών ρευμάτων, σε ύψος 6 μέτρων και 1 μέτρο δεξιά από τον κεντρικό άξονα, για λόγους ευκολίας συντήρησης και ομαλής λειτουργίας της κυκλοφορίας .



Εικόνα 5.2: Τμήμα της κάτοψης του σχεδίου της υπό μελέτη σήραγγας.

5.2.3 Υφιστάμενη εγκατεστημένη ισχύς φωτισμού

Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς, που αφορά στον φωτισμό ημέρας και νύχτας της σήραγγας, έχει υπολογιστεί στα 122,8 kW. Η τιμή αυτή θα αποτελέσει ένα από τα μέτρα σύγκρισης των σεναρίων που θα εξεταστούν παρακάτω.

Πίνακας 5.4: Αριθμός φωτιστικών και συνολική εγκατεστημένη ισχύς στην υφιστάμενη εγκατάσταση.

| Υφιστάμενη εγκατάσταση | |
|---|----------|
| Αριθμός φωτιστικών φωτισμού ημέρας | 291 |
| Αριθμός φωτιστικών φωτισμού νύχτας | 18 |
| Εγκατεστημένη ισχύς | 122,8 kW |

5.2.4 Προτάσεις αναβάθμισης της υφιστάμενης εγκατάστασης φωτισμού της υπό μελέτη σήραγγας

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας εξετάζονται προτάσεις αναβάθμισης του υφιστάμενου συστήματος φωτισμού της σήραγγας με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας, οι οποίες περιγράφονται συνοπτικά στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 5.5: Γενική περιγραφή των σεναρίων που μελετήθηκαν.

| Σενάριο | Περιγραφή |
|----------------|--|
| 1 | Αντικατάσταση των υφιστάμενων φωτιστικών Ν.Υ.Π, με φωτιστικά LED στις ήδη υπάρχουσες θέσεις εγκατάστασης, σύμφωνα με την υφιστάμενη μελέτη φωτισμού. |
| 2 | Αντικατάσταση των υφιστάμενων φωτιστικών Ν.Υ.Π, με φωτιστικά LED σε νέες θέσεις εγκατάστασης, σύμφωνα με την υφιστάμενη μελέτη φωτισμού. |
| 3 | Αντικατάσταση των υφιστάμενων φωτιστικών Ν.Υ.Π, με φωτιστικά LED σε νέες θέσεις εγκατάστασης, με καθορισμό νέων επιπέδων φωτισμού σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ CR 14380, με βάση την κυκλοφοριακή ροή. |
| 4 | Αντικατάσταση των υφιστάμενων φωτιστικών Ν.Υ.Π, με νέα φωτιστικά Ν.Υ.Π σε νέες θέσεις εγκατάστασης, με καθορισμό νέων επιπέδων φωτισμού σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ CR 14380, με βάση την κυκλοφοριακή ροή. |
| 5 | Παρέμβαση στην υφιστάμενη εγκατάσταση φωτισμού και αφαίρεση φωτιστικών, με σκοπό την επίτευξη των επιπέδων φωτισμού που ορίζει το πρότυπο ΕΛΟΤ CR 14380, με βάση την κυκλοφοριακή ροή. |

5.3 Προτάσεις αναβάθμισης του συστήματος φωτισμού της υπό μελέτης σήραγγας σύμφωνα με την υφιστάμενη μελέτη φωτισμού

5.3.1 Εισαγωγή

Για την αναβάθμιση του υφιστάμενου συστήματος φωτισμού, ακολουθήθηκαν σε αυτό το στάδιο, τα ίδια επίπεδα φωτισμού σύμφωνα με την υφιστάμενη μελέτη. Οι τιμές των μεγεθών που χρησιμοποιήθηκαν για την υφιστάμενη εγκατάσταση καθώς και για τη μελέτη των δύο επόμενων αναβαθμίσεων (Σενάριο 1 και Σενάριο 2), παρατίθενται ακολούθως:

Πίνακας 5.6: Χαρακτηριστικά μεγέθη της υπό μελέτη σήραγγας.

| | |
|---|------------------------|
| Ασφαλής Απόσταση Πέδησης (S.S.D) | 160 m |
| Εξωτερική λαμπρότητα (L20) | 3900 cd/m ² |
| Συντελεστής $k = L_{th} / L_{20}$ | 0,07 |
| Λαμπρότητα ζώνης κατωφλίου (L _{th}) | 273 cd/m ² |
| Λαμπρότητα νυχτερινής ζώνης (L _{night}) | 2 cd/m ² |
| Ταχύτητα σχεδιασμού | 100 km/h |

Πίνακας 5.7: Όρια μεγεθών σύμφωνα με τη μελέτη σχεδιασμού.

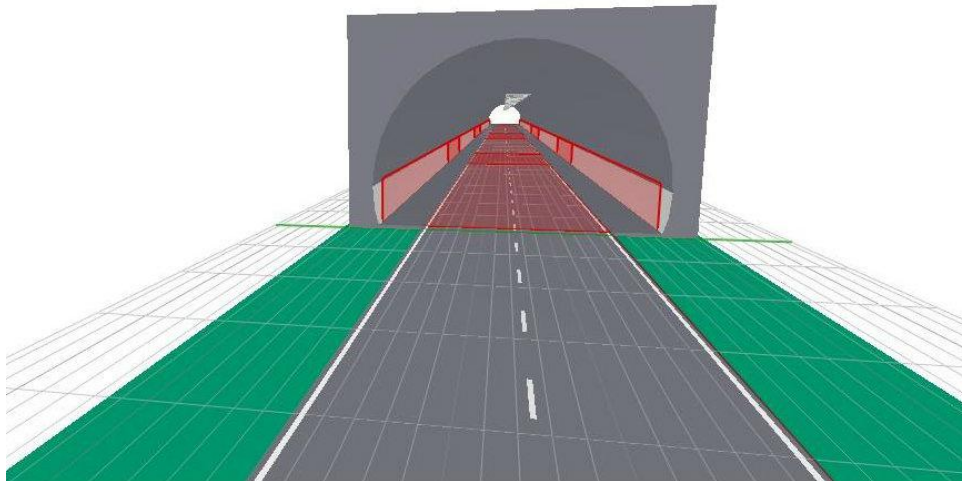
| | |
|--|-----------------------|
| Μέση λαμπρότητα βαθμίδας S1, L _{av} | 273 cd/m ² |
| Μέση λαμπρότητα νυχτερινής βαθμίδας φωτισμού, L _{night} | ≥ 2 cd/m ² |
| Ολική Ομοιομορφία, U _o | ≥ 0,4 |
| Διαμήκης ομοιομορφία, U _l | ≥ 0,6 |
| Μέγιστη προσαύξηση κατωφλίου, T.I max | ≤ 15% |

5.3.2 ΣΕΝΑΡΙΟ 1: Αντικατάσταση των υφιστάμενων φωτιστικών νατρίου υψηλής πίεσης με φωτιστικά LED στις ήδη υπάρχουσες θέσεις της εγκατάστασης

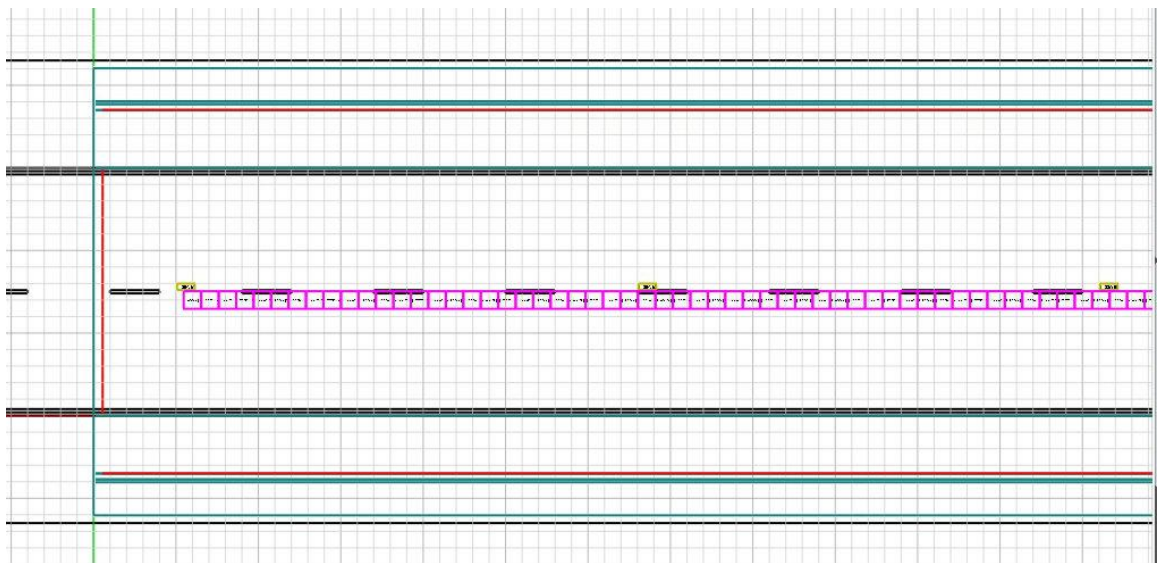
Στο ΣΕΝΑΡΙΟ 1 εξετάζεται, με χρήση του λογισμικού προσομοίωσης φωτισμού RELUX, η καταλληλότητα της αντικατάστασης των υφιστάμενων φωτιστικών νατρίου υψηλής πίεσης (N.Y.Π.) με φωτιστικά λαμπτήρων LED, δύο διαφορετικών εταιρειών Α και Β, στις ήδη υπάρχουσες θέσεις της εγκατάστασης φωτισμού της σήραγγας και κατά πόσο αυτό το σενάριο ανταποκρίνεται στις απαιτούμενες προδιαγραφές του συστήματος φωτισμού.

5.3.2.1 Αντικατάσταση με φωτιστικά LED τύπου Α.

Το πρώτο βήμα της ερευνητικής διαδικασίας είναι η κατασκευή της υπό μελέτη σήραγγας στο λογισμικό προσομοίωσης RELUX και η επιλογή των φωτιστικών σωμάτων και τοποθέτηση αυτών σε θέσεις «ένα προς ένα» των υφιστάμενων φωτιστικών. Το είδος ελέγχου των φωτιστικών σωμάτων καθορίζεται να είναι τύπου “Switch On/Off”.



Εικόνα 5.3: Πρόσοψη σήραγγας στο λογισμικό Relux Tunnel.



Εικόνα 5.4: Κάτοψη του αρχικού τμήματος της ζώνης κατωφλίου της σήραγγας, με τα φωτιστικά ζώνης κατωφλίου και νυχτερινής, στο λογισμικό Relux Tunnel.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται η ισχύς και η φωτεινή απόδοση των φωτιστικών τύπου LED που χρησιμοποιούνται στο παρόν σενάριο.

Πίνακας 5.8: Χαρακτηριστικά μεγέθη των φωτιστικών LED τύπου A, Σενάριο 1.

| Τύπος Φωτιστικού | Ζώνη Φωτισμού | Ισχύς φωτιστικού (με ballast) (W) | Φωτεινή Απόδοση (lm/W) | Πλήθος φωτιστικών | Ισχύς (KW) |
|------------------|---------------|-----------------------------------|------------------------|-------------------|------------|
| LED A | Νυχτερινή | 76,3 | 119,3 | 18 | 1,37 |
| | Προσαρμογής | 360 | 100 | 291 | 104,7 |
| Σύνολο | | | | 309 | 106,07 |

*Τα πολικά διαγράμματα των φωτιστικών σωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν, φαίνονται στο Παράρτημα Α.

Πρέπει να σημειωθεί ότι τα φωτιστικά που βρίσκονται τοποθετημένα μέσα σε μια σήραγγα είναι χωρισμένα σε ομάδες, ώστε να είναι δυνατόν να παρακολουθούνται και να ρυθμίζεται η λειτουργία τους από το σύστημα ελέγχου, ανάλογα με τις τιμές της εξωτερικής λαμπρότητας L20, οι οποίες μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της ημέρας. Κάποιες ομάδες φωτιστικών τίθενται εκτός λειτουργίας, ώστε να προσαρμόζεται ο φωτισμός μέσα στη σήραγγα στις νέες τιμές του Lth ($Lth=k \cdot L20$), και συνεπώς να αποφεύγεται η άσκοπη κατανάλωση ενέργειας.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, τα φωτιστικά των ζωνών προσαρμογής (κατωφλίου και μετάβασης) είναι χωρισμένα σε 4 ομάδες, ενώ τα φωτιστικά της νύχτας σε 1 ομάδα. Ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας των 4 ομάδων φωτιστικών, και το αν είναι όλες ταυτόχρονα σε λειτουργία ή κάποιες είναι εκτός, δημιουργούνται 4 βαθμίδες φωτισμού, για τις ζώνες προσαρμογής (S1, S2, S3, S4), και 1 βαθμίδα για τη νύχτα (Int.1).

Όταν, λοιπόν, είναι σε λειτουργία η βαθμίδα:

- S1, τότε όλα τα φωτιστικά στις ζώνες προσαρμογής και νύχτας είναι σε λειτουργία, και επιτυγχάνεται τιμή Lth στο 100% της μέγιστης τιμής.
- S2, τότε τίθεται εκτός λειτουργίας η πρώτη από τις 4 ομάδες φωτιστικών των ζωνών προσαρμογής, (τα φωτιστικά νύχτας παραμένουν σε λειτουργία), και επιτυγχάνεται τιμή Lth στο 75% της μέγιστης τιμής.
- S3, τότε τίθενται εκτός λειτουργίας 2 από τις 4 ομάδες φωτιστικών των ζωνών προσαρμογής, (τα φωτιστικά νύχτας παραμένουν σε λειτουργία), και επιτυγχάνεται τιμή Lth στο 50% της μέγιστης τιμής.
- S4, τότε τίθενται εκτός λειτουργίας 3 από τις 4 ομάδες φωτιστικών των ζωνών προσαρμογής, (τα φωτιστικά νύχτας παραμένουν σε λειτουργία), και επιτυγχάνεται τιμή Lth στο 25% της μέγιστης τιμής.
- Int.1, τότε τίθενται εκτός λειτουργίας όλες οι ομάδες φωτιστικών των ζωνών προσαρμογής και είναι σε λειτουργία μόνο η νυχτερινή βαθμίδα φωτισμού.

| Control groups | S1 | S2 | S3 | S4 | Int.1 |
|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Adaptation | | | | | |
| 1 | 100% | out | out | out | out |
| 2 | 100% | 100% | out | out | out |
| 3 | 100% | 100% | 100% | out | out |
| 4 | 100% | 100% | 100% | 100% | out |
| Interior | | | | | |
| 5 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| Calculate | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Percent Lth | 100.00 | 75.00 | 50.00 | 25.00 | |
| Lth [cd/m ²] | 273.00 | 204.75 | 136.50 | 68.25 | |
| Entrance lengt... | 318.00 | 279.00 | 236.00 | 186.00 | |

Εικόνα 5.5: Ρύθμιση βαθμίδων φωτισμού στο λογισμικό Relux.

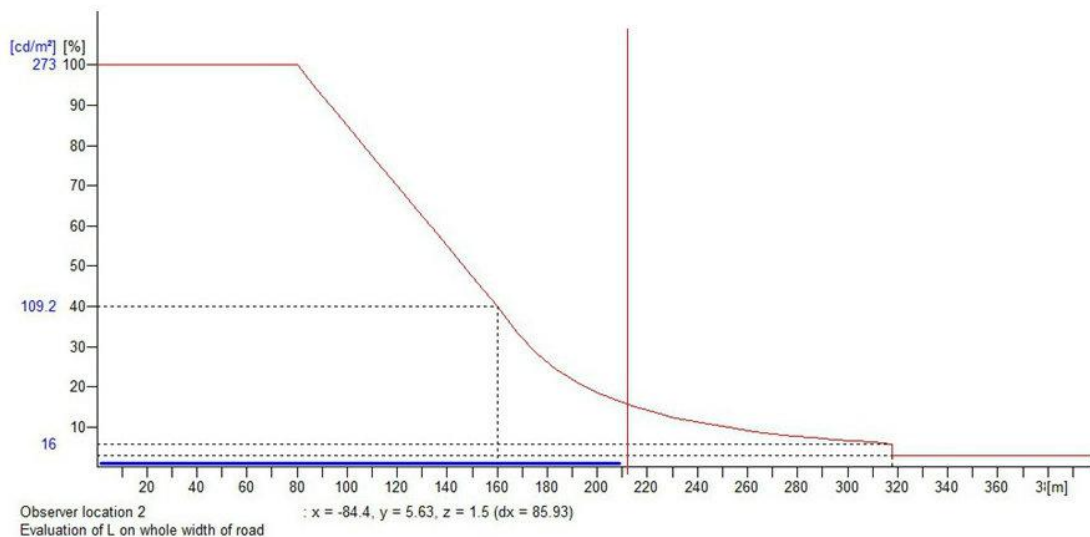
Μετά από τις παραπάνω ρυθμίσεις, προκύπτουν τα κάτωθι αποτελέσματα:

Πίνακας 5.9: Αποτελέσματα του Relux για τα φωτιστικά LED τύπου A, Σενάριο 1.

| Βαθμίδα | Int.1 | S4(25%) | S3(50%) | S2(75%) | S1(100%) |
|---------------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Roadway | | | | | |
| Lav | 2.23 cd/m ² | 52.8 cd/m ² | 105.6 cd/m ² | 158.4 cd/m ² | 211.17 cd/m ² |
| Uo | 0.6 | 0.61 | 0.62 | 0.64 | 0.67 |
| U1 | 0.75 | 0.80 | 0.82 | 0.86 | 0.87 |
| Tlmax | 1.66 % | 1.16 % | 1.16 % | 1.16 % | 1.16 % |
| Wall left (diffuse 70%) | | | | | |
| Lav | 4.93 cd/m ² | 128 cd/m ² | 256 cd/m ² | 384 cd/m ² | 512.01 cd/m ² |
| Uo | 0.73 | 0.90 | 0.91 | 0.92 | 0.89 |
| Wall right (diffuse 70%) | | | | | |
| Lav | 4.93 cd/m ² | 128 cd/m ² | 256 cd/m ² | 384 cd/m ² | 512.01 cd/m ² |
| Uo | 0.73 | 0.90 | 0.91 | 0.92 | 0.89 |

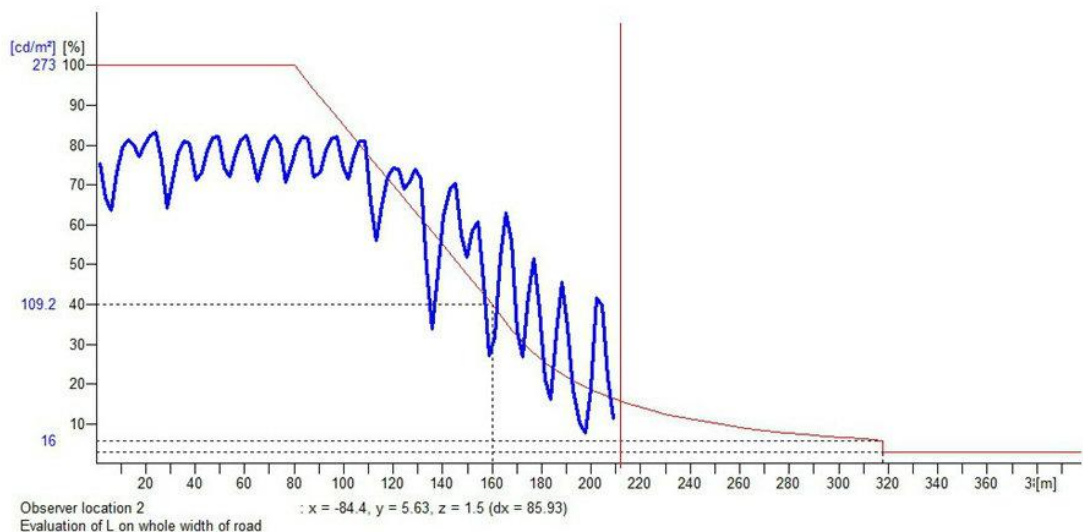
Από τον παραπάνω πίνακα είναι φανερό, ότι ενώ η λαμπρότητα και οι ομοιομορφίες για τα φωτιστικά νύχτας (interior zone) είναι μέσα στα επιθυμητά όρια, τόσο για το οδόστρωμα όσο και για τους τοίχους, όταν είναι σε λειτουργία οι βαθμίδες S4, S3, S2, και S1 η λαμπρότητα που επιτυγχάνεται είναι χαμηλή και δεν ανταποκρίνεται στις προδιαγραφές της μελέτης. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση που είναι σε λειτουργία η βαθμίδα S1, δηλαδή όταν είναι σε λειτουργία όλα τα φωτιστικά, ημέρας και νύχτας, η μέση λαμπρότητα φτάνει στην τιμή 211,17 cd/m², η οποία είναι πολύ μικρότερη της επιθυμητής (273 cd/m²).

Αυτό γίνεται αντιληπτό και από τα διαγράμματα λαμπρότητας που φαίνονται στις κάτωθι εικόνες :



*η κάθετη κόκκινη γραμμή ορίζει το πέρας της σήραγγας που είναι τα 212m

Εικόνα 5.6 : Διάγραμμα λαμπρότητας νυχτερινού φωτισμού για φωτιστικά LED τύπου A σε θέσεις ένα προς ένα, Σενάριο 1.



*η κάθετη κόκκινη γραμμή ορίζει το πέρας της σήραγγας που είναι τα 212m

Εικόνα 5.7 : Διάγραμμα λαμπρότητας για τη βαθμίδα φωτισμού S1 (100%) για φωτιστικά LED τύπου A σε θέσεις ένα προς ένα, Σενάριο 1.

Το κόκκινο διάγραμμα απεικονίζει την ιδανική καμπύλη τιμών λαμπρότητας που έχει υπολογιστεί από το RELUX βάσει των επιθυμητών τιμών της μελέτης, ενώ το μπλε διάγραμμα αφορά στις τιμές λαμπρότητας που προέκυψαν από τη χρήση των φωτιστικών που επιλέχθηκαν. Η κάθετη διαχωριστική γραμμή δηλώνει το πέρας της υπό μελέτη σήραγγας.

5.3.2.2 Αντικατάσταση με φωτιστικά LED τύπου B.

Η ίδια ακριβώς διαδικασία που ακολουθείται στην παράγραφο 5.3.2.1 για την αντικατάσταση των υφιστάμενων φωτιστικών Ν.Υ.Π με τα φωτιστικά LED τύπου Α, εφαρμόζεται και για την αντικατάσταση των υφιστάμενων φωτιστικών σε θέσεις «ένα προς ένα», με φωτιστικά LED τύπου Β.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται η ισχύς και η φωτεινή απόδοση των φωτιστικών LED που χρησιμοποιούνται στο παρόν σενάριο.

Πίνακας 5.10 : Χαρακτηριστικά μεγέθη των φωτιστικών LED τύπου Β, Σενάριο 1.

| Τύπος Φωτιστικού | Ζώνη Φωτισμού | Ισχύς φωτιστικού (με ballast) (W) | Φωτεινή Απόδοση (lm/W) | Πλήθος φωτιστικών | Ισχύς (KW) |
|------------------|---------------|-----------------------------------|------------------------|-------------------|------------|
| LED A | Νυχτερινή | 75 | 123 | 18 | 1,35 |
| | Προσαρμογής | 322 | 116,1 | 291 | 93,7 |
| Σύνολο | | | | 309 | 95,05 |

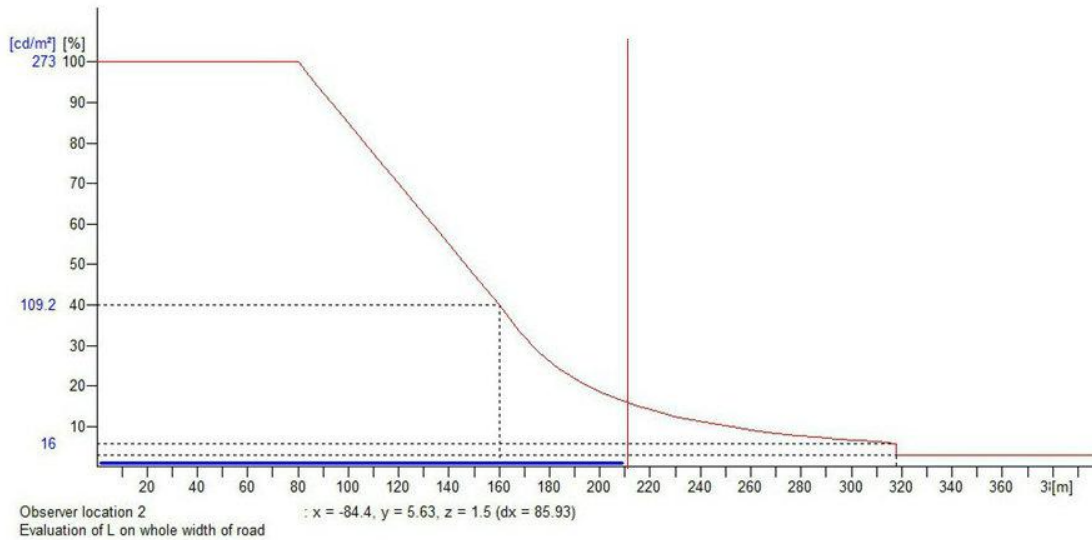
*Τα πολικά διαγράμματα των φωτιστικών σωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν, φαίνονται στο Παράρτημα Α.

Με την εκτέλεση του προγράμματος RELUX προκύπτουν οι τιμές λαμπρότητας και ομοιομορφίας που συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 5.11 : Αποτελέσματα του Relux για τα φωτιστικά LED τύπου Β, Σενάριο 1.

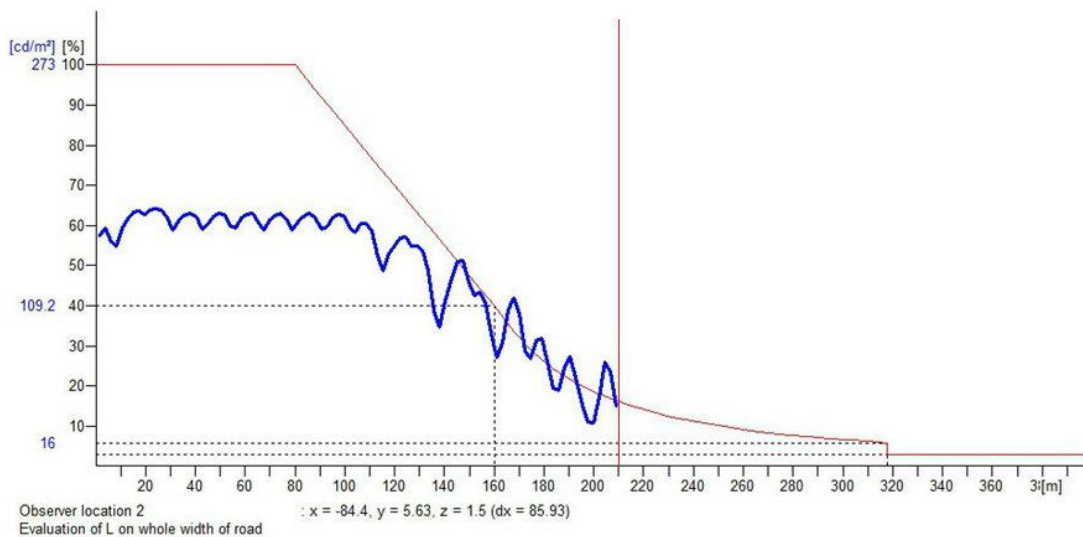
| Βαθμίδα | Int.1 | S4(25%) | S3(50%) | S2(75%) | S1(100%) |
|---------------------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Roadway | | | | | |
| Lav | 1,46 cd/m ² | 41,69 cd/m ² | 83,38 cd/m ² | 125,07 cd/m ² | 166,77 cd/m ² |
| Uo | 0,64 | 0,66 | 0,67 | 0,68 | 0,70 |
| U1 | 0,96 | 0,94 | 0,93 | 0,94 | 0,94 |
| Tlmax | 3,31 % | 1,41 % | 1,41 % | 1,41 % | 1,41 % |
| Wall left (diffuse 70%) | | | | | |
| Lav | 4,53 cd/m ² | 84,75 cd/m ² | 169,5 cd/m ² | 254,25 cd/m ² | 339,01 cd/m ² |
| Uo | 0,80 | 0,90 | 0,92 | 0,95 | 0,97 |
| Wall right (diffuse 70%) | | | | | |
| Lav | 4,65 cd/m ² | 84,79 cd/m ² | 169,58 cd/m ² | 254,37 cd/m ² | 339,16 cd/m ² |
| Uo | 0,75 | 0,90 | 0,92 | 0,95 | 0,97 |

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι μόνο ο φωτισμός της νύχτας μπορεί να είναι κατάλληλος, αφού ικανοποιεί τα επιθυμητά όρια λαμπρότητας και ομοιομορφίας (πίνακας 5.7) ενώ στις υπόλοιπες βαθμίδες φωτισμού τα επίπεδα λαμπρότητας απέχουν αρκετά από τις επιθυμητές τιμές, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τα διαγράμματα λαμπρότητας που φαίνονται ακολούθως :



*η κάθετη κόκκινη γραμμή ορίζει το πέρας της σήραγγας που είναι τα 212m

Εικόνα 5.8 : Διάγραμμα λαμπρότητας νυχτερινού φωτισμού για φωτιστικά LED τύπου B σε θέσεις ένα προς ένα, Σενάριο 1.



*η κάθετη κόκκινη γραμμή ορίζει το πέρας της σήραγγας που είναι τα 212m

Εικόνα 5.9: Διάγραμμα λαμπρότητας για τη βαθμίδα φωτισμού S1 (100%) με φωτιστικά LED τύπου B σε ένα προς ένα αντικατάσταση, Σενάριο 1.

5.3.2.3 Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων του Σεναρίου 1

Στον ακόλουθο πίνακα φαίνονται οι τιμές της λαμπρότητας του οδοστρώματος, (ημέρας και νύχτας) και η ισχύς που υπολογίστηκαν κατά τη μελέτη του 1^{ου} Σεναρίου, με τα φωτιστικά LED τύπου A και τύπου B, καθώς και οι αντίστοιχες τιμές της υφιστάμενης εγκατάστασης φωτισμού.

Πίνακας 5.12 : Αποτελέσματα Σεναρίου 1 για LED A και LED B.

| Εξεταζόμενο σενάριο | | Πλήθος φωτιστικών | | Lav S1(100%) (cd/m ²) | Lav_Night (cd/m ²) | Συνολική εγκατεστημένη ισχύς (kW) |
|--|-------|-------------------|--------|--------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| | | Νύχτας | Ημέρας | | | |
| ΣΕΝΑΡΙΟ 1 ^ο | LED A | 18 | 291 | 211,17 | 2,23 | 106,2 |
| | LED B | 18 | 291 | 166,77 | 1,46 | 95,1 |
| Υφιστάμενη εγκατάσταση με φωτιστικά Ν.Υ.Π. | | 18 | 291 | 273 | 2 | 122,8 |

Στο στάδιο αυτό της μελέτης, παρατηρείται, ότι τα φωτιστικά LED A και B της βαθμίδας S1 (100%), δεν ικανοποιούν την επιθυμητή τιμή μέγιστης λαμπρότητας (273 cd/m²). Όσον αφορά στη νυχτερινή βαθμίδα φωτισμού, μόνο τα φωτιστικά LED τύπου A καλύπτουν τα ζητούμενα όρια (Lav_night \geq 2 cd/m²).

Επομένως, το Σενάριο 1 κρίνεται απαγορευτικό ως πρόταση αναβάθμισης, καθώς δεν πληροί το κριτήριο των απαιτούμενων επιπέδων λαμπρότητας που ορίζει το πρότυπο μελέτης της εν λόγω σήραγγας και συνεπώς δεν εξετάζεται από άποψη κατανάλωσης ενέργειας. Ενδιαφέρον παρουσιάζει, ωστόσο, η νυχτερινή βαθμίδα φωτισμού με LED A, η οποία καλύπτει το απαιτούμενο όριο λαμπρότητας και για το λόγο αυτό εξετάζεται το ενεργειακό όφελος της αντικατάστασης αυτής στο κεφάλαιο 6.

5.3.3 ΣΕΝΑΡΙΟ 2: Αντικατάσταση των υφιστάμενων φωτιστικών Ν.Υ.Π. με φωτιστικά LED σε νέες θέσεις εγκατάστασης.

Στο ΣΕΝΑΡΙΟ 2 θα εξετασθεί, η καταλληλότητα της αντικατάστασης των υφιστάμενων φωτιστικών νατρίου υψηλής πίεσης με φωτιστικά τύπου LED, δύο διαφορετικών εταιρειών A και B, σε νέες θέσεις εγκατάστασης, με χρήση του λογισμικού προσομοίωσης φωτισμού RELUX.

5.3.3.1 Αντικατάσταση με φωτιστικά LED τύπου A.

Με χρήση του Relux, προσομοιώνεται η υπό μελέτη σήραγγα, ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με αυτή στην παράγραφο 5.3.2.1. με τη διαφορά ότι τα φωτιστικά τοποθετούνται σε νέες θέσεις εγκατάστασης.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται η ισχύς, η φωτεινή απόδοση το πλήθος των φωτιστικών τύπου LED που χρησιμοποιήθηκαν στο παρόν σενάριο και η ισχύς ανά ζώνη φωτισμού.

Πίνακας 5.13: Χαρακτηριστικά μεγέθη των φωτιστικών LED τύπου A, Σενάριο 2.

| Τύπος Φωτιστικού | Ζώνη Φωτισμού | Ισχύς φωτιστικού (με ballast) (W) | Φωτεινή Απόδοση (lm/W) | Πλήθος φωτιστικών | Ισχύς (kW) |
|------------------|---------------|-----------------------------------|------------------------|-------------------|------------|
| LED A | Νυχτερινή | 76,3 | 119,3 | 15 | 1,14 |
| | Προσαρμογής | 360 | 100 | 305 | 109,8 |
| Σύνολο | | | | 320 | 110,94 |

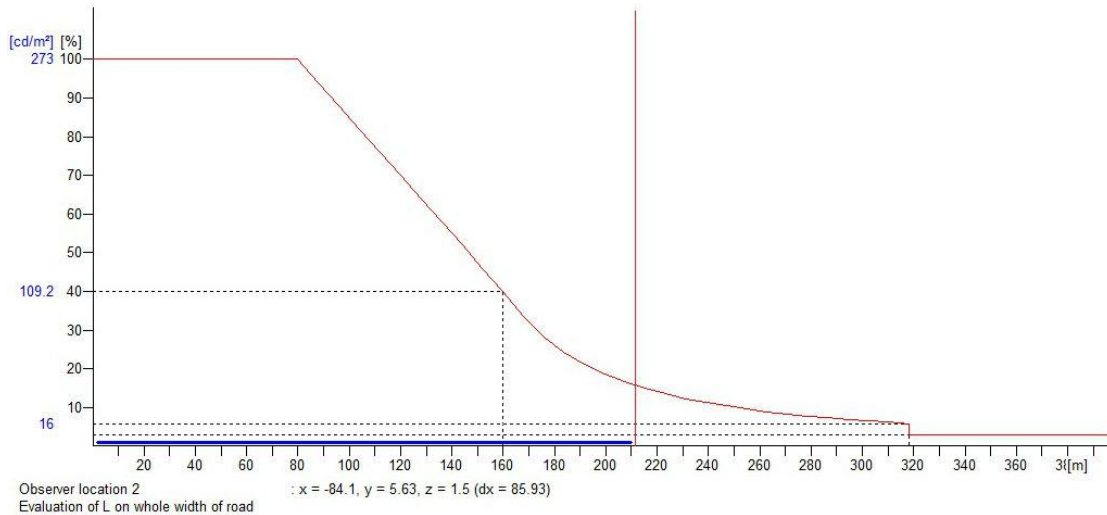
*Τα πολικά διαγράμματα των φωτιστικών σωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν, φαίνονται στο Παράρτημα Α.

Με την εκτέλεση του προγράμματος προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

Πίνακας 5.14: Αποτελέσματα του Relux για τα φωτιστικά LED τύπου A, Σενάριο 2.

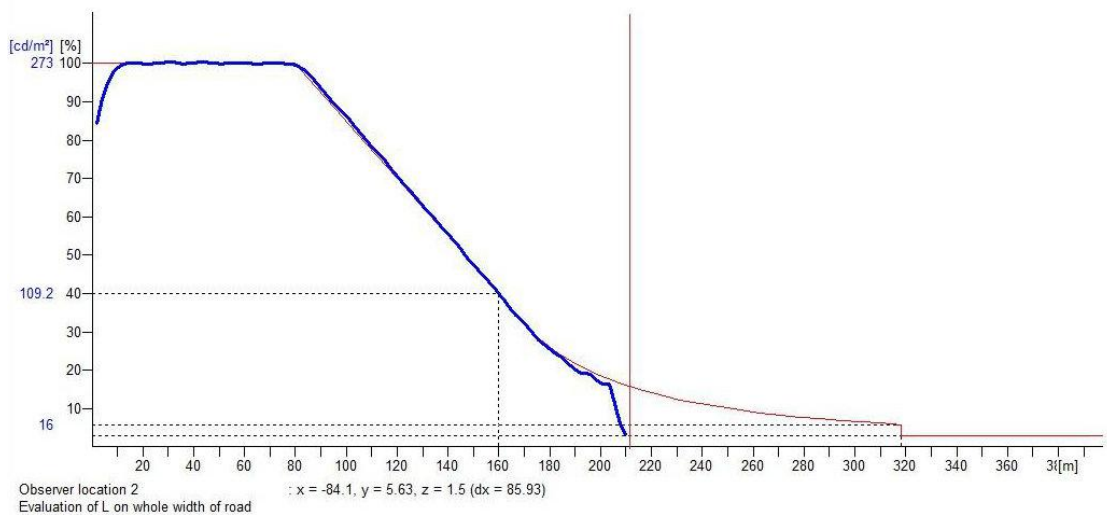
| Βαθμίδα | Int.1 | S4(25%) | S3(50%) | S2(75%) | S1(100%) |
|---------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Roadway | | | | | |
| Lav | 2,01 cd/m ² | 69,38 cd/m ² | 136,78 cd/m ² | 204,17 cd/m ² | 272,6 cd/m ² |
| Uo | 0,5 | 0,68 | 0,68 | 0,68 | 0,68 |
| Ul | 0,6 | 0,98 | 0,99 | 0,99 | 1,00 |
| Tlmax | 1,88 % | 1,11 % | 1,11 % | 1,11 % | 1,11 % |
| Wall left (diffuse 70%) | | | | | |
| Lav | 4,16 cd/m ² | 164,27 cd/m ² | 324,06 cd/m ² | 484,19 cd/m ² | 643,98 cd/m ² |
| Uo | 0,48 | 0,96 | 0,96 | 0,97 | 0,97 |
| Wall right (diffuse 70%) | | | | | |
| Lav | 4,16cd/m ² | 164,27 cd/m ² | 324,06 cd/m ² | 484,19 cd/m ² | 643,98 cd/m ² |
| Uo | 0,48 | 0,96 | 0,96 | 0,97 | 0,97 |

Από τον παραπάνω πίνακα (5.14) διαπιστώνεται ότι όλες οι βαθμίδες πληρούν τις προϋποθέσεις για ομοιομορφία ($U_0 \geq 0.4$ και $U_1 \geq 0.6$) και οι τιμές λαμπρότητας των τοιχωμάτων και του οδοστρώματος φθάνουν τις επιθυμητές ($L_{av} = 273 \text{ cd/m}^2$ και $L_{av_night} \geq 2 \text{ cd/m}^2$).



*η κάθετη κόκκινη γραμμή ορίζει το πέρας της σήραγγας που είναι τα 212m

Εικόνα 5.10: Διάγραμμα λαμπρότητας νυχτερινού φωτισμού για φωτιστικά LED τύπου A σε νέες θέσεις εγκατάστασης, Σενάριο 2.



*η κάθετη κόκκινη γραμμή ορίζει το πέρας της σήραγγας που είναι τα 212m

Εικόνα 5.11: Διάγραμμα λαμπρότητας βαθμίδας φωτισμού S1(100%) για φωτιστικά LED τύπου A σε νέες θέσεις εγκατάστασης, Σενάριο 2.

5.3.3.2 Αντικατάσταση με φωτιστικά LED τύπου B.

Ακολουθώντας ακριβώς τα ίδια βήματα με πριν, τα φωτιστικά LED της εταιρείας B τοποθετούνται σε νέες θέσεις εγκατάστασης.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται η ισχύς, η φωτεινή απόδοση το πλήθος των φωτιστικών τύπου LED που χρησιμοποιήθηκαν στο παρόν σενάριο και η ισχύς ανά ζώνη φωτισμού.

Πίνακας 5.15: Χαρακτηριστικά μεγέθη των φωτιστικών LED τύπου B, Σενάριο 2.

| Τύπος Φωτιστικού | Ζώνη Φωτισμού | Ισχύς φωτιστικού (με ballast) (W) | Φωτεινή Απόδοση (lm/W) | Πλήθος φωτιστικών | Ισχύς (Kw) |
|------------------|---------------|-----------------------------------|------------------------|-------------------|------------|
| LED B | Νυχτερινή | 139 | 111,9 | 16 | 2,22 |
| | Προσαρμογής | 322 | 116,1 | 331 | 106,6 |
| Σύνολο | | | | 347 | 108,82 |

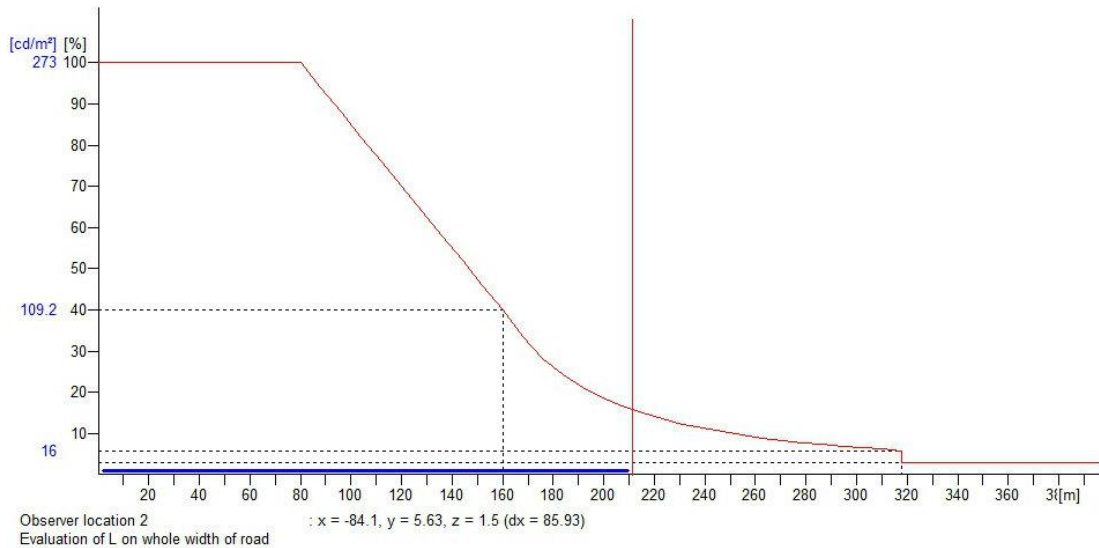
*Τα πολικά διαγράμματα των φωτιστικών σωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν, φαίνονται στο Παράρτημα Α.

Με την εκτέλεση του προγράμματος RELUX προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα :

Πίνακας 5.16: Αποτελέσματα του Relux για τα φωτιστικά LED τύπου B, Σενάριο 2.

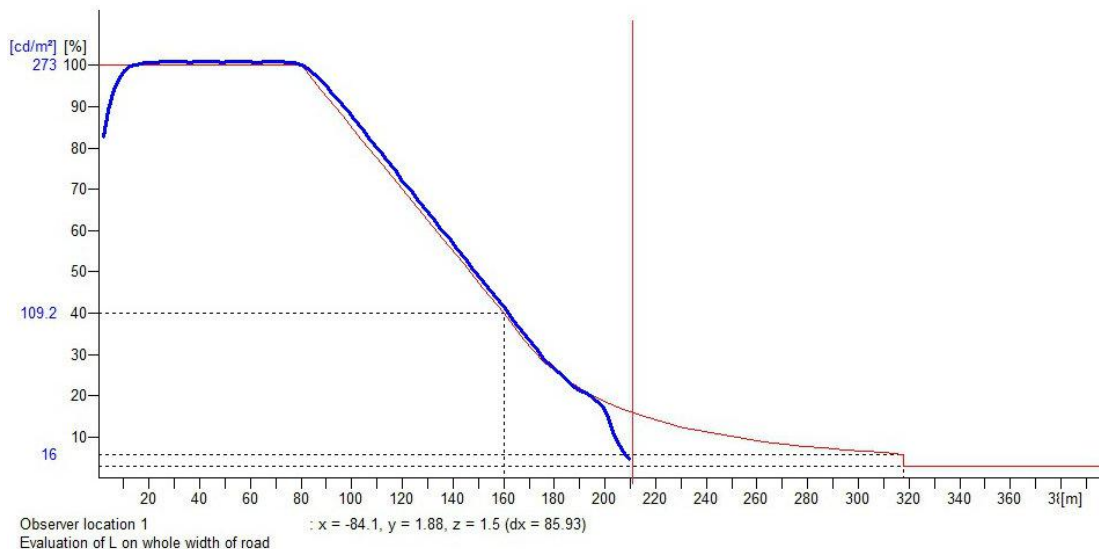
| Βαθμίδα | Int.1 | S4(25%) | S3(50%) | S2(75%) | S1(100%) |
|---------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Roadway | | | | | |
| Lav | 2,26 cd/m ² | 69,87 cd/m ² | 137,48 cd/m ² | 205,05 cd/m ² | 273 cd/m ² |
| Uo | 0,64 | 0,64 | 0,64 | 0,65 | 0,64 |
| U1 | 0,84 | 0,99 | 1,00 | 0,99 | 1,00 |
| Tlmax | 4,24 % | 0,93 % | 0,93 % | 0,93 % | 0,93 % |
| Wall left (diffuse 70%) | | | | | |
| Lav | 7,38 cd/m ² | 166,07 cd/m ² | 324,58 cd/m ² | 483,06 cd/m ² | 641,6 cd/m ² |
| Uo | 0,66 | 0,87 | 0,88 | 0,88 | 0,88 |
| Wall right (diffuse 70%) | | | | | |
| Lav | 7,38 cd/m ² | 166,07 cd/m ² | 324,58 cd/m ² | 483,06 cd/m ² | 641,6 cd/m ² |
| Uo | 0,66 | 0,87 | 0,88 | 0,88 | 0,88 |

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι όλες οι βαθμίδες φωτισμού πληρούν τις προϋποθέσεις για ομοιομορφία μέσα στα όρια ($U_0 \geq 0.4$ και $U_1 \geq 0.6$) και οι τιμές λαμπρότητας των τοιχωμάτων και του οδοστρώματος φτάνουν τις επιθυμητές τιμές ($L_{av} = 273 \text{ cd/m}^2$ και $L_{av_night} \geq 2 \text{ cd/m}^2$).



*η κάθετη κόκκινη γραμμή ορίζει το πέρας της σήραγγας που είναι τα 212m

Εικόνα 1.12: Διάγραμμα λαμπρότητας νυχτερινού φωτισμού για φωτιστικά LED τύπου B σε νέες θέσεις εγκατάστασης, Σενάριο 2.



*η κάθετη κόκκινη γραμμή ορίζει το πέρας της σήραγγας που είναι τα 212m

Εικόνα 5.13: Διάγραμμα λαμπρότητας βαθμίδας φωτισμού S1(100%) για φωτιστικά LED τύπου B σε νέες θέσεις εγκατάστασης, Σενάριο 2.

5.3.3.3 Συνοπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων του 2^{ου} Σεναρίου

Στον ακόλουθο πίνακα συνοψίζονται οι τιμές που προέκυψαν κατά τη μελέτη του 2^{ου} Σεναρίου, με τα φωτιστικά τύπου LED τύπου A και LED τύπου B, καθώς και οι αντίστοιχες τιμές της υφιστάμενης εγκατάστασης φωτισμού.

Πίνακας 5.17 : Αποτελέσματα Σεναρίου 2 για LED A και LED B.

| Εξεταζόμενο Σενάριο | | Πλήθος φωτιστικών | | Lav S1(100%) cd/m ² | Lav_Night cd/m ² | Συνολική Εγκατεστημένη Ισχύς kW |
|--|-------|-------------------|--------|-----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| | | Νύχτας | Ημέρας | | | |
| Σενάριο 2 ^ο | LED A | 15 | 305 | 272,6 | 2,01 | 110,94 |
| | LED B | 16 | 331 | 273 | 2,26 | 108,82 |
| Υφιστάμενη εγκατάσταση με φωτιστικά Ν.Υ.Π. | | 18 | 291 | 273 | 2 | 122,8 |

Από τον παραπάνω πίνακα, είναι φανερό ότι τα φωτιστικά LED A και B, φθάνουν την επιθυμητή τιμή μέγιστης λαμπρότητας (273 cd/m²), καθώς και την επιθυμητή τιμή για τη νυχτερινή βαθμίδα φωτισμού (Lav_night \geq 2 cd/m²), ενώ παρατηρείται και μείωση στην εγκατεστημένη ισχύ. Το ενεργειακό και οικονομικό όφελος του Σεναρίου αυτού, εξετάζεται στο 6^ο κεφάλαιο.

5.4 Αναβάθμιση του υφιστάμενου συστήματος φωτισμού με καθορισμό νέων επιπέδων φωτισμού, σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ CR 14380 με βάση την κυκλοφοριακή ροή

5.4.1 Εισαγωγή

Για την αναβάθμιση του υφιστάμενου συστήματος φωτισμού, χρησιμοποιούνται σε αυτό το στάδιο, νέα επίπεδα φωτισμού σύμφωνα με αυτά που ορίζει το πρότυπο ΕΛΟΤ CR 14380 με βάση την κυκλοφοριακή ροή των οχημάτων μέσα στη σήραγγα.

Με βάση την υπολογισθείσα τιμή εξωτερικής λαμπρότητας, από την υφιστάμενη εγκατάσταση φωτισμού (L20 = 3900 cd/m²), καθορίζεται η τάξη της σήραγγας ως ακολούθως.

Σύμφωνα με τον πίνακα 3.6, η σύσταση της κυκλοφορίας είναι κατηγορίας A, δηλαδή μόνο μηχανοκίνητα οχήματα, ενώ παράλληλα η πυκνότητα της κυκλοφορίας για τη δεδομένη σήραγγα κρίνεται μέτρια και προκύπτει ότι η υπό μελέτη σήραγγα είναι κλάσης 2.

Στη συνέχεια, από τον πίνακα 3.7 και με βάση την απόσταση πέδησης, η οποία στην προκειμένη περίπτωση έχει υπολογιστεί στα 160 m, αλλά και την κλάση της σήραγγας, η οποία είναι 2, προκύπτει ότι ο συντελεστής $k (=L_{th}/L_{20})$ είναι ίσος με 0,05.

Επομένως, υπολογίζεται ότι η μέγιστη λαμπρότητα της ζώνης κατωφλίου ισούται με:

$$L_{th} = k \times L_{20} = 0,05 \times 3900 \text{ cd/m}^2 = 195 \text{ cd/m}^2$$

Επιπλέον, τα όρια των ομοιομορφιών θα είναι σύμφωνα με τον πίνακα 3.9, $U_0 \geq 0,3$ και $UI \geq 0,5$, ενώ η μέση λαμπρότητα του οδοστρώματος κατά τη διάρκεια της νύχτας θα πρέπει να είναι $L_{av(night)} \geq 1 \text{ cd/m}^2$.

Τα όρια των μεγεθών που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη των επόμενων αναβαθμίσεων (Σενάριο 3, Σενάριο 4, Σενάριο 5), παρατίθενται ακολούθως:

Πίνακας 5.18: Όρια μεγεθών μετά την αναθεώρηση των επιπέδων φωτισμού.

| | |
|---|-------------------------|
| Μέση λαμπρότητα βαθμίδας S1, L_{av} | 195 cd/m^2 |
| Μέση λαμπρότητα νυχτερινής βαθμίδας φωτισμού, L_{night} | 1 έως 2 cd/m^2 |
| Ολική Ομοιομορφία, U_0 | $\geq 0,3$ |
| Διαμήκης ομοιομορφία, UI | $\geq 0,5$ |
| Μέγιστη προσαύξηση κατωφλίου, $T.I \text{ max}$ | $\leq 15\%$ |

5.4.2 ΣΕΝΑΡΙΟ 3: Αντικατάσταση των υφιστάμενων φωτιστικών νατρίου υψηλής πίεσης σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ CR 14380 με βάση την κυκλοφοριακή ροή, με φωτιστικά LED σε νέες θέσεις εγκατάστασης

Στο Σενάριο 3 εξετάζεται, η καταλληλότητα των φωτιστικών LED των εταιρειών Α και Β, με τη χρήση των νέων επιπέδων φωτισμού (πίνακας 5.18). Στο σενάριο αυτό, τα φωτιστικά τοποθετούνται σε νέες θέσεις, σε αυτές που ορίζει ο αλγόριθμος του Relux.

5.4.2.1 Αντικατάσταση με φωτιστικά LED τύπου Α

Με την προσομοίωση της υπό μελέτη σήραγγας στο λογισμικό RELUX και την τοποθέτηση των νέων φωτιστικών σε αυτή, προκύπτουν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη συνέχεια.

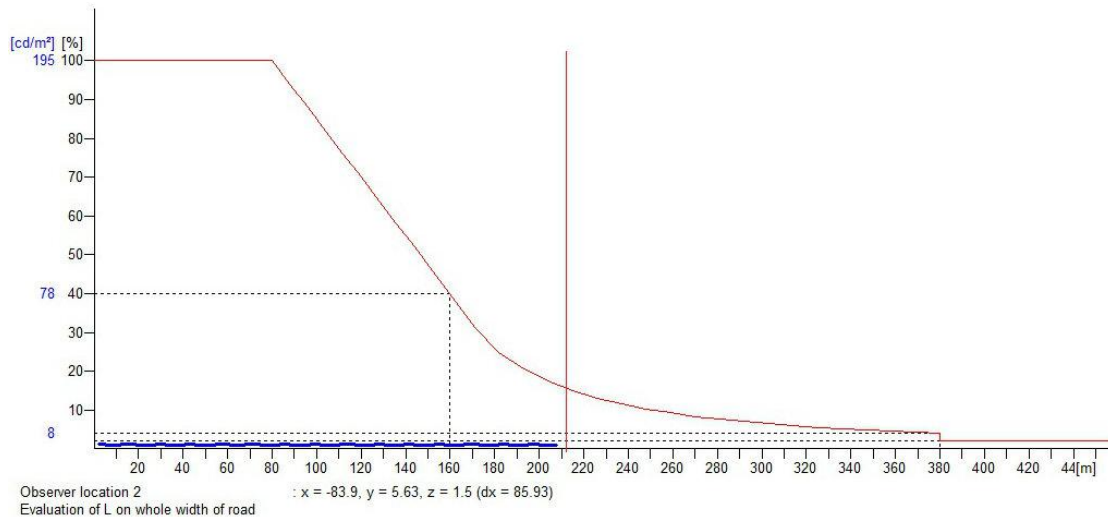
Πίνακας 5.19: Χαρακτηριστικά μεγέθη των φωτιστικών LED τύπου A, Σενάριο 3.

| Τύπος φωτιστικού | Ζώνη φωτισμού | Ισχύς φωτιστικού (με ballast) (W) | Φωτεινή απόδοση (lm/W) | Πλήθος φωτιστικών | Ισχύς (KW) |
|------------------|---------------|-----------------------------------|------------------------|-------------------|------------|
| LED A | Νυχτερινή | 76,3 | 119,3 | 15 | 1,14 |
| | Προσαρμογής | 360 | 100 | 215 | 79,6 |
| | | 240 | 100 | 9 | |
| Σύνολο | | | | | 80,7 |

*Τα πολικά διαγράμματα των φωτιστικών σωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν, φαίνονται στο Παράρτημα Α.

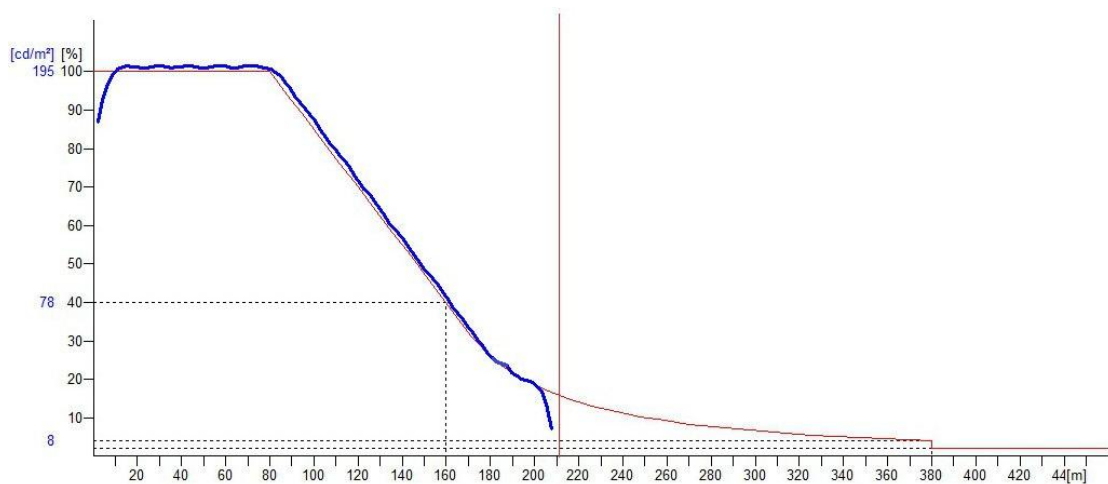
Πίνακας 5.20: Αποτελέσματα του Relux για τα φωτιστικά LED τύπου A, Σενάριο 3.

| Βαθμίδα | Int.1 | S4(25%) | S3(50%) | S2(75%) | S1(100%) |
|---------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Roadway | | | | | |
| Lav | 2,01 cd/m ² | 50,54 cd/m ² | 99,21 cd/m ² | 147,59 cd/m ² | 196,34 cd/m ² |
| Uo | 0,5 | 0,67 | 0,68 | 0,68 | 0,68 |
| U1 | 0,6 | 0,95 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |
| Tlmax | 1,88 % | 1,14 % | 1,14 % | 1,14 % | 1,14 % |
| Wall left (diffuse 70%) | | | | | |
| Lav | 4,16 cd/m ² | 119,49 cd/m ² | 234,77 cd/m ² | 349,61 cd/m ² | 465,2 cd/m ² |
| Uo | 0,48 | 0,94 | 0,96 | 0,97 | 0,97 |
| Wall right (diffuse 70%) | | | | | |
| Lav | 4,16 cd/m ² | 119,49 cd/m ² | 234,77 cd/m ² | 349,61 cd/m ² | 465,2 cd/m ² |
| Uo | 0,48 | 0,94 | 0,96 | 0,97 | 0,97 |



*η κάθετη κόκκινη γραμμή ορίζει το πέρας της σήραγγας που είναι τα 212m

Εικόνα 5.14: Διάγραμμα λαμπρότητας νυχτερινού φωτισμού για τα φωτιστικά LED τύπου A, Σενάριο 3.



*η κάθετη κόκκινη γραμμή ορίζει το πέρας της σήραγγας που είναι τα 212m

Εικόνα 5.15: Διάγραμμα λαμπρότητας βαθμίδας φωτισμού S1 (100%) για φωτιστικά LED τύπου A, Σενάριο 3.

5.4.2.2 Αντικατάσταση με φωτιστικά LED τύπου B

Η ίδια διαδικασία με πριν, εφαρμόζεται και στην περίπτωση των φωτιστικών LED τύπου B και εξάγονται τα κάτωθι αποτελέσματα.

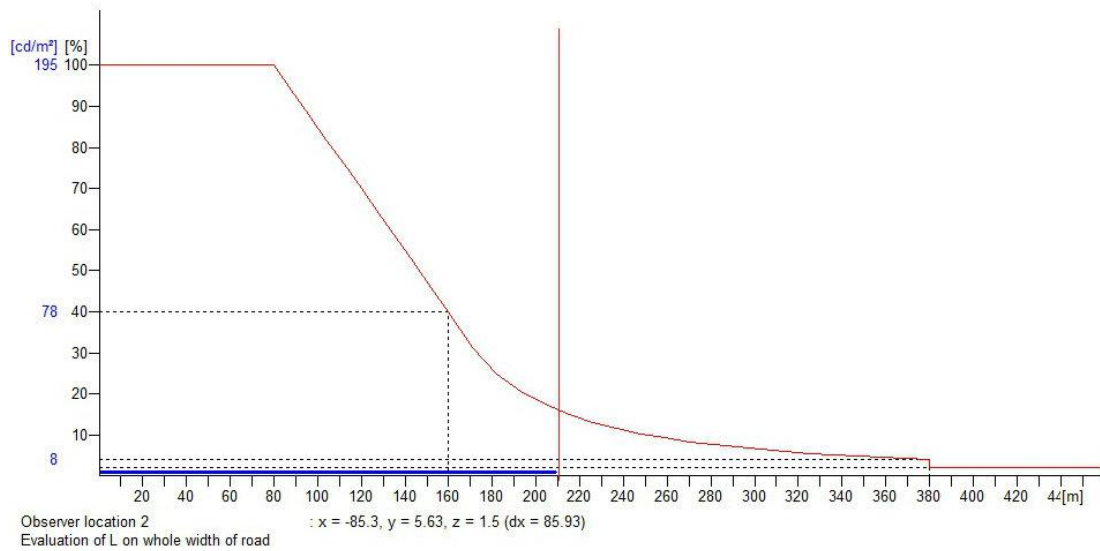
Πίνακας 5.21: Χαρακτηριστικά μεγέθη των φωτιστικών LED τύπου B, Σενάριο 3.

| Τύπος Φωτιστικού | Ζώνη Φωτισμού | Ισχύς φωτιστικού (με ballast) (W) | Φωτεινή Απόδοση (lm/W) | Πλήθος φωτιστικών | Ισχύς (KW) |
|------------------|---------------|-----------------------------------|------------------------|-------------------|------------|
| LED B | Νυχτερινή | 106 | 110,1 | 16 | 1,7 |
| | Προσαρμογής | 213 | 109,6 | 6 | 76,9 |
| | | 322 | 116,1 | 235 | |
| Σύνολο | | | | 257 | 78,6 |

*Τα πολικά διαγράμματα των φωτιστικών σωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν, φαίνονται στο Παράρτημα Α.

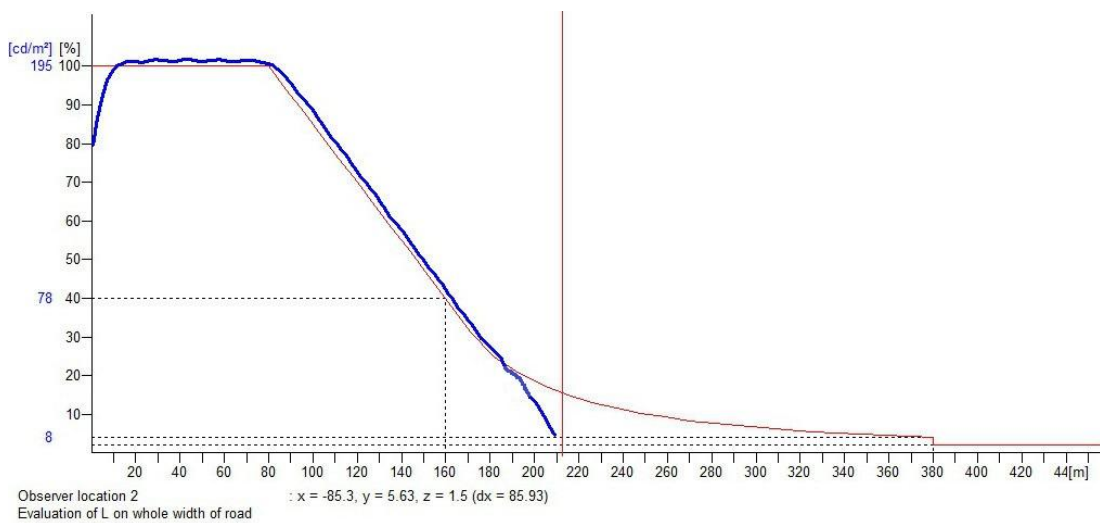
Πίνακας 5.22: Αποτελέσματα του Relux για τα φωτιστικά LED τύπου B, Σενάριο 3.

| Βαθμίδα | Int.1 | S4(25%) | S3(50%) | S2(75%) | S1(100%) |
|---------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Roadway | | | | | |
| Lav | 1,54 cd/m ² | 50,14 cd/m ² | 98,74cd/m ² | 147,34cd/m ² | 196 cd/m ² |
| Uo | 0,49 | 0,64 | 0,64 | 0,64 | 0,64 |
| U1 | 0,52 | 0,98 | 0,99 | 0,99 | 1,00 |
| Tlmax | 1,72 % | 0,96 % | 0,96 % | 0,96 % | 0,96 % |
| Wall left (diffuse 70%) | | | | | |
| Lav | 5,83 cd/m ² | 119,91 cd/m ² | 233,82 cd/m ² | 347,78 cd/m ² | 461,65 cd/m ² |
| Uo | 0,38 | 0,86 | 0,87 | 0,88 | 0,88 |
| Wall right (diffuse 70%) | | | | | |
| Lav | 5,83 cd/m ² | 119,91 cd/m ² | 233,82 cd/m ² | 347,78 cd/m ² | 461,65 cd/m ² |
| Uo | 0,38 | 0,86 | 0,87 | 0,88 | 0,88 |



*η κάθετη κόκκινη γραμμή ορίζει το πέρας της σήραγγας που είναι τα 212m

Εικόνα 5.16: Διάγραμμα λαμπρότητας νυχτερινού φωτισμού για φωτιστικά LED τύπου Β, Σενάριο 3.



*η κάθετη κόκκινη γραμμή ορίζει το πέρας της σήραγγας που είναι τα 212m

Εικόνα 5.17: Διάγραμμα λαμπρότητας βαθμίδας S1 για φωτιστικά LED τύπου Β, Σενάριο 3.

5.4.2.3 Συνοπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων του 3^{ου} Σεναρίου

Στον ακόλουθο πίνακα συνοψίζονται οι τιμές που προέκυψαν κατά τη μελέτη του 3^{ου} Σεναρίου, με τα φωτιστικά τύπου LED τύπου A και LED τύπου B, καθώς και οι αντίστοιχες τιμές της υφιστάμενης εγκατάστασης φωτισμού.

Πίνακας 5.23 : Αποτελέσματα Σεναρίου 3 για LED A και LED B.

| Εξεταζόμενο Σενάριο | | Πλήθος φωτιστικών | | Lav S1(100%) cd/m ² | Lav_Night cd/m ² | Συνολική Εγκατεστημένη Ισχύς kW |
|---------------------------------|-------|-------------------|--------|-----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|
| | | Νύχτας | Ημέρας | | | |
| Σενάριο 3 ^ο | LED A | 15 | 224 | 196,34 | 2,01 | 80,7 |
| | LED B | 16 | 241 | 196 | 1,54 | 78,6 |
| Τιμές λαμπρότητας σχεδιασμού | | | | 195 | ≥1 | |

Σε αυτό το στάδιο της μελέτης, παρατηρείται, από τον παραπάνω πίνακα, ότι τα φωτιστικά LED A και B, ικανοποιούνε την επιθυμητή τιμή μέγιστης λαμπρότητας ζώνης κατωφλίου (195 cd/m²), καθώς και την επιθυμητή τιμή για τη νυχτερινή βαθμίδα (≥ 1 cd/m²). Αξιοσημείωτο είναι επίσης, ότι επιτυγχάνεται μείωση της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος σε σχέση με την συνολική ισχύ της υφιστάμενης εγκατάστασης (122,8 kW), τόσο με τα φωτιστικά LED A όσο και με τα LED B. Η εξοικονόμηση ενέργειας στην περίπτωση αυτή εξετάζεται στο κεφάλαιο 6.

5.4.3 ΣΕΝΑΡΙΟ 4: Αντικατάσταση των υφιστάμενων φωτιστικών Ν.Υ.Π. με νέα φωτιστικά νατρίου υψηλής πίεσης σε νέες θέσεις εγκατάστασης, σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ CR 14380 με βάση την κυκλοφοριακή ροή

Στο Σενάριο 4 εξετάζεται η αντικατάσταση των υφιστάμενων φωτιστικών, με νέα φωτιστικά νατρίου υψηλής πίεσης σε νέες θέσεις εγκατάστασης. Η προσομοίωση του σεναρίου αυτού στη σήραγγα, πραγματοποιήθηκε με χρήση του λογισμικού RELUX, με τρόπο παρόμοιο με τα προηγούμενα σενάρια. Μετά την τοποθέτηση των νέων φωτιστικών (πίνακας 5.24) εξάγονται τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω.

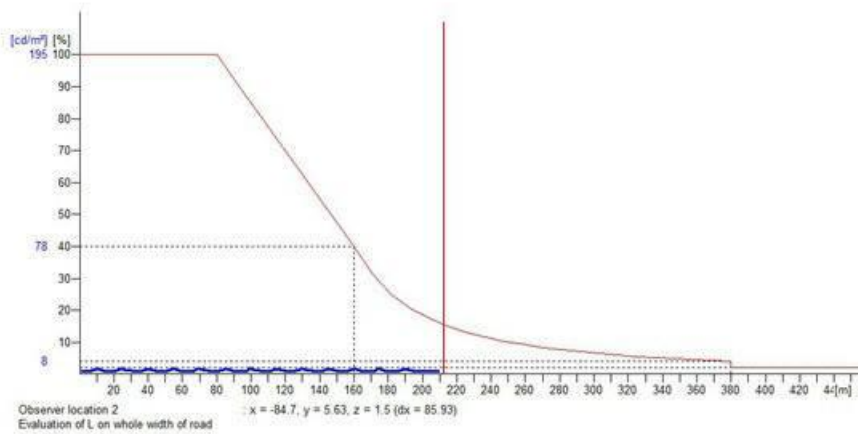
Πίνακας 5.24: Χαρακτηριστικά μεγέθη των φωτιστικών Ν.Υ.Π., Σενάριο 4.

| Τύπος Φωτιστικού | Ζώνη Φωτισμού | Ισχύς φωτιστικού (με ballast) (W) | Φωτεινή Απόδοση (lm/W) | Πλήθος φωτιστικών | Ισχύς (KW) |
|------------------|---------------|-----------------------------------|------------------------|-------------------|------------|
| N.Y.Π. | Νυχτερινή | 100 | 107 | 14 | 1,4 |
| | Προσαρμογής | 400 | 141,25 | 90 | 41,35 |
| | | 250 | 132,8 | 11 | |
| | | 100 | 107 | 26 | |
| Σύνολο | | | 141 | 42,75 | |

*Τα πολικά διαγράμματα των φωτιστικών σωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν, φαίνονται στο Παράρτημα Α.

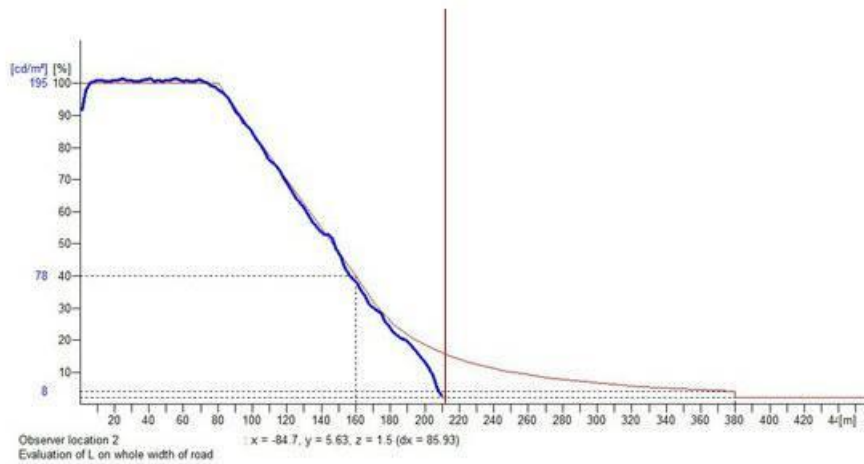
Πίνακας 5.25: Αποτελέσματα του Relux για τα φωτιστικά νατρίου υψηλής πίεσης, Σενάριο 4.

| Βαθμίδα | Int.1 | S4(25%) | S3(50%) | S2(75%) | S1(100%) |
|---------------------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Roadway | | | | | |
| Lav | 2,32 cd/m ² | 50,31 cd/m ² | 98,61 cd/m ² | 146,69 cd/m ² | 194,60 cd/m ² |
| Uo | 0,53 | 0,49 | 0,55 | 0,54 | 0,55 |
| U1 | 0,54 | 0,97 | 0,98 | 0,99 | 0,99 |
| Tlmax | 5,15 % | 3,88 % | 3,88 % | 3,88 % | 3,88 % |
| Wall left (diffuse 70%) | | | | | |
| Lav | 3,17 cd/m ² | 58,70 cd/m ² | 113,96 cd/m ² | 169,57 cd/m ² | 224,35 cd/m ² |
| Uo | 0,54 | 0,87 | 0,94 | 0,93 | 0,97 |
| Wall right (diffuse 70%) | | | | | |
| Lav | 3,17 cd/m ² | 58,70 cd/m ² | 113,96 cd/m ² | 169,57 cd/m ² | 224,35 cd/m ² |
| Uo | 0,54 | 0,87 | 0,94 | 0,93 | 0,97 |



*η κάθετη κόκκινη γραμμή ορίζει το πέρας της σήραγγας που είναι τα 212m

Εικόνα 5.18: Διάγραμμα λαμπρότητας νυχτερινού φωτισμού για φωτιστικά νατρίου, Σενάριο 4.



*η κάθετη κόκκινη γραμμή ορίζει το πέρας της σήραγγας που είναι τα 212m

Εικόνα 5.19: Διάγραμμα λαμπρότητας βαθμίδας φωτισμού S1 (100%) για φωτιστικά νατρίου, Σενάριο 4.

5.4.3.1 Συνοπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων του 4^{ου} Σεναρίου

Στον ακόλουθο πίνακα συνοψίζονται οι τιμές που προέκυψαν κατά τη μελέτη του 4^{ου} Σεναρίου, με τα νέα φωτιστικά Ν.Υ.Π.

Πίνακας 5.26: Αποτελέσματα Σεναρίου 4 για νέα φωτιστικά Ν.Υ.Π.

| Εξεταζόμενο Σενάριο | Πλήθος φωτιστικών | | Lav S1(100%) (cd/m ²) | Lav_Night (cd/m ²) | Συνολική Εγκατεστημένη Ισχύς (kW) |
|---|-------------------|--------|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| | Νύχτας | Ημέρας | | | |
| Σενάριο 4^ο Νέοι λαμπτήρες Ν.Υ.Π. | 14 | 127 | 194,6 | 2,32 | 42,75 |
| Τιμές λαμπρότητας σχεδιασμού | | | 195 | 2 | |

Στο στάδιο αυτό της μελέτης, παρατηρείται ότι τα νέα φωτιστικά Ν.Υ.Π. ικανοποιούν τις μέγιστες τιμές λαμπρότητας σχεδιασμού (ημέρας και νύχτας), καθώς και τα όρια στις ομοιομορφίες, ενώ η συνολική εγκατεστημένη ισχύς είναι σημαντικά χαμηλότερη της υφιστάμενης εγκατάστασης(122,8 kW).

5.4.4 ΣΕΝΑΡΙΟ 5: Παρεμβαίνοντας στην υφιστάμενη εγκατάσταση φωτισμού με χρήση του πρότυπου ΕΛΟΤ CR 14380 με βάση την κυκλοφοριακή ροή

Στο Σενάριο 5 προτείνεται η παρέμβαση στην υφιστάμενη εγκατάσταση, με στόχο την επίτευξη της νέας μέγιστης τιμής λαμπρότητας στη ζώνη κατωφλίου, δηλαδή Lth=195 cd/m². Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η υφιστάμενη εγκατάσταση, έχει σχεδιασθεί για Lth=273 cd/m² και τα φωτιστικά της έχουν χωρισθεί σε 6 ομάδες. Οι ομάδες αυτές, έχουν ταξινομηθεί σε 6 συνολικά βαθμίδες, καθεμία από τις οποίες πετυχαίνει ένα συγκεκριμένο επίπεδο λαμπρότητας και βρίσκεται εντός των ορίων ομοιομορφίας.

Η 1^η βαθμίδα είναι σε λειτουργία όταν εξωτερικά της σήραγγας επικρατούν συνθήκες μέγιστης λαμπρότητας (L20=3900 cd/m²). Την 1^η βαθμίδα αποτελούν όλες οι ομάδες φωτισμού (1,2,3,4,5,6) και καθώς μειώνεται η λαμπρότητα έξω από τη σήραγγα, τίθενται σταδιακά εκτός λειτουργίας οι ομάδες φωτισμού 6,5,4,3 και 2. Κατ'αυτόν τον τρόπο, η 2^η βαθμίδα αποτελείται από τις ομάδες φωτισμού (1,2,3,4,5), η 3^η αποτελείται από τις ομάδες (1,2,3,4), η 4^η από τις ομάδες (1,2,3) και η 5^η από τις ομάδες (1,2). Η 6^η και τελευταία βαθμίδα αφορά στον νυχτερινό φωτισμό (ομάδα 1).

Στον ακόλουθο πίνακα, παρουσιάζονται οι τιμές λαμπρότητας που πετυχαίνει το σύστημα ανά βαθμίδα λειτουργίας.

Πίνακας 5.27: Υφιστάμενες τιμές λαμπρότητας ανά βαθμίδα λειτουργίας.

| Βαθμίδα: | 1 ^η | 2 ^η | 3 ^η | 4 ^η | 5 ^η |
|--------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| % Lth | 100% | 80% | 60% | 40% | 20% |
| Lth (cd/m ²) | 273 | 218,4 | 163,8 | 109,2 | 54,6 |

Στόχος, στο υπό μελέτη Σενάριο, είναι να επιτευχθεί τιμή μέγιστης λαμπρότητας ζώνης κατωφλίου κοντά στην τιμή που ορίζει το πρότυπο CR-14380 κυκλοφοριακής ροής (195 cd/m²), αποσυνδέοντας μία ή περισσότερες βαθμίδες φωτισμού του υπάρχοντος συστήματος.

Από τον παραπάνω πίνακα, είναι φανερό ότι η βαθμίδα που είναι πλησιέστερη (αλλά όχι μικρότερη) στην τιμή $L_{th}=195 \text{ cd/m}^2$, είναι η 2^η βαθμίδα, η οποία φτάνει στις 218,4 cd/m².

Θέτοντας, λοιπόν, την 1^η βαθμίδα εκτός λειτουργίας και ορίζοντας ως 1^η, τη 2^η βαθμίδα (218 cd/m²), προσεγγίζεται αρκετά η επιθυμητή τιμή ($L_{th}=195 \text{ cd/m}^2$).

Με την τροποποίηση αυτή, επιτυγχάνεται σημαντική εξοικονόμηση ισχύος άρα και ενέργειας, όπως παρουσιάζεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 7. Συγκεκριμένα :

Αφαιρώντας τα 118 φωτιστικά νατρίου υψηλής πίεσης, (πίνακας 5.28), που ανήκουν στην ομάδα 6 (η οποία βγαίνει εκτός λειτουργίας), εξοικονομούμε 50,6 kW, ενώ πλέον η κατανάλωση θα ανέρχεται στα 72,2 kW, όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.28 : Τα φωτιστικά της υφιστάμενης εγκατάστασης που αφαιρούνται.

| Ισχύς φωτιστικών (W) | Πλήθος φωτιστικών |
|----------------------------|-------------------|
| 431 | 117 |
| 274 | 1 |
| Σύνολο φωτιστικών | 118 |
| Συνολική ισχύς (kW) | 50,6 |

Πίνακας 5.29: Όφελος Ισχύος από την αφαίρεση φωτιστικών στο Σενάριο 5.

| Καταναλισκόμενη Ισχύς | |
|--------------------------|----------------|
| Υφιστάμενης εγκατάστασης | 122,8 kW |
| Σεναρίου 5 | 72,2 kW |
| Όφελος | 50,6 kW |

Συνοπτικά, τα αποτελέσματα του σεναρίου 5 παρατίθενται ακολούθως:

Πίνακας 5.30 : Αποτελέσματα Σεναρίου 5.

| Εξεταζόμενο Σενάριο | Πλήθος φωτιστικών | | Lav S1(100%) (cd/m ²) | Lav_Night (cd/m ²) | Συνολική Εγκατεστημένη Ισχύς (kW) |
|---|-------------------|--------|--------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| | Νύχτας | Ημέρας | | | |
| Σενάριο 5⁰ Αποσύνδεση της 6ης ομάδας φωτιστικών από την υφιστάμενη εγκατάσταση | 18 | 173 | 218,4 | 2 | 72,12 |
| Τιμές λαμπρότητας σχεδιασμού | | | 195 | 2 | |

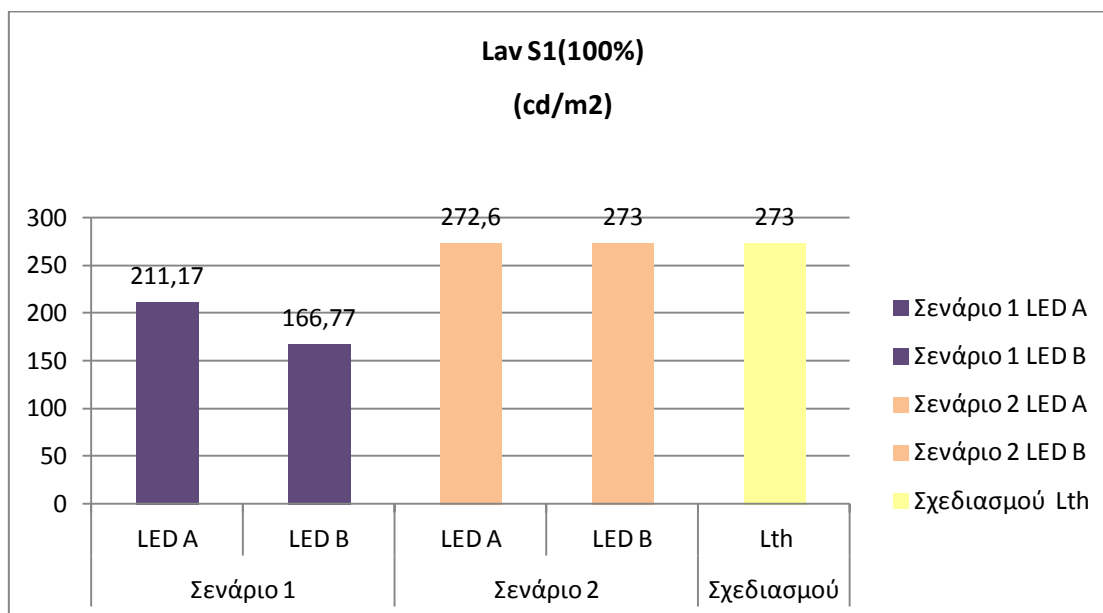
Από τους παραπάνω πίνακες, παρατηρείται ότι με την εφαρμογή του Σεναρίου 5 επιτυγχάνεται σημαντική εξοικονόμηση ισχύος στο υπάρχον σύστημα φωτισμού (περίπου 42%) και το ενεργειακό όφελος του οποίου υπολογίζεται στο κεφάλαιο 6.

5.5 Συγκρίσεις αποτελεσμάτων

Στην παρούσα ενότητα συνοψίζονται σε πίνακα τα δύο βασικά μεγέθη που αποτελούν το κριτήριο καταλληλότητας εφαρμογής του εκάστοτε προτεινόμενου σεναρίου από άποψη επιπέδων λαμπρότητας, καθώς πρέπει να ικανοποιούν τις απαιτήσεις του προτύπου στο οποίο αναφέρονται. Πρόκειται για τη μέγιστη τιμή λαμπρότητας Lav της πρώτης βαθμίδας S1 (100%) και τη μέση τιμή λαμπρότητας του νυχτερινού φωτισμού. Οι επιθυμητές τιμές (σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ CR 14380) των μεγεθών αυτών καθώς και οι νέες υπολογισθείσες τιμές (σύμφωνα με τη νέα θεώρηση του προτύπου ΕΛΟΤ CR 14380) του κάθε σεναρίου φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

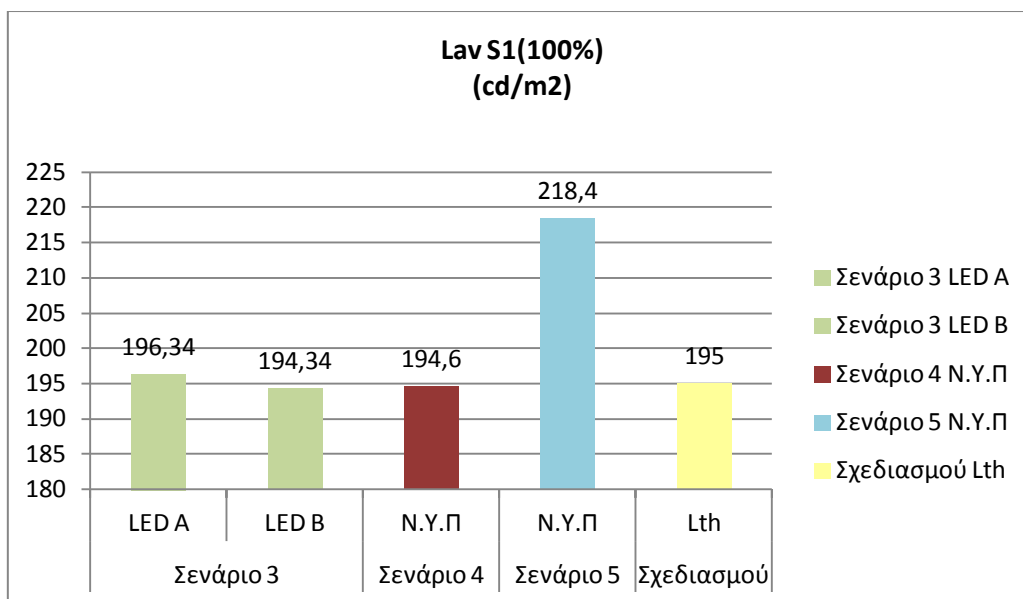
Πίνακας 5.31: Τιμές λαμπρότητας ζώνης κατωφλίου και νυχτερινής βαθμίδας, και συνολική ισχύς κάθε σεναρίου.

| Σενάριο | Τύπος φωτιστικού | Lav S1(100%) (cd/m ²) | Lav S1 (cd/m ²) Σχεδιασμού | Lav night (cd/m ²) | Lav night (cd/m ²) Σχεδιασμού | Συνολική ισχύς (kW) |
|----------------|------------------|-----------------------------------|--|--------------------------------|---|---------------------|
| 1 ^ο | LED A | 211,17 | 273 | 2,23 | 2 | 106,2 |
| | LED B | 166,77 | 273 | 1,46 | 2 | 95,1 |
| 2 ^ο | LED A | 272,6 | 273 | 2,01 | 2 | 110,94 |
| | LED B | 273 | 273 | 2,26 | 2 | 108,82 |
| 3 ^ο | LED A | 196,34 | 195 | 2,01 | 2 | 80,7 |
| | LED B | 196 | 195 | 1,54 | 2 | 78,6 |
| 4 ^ο | N.Y.Π | 194,6 | 195 | 2,32 | 2 | 42,7 |
| 5 ^ο | N.Y.Π | 218,4 | 195 | 2 | 2 | 72,2 |



Σχήμα 5.1: Συγκριτικό διάγραμμα μέγιστης τιμής λαμπρότητας ζώνης κατωφλίου μεταξύ των σεναρίων και της τιμής που ορίζει το πρότυπο της υφιστάμενης μελέτης φωτισμού.

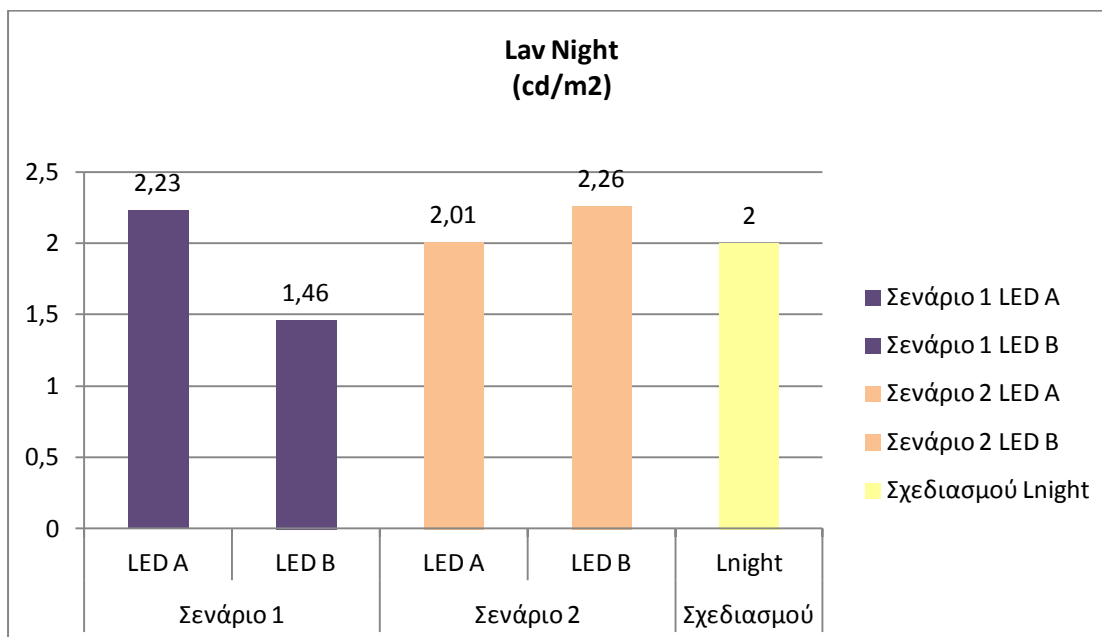
Με την εφαρμογή των Σεναρίων 1 και 2, σύμφωνα με το πρότυπο της υφιστάμενης μελέτης φωτισμού (πρότυπο ΕΛΟΤ CR 14380), διαπιστώνεται ότι τα LED A και LED B του 1^{ου} Σεναρίου, που τοποθετούνται στις ήδη υπάρχουσες θέσεις εγκατάστασης, απέχουν σημαντικά από την επιθυμητή τιμή του προτύπου που ορίζει τη μέγιστη λαμπρότητα της ζώνης κατωφλίου να είναι $L_{th} = 273 \text{ cd/m}^2$. Αντίθετα, όταν τα φωτιστικά LED τοποθετηθούν σε νέες θέσεις, όπως συμβαίνει στο Σενάριο 2, ικανοποιείται η απαίτηση για $L_{th} = 273 \text{ cd/m}^2$, τόσο από τα LED A όσο και από τα LED B, όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα.



Σχήμα 5.2: Συγκριτικό διάγραμμα μέγιστης τιμής λαμπρότητας ζώνης κατωφλίου μεταξύ των σεναρίων και της τιμής που ορίζει το πρότυπο ΕΛΟΤ CR 14380 με βάση την κυκλοφοριακή ροή.

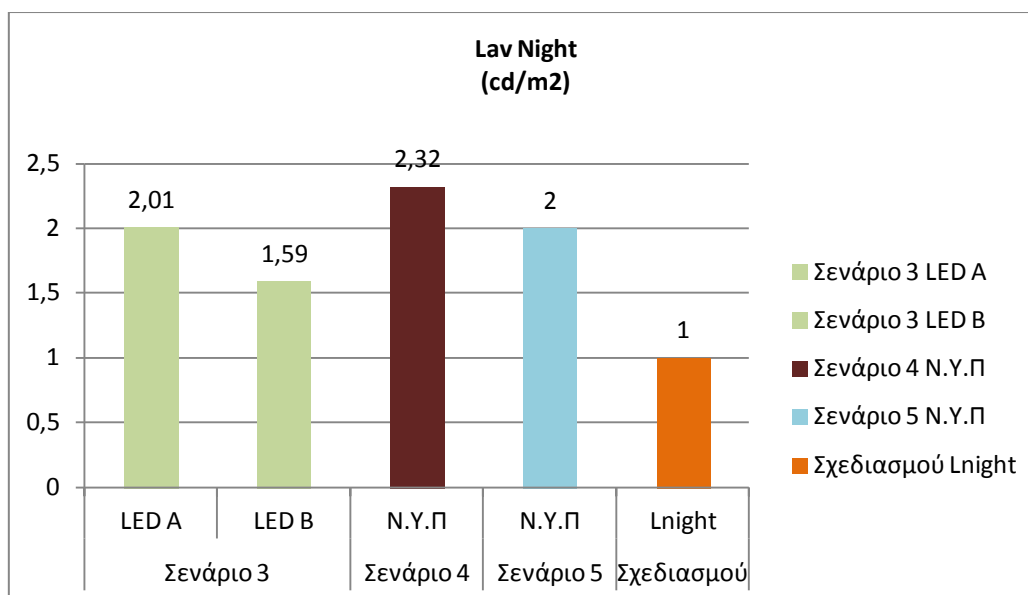
Από το ραβδόγραμμα του σχήματος 5.2, παρατηρείται ότι η νέα μέγιστη τιμή λαμπρότητας της ζώνης κατωφλίου (που ορίζει η νέα θεώρηση του προτύπου ΕΛΟΤ CR 14380), $L_{th} = 195 \text{ cd/m}^2$, ικανοποιείται από τα Σενάρια 3 και 4.

Το Σενάριο 5, στο οποίο προτείνεται η παρέμβαση στο σύστημα φωτισμού της υπάρχουσας εγκατάστασης, φαίνεται να υπερβαίνει κατά πολύ τη μέγιστη επιθυμητή τιμή ($L_{th} = 195 \text{ cd/m}^2$), ωστόσο, παρουσιάζει ενδιαφέρον από άποψη εξοικονόμησης ενέργειας και χρηματικών πόρων, όπως διαπιστώνεται και στο κεφάλαιο 6.



Σχήμα 5.3: Συγκριτικό διάγραμμα μέσης τιμής λαμπρότητας νυχτερινού φωτισμού μεταξύ των προτεινόμενων σεναρίων 1 και 2 και της τιμής σχεδιασμού της υφιστάμενης μελέτης.

Καθώς η υπό μελέτη σήραγγα αποτελεί τμήμα ενός φωτισμένου δρόμου, το πρότυπο της υφιστάμενης μελέτης ορίζει ότι τα επίπεδα των τιμών λαμπρότητας της επιφάνειας του δρόμου μέσα στη σήραγγα, κατά τη διάρκεια της νύχτας, θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίσα με τα επίπεδα που επικρατούν στο δρόμο πρόσβασης, και συγκεκριμένα τουλάχιστον 2 cd/m². Από το παραπάνω σχήμα είναι φανερό ότι η απαίτηση αυτή ικανοποιείται και από τα δύο σενάρια που εξετάζονται, εκτός της περίπτωσης του σεναρίου 1 με χρήση των φωτιστικών LED τύπου B, όπου η τιμή της λαμπρότητας του νυχτερινού φωτισμού είναι μικρότερη της επιθυμητής.



Σχήμα 5.4: Συγκριτικό διάγραμμα μέσης τιμής λαμπρότητας νυχτερινού φωτισμού μεταξύ των προτεινόμενων σεναρίων 3,4 και 5 και της τιμής σχεδιασμού σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ CR 14380 με βάση την κυκλοφοριακή ροή.

Πρέπει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση των σεναρίων 3, 4 και 5, το πρότυπο ΕΛΟΤ CR 14380 με βάση την κυκλοφοριακή ροή, συνιστά η τιμή μέσης λαμπρότητας της επιφάνειας του δρόμου κατά τη διάρκεια της νύχτας να είναι μεγαλύτερη της 1 cd/m² για σήραγγες κλάσης 2, όπως και η σήραγγα που μελετάται στην παρούσα εργασία. Η απαίτηση αυτή ικανοποιείται και από τα τρία σενάρια που εξετάζονται, όπως φαίνεται και από το παραπάνω σχήμα. Στον πίνακα που ακολουθεί, υπενθυμίζεται ποια σενάρια πληρούν τα απαιτούμενα επίπεδα λαμπρότητας (ημερήσιου και νυχτερινού φωτισμού) ανά περίπτωση. Τα σενάρια που ικανοποιούν τις απαιτήσεις σημειώνονται με ✓ και είναι αυτά που εξετάζονται από άποψη κατανάλωσης ενέργειας στο κεφάλαιο 6.

Πίνακας 5.32: Συνοπτική παρουσίαση των σεναρίων που πληρούν τα απαιτούμενα επίπεδα λαμπρότητας

| Σενάριο | Ικανοποιεί τις απαιτήσεις επιπέδων λαμπρότητας |
|----------------|--|
| 1 ^ο | Μόνο η νυχτερινή βαθμίδα με τα φωτιστικά LED A |
| 2 ^ο | ✓ |
| 3 ^ο | ✓ |
| 4 ^ο | ✓ |
| 5 ^ο | ✓ |

Κεφάλαιο 6^ο

Οικονομοτεχνική μελέτη των προτεινόμενων σεναρίων

6.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η οικονομοτεχνική μελέτη των προτεινόμενων σεναρίων για την αναβάθμιση του συστήματος φωτισμού της υπό μελέτη σήραγγας. Υπολογίζονται για το κάθε σενάριο, η ετήσια κατανάλωση ενέργειας και το κόστος αυτής, το κόστος επένδυσης και το ετήσιο λειτουργικό κόστος της εγκατάστασης. Υπολογίζονται ακόμη το ετήσιο ενεργειακό και οικονομικό όφελος, καθώς και ο χρόνος απόσβεσης της κάθε πρότασης αναβάθμισης.

6.2 Υπολογισμός της τιμής της κιλοβατώρας

Το κόστος της καταναλισκόμενης ενέργειας κάθε σεναρίου ανά έτος υπολογίστηκε με βάση την τιμή της κιλοβατώρας, όπως αυτή δίνεται από το τιμολόγιο της ΔΕΗ ΦΟΠ Τ-49 και η οποία παρουσιάζεται αναλυτικά στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 6.1: Ανάλυση της τιμής της κιλοβατώρας σύμφωνα με το τιμολόγιο ΦΟΠ Τ-49, Τ-49/1, Γ-4 της ΔΕΗ 01/06/2014.

| <i>Είδος Χρεώσεων</i> | <i>Τιμή €/kWh</i> |
|---------------------------|-------------------|
| Χρέωση ενέργειας | 0,08103 |
| Δίκτυο Μεταφοράς | 0,00454 |
| Λοιπές Χρεώσεις | 0,00046 |
| Δίκτυο Διανομής | 0,0190 |
| Υπηρεσίες Κοινής Ωφελείας | 0,01371 |
| ΕΤΜΕΑΡ | 0,003089 |
| ΕΦΚ | 0,005 |
| Ειδικό Τέλος | 5% |
| ΣΥΝΟΛΟ | 0,15540315 |

6.3 Μέθοδος υπολογισμού του συνολικού κόστους επένδυσης μιας νέας εγκατάστασης

Το κόστος επένδυσης μιας εγκατάστασης φωτισμού περιλαμβάνει το κόστος εγκατάστασης των φωτιστικών σωμάτων και το κόστος αγοράς αυτών.

Κόστος επένδυσης = (Κόστος εγκατάστασης φωτιστικών σωμάτων) + (Κόστος αγοράς φωτιστικών σωμάτων)

ή

Κόστος επένδυσης = (Κόστος 3 εργατών + Κόστος γερανοφόρου + Κόστος ανάρτησης-σύνδεσης φωτιστικών) + (Κόστος αγοράς φωτιστικών)

(6.1)

Η εγκατάσταση των φωτιστικών σωμάτων μιας σήραγγας διεκπεραιώνεται μέσα σε 3 μέρες, με την απασχόληση 3 εργατών, οι οποίοι εργάζονται 8 ώρες τη μέρα και αμείβονται με 20€ την ώρα, ενώ ταυτόχρονα, για την τοποθέτηση των φωτιστικών μέσα στη σήραγγα, χρησιμοποιείται ένας γερανοφόρος ο οποίος κοστίζει 400 € την ημέρα. Επιπλέον, η δαπάνη για την εγκατάσταση του ενός φωτιστικού ανέρχεται στα 30 €. Επομένως, το κόστος εγκατάστασης των φωτιστικών σωμάτων υπολογίζεται ως εξής:

Κόστος εγκατάστασης φωτιστικών σωμάτων =

(3 εργάτες × 20€/ώρα × 8 ώρες/μέρα × 3μέρες) + (400€ × 3 μέρες) + (30 € /φωτιστικό × πλήθος φωτιστικών)

(6.2)

6.4 Οικονομοτεχνική μελέτη της υφιστάμενης εγκατάστασης φωτισμού της υπό μελέτη σήραγγας

6.4.1 Υπολογισμός ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας

Στην υφιστάμενη εγκατάσταση τα φωτιστικά νατρίου υψηλής πίεσης (N.Y.Π) που χρησιμοποιούνται, είναι χωρισμένα σε 6 ομάδες, και η ισχύς σε καθεμία από αυτές υπολογίστηκε με βάση το ηλεκτρολογικό σχέδιο της εγκατάστασης.

Στον παρακάτω πίνακα, φαίνονται η ισχύς, οι ώρες λειτουργίες ανά ημέρα και ανά έτος, καθώς και η καταναλισκόμενη ενέργεια ανά έτος σε κάθε βαθμίδα της υπάρχουσας εγκατάστασης. Από τα μεγέθη αυτά υπολογίζονται η συνολική ετήσια κατανάλωση ενέργειας, καθώς και το κόστος αυτής.

Πίνακας 6.2: Ετήσια κατανάλωση και κόστος ενέργειας της υφιστάμενης εγκατάστασης.

| Βαθμίδα | Ημερήσιες ώρες λειτουργίας (h) | Ισχύς ανά βαθμίδα (kW) | Ετήσιες ώρες λειτουργίας (h) | Ετήσια καταναλισκόμενη ενέργεια(kWh) |
|------------------------------------|--------------------------------|------------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| | | (1) | (2) | (3)=(1) ×(2) |
| Νύχτα | 10,5 | 2,052 | 3.832,5 | 7.864 |
| S1 (100%) | 6,75 | 122,877 | 2.463,75 | 302.738 |
| S2(80%) | 1,6875 | 72,176 | 615,9375 | 44.456 |
| S3(60%) | 1,6875 | 45,622 | 615,9375 | 28.100 |
| S4(40%) | 1,6875 | 20,492 | 615,9375 | 12.622 |
| S5(20%) | 1,6875 | 9,391 | 615,9375 | 5.784 |
| ΣΥΝΟΛΟ | 24 | | | 401.564 |
| Ετήσιο κόστος ενέργειας (€) | | | | 62.242 |

6.4.2 Υπολογισμός ετήσιου κόστους συντήρησης του συνολικού πλήθους των φωτιστικών Ν.Υ.Π.

Για τη συντήρηση των φωτιστικών νατρίου υψηλής πίεσης της υφιστάμενης εγκατάστασης, πρέπει να ληφθούν υπόψη ο προσδόκιμος χρόνος ζωής των λαμπτήρων Ν.Υ.Π. και οι αναμενόμενες ώρες λειτουργίας τους. Ο μέσος χρόνος ζωής των λαμπτήρων Ν.Υ.Π. εκτιμάται περίπου στις 15.000 ώρες. Ο ημερήσιος φωτισμός της σήραγγας διαρκεί, βάσει του παραπάνω πίνακα, 13,5 ώρες. Το χρονικό αυτό διάστημα των 13,5 ωρών είναι το μέγιστο διάστημα για το οποίο λειτουργούν τα φωτιστικά μέσα στη σήραγγα στη διάρκεια ενός εικοσιτετραώρου. Σε ένα ημερολογιακό έτος (365 ημέρες), το μέγιστο διάστημα λειτουργίας των φωτιστικών είναι 4.927,5 ώρες.

Η συντήρηση των φωτιστικών Ν.Υ.Π. υπολογίζεται ότι πραγματοποιείται κάθε :

Χρόνος συντήρησης φωτιστικών Ν.Υ. Π. =

$$\frac{\text{Μέσος χρόνος ζωής λαμπτήρων Ν.Υ.Π}}{\text{Ετήσιες ώρες λειτουργίας}} = \frac{15000}{4927,5} \approx 3 \text{ χρόνια}$$

Η συντήρηση περιλαμβάνει την αντικατάσταση των λαμπτήρων νατρίου που είτε έχουν «καεί», είτε έχει μειωθεί αισθητά η φωτεινή απόδοσή τους, με νέους. Ο αριθμός των λαμπτήρων X που εκτιμάται ότι θα χρειασθεί αντικατάσταση, υπολογίζεται ως εξής:

$$X = (\text{Συντελεστής ετήσιων αντικαταστάσεων}) \times (\text{Συνολικός αριθμός λαμπτήρων})$$

Όπου, ο συντελεστής ετήσιων αντικαταστάσεων (Σ.Α) προκύπτει από τη διαίρεση του μέγιστου ετήσιου χρόνου λειτουργίας των φωτιστικών, με την ωφέλιμη διάρκεια ζωής των λαμπτήρων, όπως φαίνεται παρακάτω :

$$\text{Σ.Α} = \frac{\text{Ετήσιες ώρες λειτουργίας συστήματος φωτισμού}}{\text{Ωφέλιμη διάρκεια ζωής λαμπτήρων}} = \frac{4927,5}{15000} \approx 0,33$$

Υπενθυμίζεται ότι ο συνολικός αριθμός φωτιστικών Ν.Υ.Π. της υφιστάμενης εγκατάστασης ανέρχεται στους 309. Επομένως, ο αριθμός λαμπτήρων X που αντικαθίστανται λόγω συντήρησης ανά έτος, ισούται με:

$$X = 0,33 \times 309 = 102 \text{ λαμπτήρες}$$

Σημειώνεται ότι το κόστος των λαμπτήρων Ν.Υ.Π. ανέρχεται περί τα 30€/λαμπτήρα, επομένως το κόστος αγοράς των λαμπτήρων που αντικαθίστανται κατά τη συντήρηση ισούται με :

$$\text{Κόστος αγοράς λαμπτήρων Ν.Υ.Π.} \cdot \text{Συντήρηση υφιστ. εγκατ.} = 30 \text{ € / λαμπτήρα} \times 102 \text{ λαμπτήρες} = 3.060 \text{ €} \quad (6.4)$$

Επιπρόσθετα με το κόστος αγοράς των λαμπτήρων, στα έξοδα της συντήρησης περιλαμβάνονται οι αμοιβές των εργατών και η εκμίσθωση ενός γερανοφόρου. Το ωρομίσθιο του εργάτη ανέρχεται στα 20 €/ώρα και για τον σκοπό της συντήρησης απαιτούνται 3 εργάτες οι οποίοι θα εργάζονται επί 8 ώρες την ημέρα. Η εκμίσθωση του γερανοφόρου ανέρχεται περίπου στα 400 € την ημέρα. Πρέπει να σημειωθεί ότι η διαδικασία της συντήρησης οφείλει να ολοκληρωθεί στη διάρκεια μίας ημέρας (8 ώρες), καθώς η απαραίτητη διακοπή της κυκλοφορίας στη μία εκ των δύο λωρίδων, είναι πιθανό να προκαλέσει ανεπιθύμητη κυκλοφοριακή συμφόρηση.

Από τα παραπάνω, υπολογίζεται ότι το κόστος εργασιών συντήρησης, δηλαδή το κόστος εκμίσθωσης των απαιτούμενων εργατών και του γερανοφόρου είναι :

$$\text{Κόστος εργασιών συντήρησης} = (3 \text{ εργάτες} \times 20\text{€/ώρα} \times 8\text{ώρες}) + (400 \text{ € γερανοφόρος}) = 880 \text{ €} \quad (\text{σε 3 χρόνια})$$

Κάνοντας αναγωγή του παραπάνω ποσού στο έτος προκύπτει:

$$\text{Κόστος εργασιών συντήρησης/έτος} = \frac{880 \text{ €}}{3 \text{ χρόνια}} = 293 \text{ € ανά έτος} \quad (6.5)$$

Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται συνοπτικά τα μεγέθη που αφορούν στον υπολογισμό του ετήσιου κόστους συντήρησης της υφιστάμενης εγκατάστασης, και τα οποία υπολογίστηκαν αναλυτικά παραπάνω.

Πίνακας 6.3: Ετήσιο κόστος συντήρησης του συνόλου των φωτιστικών Ν.Υ.Π της υφιστάμενης εγκατάστασης.

| Συντελεστής ετήσιων αντικαταστάσεων (Σ.Α) | Συνολικό πλήθος φωτιστικών νυχτερινού φωτισμού | Αριθμός λαμπτήρων Ν.Υ.Π προς αντικατάσταση ανά έτος | Κόστος αγοράς λαμπτήρα Ν.Υ.Π (€) | Κόστος αγοράς λαμπτήρων Ν.Υ.Π προς συντήρηση (€) | Κόστος εργασιών συντήρησης ανά έτος (€) | Ετήσιο κόστος συντήρησης (€) |
|---|--|---|----------------------------------|--|---|------------------------------|
| (1) | (2) | (3)=(1)×(2) | (4) | (5)=(3)×(4) | (6) | (7)=(5)+(6) |
| 0,33 | 309 | 102 | 30 | 3.060 | 293 | 3.353 |

Το ετήσιο κόστος συντήρησης προκύπτει από το άθροισμα των σχέσεων (6.4) και (6.5) :

$$\text{Ετήσιο κόστος συντήρησης υφιστάμενης Εγκατάστασης} = 3.060 + 293 = 3.353 \text{ €}$$

6.4.2.1 Υπολογισμός του ετήσιου κόστους συντήρησης των φωτιστικών Ν.Υ.Π του νυχτερινού φωτισμού της υφιστάμενης εγκατάστασης

Το μέγιστο διάστημα λειτουργίας του νυχτερινού φωτισμού είναι 10,5 ώρες/ημέρα, όπως φαίνεται και στον πίνακα 6.2 . Σε ένα ημερολογιακό έτος (365 ημέρες) το μέγιστο διάστημα λειτουργίας των φωτιστικών του νυχτερινού φωτισμού είναι 3832,5 ώρες.

Η συντήρηση των φωτιστικών Ν.Υ.Π του νυχτερινού φωτισμού υπολογίζεται ότι πραγματοποιείται κάθε :

$$\text{Χρόνος συντήρησης φωτιστικών Ν.Υ.Π} =$$

$$\frac{\text{Μέσος χρόνος ζωής λαμπτήρων Ν.Υ.Π}}{\text{Ετήσιες ώρες λειτουργίας}} = \frac{15000}{3832,5} \approx 4 \text{ χρόνια}$$

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο για την εύρεση του ετήσιου κόστους συντήρησης, προκύπτουν τα κάτωθι αποτελέσματα για το νυχτερινό φωτισμό

Πίνακας 6.4: Ετήσιο κόστος συντήρησης των φωτιστικών Ν.Υ.Π νυχτερινού φωτισμού της υφιστάμενης εγκατάστασης.

| Συντελεστής ετήσιων αντικαταστάσεων (Σ.Α) | Συνολικό πλήθος φωτιστικών νυχτερινού φωτισμού | Αριθμός λαμπτήρων Ν.Υ.Π προς αντικατάσταση ανά έτος | Κόστος αγοράς λαμπτήρα Ν.Υ.Π (€) | Κόστος αγοράς λαμπτήρων Ν.Υ.Π προς συντήρηση (€) | Κόστος εργασιών συντήρησης ανά έτος (€) | Ετήσιο κόστος συντήρησης (€) |
|---|--|---|----------------------------------|--|---|------------------------------|
| (1) | (2) | (3)=(1)×(2) | (4) | (5)=(3)×(4) | (6) | (7)=(5)+(6) |
| 0,25 | 18 | 4 | 30 | 120 | 220 | 340 |

Επομένως, το ετήσιο κόστος συντήρησης των φωτιστικών Ν.Υ.Π νυχτερινού φωτισμού της υφιστάμενης εγκατάστασης είναι :

Ετήσιο κόστος συντήρησης Νυχτερινού φωτισμού = $120 + 220 = 340 \text{ €}$

6.4.3 Υπολογισμός ετήσιου λειτουργικού κόστους

Το ετήσιο λειτουργικό κόστος της υφιστάμενης εγκατάστασης αφορά στις δαπάνες που γίνονται για την αδιάλειπτη και ποιοτική λειτουργία του συστήματος φωτισμού της σήραγγας και υπολογίζεται ως το άθροισμα του κόστους της ετήσιας καταναλισκόμενης ενέργειας και του ετήσιου κόστους συντήρησης του συστήματος φωτισμού, ως εξής :

$$\begin{aligned} \text{Ετήσιο λειτουργικό κόστος υφιστάμενης εγκατάστασης} = \\ (\text{Ετήσιο κόστος κατανάλωσης ενέργειας}) + (\text{Ετήσιο κόστος συντήρησης}) = \\ 62.242\text{€} + 3.353\text{€} = 65.595 \text{ €} \end{aligned}$$

6.4.4 Οικονομοτεχνικά μεγέθη υφιστάμενης εγκατάστασης

Στον ακόλουθο πίνακα, παρουσιάζονται συνοπτικά τα οικονομοτεχνικά μεγέθη που υπολογίστηκαν για την υφιστάμενη εγκατάσταση του συστήματος φωτισμού της υπό μελέτη σήραγγας.

Πίνακας 6.5: Οικονομοτεχνικά μεγέθη υφιστάμενης εγκατάστασης.

| Τύπος λαμπτήρα | Αριθμός φωτιστικών | Εγκατεστημένη ισχύς (kW) | Ετήσια κατανάλωση ενέργειας (kWh) | Ετήσιο κόστος ενέργειας (€) | Ετήσιο κόστος συντήρησης (€) | Ετήσιο λειτουργικό κόστος (€) |
|----------------|--------------------|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| | | | | (1) | (2) | (3)=(1) + (2) |
| N.Υ.Π. | 309 | 122.877 | 401.564 | 62.242 | 3.353 | 65.595 |

6.5 Οικονομοτεχνική μελέτη για το Σενάριο 1

Υπενθυμίζουμε ότι το Σενάριο 1 αφορά στην αντικατάσταση των υφιστάμενων φωτιστικών Ν.Υ.Π, με φωτιστικά LED στις ήδη υπάρχουσες θέσεις εγκατάστασης, σύμφωνα με την υφιστάμενη μελέτη φωτισμού.

Στο κεφάλαιο 5 διαπιστώθηκε ότι η πρόταση του Σεναρίου 1 δεν μπορεί να καλύψει τα επιθυμητά επίπεδα λαμπρότητας ημερήσιου φωτισμού που ορίζει το πρότυπο της υφιστάμενης μελέτης. Ωστόσο, τα επίπεδα λαμπρότητας του νυχτερινού φωτισμού καλύπτονται στην περίπτωση της αντικατάστασης με φωτιστικά LED τύπου A, η οποία θα εξετασθεί ακολούθως.

Παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας για τα φωτιστικά LED τύπου A που χρησιμοποιήθηκαν για το νυχτερινό φωτισμό.

Πίνακας 6.6: Συνολικό κόστος αγοράς φωτιστικών φωτισμού νύχτας με LEDA, ΣΕΝΑΡΙΟ 1 .

| LED A | | | |
|------------------|--------|--------------------|-------------------|
| Είδος φωτιστικών | Πλήθος | Τιμή/φωτιστικό (€) | Συνολική Τιμή (€) |
| Νύχτας-76,3W | 18 | 300 | 5.400 |

6.5.1 Οικονομοτεχνική μελέτη για το νυχτερινό φωτισμό με φωτιστικά LED A, Σενάριο 1

Στην παράγραφο αυτή θα γίνουν οι υπολογισμοί του κόστους επένδυσης, της ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας και του χρόνου απόσβεσης για την περίπτωση της αντικατάστασης των υφιστάμενων φωτιστικών Ν.Υ.Π νυχτερινού φωτισμού με LED τύπου A σε θέσεις «ένα προς ένα», σύμφωνα με την υφιστάμενη μελέτη.

6.5.1.1 Υπολογισμός του κόστους επένδυσης εγκατάστασης νυχτερινού φωτισμού

Το κόστος επένδυσης της νέας εγκατάστασης νυχτερινής βαθμίδας αφορά στο κόστος αγοράς των φωτιστικών LED της εταιρείας A και στις δαπάνες για την εγκατάσταση των φωτιστικών, την εκμίσθωση των εργατών και του γερανοφόρου που απαιτούνται.

Το κόστος επένδυσης υπολογίζεται σύμφωνα με τις σχέσεις (6.1) και (6.2) (παράγραφος 6.3):

$$\text{Κόστος επένδυσης LED A-νυχτερινής βαθμίδας} = 540 + 2.640 \text{ €} + 5.400 \text{ €} = 8.580 \text{ €}$$

6.5.1.2 Υπολογισμός ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας του νυχτερινού φωτισμού

Ο υπολογισμός της ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας (kWh/έτος) στο νυχτερινό φωτισμό της υπό μελέτη σήραγγας, γίνεται με βάση τις ώρες λειτουργίας και την ισχύ της νυχτερινής βαθμίδας, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6.7: Ετήσια κατανάλωση και κόστος ενέργειας νυχτερινού φωτισμού για τα LED A, Σενάριο 1.

| Βαθμίδα | Ημερήσιες Ώρες Λειτουργίας (h) | Ισχύς ανά βαθμίδα με LEDA (kW) | Ετήσιες Ώρες Λειτουργίας (h) | Ετήσια Καταναλισκόμενη Ενέργεια (kWh) |
|------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|
| | | (1) | (2) | (3) = (1) × (2) |
| Νύχτα | 10,5 | 1,374 | 3832,5 | 5.266 |
| Ετήσιο Κόστος Ενέργειας (€) | | | | 816,23 |

Το ετήσιο κόστος κατανάλωσης ενέργειας προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό της ετήσιας καταναλισκόμενης ενέργειας με την τιμή της κιλοβατώρας (0,155 €/kWh), η οποία φαίνεται στον πίνακα 6.1 και ισούται με:

$$\text{Ετήσιο κόστος κατανάλωσης ενέργειας Led A-νυχτερινής βαθμίδας (€)} = 816,23 \text{ €}$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ωφέλιμη διάρκεια ζωής των λαμπτήρων LED αφορά στη μείωση της ονομαστικής φωτεινής ροής και όχι στην παύση λειτουργίας τους. Αυτό σημαίνει ότι θα συνεχίσουν να λειτουργούν με χαμηλότερη φωτεινή ροή από το 90% της αρχικής (έως και 100.000 h) και ότι δεν επιφέρουν κόστος συντήρησης. Το ετήσιο λειτουργικό κόστος της εγκατάστασης περιλαμβάνει, στην περίπτωση αυτή, μόνο το κόστος της ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας, καθώς το κόστος συντήρησης είναι μηδενικό.

$$\text{Ετήσιο κόστος λειτουργίας Led A-νυχτερινής βαθμίδας (€)} = 816,23 \text{ €}$$

6.5.1.3 Υπολογισμός του χρόνου απόσβεσης του νυχτερινού φωτισμού

Γνωρίζοντας το κόστος επένδυσης και το ετήσιο κόστος λειτουργίας της νέας εγκατάστασης νυχτερινού φωτισμού, υπολογίζεται ο χρόνος απόσβεσης κάνοντας μια απλή διαίρεση του κόστους της νέας επένδυσης με τη διαφορά του ετήσιου κόστους λειτουργίας της νέας εγκατάστασης(2) από το ετήσιο κόστος λειτουργίας της υφιστάμενης εγκατάστασης(1) :

$$\text{Χρόνος Απόσβεσης} = \frac{\text{κόστος νέας επένδυσης}}{\text{ετήσιο κόστος λειτουργίας 1} - \text{ετήσιο κόστος λειτουργίας 2}}$$

Για το Σενάριο 1, με χρήση των LED A, ο χρόνος απόσβεσης υπολογίζεται σύμφωνα με την παραπάνω σχέση ως εξής :

$$\text{Χρόνος απόσβεσης}_{\text{Σενάριο 1 - LEDA-νυχτερινή βαθμίδα}} = \frac{8.580}{1.632 - 816,23} = 10,5 \cong 10 \text{ έτη}$$

6.5.2 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της οικονομοτεχνικής μελέτης του Σεναρίου 1 για το νυχτερινό φωτισμό

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την οικονομοτεχνική μελέτη της αντικατάστασης των υφιστάμενων φωτιστικών Ν.Υ.Π της νυχτερινής βαθμίδας φωτισμού της υπό μελέτη σήραγγας με τα φωτιστικά LED τύπου Α, και υπολογίζονται το ετήσιο ενεργειακό και οικονομικό όφελος που προκύπτουν μέσω αυτής της αντικατάστασης.

Πίνακας 6.8: Αποτελέσματα οικονομοτεχνικής μελέτης για το Σενάριο 1 και της υφιστάμενης εγκατάστασης (νυχτερινή βαθμίδα φωτισμού)

| | Τύπος φωτιστικού | Συνολική ισχύς (kW) | Ετήσια καταναλ. ενέργεια (kWh) | Ετήσιο κόστος κατανάλωσης ενέργειας (€) | Ετήσιο κόστος συντήρησης (€) | Ετήσιο κόστος λειτουργίας (€) | Αριθμός φωτιστικών | Χρόνος απόσβεσης (έτη) |
|-----------------|----------------------------|---------------------|--------------------------------|---|------------------------------|-------------------------------|--------------------|------------------------|
| | | | | (1) | (2) | (3)=(1)+(2) | | |
| Σενάριο 1 | LED A Νυχτερινού φωτισμού | 1,37 | 5.266 | 816,23 | 0 | 816,23 | 18 | 10 |
| Υφιστάμ. Εγκατ. | Ν.Υ.Π. Νυχτερινού φωτισμού | 2,05 | 7.864,3 | 1.219 | 340 | 1.559 | 18 | - |

Πίνακας 6.9 : Ετήσιο ενεργειακό και οικονομικό όφελος από την αντικατάσταση των φωτιστικών Ν.Υ.Π του νυχτερινού φωτισμού με φωτιστικά LED τύπου A, Σενάριο 1.

| Ετήσια καταναλισκόμενη ενέργεια νυχτερινού φωτισμού με Ν.Υ.Π (kWh) (1) | Ετήσια καταναλισκόμενη ενέργεια νυχτερινού φωτισμού με LED A (kWh) (2) | Ετήσιο ενεργειακό όφελος (kWh) (3)=(1)-(2) | Ετήσιο κόστος λειτουργίας νυχτερινού φωτισμού με Ν.Υ.Π (€) (4) | Ετήσιο κόστος λειτουργίας νυχτερινού φωτισμού με LED A (€) (5) | Ετήσιο οικονομικό όφελος (€) (6)=(4)-(5) |
|--|--|--|--|--|--|
| 7.864,3 | 5.266 | 2.598,3 | 1.559 | 816,23 | 742,77 |

Με βάση τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στους παραπάνω πίνακες, διαπιστώνεται ότι το Σενάριο 1 αποτελεί μια ενδιαφέρουσα πρόταση αναβάθμισης του νυχτερινού συστήματος φωτισμού της υπό μελέτη σήραγγας, καθώς, με την τοποθέτηση των φωτιστικών LED A στις ήδη υπάρχουσες θέσεις εγκατάστασης, επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας και χρημάτων. Πρόκειται για τη βέλτιστη λύση που μπορεί να δοθεί στην πρόταση του Σεναρίου 1, προκειμένου να καλύπτονται οι απαιτήσεις των επιπέδων φωτισμού της υφιστάμενης μελέτης.

6.6 Οικονομοτεχνική μελέτη για το Σενάριο 2

Στην παράγραφο αυτή αναλύεται η οικονομοτεχνική μελέτη του Σεναρίου 2, όπου προτείνεται η αντικατάσταση των υφιστάμενων φωτιστικών Ν.Υ.Π, με φωτιστικά LED σε νέες θέσεις εγκατάστασης, σύμφωνα με τη υφιστάμενη μελέτη φωτισμού.

Παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας με τα φωτιστικά LED που εξετάστηκαν, και περιλαμβάνει το είδος των φωτιστικών που χρησιμοποιήθηκαν, το πλήθος των φωτιστικών, την τιμή ανά φωτιστικό, καθώς και το συνολικό κόστος αγοράς τους.

Πίνακας 6.10: Συνολικό κόστος αγοράς φωτιστικών για LED A και LED B, στο Σενάριο 2.

| ΣΕΝΑΡΙΟ 2 | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------|--------------------|-------------------|-----------------------------------|--------|--------------------|-------------------|
| LED A | | | | LED B | | | |
| Είδος φωτιστικών | Πλήθος | Τιμή/φωτιστικό (€) | Συνολική Τιμή (€) | Είδος φωτιστικών | Πλήθος | Τιμή/φωτιστικό (€) | Συνολική τιμή (€) |
| Νύχτας-76,3W | 15 | 300 | 4.500 | Νύχτας-139W | 16 | 400 | 6.400 |
| Ζωνών προσαρμογής-360W | 305 | 970 | 295.850 | Ζωνών προσαρμογής-322W | 331 | 874 | 289.294 |
| Συνολικό κόστος αγοράς φωτιστικών | | | 300.350 | Συνολικό κόστος αγοράς φωτιστικών | | | 295.694 |

*Πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές που φαίνονται στον παραπάνω πίνακα για τα φωτιστικά LED που χρησιμοποιήθηκαν, αφορούν σε ενδεικτικές τιμές καταλόγου, που χρησιμοποιούν οι συγκεκριμένες εταιρείες A και B. Αυτό σημαίνει ότι είναι πιθανό να υπάρχουν στην αγορά φωτιστικά LED με τις ίδιες προδιαγραφές, σε τιμές χαμηλότερες.

6.6.1 Οικονομοτεχνική μελέτη με τη χρήση των LED A, Σενάριο 2

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται οι υπολογισμοί του κόστους επένδυσης, της ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας και του χρόνου απόσβεσης για την περίπτωση της αντικατάστασης των υφιστάμενων φωτιστικών Ν.Υ.Π. με φωτιστικά LED A σε νέες θέσεις, σύμφωνα με την υφιστάμενη μελέτη φωτισμού.

6.6.1.1 Υπολογισμός του κόστους επένδυσης της νέας εγκατάστασης

Το κόστος επένδυσης της νέας εγκατάστασης αφορά στο κόστος αγοράς των φωτιστικών LED της εταιρείας A και στις δαπάνες για την εγκατάσταση των φωτιστικών και την εκμίσθωση των εργατών και του γερανοφόρου που απαιτούνται.

Το κόστος επένδυσης υπολογίζεται σύμφωνα με τις σχέσεις (6.1) και (6.2) (παράγραφος 6.3):

$$\text{Κόστος επένδυσης LED A-Σενάριο 2} = 9.600 \text{ €} + 2.640 \text{ €} + 300.650\text{€} = 312.890\text{€}$$

6.6.1.2 Υπολογισμός ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας

Ο υπολογισμός της ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας (kWh/έτος) στο φωτισμό της υπό μελέτη σήραγγας γίνεται με βάση τις ώρες λειτουργίας ανά ημέρα για κάθε βαθμίδα φωτισμού και την ισχύ ανά βαθμίδα (kW). Συγκεκριμένα, κατά τη λειτουργία της βαθμίδας φωτισμού S1, όπου όλα τα φωτιστικά μέσα στη σήραγγα είναι αναμμένα προκειμένου να επιτευχθεί μέγιστη τιμή λαμπρότητας Lth (100%), η συνολική μέγιστη ισχύς είναι 110,94kW. Εφόσον τα led ντιμάρονται, υπολογίζεται η ισχύς των υπόλοιπων βαθμίδων πολλαπλασιάζοντας κάθε φορά το αντίστοιχο ποσοστό με τη μέγιστη συνολική ισχύ. Η καταναλισκόμενη ενέργεια της κάθε βαθμίδας φωτισμού προκύπτει πολλαπλασιάζοντας την ισχύ της καθεμιάς με τις ώρες που είναι σε λειτουργία ανά έτος, και αθροίζοντας την καταναλισκόμενη ενέργεια όλων των βαθμίδων φωτισμού υπολογίζεται η ετήσια κατανάλωση ενέργειας στο φωτισμό της υπό μελέτη σήραγγας.

Πίνακας 6.11: Ετήσια κατανάλωση και κόστους ενέργειας για τα LED A, Σενάριο 2.

| Βαθμίδα | Ημερήσιες ώρες λειτουργίας (h) | Ισχύς ανά βαθμίδα LED A (kW) | Ετήσιες ώρες λειτουργίας (h) | Ετήσια καταναλισκόμενη ενέργεια (kWh) |
|-----------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|
| | | (1) | (2) | (3) = (1) × (2) |
| Νύχτα | 10,5 | 1,14 | 3.832,5 | 4.369,1 |
| S1 (100%) | 6,75 | 110,94 | 2.463,75 | 273.328,4 |
| S2(75%) | 2,25 | 83,2 | 821,25 | 68.328 |
| S3(50%) | 2,25 | 55,5 | 821,25 | 45.579,4 |
| S4(25%) | 2,25 | 27,7 | 821,25 | 22.748,6 |
| ΣΥΝΟΛΟ | | | | 414.353 |
| Ετήσιο κόστος ενέργειας (€) | | | | 64.225 |

Το ετήσιο κόστος κατανάλωσης ενέργειας προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό της ετήσιας καταναλισκόμενης ενέργειας με την τιμή της κιλοβατώρας (0,155 €/kWh), η οποία φαίνεται στον πίνακα 6.1 και ισούται με:

Ετήσιο κόστος κατανάλωσης ενέργειας LED A-Σενάριο 2 (€) = 64.225€

6.6.2 Οικονομοτεχνική μελέτη με τη χρήση των LED B, Σενάριο 2

Στην παράγραφο αυτή θα γίνουν οι υπολογισμοί του κόστους επένδυσης, της ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας και του χρόνου απόσβεσης για την περίπτωση της αντικατάστασης των υφιστάμενων φωτιστικών Ν.Υ.Π. με LED B, σε νέες θέσεις εγκατάστασης.

6.6.2.1 Υπολογισμός του κόστους επένδυσης της νέας εγκατάστασης

Το κόστος επένδυσης της νέας εγκατάστασης αφορά στο κόστος αγοράς των φωτιστικών LED της εταιρείας B (πίνακας 6.10) και στις δαπάνες για την εγκατάσταση των φωτιστικών και την εκμίσθωση των εργατών και του γερανοφόρου που απαιτούνται.

Το κόστος επένδυσης υπολογίζεται σύμφωνα με τις σχέσεις (6.1) και (6.2) (παράγραφος 6.3):

Κόστος επένδυσης LED B-Σενάριο 2 = 10.410 € + 2.640 € + 295.694 € = 308.744 €

6.6.2.2 Υπολογισμός Ετήσιας Κατανάλωσης Ενέργειας

Ο υπολογισμός της ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας (kWh/έτος) στο φωτισμό της υπό μελέτη σήραγγας γίνεται με βάση τις ώρες λειτουργίας ανά ημέρα για κάθε βαθμίδα φωτισμού και την ισχύ ανά βαθμίδα (kW). Συγκεκριμένα, κατά τη λειτουργία της βαθμίδας φωτισμού S1, όπου όλα τα φωτιστικά μέσα στη σήραγγα είναι σε λειτουργία, προκειμένου να επιτευχθεί μέγιστη τιμή λαμπρότητας Lth (100%), η συνολική μέγιστη ισχύς είναι 108,82kW. Εφόσον τα led ντιμάρονται, υπολογίζεται η ισχύς των υπόλοιπων βαθμίδων πολλαπλασιάζοντας κάθε φορά το αντίστοιχο ποσοστό με τη μέγιστη συνολική ισχύ. Υπολογίζεται, λοιπόν, η καταναλισκόμενη ενέργεια της κάθε βαθμίδας πολλαπλασιάζοντας την ισχύ της με τις ώρες που είναι σε λειτουργία ανά έτος. Αθροίζοντας την καταναλισκόμενη ενέργεια όλων των βαθμίδων προκύπτει η ετήσια κατανάλωση ενέργειας στο φωτισμό της υπό μελέτη σήραγγας.

Πίνακας 6.12: Ετήσια κατανάλωση και κόστος ενέργειας για τα LED B, Σενάριο 2.

| Βαθμίδα | Ημερήσιες Ώρες Λειτουργίας (h) | Ισχύς ανά βαθμίδα με LED B (kW) | Ετήσιες Ώρες Λειτουργίας (h) | Ετήσια Καταναλισκόμενη Ενέργεια (kWh) |
|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|
| | | (1) | (2) | (3) = (1) × (2) |
| Νύχτα | 10,5 | 2,224 | 3.832,5 | 8.524 |
| S1 (100%) | 6,75 | 108,8 | 2.463,75 | 268.056 |
| S2(75%) | 2,25 | 81,6 | 821,25 | 67.014 |
| S3(50%) | 2,25 | 54,4 | 821,25 | 44.676 |
| S4(25%) | 2,25 | 27,2 | 821,25 | 22.338 |
| ΣΥΝΟΛΟ | | | | 410.608 |
| Ετήσιο Κόστος Ενέργειας (€) | | | | 63.644 |

Το ετήσιο κόστος κατανάλωσης ενέργειας προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό της ετήσιας καταναλισκόμενης ενέργειας με την τιμή της κιλοβατώρας (0,155 €/kWh), η οποία φαίνεται στον πίνακα 6.1 και ισούται με :

Ετήσιο κόστος κατανάλωσης ενέργειας (€)=63.644,24€

6.6.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της οικονομοτεχνικής μελέτης του Σεναρίου 2

Πίνακας 6.13: Αποτελέσματα οικονομοτεχνικής μελέτης για το Σενάριο 2 και της υφιστάμενης εγκατάστασης.

| | Τύπος Φωτιστικού | Συνολική Ισχύς (kW) | Ετήσια Καταναλισκ. Ενέργεια (kWh) | Ετήσιο κόστος Κατανάλωσης Ενέργειας (€) | Ετήσιο Κόστος Συντήρησης (€) | Ετήσιο Κόστος Λειτουργίας (€) | Αριθμός Φωτιστικών |
|---------------|------------------|---------------------|-----------------------------------|---|------------------------------|-------------------------------|--------------------|
| Σενάριο 2 | LED A | 110,94 | 414.353 | 64.225 | 0 | 64.225 | 320 |
| | LED B | 108,82 | 410.608 | 63.644 | 0 | 63.644 | 347 |
| Υφιστ. Εγκατ. | N.Y.Π. | 122,8 | 401.564 | 62.242 | 3.353 | 65.595 | 309 |

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον παραπάνω πίνακα, διαπιστώνεται ότι το Σενάριο 2 δε μπορεί να αποτελέσει πρόταση εξοικονόμησης ενέργειας για την υπό μελέτη σήραγγα, καθώς η υπολογισθείσα ετήσια καταναλισκόμενη ενέργεια ξεπερνά εκείνη της υφιστάμενης εγκατάστασης, και για το λόγο αυτό δε συγκρίνεται στη συνέχεια με τα υπόλοιπα σενάρια αναβάθμισης που εξετάζονται.

6.7 Οικονομοτεχνική μελέτη για το Σενάριο 3

Στην παρούσα ενότητα πραγματοποιείται η οικονομοτεχνική μελέτη του Σεναρίου 3, που αφορά στην αντικατάσταση των φωτιστικών Ν.Υ.Π. με φωτιστικά LED των δύο εταιρειών Α και Β σε νέες θέσεις, έχοντας καθορίσει νέα επίπεδα φωτισμού σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ CR 14380 με βάση την κυκλοφοριακή ροή. Παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας με τα φωτιστικά LED που χρησιμοποιούνται, το πλήθος των φωτιστικών, την τιμή ανά φωτιστικό, καθώς και το συνολικό κόστος αγοράς τους.

Πίνακα 6.14: Συνολικό κόστος αγοράς φωτιστικών για LED Α και LED Β, στο Σενάριο 3.

| ΣΕΝΑΡΙΟ 3 | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------|--------------------|-------------------|-----------------------------------|--------|--------------------|-------------------|
| LED A | | | | LED B | | | |
| Είδος φωτιστικών | Πλήθος | Τιμή/φωτιστικό (€) | Συνολική Τιμή (€) | Είδος φωτιστικών | Πλήθος | Τιμή/φωτιστικό (€) | Συνολική Τιμή (€) |
| Νύχτας-80W | 15 | 300 | 4.500 | Νύχτας-106W | 16 | 380 | 6.080 |
| Ζωνών προσαρμογής-360W | 215 | 980 | 210.700 | Ζωνών προσαρμογής-213W | 6 | 580 | 3.480 |
| Ζωνών προσαρμογής-240W | 9 | 680 | 6.120 | Ζωνών προσαρμογής-322W | 235 | 600 | 141.000 |
| Συνολικό κόστος αγοράς φωτιστικών | | | 221.320 | Συνολικό κόστος αγοράς φωτιστικών | | | 150.560 |

6.7.1 Οικονομοτεχνική μελέτη με χρήση των LED A, Σενάριο 3

Στην παράγραφο αυτή πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί του κόστους επένδυσης, της ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας και του χρόνου απόσβεσης για την περίπτωση της αντικατάστασης των υφιστάμενων φωτιστικών Ν.Υ.Π. με LED A σε νέες θέσεις, έχοντας καθορίσει νέα επίπεδα φωτισμού σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ CR 14380 με βάση την κυκλοφοριακή ροή.

6.7.1.1 Υπολογισμός του κόστους επένδυσης της νέας εγκατάστασης

Το κόστος επένδυσης της νέας εγκατάστασης αφορά στο κόστος αγοράς των φωτιστικών LED της εταιρείας A και στις δαπάνες για την εγκατάσταση των φωτιστικών, την εκμίσθωση των εργατών και του γερανοφόρου που απαιτούνται.

Το κόστος επένδυσης υπολογίζεται σύμφωνα με τις σχέσεις (6.1) και (6.2) (παράγραφος 6.3):

$$\text{Κόστος επένδυσης}_{\text{Σενάριο 3 - LED A}} = 7.170\text{€} + 2.640\text{€} + 221.320\text{€} = 231.130\text{€}$$

6.7.1.2 Υπολογισμός ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας

Ο υπολογισμός της ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας (kWh/έτος) στο φωτισμό της υπό μελέτη σήραγγας γίνεται με βάση τις ώρες λειτουργίας ανά ημέρα για κάθε βαθμίδα φωτισμού και την ισχύ ανά βαθμίδα (kW). Συγκεκριμένα, κατά τη λειτουργία της βαθμίδας φωτισμού S1, όπου όλα τα φωτιστικά μέσα στη σήραγγα είναι σε λειτουργία, προκειμένου να επιτευχθεί μέγιστη τιμή λαμπρότητας $L_{th}(100\%)$, η συνολική μέγιστη ισχύς είναι 80,7kW. Εφόσον τα led ντιμάρονται, η ισχύς των υπόλοιπων βαθμίδων υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας κάθε φορά το αντίστοιχο ποσοστό με τη μέγιστη συνολική ισχύ. Προκύπτει, λοιπόν, η καταναλισκόμενη ενέργεια της κάθε βαθμίδας φωτισμού πολλαπλασιάζοντας την ισχύ της (kW) με τις ώρες που είναι σε λειτουργία ανά έτος. Αθροίζοντας την καταναλισκόμενη ενέργεια (kWh/έτος) όλων των βαθμίδων υπολογίζεται η ετήσια κατανάλωση ενέργειας στο φωτισμό της υπό μελέτη σήραγγας.

Πίνακας 6.15: Ετήσια κατανάλωση και κόστος ενέργειας για τα LED A, Σενάριο 3 .

| Βαθμίδα | Ημερήσιες ώρες λειτουργίας (h) | Ισχύς ανά βαθμίδα με LED A (kW) | Ετήσιες ώρες λειτουργίας (h) | Ετήσια καταναλισκόμενη ενέργεια (kWh) |
|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|
| | | (1) | (2) | (3) = (1) × (2) |
| Νύχτα | 10,5 | 1,144 | 3.832,5 | 4.384 |
| S1 (100%) | 6,75 | 79,56 | 2.463,75 | 196.016 |
| S2(75%) | 2,25 | 59,67 | 821,25 | 49.004 |
| S3(50%) | 2,25 | 39,78 | 821,25 | 32.669 |
| S4(25%) | 2,25 | 19,89 | 821,25 | 16.335 |
| ΣΥΝΟΛΟ | | | | 298.408 |
| Ετήσιο κόστος ενέργειας (€) | | | | 46.253 |

Το ετήσιο κόστος κατανάλωσης ενέργειας προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό της ετήσιας καταναλισκόμενης ενέργειας με την τιμή της κιλοβατώρας (0,155 €/kWh), η οποία φαίνεται στον πίνακα 6.1 και ισούται με :

$$\text{Ετήσιο κόστος κατανάλωσης ενέργειας}_{\text{Σενάριο 3 - LED A}} (\text{€}) = 46.253\text{€}$$

6.7.1.3 Υπολογισμός του χρόνου απόσβεσης

Γνωρίζοντας το κόστος επένδυσης και το ετήσιο κόστος λειτουργίας της νέας εγκατάστασης, υπολογίζεται ο χρόνος απόσβεσης κάνοντας μια διαίρεση του κόστους της νέας επένδυσης με τη διαφορά του ετήσιου κόστους λειτουργίας της νέας εγκατάστασης από το ετήσιο κόστος λειτουργίας της υφιστάμενης εγκατάστασης. Ο χρόνος απόσβεσης για τα LED A, Σενάριο 3, ισούται με :

$$\text{Χρόνος απόσβεσης}_{\text{Σενάριο 3 - LED A}} = \frac{228.93231.130}{65.595 - 46.253} = 11,94 \cong 12 \text{ έτη}$$

6.7.2 Οικονομοτεχνική μελέτη με τα LED B, Σενάριο 3

Στην παράγραφο αυτή διεξάγονται οι υπολογισμοί του κόστους επένδυσης, της ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας και του χρόνου απόσβεσης για την περίπτωση της αντικατάστασης

των υφιστάμενων φωτιστικών Ν.Υ.Π. με LED B, σε νέες θέσεις, έχοντας καθορίσει νέα επίπεδα φωτισμού σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ CR 14380 με βάση την κυκλοφοριακή ροή.

6.7.2.1 Υπολογισμός του κόστους επένδυσης της νέας εγκατάστασης

Το κόστος επένδυσης της νέας εγκατάστασης αφορά στο κόστος αγοράς των φωτιστικών LED της εταιρείας B και στις δαπάνες για την εγκατάσταση των φωτιστικών, την εκμίσθωση των εργατών και του γερανοφόρου που απαιτούνται.

Το κόστος επένδυσης υπολογίζεται σύμφωνα με τις σχέσεις (6.1) και (6.2) (παράγραφος 6.3):

$$\text{Κόστος επένδυσης}_{\text{Σενάριο 3 - LED B}} = 7.710 \text{ €} + 2.640 \text{ €} + 150.560 \text{ €} = 160.910 \text{ €}$$

6.7.2.2 Υπολογισμός ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας

Ο υπολογισμός της ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας (kWh/έτος) στο φωτισμό της υπό μελέτη σήραγγας γίνεται με βάση τις ώρες λειτουργίας ανά ημέρα για κάθε βαθμίδα φωτισμού και την ισχύ ανά βαθμίδα (kW). Συγκεκριμένα, κατά τη λειτουργία της βαθμίδας S1, όπου όλα τα φωτιστικά μέσα στη σήραγγα είναι σε λειτουργία, προκειμένου να επιτευχθεί μέγιστη τιμή λαμπρότητας Lth (100%), η συνολική μέγιστη ισχύς είναι 78,6kW. Εφόσον τα led ντιμάρονται, υπολογίζεται η ισχύς των υπόλοιπων βαθμίδων φωτισμού πολλαπλασιάζοντας κάθε φορά το αντίστοιχο ποσοστό με τη μέγιστη συνολική ισχύ. Υπολογίζεται, ακόμη, η καταναλισκόμενη ενέργεια της κάθε βαθμίδας πολλαπλασιάζοντας την ισχύ της (kW) με τις ώρες που είναι σε λειτουργία ανά έτος. Αθροίζοντας την καταναλισκόμενη ενέργεια όλων των βαθμίδων προκύπτει η ετήσια κατανάλωση ενέργειας στο φωτισμό της υπό μελέτη σήραγγας.

Πίνακας 6.16: Ετήσια κατανάλωση και κόστος ενέργειας για τα LED B, Σενάριο 3.

| Βαθμίδα | Ημερήσιες ώρες λειτουργίας (h) | Ισχύς ανά βαθμίδα με LED B (kW) | Ετήσιες ώρες λειτουργίας (h) | Ετήσια καταναλισκόμενη ενέργεια (kWh) |
|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|
| | | (1) | (2) | (3) = (1) × (2) |
| Νύχτα | 10,5 | 1,7 | 3832,5 | 6515 |
| S1 (100%) | 6,75 | 78,6 | 2463,75 | 193651 |
| S2(75%) | 2,25 | 58,95 | 821,25 | 48413 |
| S3(50%) | 2,25 | 39,3 | 821,25 | 32275 |
| S4(25%) | 2,25 | 19,65 | 821,25 | 16137 |
| ΣΥΝΟΛΟ | | | | 296.991 |
| Ετήσιο κόστος ενέργειας (€) | | | | 46.034 |

Το ετήσιο κόστος κατανάλωσης ενέργειας προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό της ετήσιας καταναλισκόμενης ενέργειας με την τιμή της κιλοβατώρας (0,155 €/kWh), η οποία φαίνεται στον πίνακα 6.1, και ισούται με :

$$\text{Ετήσιο κόστος κατανάλωσης ενέργειας}_{\text{Σενάριο 3 - LED B}} (\text{€}) = 46.034\text{€}$$

6.7.2.3 Υπολογισμός του χρόνου απόσβεσης

Γνωρίζοντας το κόστος επένδυσης και το ετήσιο κόστος λειτουργίας της νέας εγκατάστασης, υπολογίζεται ο χρόνος απόσβεσης μέσω της διαίρεσης του κόστους της νέας επένδυσης με τη διαφορά του ετήσιου κόστους λειτουργίας της νέας εγκατάστασης από το ετήσιο κόστος λειτουργίας της υφιστάμενης εγκατάστασης και προκύπτει ως εξής :

$$\text{Χρόνος απόσβεσης}_{\text{Σενάριο 3 - LEDB}} = \frac{160.910}{65.595 - 46.034} = 8,22 \cong 8 \text{ έτη}$$

6.7.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της οικονομοτεχνικής μελέτης του Σεναρίου3

Πίνακας 6.17: Αποτελέσματα οικονομοτεχνικής μελέτης για το Σενάριο 3 και της υφιστάμενης εγκατάστασης.

| | Τύπος φωτιστικού | Συνολική ισχύς (kW) | Ετήσια καταναλισκ. ενέργεια (kWh) | Ετήσιο κόστος καταναλ. ενέργειας (€) | Ετήσιο κόστος συντήρησης (€) | Ετήσιο κόστος λειτουργίας (€) | Αριθμός φωτιστικών | Χρόνος απόσβ. (έτη) |
|-----------------|------------------|---------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------|---------------------|
| Σενάριο 3 | LED A | 80,7 | 298.408 | 46.253 | 0 | 46.253 | 239 | 12 |
| | LED B | 78,6 | 296.991 | 46.034 | 0 | 46.034 | 257 | 8 |
| Υφιστάμ. εγκατ. | N.Y.Π. | 122,877 | 401.564 | 62.242 | 3.353 | 65.595 | 309 | |

Η πρόταση του Σεναρίου 3 για αντικατάσταση των υφιστάμενων φωτιστικών νατρίου υψηλής πίεσης (N.Y.Π) με φωτιστικά τύπου LED, σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ CR 14380 με βάση την κυκλοφοριακή ροή, εξασφαλίζει σημαντική εξοικονόμηση ισχύος, ενέργειας και χρημάτων. Συγκεκριμένα, από τον παραπάνω πίνακα είναι φανερό ότι η χρήση των LED τύπου B αποτελεί την πιο συμφέρουσα πρόταση και από άποψη εξοικονόμησης ενέργειας και λόγω του μικρότερου χρόνου απόσβεσης.

6.8 Οικονομοτεχνική μελέτη για το Σενάριο 4

Στην ενότητα αυτή πραγματοποιείται η οικονομοτεχνική μελέτη του Σεναρίου 4, που αφορά στην αντικατάσταση των φωτιστικών N.Y.Π. με νέα φωτιστικά N.Y.Π σε νέες θέσεις, έχοντας καθορίσει νέα επίπεδα φωτισμού σύμφωνα με το πρότυπο CR_14380 με βάση την κυκλοφοριακή ροή.

Παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας των φωτιστικών Νατρίου που χρησιμοποιούνται, το πλήθος των φωτιστικών, την τιμή ανά φωτιστικό, καθώς και το συνολικό κόστος αγοράς όλων των φωτιστικών.

Πίνακας 6.18: Συνολικό κόστος αγοράς φωτιστικών Ν.Υ.Π., Σενάριο 4.

| ΣΕΝΑΡΙΟ 4 | | | |
|--|---------------|-------------------------------|----------------------------------|
| Φωτιστικά Νατρίου Υψηλής Πίεσης | | | |
| Είδος φωτιστικών | Πλήθος | Τιμή/φωτιστικό (€) | Συνολική τιμή (€) |
| Νύχτας-100W | 14 | 250 | 3.500 |
| Ζωνών προσαρμογής-400W | 90 | 350 | 31.500 |
| Ζωνών προσαρμογής-250W | 11 | 300 | 3.300 |
| Ζωνών προσαρμογής-100W | 26 | 250 | 6.500 |
| Συνολικό κόστος αγοράς φωτιστικών | | | 44.800 |

6.8.1 Υπολογισμός κόστους επένδυσης της νέας εγκατάστασης

Το κόστος επένδυσης της νέας εγκατάστασης αφορά στο κόστος αγοράς των νέων φωτιστικών Ν.Υ.Π. και στις δαπάνες για την εγκατάσταση των φωτιστικών, την εκμίσθωση των εργατών και του γερανοφόρου που απαιτούνται.

Το κόστος επένδυσης υπολογίζεται σύμφωνα με τις σχέσεις (6.1) και (6.2) (παράγραφος 6.3):

$$\text{Κόστος Επένδυσης νέα φωτιστικά Ν.Υ.Π.-Σενάριο 4} = 4.230 + 2.640 \text{ €} + 44.800 \text{ €} = 51.670 \text{ €}$$

6.8.2 Υπολογισμός ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας

Γνωρίζοντας τις ώρες λειτουργίας ανά ημέρα για κάθε βαθμίδα και την ισχύ ανά βαθμίδα (kW), υπολογίζεται η ετήσια κατανάλωση ενέργειας στο φωτισμό (kWh/έτος) για το Σενάριο 4 με τη χρήση των νέων φωτιστικών νατρίου υψηλής πίεσης, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 6.19: Ετήσια κατανάλωση και κόστος ενέργειας για τα νέα φωτιστικά Ν.Υ.Π., Σενάριο 4.

| Βαθμίδα | Ημερήσιες ώρες λειτουργίας (h) | Ισχύς ανά βαθμίδα Ν.Υ.Π. (kW) | Ετήσιες ώρες λειτουργίας (h) | Ετήσια Καταναλισκόμενη ενέργεια (kWh) |
|------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|
| | | (1) | (2) | (3) = (1) × (2) |
| Νύχτα | 10,5 | 1,4 | 3832,5 | 5.366 |
| S1 (100%) | 6,75 | 42,7 | 2463,75 | 105.325 |
| S2(75%) | 2,25 | 32,0625 | 821,25 | 26.331 |
| S3(50%) | 2,25 | 21,375 | 821,25 | 17.554 |
| S4(25%) | 2,25 | 10,687 | 821,25 | 8.777 |
| ΣΥΝΟΛΟ | | | | 163.353 |
| Ετήσιο κόστος ενέργειας (€) | | | | 25.320 |

Το ετήσιο κόστος κατανάλωσης ενέργειας προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό της ετήσιας καταναλισκόμενης ενέργειας με την τιμή της κιλοβατώρας (0,155 €/kWh), η οποία φαίνεται στον πίνακα 6.1, και ισούται με :

Ετήσιο Κόστος Κατανάλωσης Ενέργειας νέα φωτιστικά Ν.Υ.Π.-Σενάριο 4 (€)= 25.320 €

6.8.3 Υπολογισμός του ετήσιου κόστους συντήρησης των νέων φωτιστικών Ν.Υ.Π.

Με βάση τα όσα αναλύθηκαν στην παράγραφο 6.4.2, για τον υπολογισμό του ετήσιου κόστους συντήρησης των νέων φωτιστικών Ν.Υ.Π. θα ισχύουν τα εξής :

Ο αριθμός λαμπτήρων Χ που αντικαθίστανται λόγω συντήρησης ανά έτος ισούται με:

$$X = 0,33 \times 141 = 46 \text{ λαμπτήρες}$$

Υπενθυμίζεται ότι ο συνολικός αριθμός φωτιστικών Ν.Υ.Π. της υφιστάμενης εγκατάστασης ανέρχεται στους 141 και το κόστος των λαμπτήρων Ν.Υ.Π. ανέρχεται περί τα

30€/λαμπτήρα, επομένως το κόστος αγοράς των λαμπτήρων που αντικαθίστανται κατά τη συντήρηση ισούται με:

$$\text{Κόστος αγοράς λαμπτήρων Ν.Υ.Π. για συντήρηση} = 30 \text{ € / λαμπτήρα} \times 46 \text{ λαμπτήρες} = 1.380 \text{ €} \quad (6.6)$$

$$\text{Κόστος εργασιών συντήρησης/έτος} = \frac{880 \text{ €}}{3 \text{ χρόνια}} = 293 \text{ € ανά έτος} \quad (6.7)$$

Το ετήσιο κόστος συντήρησης προκύπτει από το άθροισμα των σχέσεων (6.6) και (6.7):

$$\text{Ετήσιο κόστος συντήρησης ΣΕΝΑΡΙΟ 4-Ν.Υ.Π} = 1.380 + 293 = 1.673 \text{ €}$$

Πίνακας 6.20: Υπολογισμός ετήσιου κόστους συντήρησης των φωτιστικών Ν.Υ.Π, Σενάριο 4.

| Συντελεστής ετήσιων αντικαταστάσεων (Σ.Α) | Συνολικό πλήθος φωτιστικών νυχτερινού φωτισμού | Αριθμός λαμπτήρων Ν.Υ.Π προς αντικατάσταση ανά έτος (Χ) | Κόστος αγοράς λαμπτήρα Ν.Υ.Π (€) | Κόστος αγοράς λαμπτήρων Ν.Υ.Π προς συντήρηση (€) | Κόστος εργασιών συντήρησης ανά έτος (€) | Ετήσιο κόστος συντήρησης (€) |
|---|--|---|----------------------------------|--|---|------------------------------|
| (1) | (2) | (3)=(1)×(2) | (4) | (5)=(3)×(4) | (6) | (7)=(5)+(6) |
| 0,33 | 141 | 46 | 30 | 1.380 | 293 | 1.673 |

6.8.4 Υπολογισμός του ετήσιου λειτουργικού κόστους των νέων φωτιστικών Ν.Υ.Π.

Το ετήσιο λειτουργικό κόστος της υπό μελέτη σήραγγας μετά την αντικατάσταση των υφιστάμενων φωτιστικών Ν.Υ.Π. με νέα φωτιστικά Ν.Υ.Π., περιλαμβάνει το κόστος της ετήσιας καταναλισκόμενης ενέργειας και το ετήσιο κόστος συντήρησης, που υπολογίστηκαν παραπάνω, και υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{Ετήσιο κόστος λειτουργίας φωτιστικών νατρίου} = \text{Ετήσιο κόστος κατανάλωσης Ενέργειας} + \text{Ετήσιο κόστος συντήρησης} = 25.320\text{€} + 1.673 \text{ €} = 26.993 \text{ €}$$

6.8.5 Υπολογισμός χρόνου απόσβεσης των νέων φωτιστικών Ν.Υ.Π.

Ο χρόνος απόσβεσης προκύπτει διαιρώντας το κόστος της νέας επένδυσης με τη διαφορά του ετήσιου κόστους λειτουργίας της νέας εγκατάστασης από το ετήσιο κόστος λειτουργίας της υφιστάμενης εγκατάστασης:

$$\text{Χρόνος απόσβεσης}_{\text{Σενάριο 4 - N.Y.Π.}} = \frac{51.670}{65.595 - 26.993} = 1.3 \cong 1 \text{ έτος}$$

6.8.6 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της οικονομοτεχνικής μελέτης για τα φωτιστικά N.Y.Π. του Σεναρίου 4

Πίνακας 6.21 : Αποτελέσματα οικονομοτεχνικής μελέτης του Σεναρίου 4 και της υφιστάμενης εγκατάστασης.

| | Συνολική ισχύς (kW) | Ετήσια καταναλ. ενέργεια (kWh) | Ετήσιο κόστος καταναλ. ενέργειας (€) | Ετήσιο κόστος συντήρησης (€) | Ετήσιο κόστος λειτουργίας (€) | Αριθμός φωτιστικών | Χρόνος απόσβ. (έτη) |
|------------------------|---------------------|--------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------|---------------------|
| Σενάριο 4 | 42,7 | 163.353 | 25.320 | 1.673 | 26.993 | 141 | 1 |
| Υφιστάμ. Εγκατ. | 122,8 | 401.564 | 62.242 | 3.353 | 65.595 | 309 | - |

Συγκρίνοντας το σενάριο 4 με την υφιστάμενη εγκατάσταση φωτισμού προκύπτει ότι με τη χρήση νέων φωτιστικών N.Y.Π επιτυγχάνεται σημαντική μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας, του κόστους αυτής και του ετήσιου λειτουργικού κόστους, ενώ μειώνεται και το πλήθος των φωτιστικών που χρησιμοποιούνται .

6.9 Οικονομοτεχνική μελέτη για το Σενάριο 5

Στην ενότητα αυτή μελετάται η περίπτωση της παρέμβασης στην υφιστάμενη εγκατάσταση, για την επίτευξη της νέας τιμής μέγιστης λαμπρότητας στη ζώνη κατωφλίου, $L_{th} = 195 \text{ cd/m}^2$, η οποία ορίζεται από το πρότυπο CR-4380 με βάση την κυκλοφοριακή ροή, μέσω της αφαίρεσης της ομάδας 6 των φωτιστικών σωμάτων.

Από το σύνολο των φωτιστικών N.Y.Π. της υφιστάμενης εγκατάστασης, που είναι 309 σε πλήθος, αποσυνδέονται 118 φωτιστικά της ομάδας 6, και απομένουν στο σύστημα φωτισμού οι επόμενες 5 ομάδες με 191 φωτιστικά.

6.9.1 Υπολογισμός κόστους επένδυσης

Κόστος της νέας επένδυσης αποτελεί η χρηματική δαπάνη για την αποσύνδεση των 118 φωτιστικών, η οποία πραγματοποιείται μέσω του συστήματος αυτομάτου ελέγχου SCADA, μέσα σε μία ημέρα, και η εκμίσθωση του τεχνικού ανέρχεται στα 100 €. Επομένως :

Κόστος επένδυσης =100 €

6.9.2 Υπολογισμός του ετήσιου κόστους συντήρησης του νέου αριθμού φωτιστικών Ν.Υ.Π.

Ακολουθώντας ακριβώς την ίδια διαδικασία με αυτή της παραγράφου 6.4.2 για τον υπολογισμό του κόστους συντήρησης, με τη μόνη διαφορά ότι τώρα το συνολικό πλήθος των φωτιστικών που είναι σε λειτουργία μέσα στη σήραγγα είναι 191, εξάγονται τα ακόλουθα αποτελέσματα :

Αριθμός λαμπτήρων Ν.Υ.Π. που αντικαθίστανται ανά έτος = $0,33 \times 191 \approx 63$ λαμπτήρες

Κόστος αγοράς λαμπτήρων Ν.Υ.Π. Στο πλαίσιο της συντήρησης = $30 \text{ €} / \text{λαμπτήρα} \times 63 \text{ λαμπτ.} = 1.890 \text{ €}$ (6.8)

Το κόστος εκμίσθωσης των απαιτούμενων εργατών και του γερανοφόρου για τους σκοπούς της συντήρησης ισούται με:

$$\frac{880 \text{ €}}{3 \text{ χρόνια}} = 293 \text{ € ανά έτος} \quad (6.9)$$

Επομένως, το ετήσιο κόστος συντήρησης προκύπτει :

Ετήσιο κόστος συντήρησης ΣΕΝΑΡΙΟ 5 = $1.890 + 293 = 2.183 \text{ €}$

Πίνακας 6.22 :Υπολογισμός ετήσιου κόστους συντήρησης των φωτιστικών Ν.Υ.Π, Σενάριο 5.

| Συντελεστής ετήσιων αντικαταστάσεων (Σ.Α) | Συνολικό πλήθος φωτιστικών νυχτερινού φωτισμού | Αριθμός λαμπτήρων Ν.Υ.Π προς αντικατάσταση ανά έτος (X) | Κόστος αγοράς λαμπτήρα Ν.Υ.Π (€) | Κόστος αγοράς λαμπτήρων Ν.Υ.Π προς συντήρηση (€) | Κόστος εργασιών συντήρησης ανά έτος (€) | Ετήσιο κόστος συντήρησης (€) |
|---|--|---|----------------------------------|--|---|------------------------------|
| (1) | (2) | (3)=(1)×(2) | (4) | (5)=(3)×(4) | (6) | (7)=(5)+(6) |
| 0,33 | 191 | 63 | 30 | 1.890 | 293 | 2.183 |

6.9.3 Υπολογισμός ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας και ετήσιου λειτουργικού κόστους της νέας εγκατάστασης

Για την νέα εκδοχή της υφιστάμενης εγκατάστασης ισχύουν τα δεδομένα που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 6.23: Ετήσια κατανάλωση και κόστος ενέργειας για το Σενάριο 5.

| Βαθμίδα | Ημερήσιες ώρες λειτουργίας (h) | Ισχύς ανά βαθμίδα με αφαίρεση φωτιστικών Ν.Υ.Π. (kW) | Ετήσιες ώρες λειτουργίας (h) | Ετήσια Καταναλισκ. ενέργεια (kWh) |
|-----------------------------|--------------------------------|--|------------------------------|-----------------------------------|
| | | (1) | (2) | (3) = (1) × (2) |
| Νύχτα | 10,5 | 2,052 | 3.832,5 | 7.864 |
| S1 (100%) | 6,75 | 72,176 | 2.463,75 | 177.824 |
| S2(75%) | 2,25 | 45,622 | 821,25 | 37.467 |
| S3(50%) | 2,25 | 20,492 | 821,25 | 16.829 |
| S4(25%) | 2,25 | 9,391 | 821,25 | 7.712 |
| ΣΥΝΟΛΟ | | | | 247.696 |
| Ετήσιο κόστος ενέργειας (€) | | | | 38.393 |

Το ετήσιο κόστος κατανάλωσης ενέργειας προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό της ετήσιας καταναλισκόμενης ενέργειας με την τιμή της κιλοβατώρας (0,155 €/kWh), η οποία φαίνεται στον πίνακα 6.1, και είναι :

Ετήσιο κόστος κατανάλωσης ενέργειας ΣΕΝΑΡΙΟ 5 (€)= 38.393 €

Το ετήσιο λειτουργικό κόστος της υπό μελέτη σήραγγας μετά την αφαίρεση των 118 φωτιστικών Ν.Υ.Π., περιλαμβάνει το κόστος της ετήσιας καταναλισκόμενης ενέργειας και το ετήσιο κόστος συντήρησης, και υπολογίζεται ως εξής :

Ετήσιο κόστος λειτουργίας υφιστάμενης εγκατάστασης ΣΕΝΑΡΙΟ 5=

ετήσιο κόστος κατανάλωσης ενέργειας + ετήσιο κόστος συντήρησης =

38.393€ + 2.183 €= 40.576 €

6.9.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της οικονομοτεχνικής μελέτης για τα φωτιστικά Ν.Υ.Π. του Σεναρίου 5

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την οικονομοτεχνική μελέτη του Σεναρίου 5, με την αφαίρεση των 118 φωτιστικών Ν.Υ.Π. από την υφιστάμενη εγκατάσταση.

Πίνακας 6.24: Αποτελέσματα οικονομοτεχνικής μελέτης του Σεναρίου 5 και της υφιστάμενης εγκατάστασης.

| | Συνολική ισχύς (kW) | Ετήσια καταναλ. ενέργεια (kWh) | Ετήσιο κόστος κατανάλωσης ενέργειας (€) | Ετήσιο κόστος συντήρησης (€) | Ετήσιο κόστος λειτουργίας (€) | Αριθμός φωτιστικών |
|------------------------|---------------------|--------------------------------|---|------------------------------|-------------------------------|--------------------|
| Σενάριο 5 | 72,176 | 247.696 | 38.393 | 2.183 | 40.576 | 191 |
| Υφιστάμ. Εγκατ. | 122,877 | 401.564 | 62.242 | 3.353 | 65.595 | 309 |

Από τον παραπάνω πίνακα, και από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων του σεναρίου 5 με αυτά της υφιστάμενης εγκατάστασης που υπολογίστηκαν στην παράγραφο 6.4, υπολογίζονται τα οφέλη που προκύπτουν με την παρέμβαση στην υφιστάμενη εγκατάσταση και την αποσύνδεση των 118 φωτιστικών προκειμένου να επιτευχθεί η νέα τιμή μέγιστης λαμπρότητας στη ζώνη κατωφλίου, $L_{th} = 195 \text{ cd/m}^2$, η οποία ορίζεται από το πρότυπο CR-4380 με βάση την κυκλοφοριακή ροή.

- **Εξοικονόμηση ενέργειας = $401.564 - 247.696 = 153.868 \text{ kWh/έτος}$**
- **Ετήσιο χρηματικό όφελος λόγω εξοικονόμησης ενέργειας = $62.242 - 38.393 = 23.849 \text{ €}$**
- **Ετήσιο χρηματικό όφελος λόγω μη συντήρησης των 118 φωτιστικών = $3.353 - 2.183 = 1170 \text{ €}/έτος$**

Προκύπτει, λοιπόν, το συμπέρασμα ότι με αυτή τη παρέμβαση στην υφιστάμενη εγκατάσταση επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενός σημαντικού ενεργειακού και χρηματικού ποσού ανά έτος, με ελάχιστο κόστος επένδυσης.

6.10 Πίνακες αποτελεσμάτων οικονομοτεχνικής μελέτης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται σε πίνακες και ραβδογράμματα τα αποτελέσματα των οικονομοτεχνικών μελετών των σεναρίων 3, 4 και 5 που εξετάστηκαν παραπάνω.

Υπενθυμίζεται ότι το σενάριο 2 αποτελεί μια ασύμφορη πρόταση αναβάθμισης και γι αυτό δε θα εξετασθεί περαιτέρω.

6.10.1 Εξοικονόμηση ενέργειας και αντίστοιχου οικονομικού οφέλους

Στους πίνακες που ακολουθούν συγκρίνονται τα τρία σενάρια μεταξύ τους αλλά και με την υφιστάμενη εγκατάσταση και καταγράφονται ο αριθμός φωτιστικών, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς, η κατανάλωση και η εξοικονόμηση ενέργειας και το όφελος από την εξοικονόμηση ενέργειας για κάθε ένα από αυτά.

Πίνακας 6.25: Αριθμός φωτιστικών και συνολική ισχύς ανά σενάριο.

| Σενάριο | Τύπος φωτιστικού | Αριθμός φωτιστικών | Συνολική ισχύς (kW) |
|----------------|------------------|--------------------|---------------------|
| 3 ^ο | LED A | 239 | 80,7 |
| | LED B | 257 | 78,6 |
| 4 ^ο | N.Y.Π | 141 | 42,7 |
| 5 ^ο | N.Y.Π | 191 | 72,2 |
| Υφιστ. εγκατ. | N.Y.Π | 309 | 122,8 |

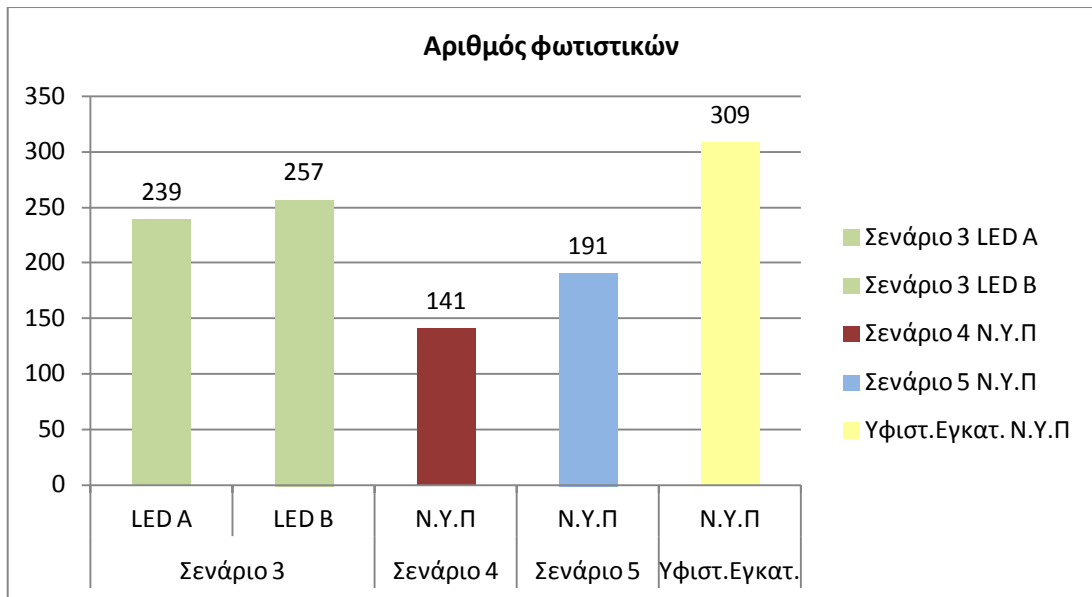
Πίνακας 6.26: Υπολογισμός εξοικονόμησης ενέργειας και αντίστοιχου οικονομικού οφέλους.

| Σενάριο | Τύπος φωτιστικού | Κατανάλωση υφιστάμενης εγκατάστασης (kWh) | Κατανάλωση προτεινόμενης εγκατάστασης (kWh) | Εξοικονόμηση ενέργειας (kWh) | Όφελος από εξοικονόμηση ενέργειας (€) |
|----------------|------------------|---|---|------------------------------|---------------------------------------|
| | | (1) | (2) | (3)=(1)-(2) | (4)=κόστος kWh*· (3) |
| 3 ^ο | LED A | 401.564 | 298.408 | 103.156 | 15.989 |
| | LED B | 401.564 | 296.991 | 104.573 | 16.209 |
| 4 ^ο | N.Y.Π | 401.564 | 163.353 | 238.211 | 36.923 |
| 5 ^ο | N.Y.Π | 401.564 | 247.696 | 153.868 | 23.849 |

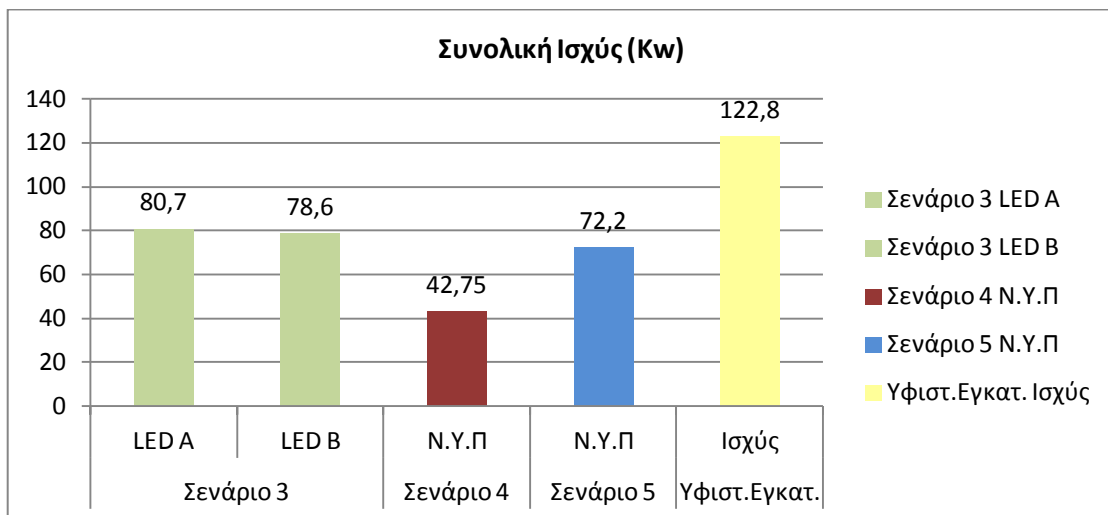
*το κόστος της κιλοβατώρας φαίνεται στον πίνακα 6.1

Παρατηρείται σημαντική εξοικονόμηση στην κατανάλωση και στο κόστος ενέργειας σημειώνεται στο Σενάριο 4, όπου προτείνεται η αντικατάσταση των υφιστάμενων φωτιστικών N.Y.Π. με νέα φωτιστικά N.Y.Π.

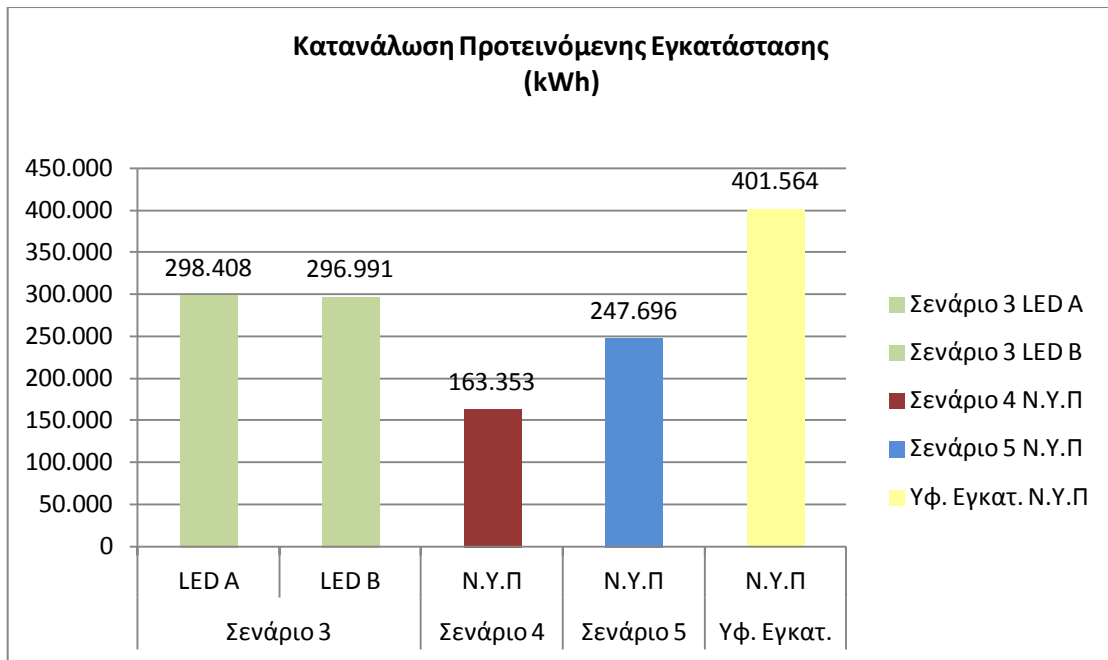
Όσον αφορά στην τεχνολογία LED, η πιο συμφέρουσα λύση από ενεργειακή σκοπιά φαίνεται να είναι τα φωτιστικά LED B του Σεναρίου 3.



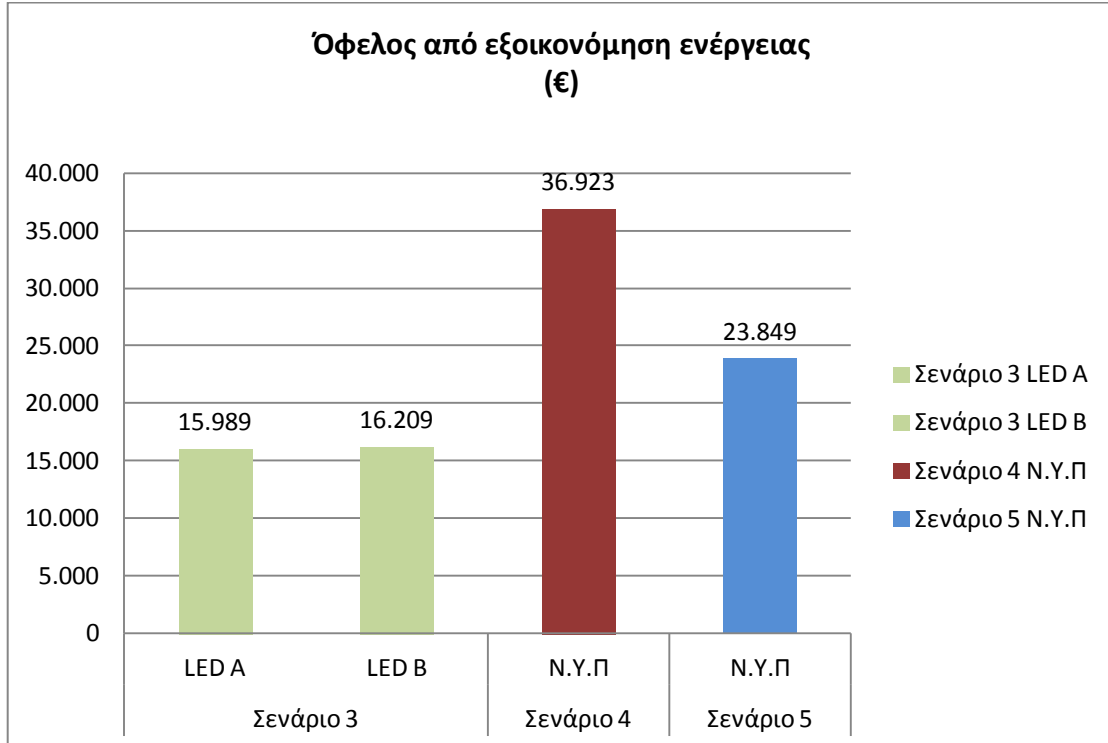
Σχήμα 6.1 : Συγκριτικό διάγραμμα πλήθους φωτιστικών ανά σενάριο.



Σχήμα 6.2: Συγκριτικό διάγραμμα συνολικής εγκατεστημένης ισχύος μεταξύ των σεναρίων και της υφιστάμενης εγκατάστασης.



Σχήμα 6.3: Συγκριτικό διάγραμμα καταναλισκόμενης ενέργειας μεταξύ των σεναρίων και της υφιστάμενης εγκατάστασης.



Σχήμα 6.4: Συγκριτικό διάγραμμα οικονομικού οφέλους από εξοικονόμηση ενέργειας μεταξύ των σεναρίων και της υφιστάμενης εγκατάστασης.

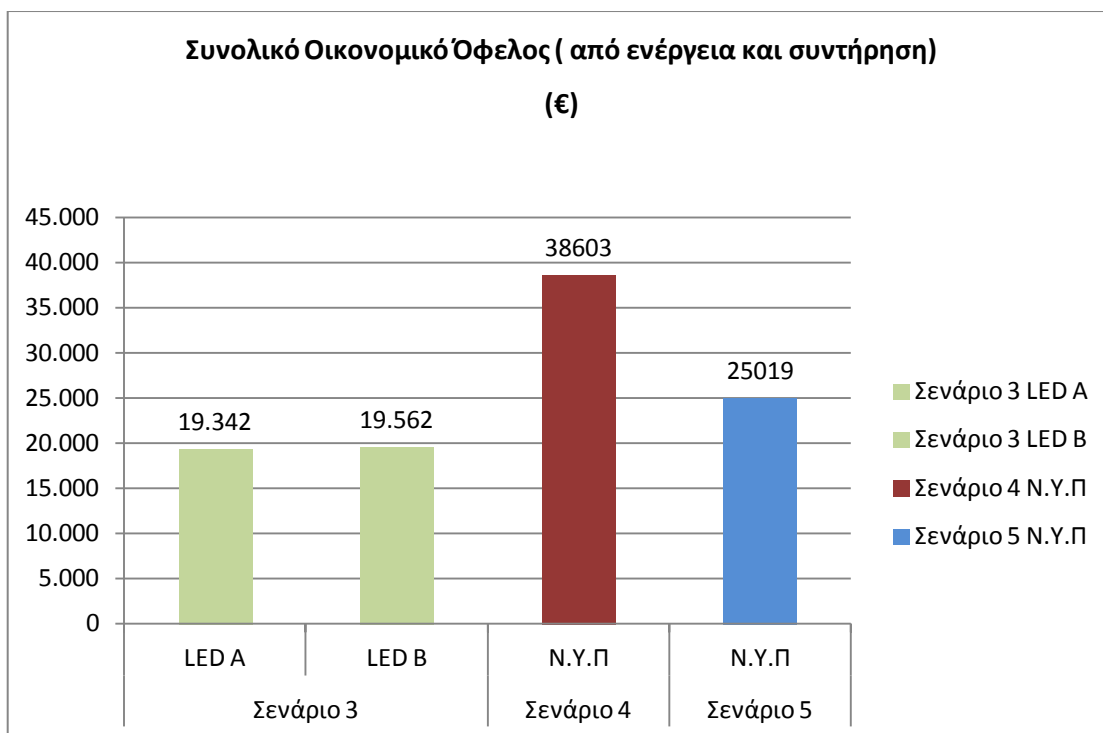
6.10.2 Οικονομικό όφελος από συντήρηση φωτιστικών και συνολικό οικονομικό όφελος

Στον πίνακα που ακολουθεί συγκρίνονται τα σενάρια μεταξύ τους από την άποψη συνολικού οικονομικού οφέλους που πετυχαίνει το καθένα, τόσο από την εξοικονόμηση ενέργειας όσο και από την εξοικονόμηση του κόστους συντήρησης των φωτιστικών.

Πίνακας 5.27: Υπολογισμός οικονομικού οφέλους από συντήρηση φωτιστικών και συνολικού οικονομικού οφέλους.

| Σενάριο | Τύπος φωτιστικού | Κατανάλωση υφιστάμενης εγκατάστασης (kWh) | Εξοικονόμηση ενέργειας (kWh) | Όφελος από εξοικονόμηση ενέργειας (€) | Ετήσιο κόστος συντήρησης φωτιστικών (€) | Όφελος από συντήρηση φωτιστικών (€) | Συνολικό οικονομικό όφελος (€) |
|----------------|------------------|---|------------------------------|---------------------------------------|---|-------------------------------------|--------------------------------|
| | | (1) | (2) | (3) | (4) | (5)=3.353-(4) | (6)=(3)+(5) |
| 3 ^ο | LED A | 401.564 | 103.156 | 15.989 | 0 | 3.353 | 19.342 |
| | LED B | 401.564 | 104.573 | 16.209 | 0 | 3.353 | 19.562 |
| 4 ^ο | N.Y.Π | 401.564 | 238.211 | 36.923 | 1.673 | 1.680 | 38.603 |
| 5 ^ο | N.Y.Π | 401.564 | 153.868 | 23.849 | 2.183 | 1.170 | 25.019 |

Να σημειωθεί ότι για το Σενάριο 3, που περιλαμβάνει την αντικατάσταση με φωτιστικά LED, το όφελος από τη συντήρηση των φωτιστικών ισούται με το κόστος συντήρησης των φωτιστικών της υφιστάμενης εγκατάστασης (3.353 €), καθώς τα φωτιστικά LED δεν επιφέρουν κόστος συντήρησης. Υπενθυμίζεται ότι ωφέλιμη διάρκεια ζωής των LED αφορά στη μείωση της ονομαστικής φωτεινής ροής κατά 10% και όχι στη παύση λειτουργίας τους. Δηλαδή τα LED θα συνεχίσουν να λειτουργούν και μετά την παρέλευση ενός μεγάλου χρονικού διαστήματος (8 έως 13 έτη, ανάλογα με την τεχνολογία LED που χρησιμοποιείται) με φωτεινή ροή χαμηλότερη από το 90% της αρχικής (σε μερικές περιπτώσεις φτάνουν και τις 100.000 h).



Σχήμα 6.5 : Συγκριτικό διάγραμμα συνολικού οικονομικού οφέλους από εξοικονόμηση ενέργειας και κόστος συντήρησης μεταξύ των σεναρίων.

Όπως γίνεται αντιληπτό και από το παραπάνω διάγραμμα, το μεγαλύτερο οικονομικό όφελος από εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους συντήρησης, παρουσιάζει το Σενάριο 4.

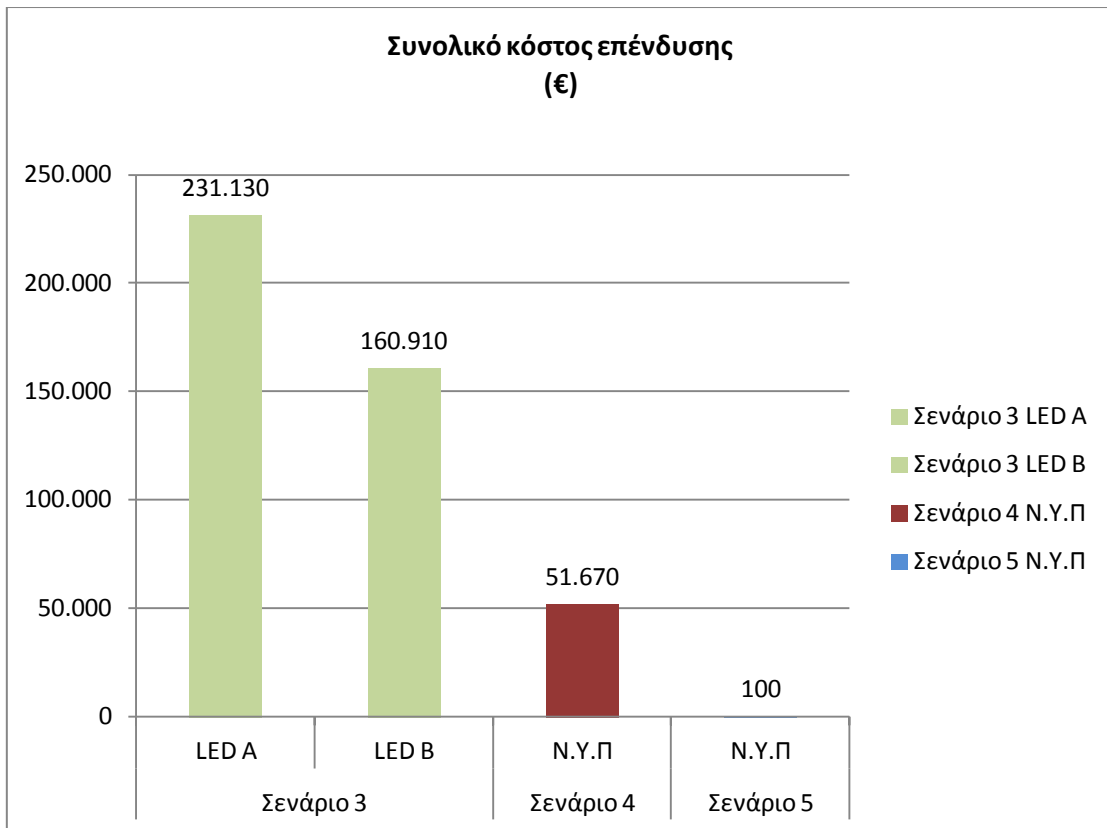
Όσον αφορά τα φωτιστικά τύπου LED, το 3^ο Σενάριο με τα φωτιστικά LED A παρουσιάζει το μεγαλύτερο οικονομικό όφελος.

6.10.3 Συνολικό κόστος επένδυσης ανά προτεινόμενο σενάριο

Στον παρακάτω πίνακα συγκρίνεται το συνολικό κόστος της επένδυσης μεταξύ των σεναρίων, που περιλαμβάνει το κόστος αγοράς των νέων φωτιστικών και το κόστος εγκατάστασής τους, όπως φαίνεται και ακολούθως.

Πίνακας 6.28: Κόστος επένδυσης ανά προτεινόμενο σενάριο.

| Σενάριο | Τύπος φωτιστικού | Αριθμός φωτιστικών | Συνολικό κόστος αγοράς φωτιστικών (€) | Κόστος εγκατάστασης φωτιστικών (€) | Συνολικό κόστος επένδυσης (€) |
|----------------|------------------|--------------------|---------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| | | | (1) | (2) | (3)=(1)+2) |
| 3 ^ο | LED A | 239 | 221.320 | 9.810 | 231.130 |
| | LED B | 257 | 150.560 | 10.350 | 160.910 |
| 4 ^ο | N.Y.Π | 141 | 44.800 | 6.870 | 51.670 |
| 5 ^ο | N.Y.Π | 191 | 0 | 0 | 100 |



Σχήμα 6.6: Συγκριτικό διάγραμμα συνολικού κόστους επένδυσης μεταξύ των προτεινόμενων σεναρίων.

Ελάχιστο κόστος επένδυσης φαίνεται να παρουσιάζει το Σενάριο 5, όπου προτείνεται παρέμβαση στην υφιστάμενη εγκατάσταση με αποσύνδεση ορισμένου αριθμού φωτιστικών, καθώς στο κόστος επένδυσης περιλαμβάνεται μόνο το κόστος αποσύνδεσης αυτών (100 €).

Ακολουθούν τα Σενάρια 4 (φωτιστικά N.Y.Π.) και 3 (LED B), με το Σενάριο 4 να υπερτερεί του 3, κυρίως λόγω του χαμηλότερου κόστους αγοράς των φωτιστικών N.Y.Π έναντι των φωτιστικών τύπου LED, ενώ το Σενάριο 3 με τα φωτιστικά LED B να είναι η πιο συμφέρουσα πρόταση αντικατάστασης με φωτιστικά LED από άποψη κόστους επένδυσης.

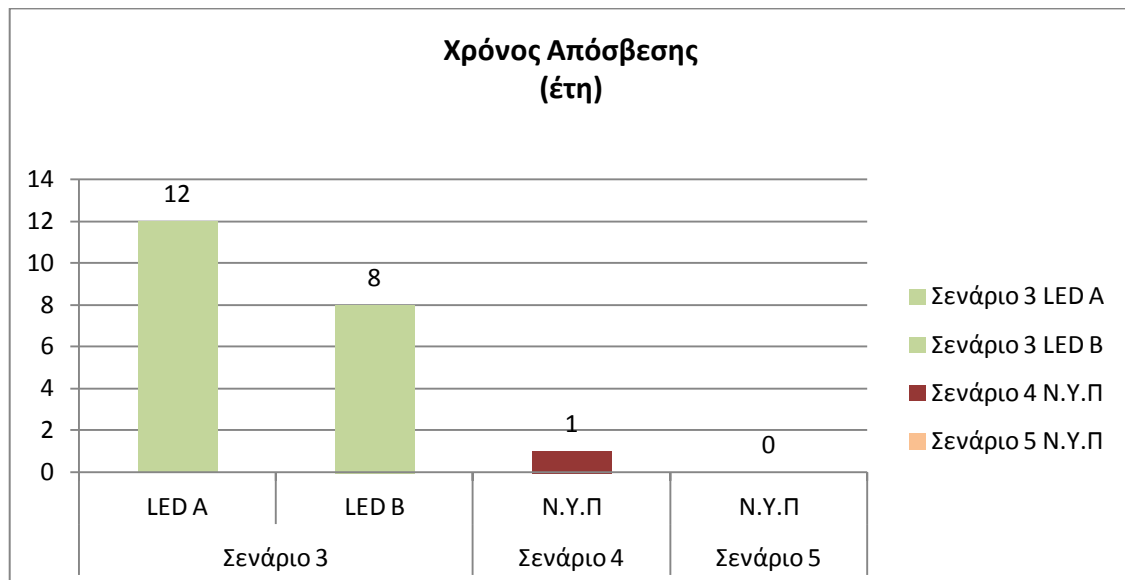
6.10.4 Χρόνος απόσβεσης των προτεινόμενων αναβαθμίσεων

Στον πίνακα που ακολουθεί συγκρίνονται τα σεναρία μεταξύ τους από την άποψη του χρόνου απόσβεσης κάθε νέας προτεινόμενης επένδυσης .

Πίνακας 6.29 : Χρόνος απόσβεσης των προτεινόμενων εγκαταστάσεων.

| Σενάριο | Τύπος φωτιστικού | Αριθμός φωτιστικών | Συνολικό κόστος επένδυσης (€) | Ετήσιο οικονομικό όφελος** (€) | Χρόνος απόσβεσης (έτη) |
|----------------|------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------------------|------------------------|
| | | | (1) | (2) | (3)=(1) ÷ (2) |
| 3 ^ο | LED A | 239 | 231.130 | 19.342 | 12 |
| | LED B | 257 | 160.910 | 19.561 | 8 |
| 4 ^ο | N.Y.Π | 141 | 51.670 | 38.602 | 1 |
| 5 ^ο | N.Y.Π | 191 | 100 | 25.019 | 0 |

** Ετήσιο Οικονομικό όφελος = Ετήσιο λειτουργικό κόστος υφιστάμενης εγκατάστασης (65.595 €) - Ετήσιο λειτουργικό κόστος νέας εγκατάστασης.



Σχήμα 6.7: Συγκριτικό διάγραμμα του χρόνου απόσβεσης μεταξύ των προτεινόμενων σεναρίων.

Από το παραπάνω συγκριτικό διάγραμμα είναι φανερό ότι μεταξύ των φωτιστικών τύπου LED, (σενάριο 3), τα φωτιστικά LED τύπου B παρουσιάζουν μικρότερο χρόνο απόσβεσης. Στο σενάριο 4, με χρήση φωτιστικών νατρίου υψηλής πίεσης, ο χρόνος απόσβεσης είναι ένα έτος, ενώ στο Σενάριο 5 ο χρόνος απόσβεσης είναι μηδενικός, καθώς το κόστος επένδυσης είναι ελάχιστο.

Κεφάλαιο 7^ο

Επίδραση της ταχύτητας των οχημάτων για την οποία έχει σχεδιασθεί η σήραγγα στην κατανάλωση ενέργειας

7.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο 5 εξετάστηκαν πέντε προτάσεις αναβάθμισης του υφιστάμενου συστήματος φωτισμού της υπό μελέτη σήραγγας για ταχύτητα οχημάτων 100 km/h. Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται το Σενάριο 3 για δύο νέες ταχύτητες οχημάτων, 80 km/h και 120 km/h. Σκοπός είναι να υπολογισθεί η επίδραση της ταχύτητας των οχημάτων, για την οποία σχεδιάζεται η σήραγγα, στην κατανάλωση ενέργειας.

7.2 Μελέτη φωτισμού για ταχύτητα οχημάτων 80 km/h

Για τη νέα ταχύτητα, 80 km/h, υπολογίζεται η νέα ασφαλής απόσταση πέδησης (S.S.D.), από τη Σχέση 2.3 (κεφάλαιο 2), καθώς και οι νέες τιμές του συντελεστή k και της μέγιστης λαμπρότητας ζώνης κατωφλίου L_{th} , σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ CR 14380 με βάση την κυκλοφοριακή ροή (παράγραφος 3.3).

Οι νέες τιμές που προκύπτουν παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα :

Πίνακας 7.1: Νέες τιμές για την ταχύτητα οχημάτων $U = 80$ km/h, Σενάριο 3.

| Πυκνότητα κυκλοφορίας | Είδος κίνησης | Κλάση σήραγγας | Ταχύτητα οχημάτων U (km/h) | Ασφαλής απόσταση πέδησης (S.S.D.) (m) | Συντελεστής k | Μέγιστη λαμπρότητα ζώνης κατωφλίου $L_{th} = k * L_{20}$ (cd/m^2) | Ολική ομοιομορφία U_o | Διαμήκης ομοιομορφία U_l |
|-----------------------|------------------|----------------|------------------------------|---------------------------------------|-----------------|---|-------------------------|----------------------------|
| Μέση | Μηχανοκίνητα (A) | 2 | 80 | 100 | 0.04 | 156 | ≥ 0.3 | ≥ 0.5 |

Να σημειωθεί ότι σαν εξωτερική λαμπρότητα L_{20} χρησιμοποιείται εκείνη που μετρήθηκε και χρησιμοποιήθηκε στην υφιστάμενη μελέτη φωτισμού της σήραγγας και ισούται με $L_{20}=3900$ cd/m^2 .

7.2.1 Αντικατάσταση με φωτιστικά LED τύπου A

Αρχικά, εισάγονται στο πρόγραμμα προσομοίωσης φωτισμού Relux, οι νέες τιμές που υπολογίσθηκαν παραπάνω για ταχύτητα οχημάτων 80 km/h, καθώς και τα φωτιστικά LED τύπου A, με τα οποία πραγματοποιείται η μελέτη.

Ρυθμίζοντας τον αριθμό των βαθμίδων φωτισμού να είναι τέσσερις (S1, S2, S3, S4) για τις ζώνες προσαρμογής (φωτισμός ημέρας) και μία για το φωτισμό νύχτας (Int.1), η

λειτουργία των οποίων έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 5, το πρόγραμμα εξάγει τα αποτελέσματα που συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα :

Πίνακας 7.2: Αποτελέσματα του Relux με τα φωτιστικά LED τύπου A για ταχύτητα οχημάτων 80 km/h, Σενάριο 3

| Βαθμίδα | Int.1 | S4(25%) | S3(50%) | S2(75%) | S1 (100%) |
|---------------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Roadway | | | | | |
| Lav | 1,88 cd/m ² | 40,43 cd/m ² | 79,56 cd/m ² | 118,35 cd/m ² | 157,2 cd/m ² |
| Uo | 0,46 | 0,67 | 0,68 | 0,68 | 0,69 |
| U1 | 0,50 | 0,90 | 0,98 | 0,97 | 0,99 |
| Tlmax | 1,97 % | 0,84 % | 0,84 % | 0,84 % | 0,84 % |
| Wall left (diffuse 70%) | | | | | |
| Lav | 3,87 cd/m ² | 96,31 cd/m ² | 187,8 cd/m ² | 279,99 cd/m ² | 371,68 cd/m ² |
| Uo | 0,34 | 0,90 | 0,96 | 0,96 | 0,96 |
| Wall right (diffuse 70%) | | | | | |
| Lav | 3,87 cd/m ² | 96,31 cd/m ² | 187,8 cd/m ² | 279,99 cd/m ² | 371,68 cd/m ² |
| Uo | 0,34 | 0,90 | 0,96 | 0,96 | 0,96 |

Για να επιτευχθούν τα παραπάνω αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν τα φωτιστικά LED της εταιρείας A που φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 7.3: Ισχύς, φωτεινή απόδοση και πλήθος των φωτιστικών LED A για ταχύτητα οχημάτων 80 km/h, Σενάριο 3.

| Τύπος φωτιστικού | Ζώνη φωτισμού | Ισχύς φωτιστικού (με ballast) (W) | Φωτεινή απόδοση (lm/W) | Πλήθος φωτιστικών | Ισχύς (KW) |
|------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|------------------------|-------------------|------------|
| LED A | Νυχτερινή | 76,3 | 119,3 | 14 | 1,07 |
| | Προσαρμογής (κατωφλίου και μετάβασης) | 360 | 100 | 109 | 44,2 |
| | | 240 | 100 | 7 | |
| | | 160 | 100 | 8 | |
| | | 100 | 100 | 20 | |
| Σύνολο | | | | 158 | 45,3 |

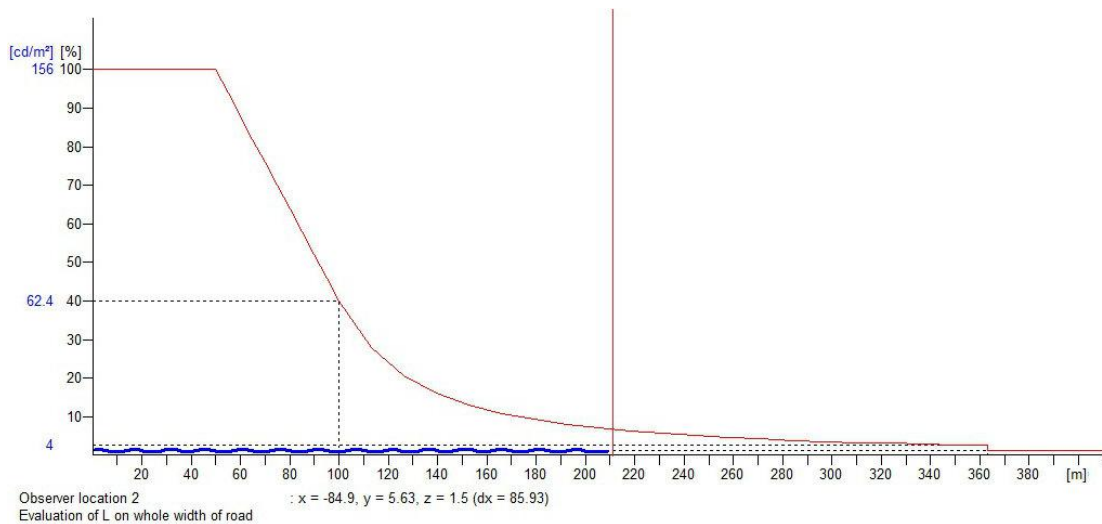
*Τα πολικά διαγράμματα των φωτιστικών σωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν, παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η μέγιστη τιμή λαμπρότητας κατωφλίου Lth που πρέπει να επιτευχθεί για την ταχύτητα των 80 km/h είναι Lth = 156 cd/m². Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Relux που παρουσιάζονται στον πίνακα 7.2 παρατηρείται ότι με χρήση

των φωτιστικών LED τύπου A επιτυγχάνεται αυτή η τιμή, και διατηρούνται οι ομοιομορφίες πάνω από τα επιθυμητά όρια, ενώ η συνολική εγκατεστημένη ισχύς φωτισμού προκύπτει :

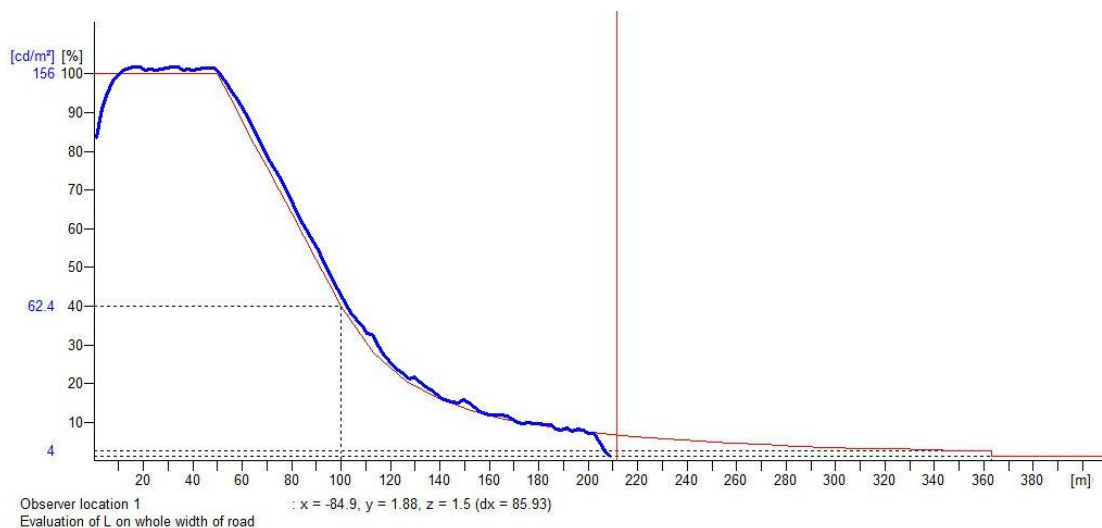
Συνολική ισχύς φωτισμού = 45,3 kW

Στις επόμενες εικόνες παρατίθενται τα διαγράμματα λαμπρότητας που προκύπτουν για τη νύχτα και για τη βαθμίδα φωτισμού S1(100%).



*η κάθετη κόκκινη γραμμή ορίζει το πέρας της σήραγγας που είναι τα 212m

Εικόνα 7.1: Διάγραμμα λαμπρότητας νυχτερινού φωτισμού με φωτιστικά LED τύπου A για ταχύτητα οχημάτων 80 km/h, Σενάριο 3.



*η κάθετη κόκκινη γραμμή ορίζει το πέρας της σήραγγας που είναι τα 212m

Εικόνα 7.2: Διάγραμμα λαμπρότητας βαθμίδας φωτισμού S1(100%) με φωτιστικά LED τύπου A για ταχύτητα οχημάτων 80 km/h, Σενάριο 3.

7.2.2 Αντικατάσταση με φωτιστικά LED τύπου B

Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται για ταχύτητα οχημάτων 80 km/h η αντικατάσταση των υφιστάμενων φωτιστικών Ν.Υ.Π. της σήραγγας, με φωτιστικά LED τύπου B, σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ CR 14380 με βάση την κυκλοφοριακή ροή.

Τα φωτομετρικά αποτελέσματα που προέκυψαν με χρήση του προγράμματος RELUX συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 7.4: Αποτελέσματα του Relux με τα φωτιστικά LED τύπου B για ταχύτητα οχημάτων 80 km/h, Σενάριο 3.

| Βαθμίδα | Int.1 | S4(25%) | S3(50%) | S2(75%) | S1(100%) |
|---------------------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Roadway | | | | | |
| Lav | 1,21cd/m ² | 40 cd/m ² | 78,9 cd/m ² | 117,73 cd/m ² | 156,53 cd/m ² |
| Uo | 0,49 | 0,64 | 0,64 | 0,64 | 0,64 |
| UI | 0,52 | 0,97 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |
| Tlmax | 1,64 % | 0,91 % | 0,91 % | 0,91 % | 0,91 % |
| Wall left (diffuse 70%) | | | | | |
| Lav | 4,58 cd/m ² | 95,49 cd/m ² | 186,28 cd/m ² | 276,91 cd/m ² | 367,67 cd/m ² |
| Uo | 0,38 | 0,86 | 0,87 | 0,88 | 0,88 |
| Wall right (diffuse 70%) | | | | | |
| Lav | 4,58 cd/m ² | 95,49 cd/m ² | 186,28 cd/m ² | 276,91 cd/m ² | 367,67 cd/m ² |
| Uo | 0,38 | 0,86 | 0,87 | 0,88 | 0,88 |

Για να επιτευχθούν τα παραπάνω αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν τα φωτιστικά LED της εταιρείας B που παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 7.5: Ισχύς, φωτεινή απόδοση και πλήθος των φωτιστικών LED B για ταχύτητα οχημάτων 80 km/h, Σενάριο 3.

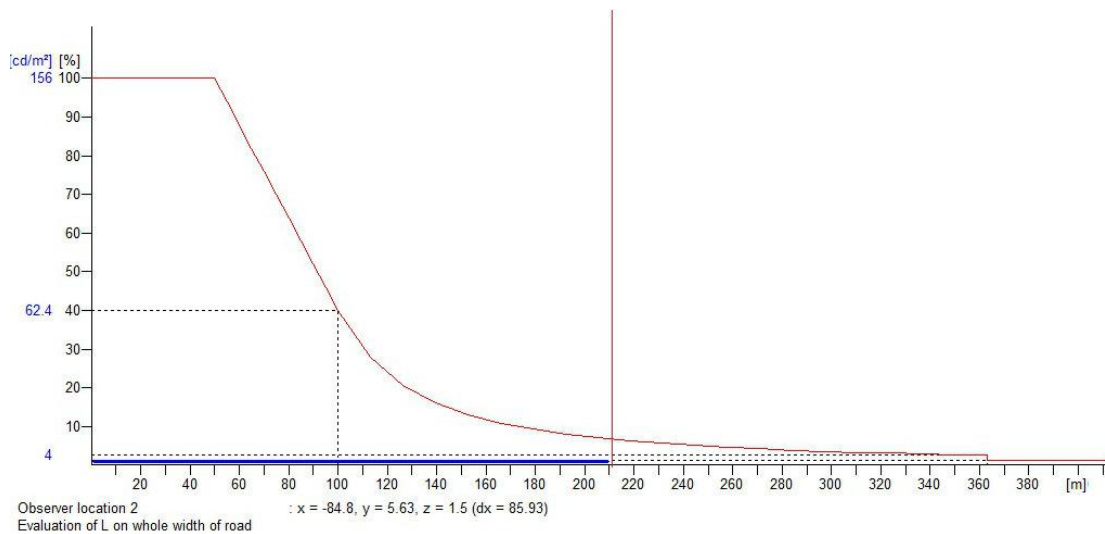
| Τύπος φωτιστικού | Ζώνη φωτισμού | Ισχύς φωτιστικού (με ballast) (W) | Φωτεινή απόδοση (lm/W) | Πλήθος φωτιστικών | Ισχύς (KW) |
|------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|------------------------|-------------------|------------|
| LED B | Νυχτερινή | 75 | 119,3 | 15 | 1,12 |
| | Προσαρμογής (κατωφλίου και μετάβασης) | 322 | 116,1 | 121 | 43,7 |
| | | 180 | 108,1 | 13 | |
| | | 153 | 120,3 | 16 | |
| Σύνολο | | | | 165 | 44,8 |

*Τα πολιτικά διαγράμματα των φωτιστικών σωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν, παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.

Η μέγιστη τιμή λαμπρότητας L_{th} που πρέπει να επιτευχθεί για ταχύτητα οχημάτων 80 km/h, είναι $L_{th} = 156 \text{ cd/m}^2$. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Relux που συνοψίζονται στον παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι με χρήση των φωτιστικών LED τύπου B επιτυγχάνεται αυτή η τιμή και διατηρούνται οι ομοιομορφίες, ενώ η συνολική εγκατεστημένη ισχύς φωτισμού ισούται με :

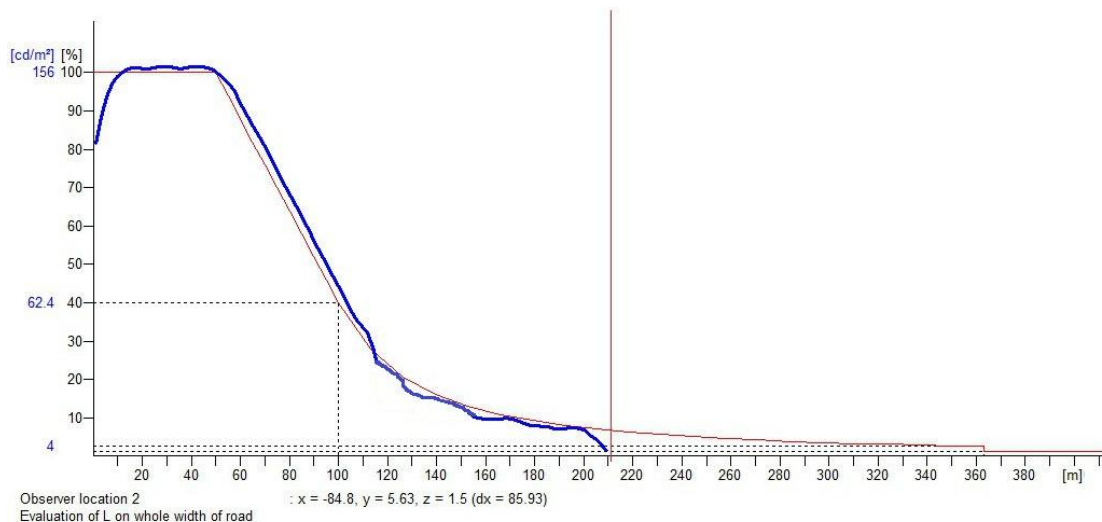
Συνολική ισχύς φωτισμού = 44,8 kW

Στις επόμενες εικόνες φαίνονται τα διαγράμματα λαμπρότητας που προκύπτουν για τη νύχτα και για τη βαθμίδα φωτισμού S1(100%).



* η κάθετη κόκκινη γραμμή ορίζει το πέρας της σήραγγας που είναι τα 212m

Εικόνα 7.3 : Διάγραμμα λαμπρότητας νυχτερινού φωτισμού με φωτιστικά LED τύπου B για ταχύτητα οχημάτων 80 km/h, Σενάριο 3.



*η κάθετη κόκκινη γραμμή ορίζει το πέρας της σήραγγας που είναι τα 212m

Εικόνα 7.4 : Διάγραμμα λαμπρότητας της βαθμίδας φωτισμού S1(100%) με φωτιστικά LED τύπου B για ταχύτητα οχημάτων 80 km/h, Σενάριο 3.

7.3 Μελέτη φωτισμού για ταχύτητα οχημάτων 120 km/h

Για τη νέα ταχύτητα οχημάτων, 120 km/h, υπολογίζονται η νέα ασφαλής απόσταση πέδησης (S.S.D.), από τη Σχέση 2.3 (κεφάλαιο 2), καθώς και οι νέες τιμές του συντελεστή k και της μέγιστης λαμπρότητας ζώνης κατωφλίου L_{th} , σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ CR 14380 με βάση την κυκλοφοριακή ροή (παράγραφος 3.3). Οι νέες τιμές που προκύπτουν συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα :

Πίνακας 7.6: Νέες τιμές για την ταχύτητα οχημάτων $U = 120$ km/h, Σενάριο 3.

| Πυκνότητα κυκλοφορίας | Είδος κίνησης | Κλάση σήραγγας | Ταχύτητα οχημάτων U (km/h) | Ασφαλής απόσταση πέδησης (S.S.D.) (m) | Συντελ. k | Μέγιστη λαμπρότητα ζώνης κατωφλίου $L_{th} = k * L_{20}$ (cd/m^2) | Ολική ομοιομορφία U_o | Διαμήκης ομοιομορφία U_l |
|-----------------------|------------------|----------------|------------------------------|---------------------------------------|-------------|---|-------------------------|----------------------------|
| Μέση | Μηχανοκίνητα (A) | 2 | 120 | 223 | 0.06 | 234 | ≥ 0.3 | ≥ 0.5 |

Επισημαίνουμε ότι ως εξωτερική λαμπρότητα L_{20} χρησιμοποιείται εκείνη που μετρήθηκε και χρησιμοποιήθηκε στην υφιστάμενη μελέτη φωτισμού της σήραγγας και ισούται με $L_{20}=3900$ cd/m^2 .

7.3.1 Αντικατάσταση με φωτιστικά LED τύπου A

Αρχικά, εισάγονται στο πρόγραμμα προσομοίωσης φωτισμού Relux, οι νέες τιμές που υπολογίστηκαν παραπάνω για την ταχύτητα οχημάτων, 120 km/h, καθώς και τα φωτιστικά LED τύπου A, με τα οποία πραγματοποιείται η μελέτη.

Ρυθμίζοντας τον αριθμό των βαθμίδων φωτισμού να είναι τέσσερις (S1, S2, S3, S4) για τις ζώνες προσαρμογής (φωτισμός ημέρας) και μία για το φωτισμό νύχτας (Int.1), η λειτουργία των οποίων έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 5, το πρόγραμμα εξάγει τα αποτελέσματα που συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα :

Πίνακας 7.7: Πίνακας αποτελεσμάτων Relux με φωτιστικά LED τύπου A για ταχύτητα οχημάτων 120 km/h, Σενάριο 3.

| Βαθμίδα | int.1 | s4(25%) | s3(50%) | s2(75%) | s1(100%) |
|---------------------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Roadway | | | | | |
| Lav | 1,9 cd/m ² | 60,26 cd/m ² | 119,27 cd/m ² | 178,23 cd/m ² | 236,77 cd/m ² |
| Uo | 0,46 | 0,68 | 0,69 | 0,69 | 0,7 |
| U1 | 0,5 | 0,98 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |
| Tlmax | 1,95 % | 1,29 % | 1,29 % | 1,29 % | 1,29 % |
| Wall left (diffuse 70%) | | | | | |
| Lav | 3,32 cd/m ² | 115,9 cd/m ² | 228,59 cd/m ² | 341,35 cd/m ² | 453,28 cd/m ² |
| Uo | 0,32 | 0,89 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| Wall right (diffuse 70%) | | | | | |
| Lav | 3,97 cd/m ² | 144,5 cd/m ² | 284,83 cd/m ² | 425,35 cd/m ² | 564,59 cd/m ² |
| Uo | 0,34 | 0,93 | 0,94 | 0,95 | 0,95 |

Προκειμένου να επιτευχθούν τα παραπάνω αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν τα φωτιστικά LED της εταιρείας A που παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 7.8: Ισχύς, φωτεινή απόδοση και πλήθος των φωτιστικών LED A για ταχύτητα οχημάτων 120 km/h, Σενάριο 3.

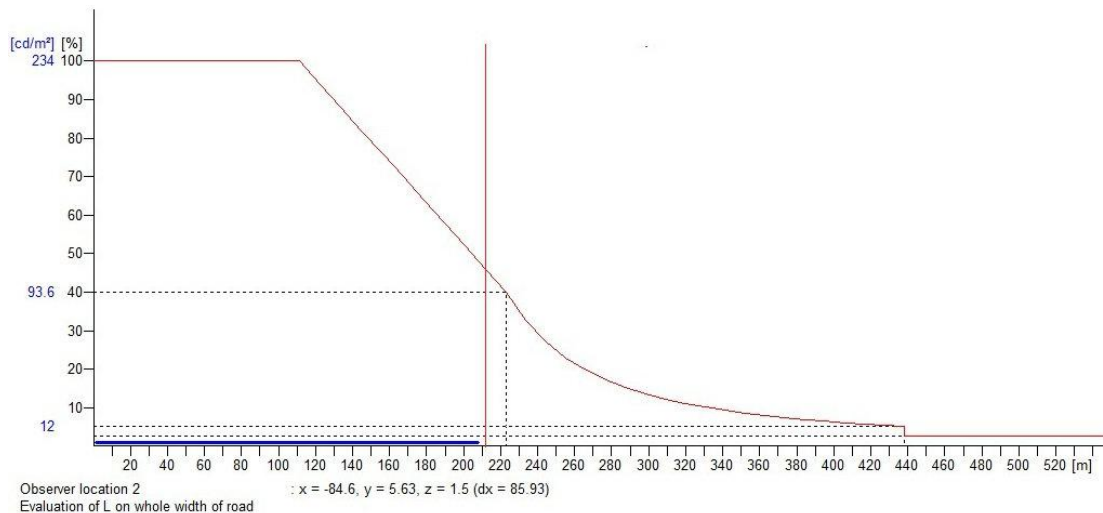
| Τύπος φωτιστικού | Ζώνη φωτισμού | Ισχύς φωτιστικού (με ballast) (W) | Φωτεινή απόδοση (lm/W) | Πλήθος φωτιστικών | Ισχύς (kW) |
|------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|------------------------|-------------------|--------------|
| LED A | Νυχτερινή | 76,3 | 119,3 | 14 | 1,07 |
| | Προσαρμογής (κατωφλίου και μετάβασης) | 360 | 100 | 324 | 116,6 |
| Σύνολο | | | | 338 | 117,7 |

*Τα πολικά διαγράμματα των φωτιστικών σωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν, παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.

Η μέγιστη τιμή λαμπρότητας L_{th} που πρέπει να επιτευχθεί για ταχύτητα οχημάτων 120 km/h, είναι $L_{th} = 234 \text{ cd/m}^2$. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Relux που παρουσιάζονται στον παραπάνω πίνακα, παρατηρείται ότι με χρήση των φωτιστικών LED τύπου A επιτυγχάνεται αυτή η τιμή και οι ομοιομορφίες διατηρούνται πάνω από τα επιθυμητά όρια, ενώ η συνολική εγκατεστημένη ισχύς φωτισμού ισούται με :

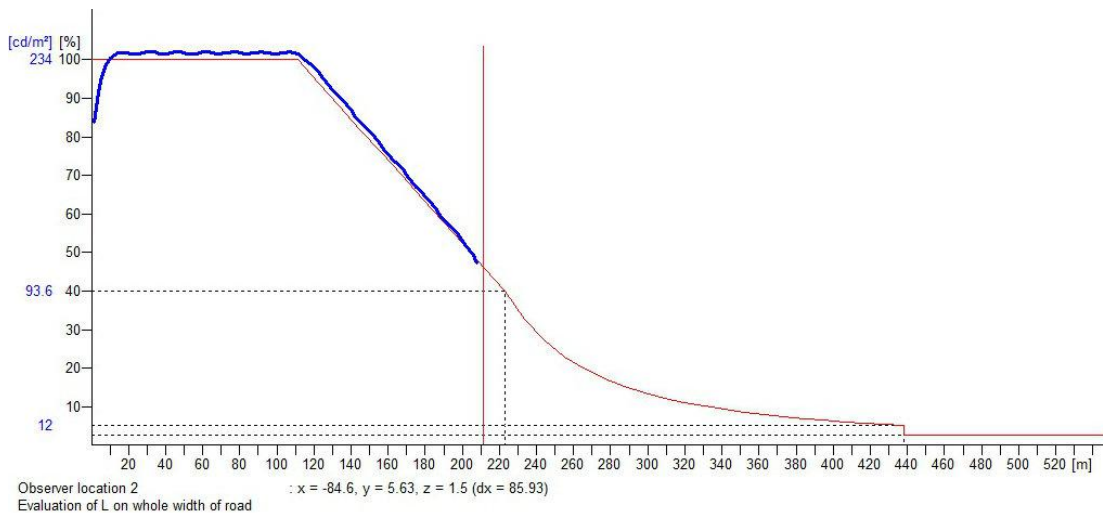
Συνολική ισχύς φωτισμού = 117,7 kW

Στις επόμενες εικόνες παρουσιάζονται τα διαγράμματα λαμπρότητας που προκύπτουν για τη νυχτερινή βαθμίδα φωτισμού, καθώς και για τη βαθμίδα φωτισμού S1(100%).



* η κάθετη κόκκινη γραμμή ορίζει το πέρας της σήραγγας που είναι τα 212m

Εικόνα 7.5: Διάγραμμα λαμπρότητας νυχτερινού φωτισμού με φωτιστικά LED τύπου A για ταχύτητα οχημάτων 120 km/h, Σενάριο 3.



*η κάθετη κόκκινη γραμμή ορίζει το πέρασ της σήραγγας που είναι τα 212m

Εικόνα 7.6: Διάγραμμα λαμπρότητας βαθμίδας φωτισμού S1(100%) με φωτιστικά LED τύπου A για ταχύτητα οχημάτων 120 km/h, Σενάριο 3.

7.3.2 Αντικατάσταση με φωτιστικά LED τύπου B

Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται για την ταχύτητα 120 km/h (Σενάριο3) η αντικατάσταση των υφιστάμενων φωτιστικών Ν.Υ.Π. της σήραγγας, με φωτιστικά LED τύπου B, σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ CR 14380 με βάση την κυκλοφοριακή ροή.

Τα φωτομετρικά αποτελέσματα που προέκυψαν με χρήση του προγράμματος RELUX συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 7.9: Πίνακας αποτελεσμάτων Relux με φωτιστικά LED τύπου B για ταχύτητα οχημάτων 120 km/h.

| Βαθμίδα | Int.1 | S4(25%) | S3(50%) | S2(75%) | S1(100%) |
|---------------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Roadway | | | | | |
| Lav | 1,54 cd/m ² | 59,93 cd/m ² | 118,37cd/m ² | 176,6 cd/m ² | 235,26 cd/m ² |
| Uo | 0,5 | 0,61 | 0,61 | 0,61 | 0,61 |
| UI | 0,52 | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 1,00 |
| Tlmax | 1,67 % | 1,00 % | 1,00 % | 1,00 % | 1,00 % |
| Wall left (diffuse 70%) | | | | | |
| Lav | 5,88 cd/m ² | 141,1 cd/m ² | 276,26 cd/m ² | 411,55 cd/m ² | 546,75 cd/m ² |
| Uo | 0,38 | 0,88 | 0,89 | 0,89 | 0,89 |
| Wall right (diffuse 70%) | | | | | |
| Lav | 5,77 cd/m ² | 145,35 cd/m ² | 284,99 cd/m ² | 424,45 cd/m ² | 564,37 cd/m ² |
| Uo | 0,38 | 0,85 | 0,86 | 0,86 | 0,86 |

Προκειμένου να επιτευχθούν τα παραπάνω αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν τα φωτιστικά LED της εταιρείας B που παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 7.10: Ισχύς, φωτεινή απόδοση και πλήθος των φωτιστικών LED B για ταχύτητα οχημάτων 120 km/h, Σενάριο 3.

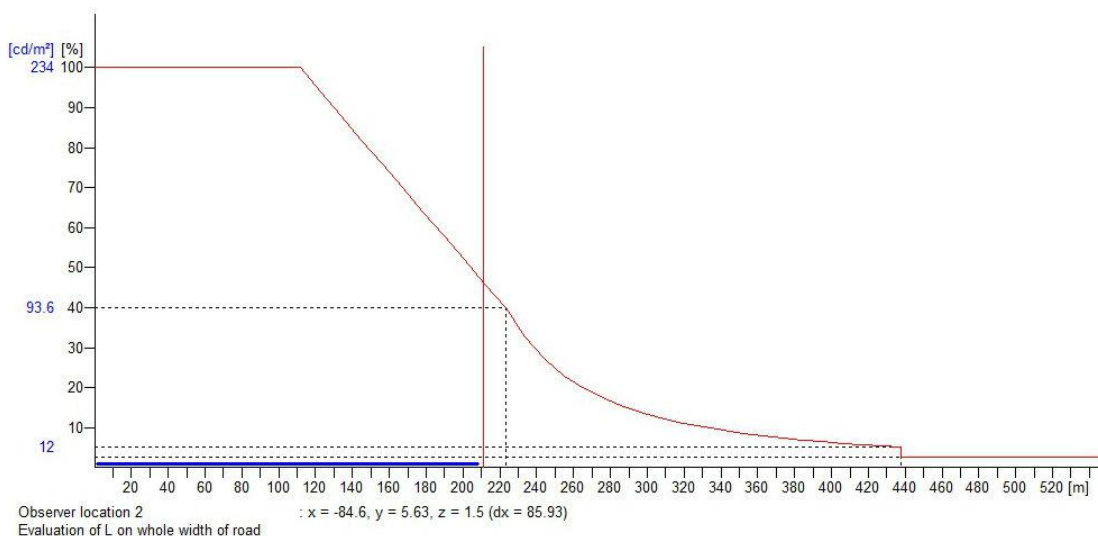
| Τύπος φωτιστικού | Ζώνη φωτισμού | Ισχύς φωτιστικού (με ballast) (W) | Φωτεινή απόδοση (lm/W) | Πλήθος φωτιστικών | Ισχύς (kW) |
|------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|------------------------|-------------------|------------|
| LED A | Νυχτερινή | 106 | 110,1 | 15 | 1,6 |
| | Προσαρμογής (κατωφλίου και μετάβασης) | 322 | 116,1 | 352 | 113,4 |
| Σύνολο | | | | 367 | 115 |

*Τα πολικά διαγράμματα των φωτιστικών σωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν, παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.

Η μέγιστη τιμή λαμπρότητας L_{th} που πρέπει να επιτευχθεί για ταχύτητα οχημάτων 120 km/h, είναι $L_{th} = 234 \text{ cd/m}^2$. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Relux που παρουσιάζονται στον παραπάνω πίνακα παρατηρείται ότι με χρήση των φωτιστικών LED τύπου A επιτυγχάνεται αυτή η τιμή και οι ομοιομορφίες διατηρούνται πάνω από τα επιθυμητά όρια, ενώ η συνολική εγκατεστημένη ισχύς φωτισμού ισούται με :

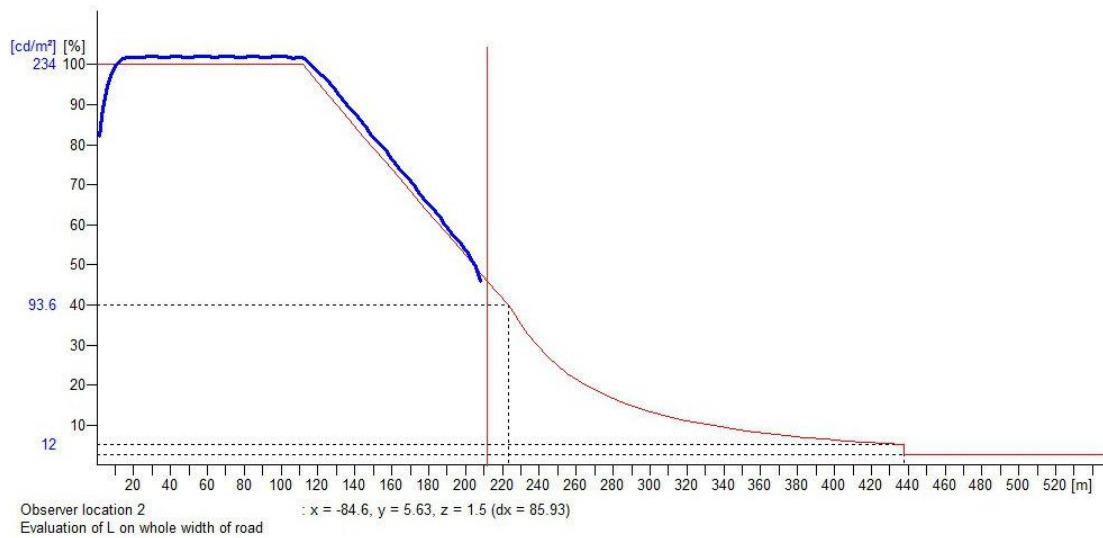
Συνολική ισχύς φωτισμού = 115 kW

Στις επόμενες εικόνες παρουσιάζονται τα διαγράμματα λαμπρότητας που προκύπτουν για τη νυχτερινή βαθμίδα φωτισμού, καθώς και για τη βαθμίδα φωτισμού S1(100%).



*η κάθετη κόκκινη γραμμή ορίζει το πέρασ της σήραγγας που είναι τα 212m

Εικόνα 7.7: Διάγραμμα λαμπρότητας νυχτερινού φωτισμού με φωτιστικά LED τύπου B για ταχύτητα οχημάτων 120 km/h, Σενάριο 3.



*η κάθετη κόκκινη γραμμή ορίζει το πέρασ της σήραγγας που είναι τα 212m

Εικόνα 7. 8: Διάγραμμα λαμπρότητας βαθμίδας φωτισμού S1(100%) με φωτιστικά LED τύπου B για ταχύτητα οχημάτων 120 km/h, Σενάριο 3.

7.4 Υπολογισμός κόστους αγοράς φωτιστικών και κατανάλωσης ενέργειας

Στην παράγραφο αυτή υπολογίζονται το κόστος αγοράς των φωτιστικών LED και το κόστος κατανάλωσης ενέργειας για τις νέες ταχύτητες οχημάτων, 80 km/h και 120 km/h, με τον τρόπο που υπολογίστηκαν οι τιμές αυτές στο κεφάλαιο 6.

7.4.1 Υπολογισμός κόστους για την ταχύτητα οχημάτων 80 km/h

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται το πλήθος και οι τιμές των φωτιστικών LED A και LED B, και υπολογίζεται αντίστοιχα το συνολικό κόστος αγοράς τους.

Πίνακα 7.11 : Συνολικό κόστος αγοράς φωτιστικών για LED A και LED B για ταχύτητα οχημάτων 80 km/h, Σενάριο 3.

| Ταχύτητα σχεδιασμού 80 km/h | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------|---------------------|--------------------|-----------------------------------|--------|---------------------|--------------------|
| LED A | | | | LED B | | | |
| Είδος φωτιστικών | Πλήθος | Τιμή/φωτιστικό € | Συνολική Τιμή € | Είδος φωτιστικών | Πλήθος | Τιμή/φωτιστικό € | Συνολική Τιμή € |
| Νύχτας-76,3W | 14 | 300 | 4.200 | Νύχτας – 75 W | 15 | 325 | 4.875 |
| Ζωνών προσαρμογής-360W | 109 | 980 | 106.820 | Ζωνών προσαρμογής-322W | 121 | 875 | 105.875 |
| Ζωνών προσαρμογής-240W | 7 | 710 | 4.970 | Ζωνών προσαρμογής-180W | 13 | 553 | 7.189 |
| Ζωνών προσαρμογής-160W | 8 | 500 | 4.000 | Ζωνών προσαρμογής-153W | 16 | 490 | 7.840 |
| Ζωνών προσαρμογής-100W | 20 | 355 | 7.100 | | | | |
| Συνολικό κόστος αγοράς φωτιστικών | | | 127.090 | Συνολικό κόστος αγοράς φωτιστικών | | | 125.780 |

Ο υπολογισμός της ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας (kWh/έτος) στο φωτισμό της υπό μελέτη σήραγγας γίνεται με βάση τις ώρες λειτουργίας ανά ημέρα για κάθε βαθμίδα φωτισμού και την ισχύ ανά βαθμίδα (kW). Συγκεκριμένα, κατά τη λειτουργία της βαθμίδας φωτισμού S1, όπου όλα τα φωτιστικά μέσα στη σήραγγα είναι σε λειτουργία, προκειμένου να επιτευχθεί μέγιστη τιμή λαμπρότητας Lth (100%), η συνολική μέγιστη ισχύς είναι 45,3 kW. Εφόσον τα LED ντιμάρονται, υπολογίζεται η ισχύς των υπόλοιπων βαθμίδων πολλαπλασιάζοντας κάθε φορά το αντίστοιχο ποσοστό με τη μέγιστη συνολική ισχύ. Προκύπτει, λοιπόν, η καταναλισκόμενη ενέργεια της κάθε βαθμίδας φωτισμού πολλαπλασιάζοντας την ισχύ της (kW) με τις ώρες που είναι σε λειτουργία ανά έτος. Αθροίζοντας την καταναλισκόμενη ενέργεια (kWh/έτος) όλων των βαθμίδων υπολογίζεται η ετήσια κατανάλωση ενέργειας και το κόστος αυτής, όπως φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 7.12: Ετήσιο κόστος κατανάλωσης ενέργειας για τα LED A στην ταχύτητα οχημάτων 80km/h, Σενάριο 3.

| Βαθμίδα | Ημερήσιες ώρες λειτουργίας (h) | Ισχύς ανά βαθμίδα με LED A (kW) | Ετήσιες ώρες λειτουργίας (h) | Ετήσια καταναλισκόμενη ενέργεια (kWh) |
|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|
| | | (1) | (2) | (3) = (1) × (2) |
| Νύχτα | 10,5 | 1,07 | 3.832,5 | 4.100,7 |
| S1 (100%) | 6,75 | 45,3 | 2.463,75 | 111.607,8 |
| S2(75%) | 2,25 | 34 | 821,25 | 27.922,5 |
| S3(50%) | 2,25 | 22,65 | 821,25 | 18.601,3 |
| S4(25%) | 2,25 | 11,3 | 821,25 | 9.280,125 |
| ΣΥΝΟΛΟ | | | | 171.513 |
| Ετήσιο κόστος ενέργειας (€) | | | | 26.584,5 |

*τιμή κιλοβατώρας=0,155€/kWh, πίνακας 6.1

Ομοίως υπολογίζεται η ετήσια καταναλισκόμενη ενέργεια και το κόστος αυτής, στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται τα LED B για ταχύτητα οχημάτων 80 km/h. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 7.13: Ετήσιο κόστος κατανάλωσης ενέργειας για τα LED B στην ταχύτητα οχημάτων 80km/h, Σενάριο 3.

| Βαθμίδα | Ημερήσιες ώρες λειτουργίας (h) | Ισχύς ανά βαθμίδα με LED B (kW) | Ετήσιες ώρες λειτουργίας (h) | Ετήσια καταναλισκόμενη ενέργεια (kWh) |
|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|
| | | (1) | (2) | (3) = (1) × (2) |
| Νύχτα | 10,5 | 1,12 | 3.832,5 | 4.292,4 |
| S1 (100%) | 6,75 | 44,8 | 2.463,75 | 110.376 |
| S2(75%) | 2,25 | 33,6 | 821,25 | 27.594 |
| S3(50%) | 2,25 | 22,4 | 821,25 | 18.396 |
| S4(25%) | 2,25 | 11,2 | 821,25 | 9.198 |
| ΣΥΝΟΛΟ | | | | 169.856,4 |
| Ετήσιο κόστος ενέργειας (€) | | | | 26.327,7 |

*τιμή κιλοβατώρας=0,155€/kWh, πίνακας 6.1

7.4.2 Υπολογισμός κόστους για την ταχύτητα οχημάτων 120 km/h

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται το πλήθος και οι τιμές των φωτιστικών LED A και LED B, και υπολογίζεται αντίστοιχα το συνολικό κόστος αγοράς τους.

Πίνακα 7.14 : Συνολικό κόστος αγοράς φωτιστικών για LED A και LED B για ταχύτητα οχημάτων 120km/h, Σενάριο 3.

| Ταχύτητα σχεδιασμού 120 km/h | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------|------------------|-----------------|-----------------------------------|--------|------------------|-----------------|
| LED A | | | | LED B | | | |
| Είδος φωτιστικών | Πλήθος | Τιμή/φωτιστικό € | Συνολική Τιμή € | Είδος φωτιστικών | Πλήθος | Τιμή/φωτιστικό € | Συνολική Τιμή € |
| Νύχτας-76,3W | 14 | 300 | 4.200 | Νύχτας – 106W | 15 | 325 | 4.875 |
| Ζωνών προσαρμογής -360W | 324 | 900 | 291.600 | Ζωνών προσαρμογής -322W | 352 | 800 | 281.600 |
| Συνολικό κόστος αγοράς φωτιστικών | | | 295.800 | Συνολικό κόστος αγοράς φωτιστικών | | | 286.475 |

Ο υπολογισμός της ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας (kWh/έτος) και του κόστους αυτής, πραγματοποιείται με τον τρόπο που περιγράφηκε στην παράγραφο 7.4.1., τόσο για τα LED A όσο και για τα LED B, τα αποτελέσματα των οποίων φαίνονται στους πίνακες που ακολουθούν.

Πίνακας 7.15: Ετήσια κατανάλωση ενέργειας για τα LED A, ταχύτητα οχημάτων 120km/h, Σενάριο 3.

| Βαθμίδα | Ημερήσιες ώρες λειτουργίας (h) | Ισχύς ανά βαθμίδα με LED A (kW) | Ετήσιες ώρες λειτουργίας (h) | Ετήσια καταναλισκόμενη ενέργεια (kWh) |
|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|
| | | (1) | (2) | (3) = (1) × (2) |
| Νύχτα | 10,5 | 1,07 | 3.832,5 | 4.100,8 |
| S1 (100%) | 6,75 | 117,7 | 2.463,75 | 289.983,4 |
| S2(75%) | 2,25 | 88,3 | 821,25 | 72.516,4 |
| S3(50%) | 2,25 | 58,8 | 821,25 | 48.289,5 |
| S4(25%) | 2,25 | 29,4 | 821,25 | 24.144,7 |
| ΣΥΝΟΛΟ | | | | 439.035 |
| Ετήσιο κόστος ενέργειας (€) | | | | 68.050,4 |

Πίνακας 7.16: Ετήσιο κόστος κατανάλωσης ενέργειας για τα LED B στην ταχύτητα οχημάτων 120km/h.

| Βαθμίδα | Ημερήσιες ώρες λειτουργίας (h) | Ισχύς ανά βαθμίδα με LED B (kW) | Ετήσιες ώρες λειτουργίας (h) | Ετήσια καταναλισκόμενη ενέργεια (kWh) |
|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|
| | | (1) | (2) | (3) = (1) × (2) |
| Νύχτα | 10,5 | 1,6 | 3832,5 | 6132 |
| S1 (100%) | 6,75 | 115 | 2463,75 | 283331,3 |
| S2(75%) | 2,25 | 86,3 | 821,25 | 70873,9 |
| S3(50%) | 2,25 | 57,5 | 821,25 | 47221,9 |
| S4(25%) | 2,25 | 28,7 | 821,25 | 23569,8 |
| ΣΥΝΟΛΟ | | | | 431129 |
| Ετήσιο κόστος ενέργειας (€) | | | | 66.825 |

*τιμή κιλοβατώρας=0,155€/kWh, πίνακας 6.1

7.5 Συνοπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων για τις ταχύτητες που μελετήθηκαν

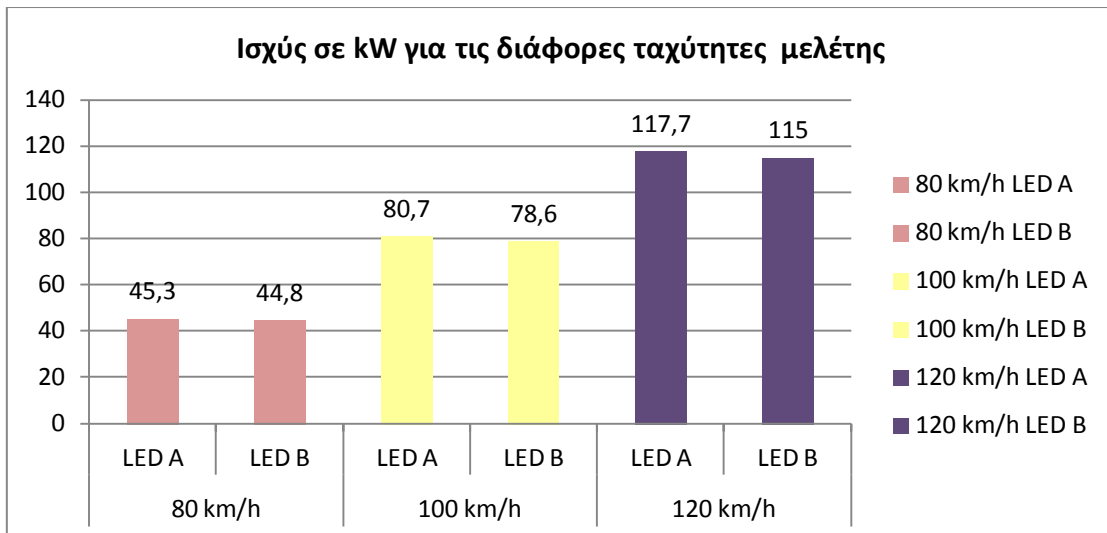
Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά ο αριθμός των φωτιστικών σωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν, για τα LED A και τα LED B (σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ CR 14380 με βάση την κυκλοφοριακή ροή), το κόστος αγοράς των φωτιστικών, τα επίπεδα λαμπρότητας που επιτυγχάνονται, καθώς και η εγκατεστημένη ισχύς, η κατανάλωση ενέργειας και το κόστος αυτής, ανά ταχύτητα.

Πίνακας 7.17: Συνοπτικά αποτελέσματα για τις τρεις ταχύτητες οχημάτων που μελετήθηκαν.

| Σενάριο 3 | | | | | | |
|--|--|--------------|--|--------------|--|--------------|
| Ταχύτητα Σχεδιασμού | 80 km/h | | 100 km/h | | 120 km/h | |
| | ($L_{thmax} = 156 \text{ cd/m}^2$) | | ($L_{thmax} = 195 \text{ cd/m}^2$) | | ($L_{thmax} = 234 \text{ cd/m}^2$) | |
| | ($L_{av-νύχτα} \geq 1 \text{ cd/m}^2$) | | ($L_{av-νύχτα} \geq 1 \text{ cd/m}^2$) | | ($L_{av-νύχτα} \geq 1 \text{ cd/m}^2$) | |
| | LED A | LED B | LED A | LED B | LED A | LED B |
| Συνολικό πλήθος φωτιστικών | 158 | 165 | 239 | 257 | 338 | 367 |
| L_{av} Νύχτα (cd/m^2) | 1,9 | 1,21 | 2,01 | 1,54 | 1,9 | 1,54 |
| L_{av} (100%) (cd/m^2) | 157,2 | 156,53 | 196,34 | 196 | 236,77 | 236,27 |
| Συνολική Ισχύς (kW) | 45,3 | 44,8 | 80,7 | 78,6 | 117,7 | 115 |
| Ετήσια κατανάλωση ενέργειας (kWh) | 171.513 | 169.856,4 | 298.408 | 296.991 | 439.035 | 431.129 |
| Κόστος αγοράς φωτιστικών (€) | 127.090 | 125.780 | 221.320 | 150.560 | 295.800 | 286.475 |
| Ετήσιο κόστος ενέργειας (€) | 26.584,5 | 26.327,7 | 46.253 | 46.034 | 68.050,4 | 66.825 |

Με βάση τις τιμές λαμπρότητας που υπολογίστηκαν για τις τρεις διαφορετικές ταχύτητες, και οι οποίες παρουσιάζονται στον παραπάνω πίνακα, διαπιστώνεται ότι και με τα δύο διαφορετικά είδη LED, A και B, μπορούν να επιτευχθούν τα επιθυμητά επίπεδα τιμών λαμπρότητας.

Στο σημείο αυτό συγκρίνονται από άποψη εγκατεστημένης ισχύος, ανά ταχύτητα, τα φωτιστικά LED A και LED B, ώστε να βρεθεί η πιο συμφέρουσα λύση.



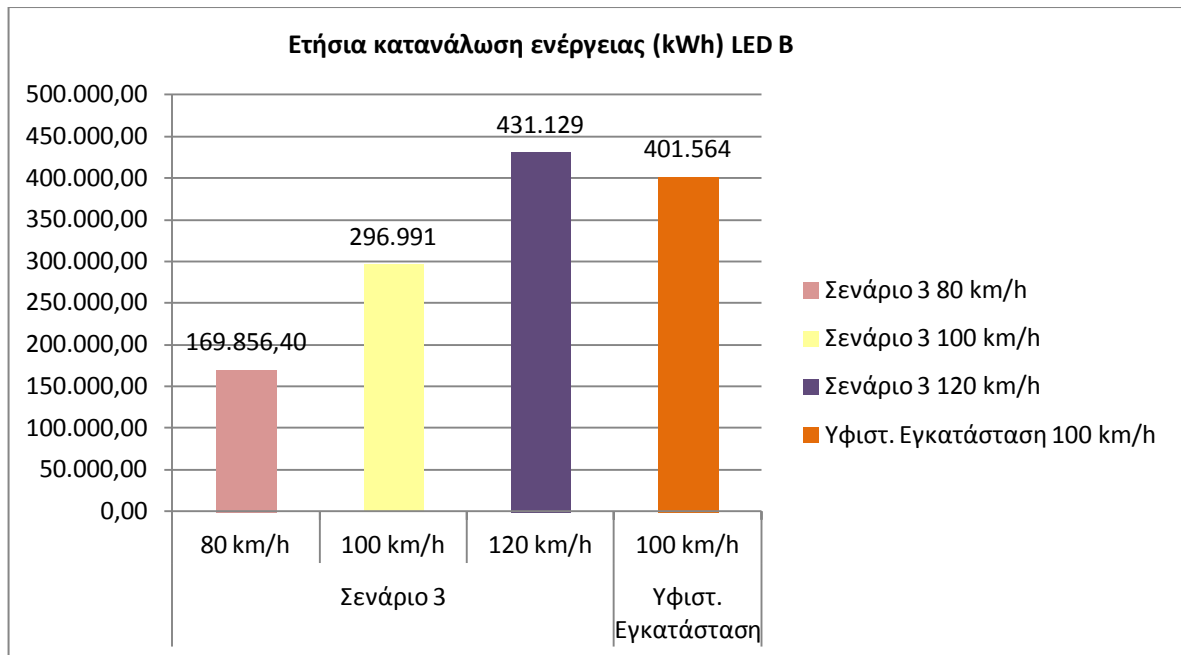
Σχήμα 7.1: Συγκριτικό διάγραμμα ισχύος σε kW για τις τρεις διαφορετικές ταχύτητες οχημάτων που μελετήθηκαν, σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ CR 14380 με βάση την κυκλοφοριακή ροή, για τα LED A και LED B.

Από το παραπάνω σχήμα προκύπτει ότι με τα φωτιστικά LED τύπου B επιτυγχάνεται μικρότερη εγκατεστημένη ισχύς, άρα και μικρότερη κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με τα φωτιστικά LED A σε καθεμία από τις ταχύτητες σχεδιασμού.

Πίνακας 7.18: Παρουσίαση της βέλτιστης λύσης με φωτιστικά LED B ανά ταχύτητα μελέτης.

| Ταχύτητα μελέτης | 80 km/h | 100 km/h | 120 km/h |
|-----------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Τύπος Φωτιστικού | LED B | LED B | LED B |
| Συνολικό πλήθος φωτιστικών | 165 | 257 | 367 |
| Εγκατεστημένη ισχύς | 44,8 kW | 78,6 kW | 115 kW |
| Ετήσια κατανάλωση ενέργειας (kWh) | 169.856,4 | 296.991 | 431.129 |
| Ετήσιο κόστος ενέργειας (€) | 26.327,7 | 46.034 | 66.825 |

Καθώς έχει εκτιμηθεί η βέλτιστη λύση επιλογής φωτιστικών για κάθε ταχύτητα μελέτης, συγκρίνονται στο ακόλουθο ραβδόγραμμα οι λύσεις αυτές με την υφιστάμενη εγκατάσταση φωτισμού της υπό μελέτη σήραγγας, από τη σκοπιά της ετήσιας ενεργειακής κατανάλωσης (kWh).



Σχήμα 7.2: Συγκριτικό διάγραμμα της ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας των φωτιστικών LED B, ανά ταχύτητα μελέτης, με την υφιστάμενη εγκατάσταση.

Στο Σενάριο 3 αυξάνοντας την ταχύτητα μελέτης των οχημάτων, από τα 100 km/h στα 120 km/h, διαπιστώνεται ότι η ετήσια κατανάλωση ενέργειας ξεπερνά την κατανάλωση της υφιστάμενης εγκατάστασης και για το λόγο αυτό κρίνεται ως μη συμφέρουσα πρόταση αναβάθμισης.

Αντιθέτως, μειώνοντας την ταχύτητα μελέτης του Σεναρίου 3, από τα 100 km/h στα 80 km/h, παρατηρείται σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας σε σχέση με την υφιστάμενη εγκατάσταση, σε ποσοστό 58%. Ο χρόνος απόσβεσης στην περίπτωση αυτή υπολογίζεται ότι είναι ίσος με :

$$\text{Χρόνος απόσβεσης} = \frac{\text{κόστος επένδυσης}}{\text{ετήσιο λειτουργικό κόστος υφ.εγκατ.} - \text{ετήσιο λειτουργικό κόστος νέας εγκατ.}} = 3,5 \text{ έτη}$$

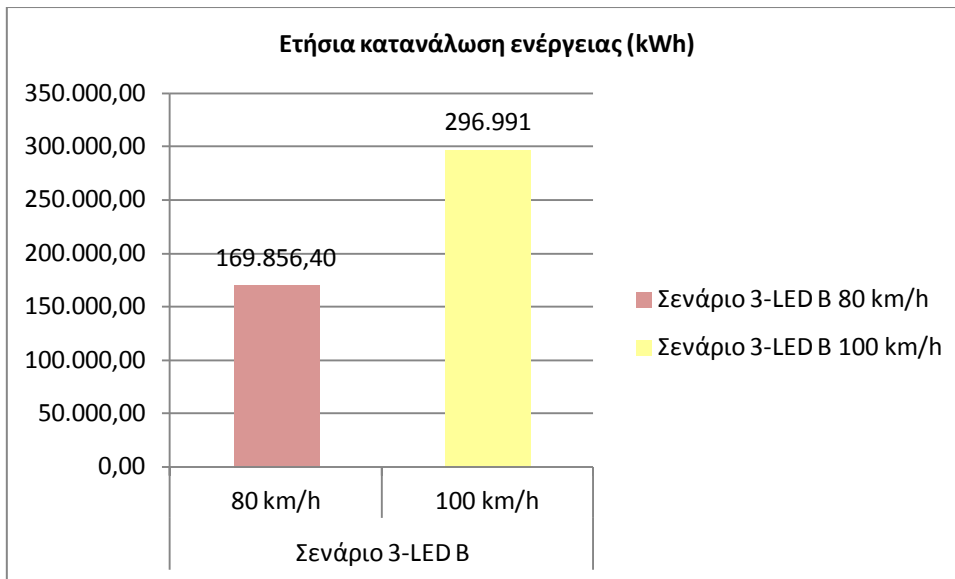
Όπου :

Κόστος επένδυσης = 133.370 € (από σχέση 6.1)

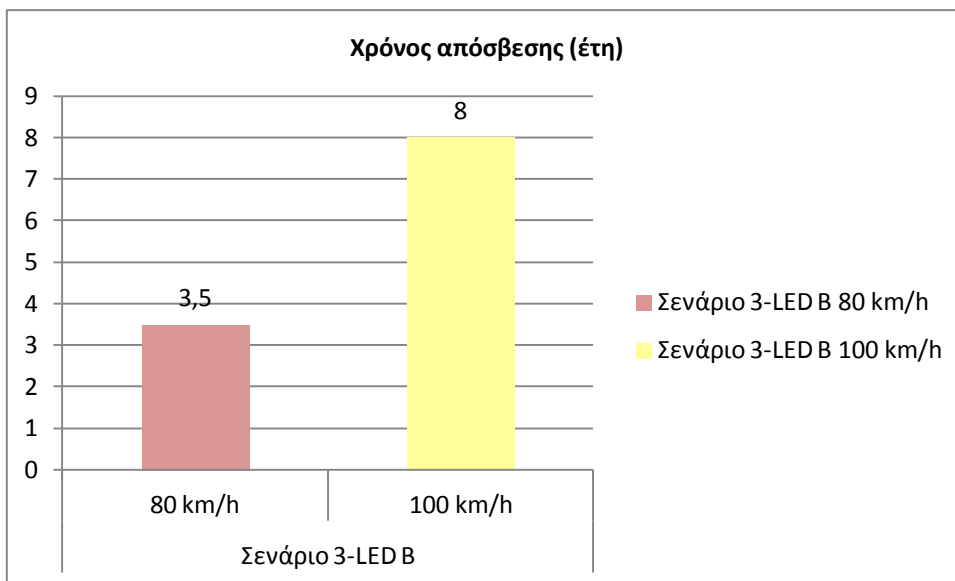
Ετήσιο λειτουργικό κόστος υφιστάμενης εγκατ. = 65.595 €

Ετήσιο λειτουργικό κόστος 80 km/h, Σενάριο 3 = ετήσιο κόστος ενέργειας = 26.327,7 € (πίνακας 7.17)

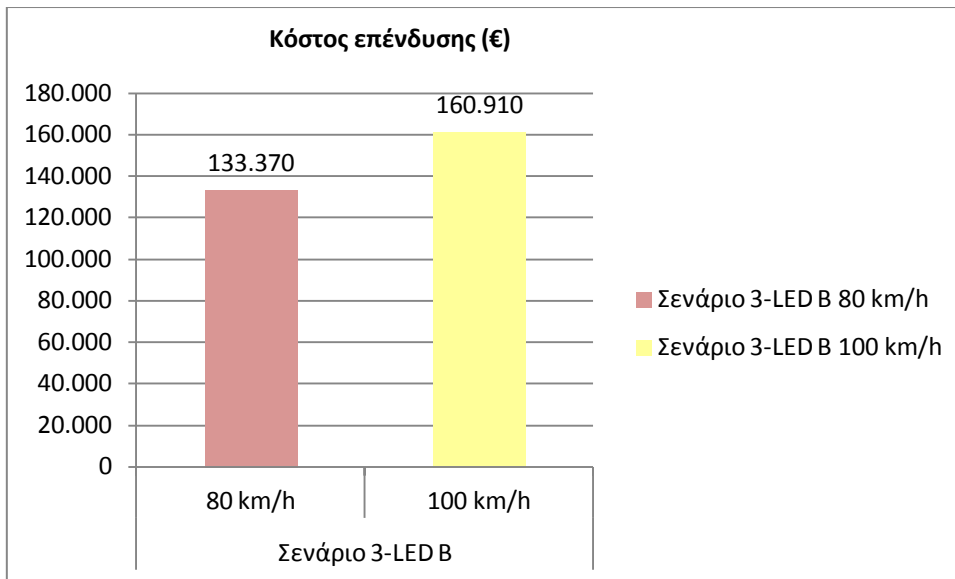
Στα επόμενα σχήματα συγκρίνονται οι ταχύτητες μελέτης των οχημάτων 80 km/h και 100 km/h στην περίπτωση του Σεναρίου 3 με χρήση των φωτιστικών LED B .



Σχήμα 7.3: Συγκριτικό διάγραμμα ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας μεταξύ των ταχυτήτων 80 km/h και 100 km/h για τα LED B, Σενάριο 3.



Σχήμα 7.4: Συγκριτικό διάγραμμα χρόνου απόσβεσης μεταξύ των ταχυτήτων 80 km/h και 100 km/h για τα LED B, Σενάριο 3.



Σχήμα 7.5: Συγκριτικό διάγραμμα κόστους επένδυσης μεταξύ των ταχυτήτων 80 km/h και 100 km/h για τα LED B, Σενάριο 3.

Από τα παραπάνω διαγράμματα διαπιστώνεται ότι, με τη χρήση του προτύπου ΕΛΟΤ CR 14380 με βάση την κυκλοφοριακή ροή, το οποίο ορίζει χαμηλότερα επίπεδα λαμπρότητας, η πιο συμφέρουσα πρόταση εξοικονόμησης ενέργειας με χρήση φωτιστικών LED στην υπό μελέτη σήραγγα, είναι η περίπτωση όπου μειώνεται η ταχύτητα των οχημάτων, για την οποία σχεδιάζεται ο φωτισμός της σήραγγας, από τα 100 km/h στα 80 km/h, με την αντικατάσταση των υφιστάμενων φωτιστικών Ν.Υ.Π. με φωτιστικά LED της εταιρείας Β.

Το ενδεχόμενο αντικατάστασης με φωτιστικά LED για υψηλότερη ταχύτητα οχημάτων, 120 km/h, κρίθηκε απαγορευτικό για τα δεδομένα της υπό μελέτη σήραγγας, καθώς δεν εξοικονομείται ενέργεια. Αντιθέτως, αυξάνεται η ετήσια κατανάλωση ενέργειας του φωτισμού της σήραγγας κατά 29.565 kWh.

Κεφάλαιο 8

Σύνοψη αποτελεσμάτων και τελικά συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται μια σύνοψη των αποτελεσμάτων των προτεινόμενων αναβαθμίσεων του συστήματος φωτισμού της υπό μελέτη σήραγγας (Σενάρια 1, 2, 3, 4 και 5), καθώς και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη εκτέλεση του Σεναρίου 3 με μείωση και αύξηση της ταχύτητας σχεδιασμού, από τα 100 km/h, στα 80km/h και στα 120 km/h αντίστοιχα.

Υπενθυμίζεται ότι τα Σενάρια 1 και 2 αφορούν σε προτάσεις αναβάθμισης που πραγματοποιήθηκαν με βάση το πρότυπο της υφιστάμενης μελέτης, ενώ τα Σενάρια 3, 4 και 5, καθώς και οι μελέτες για τις νέες ταχύτητες σχεδιασμού, πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ CR 14380 με βάση την κυκλοφοριακή ροή.

Η εκπόνηση της παρούσας εργασίας κατέδειξε τις μεγάλες δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας στο σύστημα φωτισμού της υφιστάμενης εγκατάστασης της υπό μελέτη σήραγγας, τόσο με τη χρήση φωτιστικών Ν.Υ.Π. όσο και με τη χρήση φωτιστικών LED, χάρη στη χρήση των νέων χαμηλότερων επιπέδων φωτισμού που ορίζει το πρότυπο CR 14380 με βάση την κυκλοφοριακή ροή της σήραγγας.

Υπενθυμίζεται ότι το Σενάριο 2, το οποίο αφορά στην αντικατάσταση των υφιστάμενων φωτιστικών Ν.Υ.Π. με φωτιστικά LED σύμφωνα με τα επίπεδα φωτισμού της υφιστάμενης μελέτης, αποδείχθηκε κατά τη διεξαγωγή της οικονομοτεχνικής μελέτης ιδιαίτερα ενεργοβόρο (κεφάλαιο 6) και γι αυτό το λόγο απορρίφθηκε σαν πρόταση εξοικονόμησης ενέργειας του συστήματος φωτισμού της σήραγγας και δεν συγκρίνεται με τα υπόλοιπα σενάρια.

Πίνακας 8.1: Σύγκριση αποτελεσμάτων της υφιστάμενης εγκατάστασης και των προτεινόμενων σεναρίων.

| Υφιστάμενη Εγκατάσταση Φωτισμού Σήραγγας | | | | | | |
|---|-------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|------------------------|
| Τύπος Φωτιστικού | Πλήθος Φωτιστικών | Συνολική Ισχύς (kW) | Ετήσια Καταναλισκόμενη Ενέργεια (kWh) | Ισχύς νυχτερινής βαθμίδας (kW) | | |
| N.Y.P. | 309 | 122,8 | 401.564 | 2,05 | | |
| Προτεινόμενες Αναβαθμίσεις στο Σενάριο 1 | | | | | | |
| Τύπος Φωτιστικού | Πλήθος Φωτιστικών | Συνολική Ισχύς (kW) | Ετήσια Καταναλισκόμενη Ενέργεια (kWh) | Ετήσιο συνολικό οικονομικό όφελος (€) | Συνολικό κόστος επένδυσης (€) | Χρόνος Απόσβεσης (έτη) |
| LED A_Νυχτερινής βαθμίδας | 18 | 1,37 | 5.266 | 742,77 | 8.580 | 10 |
| Προτεινόμενες Αναβαθμίσεις στο Σενάριο 3 | | | | | | |
| Τύπος Φωτιστικού | Πλήθος Φωτιστικών | Συνολική Ισχύς (kW) | Ετήσια Καταναλισκόμενη Ενέργεια (kWh) | Ετήσιο συνολικό οικονομικό όφελος (€) | Συνολικό κόστος επένδυσης (€) | Χρόνος Απόσβεσης (έτη) |
| LED A | 239 | 80,7 | 298.408 | 19.342 | 231.130 | 12 |
| LED B | 257 | 78,6 | 296.991 | 19.562 | 160.910 | 8 |
| Προτεινόμενη Αναβάθμιση στο Σενάριο 4 | | | | | | |
| Τύπος Φωτιστικού | Πλήθος Φωτιστικών | Συνολική Ισχύς (kW) | Ετήσια Καταναλισκόμενη Ενέργεια (kWh) | Ετήσιο συνολικό οικονομικό όφελος (€) | Συνολικό κόστος επένδυσης (€) | Χρόνος Απόσβεσης (έτη) |
| N.Y.P. | 141 | 42,75 | 163,353 | 38.603 | 51.670 | 1 |
| Προτεινόμενη Αναβάθμιση στο Σενάριο 5 | | | | | | |
| Τύπος Φωτιστικού | Πλήθος Φωτιστικών | Συνολική Ισχύς (kW) | Ετήσια Καταναλισκόμενη Ενέργεια (kWh) | Ετήσιο συνολικό οικονομικό όφελος (€) | Συνολικό κόστος επένδυσης (€) | Χρόνος Απόσβεσης (έτη) |
| N.Y.P. | 191 | 72,17 | 247.696 | 25.019 | 100 | 0 |

Πίνακας 8.2 : Η επίδραση της ταχύτητας σχεδιασμού στην κατανάλωση ενέργειας.

| Σενάριο 3 – Ταχύτητες σχεδιασμού | | | | |
|---|------------------|----------------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| Ταχύτητα σχεδιασμού | Τύπος Φωτιστικού | Συνολικό πλήθος φωτιστικών | Εγκατεστημένη ισχύς (kW) | Ετήσια κατανάλωση ενέργειας (kWh) |
| 80 km/h | LED B | 165 | 44,8 | 169.856,4 |
| 100 km/h | LED B | 257 | 78,6 | 296.991 |
| 120 km/h | LED B | 367 | 115 | 431.129 |

Από τα σενάρια που εξετάστηκαν, προέκυψαν αρκετά συμπεράσματα, τα κυριότερα από τα οποία αναφέρονται στη συνέχεια.

Σημαντική μείωση στην κατανάλωση ενέργειας παρατηρείται στα Σενάρια 3, 4, και 5, όπου η μελέτη φωτισμού διεξάγεται με τα νέα επίπεδα φωτισμού που ορίζει το πρότυπο ΕΛΟΤ CR 14380 με βάση την κυκλοφοριακή ροή της σήραγγας. Στο Σενάριο 3, η αναβάθμιση του συστήματος φωτισμού με φωτιστικά LED επιφέρει μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας περίπου 26% σε σχέση με την υφιστάμενη. Ακολουθεί το Σενάριο 5 στο οποίο, με την αφαίρεση φωτιστικών σωμάτων από την υπάρχουσα εγκατάσταση, επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας περίπου 38%. Η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας είναι ακόμη μεγαλύτερη στην περίπτωση του Σεναρίου 4, όπου χρησιμοποιούνται φωτιστικά Ν.Υ.Π. και παρατηρείται μείωση περίπου 59%.

Από τη μελέτη του Σεναρίου 1 διαπιστώθηκε ότι μόνο η νυχτερινή βαθμίδα ικανοποιεί τις απαιτήσεις των επιπέδων λαμπρότητας του νυχτερινού φωτισμού και συμβάλλει στην εξοικονόμηση ενέργειας (περίπου 33%) με χρήση των φωτιστικών LED A στις υφιστάμενες θέσεις εγκατάστασης.

Ανάλογα συμπεράσματα, για κάθε σενάριο, εξάγονται για το κόστος (€) της καταναλισκόμενης ενέργειας.

Δύο από τους σημαντικότερους παράγοντες που καθορίζουν την εκπόνηση και την υλοποίηση μιας μελέτης φωτισμού είναι το κόστος της επένδυσης και ο χρόνος απόσβεσης. Όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα, το χαμηλότερο κόστος επένδυσης σημειώνεται στα Σενάρια 4 και 5. Στο Σενάριο 4, με τη χρήση λαμπτήρων Ν.Υ.Π., το κόστος επένδυσης ανέρχεται στα 51.670€ και είναι σημαντικά χαμηλότερο από αυτό του Σεναρίου 3, κυρίως λόγω του χαμηλότερου κόστους αγοράς των φωτιστικών Ν.Υ.Π σε σχέση με τα φωτιστικά LED, και με χρόνο απόσβεσης ένα έτος. Εξαιρετικά χαμηλό κόστος επένδυσης έχει η υλοποίηση του Σεναρίου 5, το οποίο αποδεικνύεται μια πολύ ενδιαφέρουσα πρόταση

αναβάθμισης με ελάχιστο κόστος επένδυσης και μηδενικό χρόνο απόσβεσης και κόστος αγοράς φωτιστικών.

Όσον αφορά το Σενάριο 3, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση μείωσης της ταχύτητας των οχημάτων για την οποία σχεδιάζεται ο φωτισμός της σήραγγας, από τα 100 km/h στα 80 km/h (LED B), όπου επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας 58% σε σχέση με την υφιστάμενη εγκατάσταση. Η αύξηση της ταχύτητας σχεδιασμού στα 120 km/h κρίθηκε αποτρεπτική ως πρόταση αναβάθμισης της εγκατάστασης φωτισμού, καθώς η κατανάλωση ενέργειας αυτής ξεπερνά την κατανάλωση της υφιστάμενης εγκατάστασης.

Διαπιστώνεται, επομένως, ότι - όσον αφορά την παρούσα μελέτη φωτισμού - μειώνοντας τις απαιτήσεις των επιπέδων φωτισμού μέσα στη σήραγγα και διατηρώντας ταυτόχρονα συνθήκες άνετης και ασφαλούς οδήγησης, μπορεί να επιτευχθεί σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας σε ένα τμήμα του οδοφωτισμού ιδιαίτερα ενεργοβόρο και απαιτητικό. Η παρατήρηση αυτή αποτελεί τον επίλογο της διπλωματικής εργασίας και των συμπερασμάτων που εξήχθησαν από αυτή.

Βιβλιογραφία

- [1] «Εφαρμογές φωτισμού –Φωτισμός Σηράγγων», Ελληνικό Πρότυπο ΕΛΟΤ CR 14380, 2003.
- [2] “Code for practice for the design of road lighting. Part 2: Lighting of Tunnels”, British Standard, 2003.
- [3] “Road, Paths and Squares”, licht.wissen 03, <http://www.licht.de/de/startseite>, 2014.
- [4] “ The IESNA Lighting Handbook, Reference and Application”, 9th edition, IESNA, 2000.
- [5] “Relux Tunnel”, Relux Simulation Tools, 2011.
- [6] “LED Street Lighting”, Field Test DELTA Snapshots, Issue 4, LRC, March, 2010.
- [7] “Tunnel Lighting”, Thorn, 2004.
- [8] “Schreder Tunnel Lighting Solutions”, by Schreder Tunnel Lighting catalogue.
- [9] “Tunnel and Underpass Lighting”, Philips Indoor & Outdoor luminaires catalogue.
- [10] “Safe and attractive road tunnels by lighting design”, Gunnar D.Jenssen, Senior Research Scientist, PhD SINTEF Technology and Society Transport Research.
- [11] «Φωτοτεχνία», Τοπαλής Φραγκίσκος Β., Οικονόμου Λάμπρος, Κουρτέση Σταυρούλα, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2010.
- [12] Καραχάλιος Θ. Χρήστος, Διπλωματική Εργασία, «Τεχνολογίες Εξοικονόμησης Ενέργειας στο Φωτισμό Σηράγγων και Εφαρμογή των Διεθνών και Ευρωπαϊκών Προτύπων», επιβλέπων καθηγητής Φραγκίσκος Τοπαλής Β., ΕΜΠ, Αθήνα, Οκτώβριος 2006.
- [13] Βαλσαμάκης Δ. Μάριος, Μεταπτυχιακή Εργασία, «Φωτισμός Δρόμων και Εξοικονόμηση Ενέργειας», επιβλέπων καθηγητής Φραγκίσκος Τοπαλής Β., ΕΜΠ, Αθήνα, Ιούλιος 2008.
- [14] Χικιμτζής Π. Δημήτριος, Διπλωματική Εργασία, «Μελέτη Φωτισμού Οδικών Σηράγγων κατά CIE 88-1990 με χρήση υπολογιστή», επιβλέπων καθηγητής Φραγκίσκος Τοπαλής Β., ΕΜΠ, Αθήνα, Μάρτιος 2003.
- [15] Μαρκοπούλου Χ. Ιωάννα, Διπλωματική Εργασία, « Πρόταση εξοικονόμησης ενέργειας σε οδικές σήραγγες με παρεμβάσεις στο στόμιο», επιβλέπων καθηγητής Φραγκίσκος Τοπαλής Β., ΕΜΠ, Αθήνα, Ιούλιος 2010.
- [16] Μπαντουκούδης Γ. Νικηφόρος, Διπλωματική Εργασία : Εξοικονόμηση ενέργειας σε εγκαταστάσεις δρόμων με ρύθμιση (dimming). Επιβλέπων καθηγητής Φραγκίσκος Β. Τοπαλής, ΕΜΠ, Αθήνα, Ιούλιος 2008.

- [17] «Οδηγίες Συντάξεως Μελετών Η/Μ Έργων Σηράγγων και Φωτισμού Υπαίθριων Οδικών Έργων», Ο.Σ.Μ.Ε.Ο, 2004.
- [18] «Σήμανση Οδικών Σηράγγων- Κατακόρυφη Σήμανση Αυτοκινητοδρόμων», ΟΜΟΕ-ΚΣΑ, 2003.
- [19] «Φωτισμός Σηράγγων», Ημερίδα με θέμα « Φωτισμός Αυτοκινητοδρόμων», της 9/4/03, PhilipsΕΛΛΑΣ ΑΕΒΕ, Τομέας Φωτισμού, εισηγητής: Δημήτρης Ξανταδέκας (Υπεύθυνος Τμήματος Μελετών), ΤΕΕ, Αθήνα 2003.
- [20] «Εξοικονόμηση ενέργειας σε οδικές σήραγγες», ΤΕΕ –Συνέδριο για την ενέργεια, Φραγκίσκος Β. Τοπαλής, Κωνσταντίνος Α. Μπουρούσης, Αθήνα 8-10 Μαρτίου 2010.
- [21] «Εξοικονόμηση ενέργειας σε οδοφωτισμό και σήραγγες», Φραγκίσκος Β. Τοπαλής, διάλεξη μαθήματος ‘Τεχνολογία Φωτισμού’.
- [22] «Όραση και Οδήγηση», Ophthalmological Research Center.
- [23] «Visual Forensic of Older Drivers», Marc Green PhD, Human factors, 2013.
- [24] «Τεχνολογία των LED – πλεονεκτήματα», <http://www.theledcompany.gr>
- [25] «Ηλεκτρονικές πινακίδες LED», <http://www.odosimansi.gr>
- [26] Ελληνική Στατιστική Υπηρεσία, 2008-2013.
- [27] «Τηλε-διαχείριση οδικού φωτισμού με λαμπτήρες LED», <http://www.globitel.gr>
- [28] CIE TECHNICAL REPORT: Guide for the lighting of road, tunnels and underpasses, Publication CIE 88-1990.

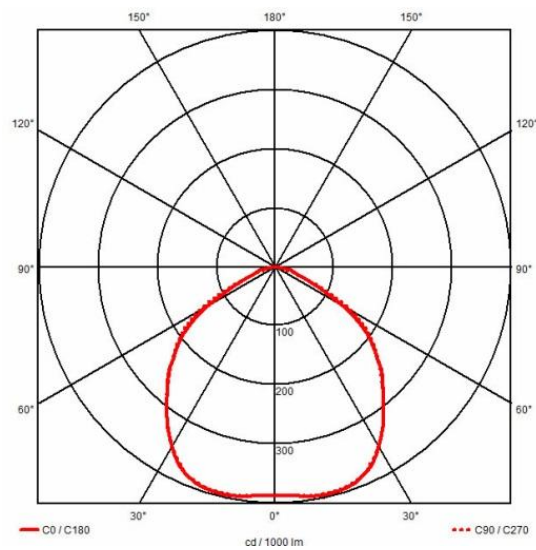
Παράρτημα Α

Προδιαγραφές φωτιστικών σωμάτων

Εταιρεία: ServiceLink

Μοντέλο: ServiceLink C0820-C-80W

Τεχνικά χαρακτηριστικά: LED, 76.3W, 60 LEDs, Συμμετρικό

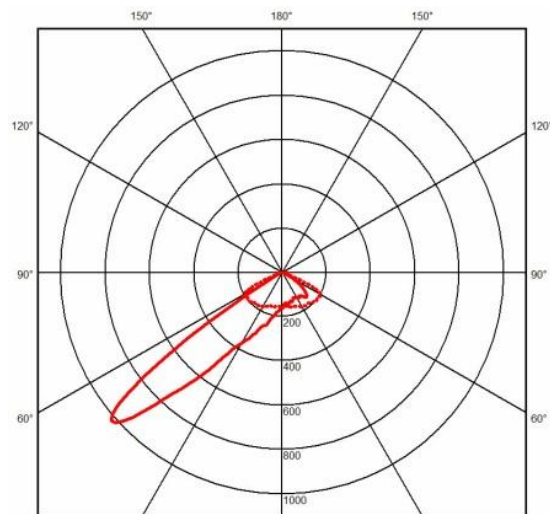


Σχήμα Α1: Πολικό διάγραμμα LED A 76,3 W

Εταιρεία: SANSI

Μοντέλο: C0820-TUN-RP-360W

Τεχνικά χαρακτηριστικά: LED, 360W, Ασύμμετρο

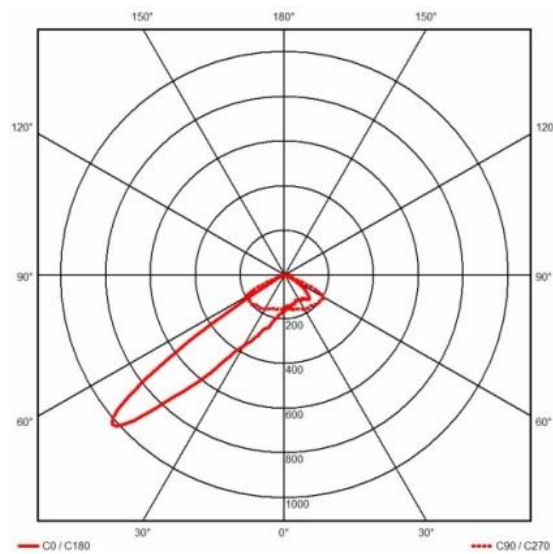


Σχήμα Α2: Πολικό διάγραμμα LED A 360 W 0 / C270

Εταιρεία: SANSI

Μοντέλο: C0820-TUN-RP-240W

Τεχνικά χαρακτηριστικά: LED, 240W, Ασύμμετρο

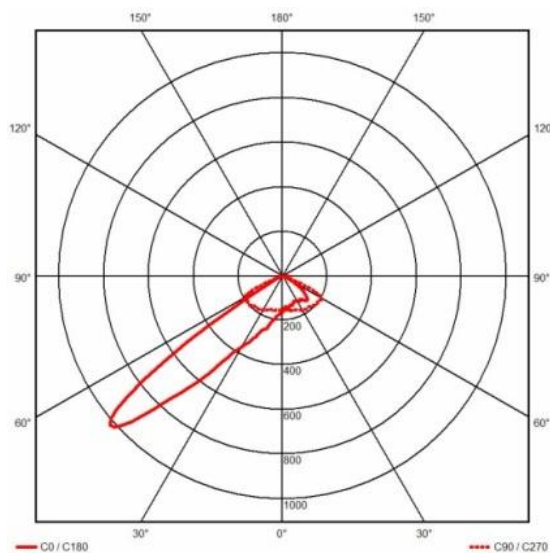


Σχήμα A3 :Πολικό διάγραμμα LED A 240W

Εταιρεία: SANSI

Μοντέλο: C0820-TUN-RP-160W

Τεχνικά χαρακτηριστικά: LED, 160W, Ασύμμετρο

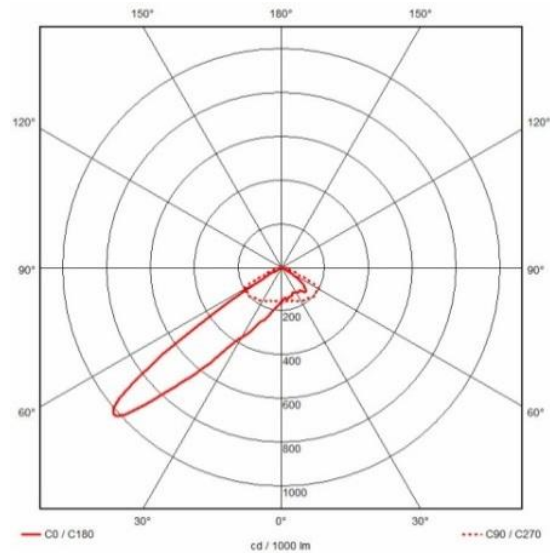


Σχήμα A4:Πολικό διάγραμμα LED A 160W

Εταιρεία: SANSI

Μοντέλο: C0820-TUN-RP-100W

Τεχνικά χαρακτηριστικά: LED, 100W, Ασύμμετρο

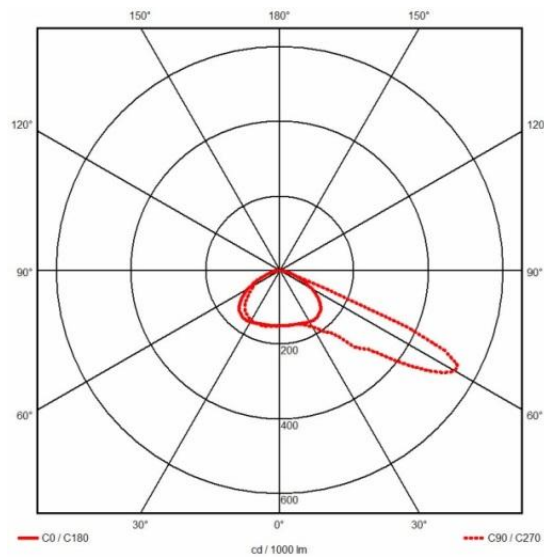


Σχήμα Α5: Πολικό διάγραμμα LED A 100W

Εταιρεία: OMNISTAR

Μοντέλο: OMNISTAR, Flat Glass Extra Clear Smooth, 5121, 337022

Τεχνικά χαρακτηριστικά: LED, 322W, 114 XP-G2, 700 mA, NW, Ασύμμετρο

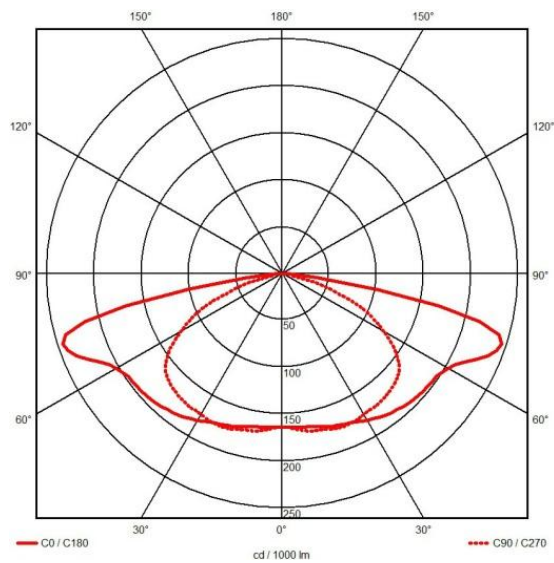


Σχήμα Α6: Πολικό διάγραμμα LED B 322 W.

Εταιρεία: SCHREDER

Μοντέλο: GL2 Compact, Flat Glass Extra Clear Smooth, 5068, 33628S

Τεχνικά χαρακτηριστικά: LED, 139W, 114 XP-G2, 700 mA, NW, Συμμετρικό

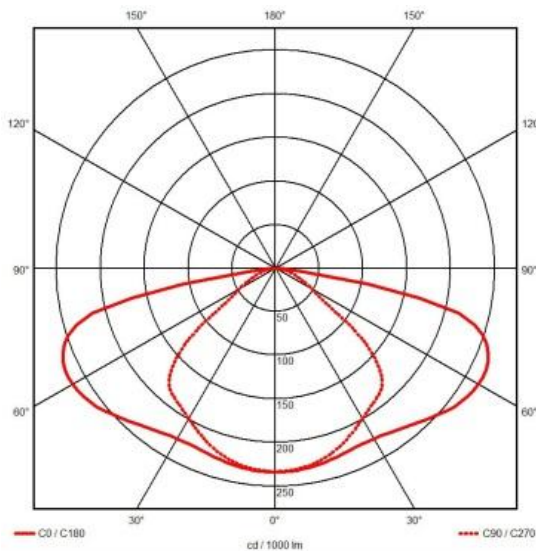


Σχήμα A7: Πολικό διάγραμμα LED B 139 W

Εταιρεία: SCHREDER

Μοντέλο: GL2 Compact, Flat Glass Extra Clear Smooth, 5103, 33632S

Τεχνικά χαρακτηριστικά: LED, 106W, 48 XP-G2, 700 mA, NW, Συμμετρικό

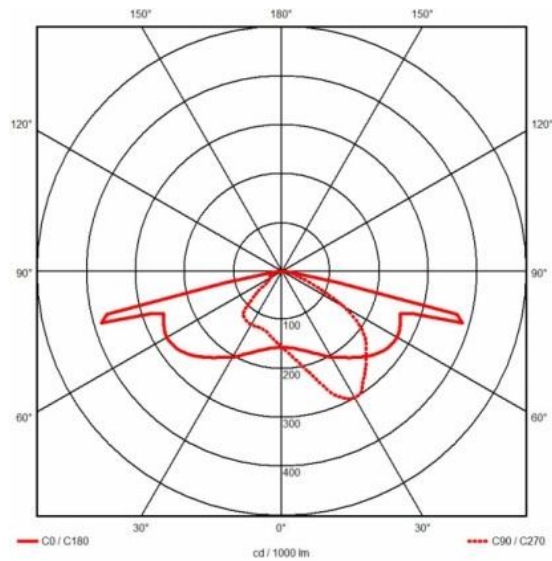


Σχήμα A8: Πολικό διάγραμμα LED B 106 W

Εταιρεία: SCHREDER

Μοντέλο: GL2 Compact, Flat Glass Extra Clear Smooth, 5098, 336302

Τεχνικά χαρακτηριστικά: LED, 213W, 96 XP-G2, 700 mA, NW, Ασύμμετρο

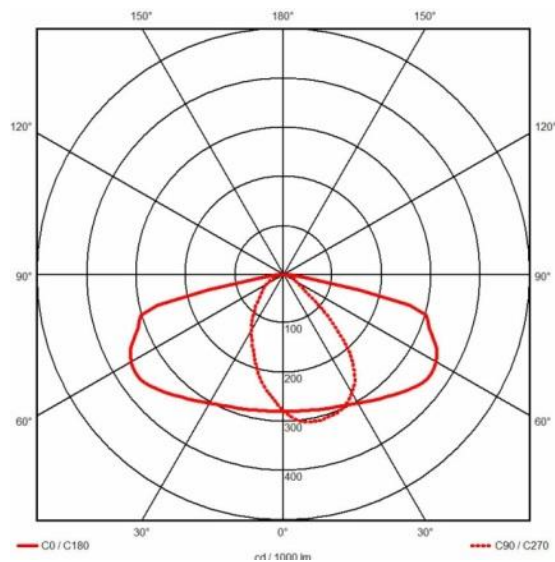


Σχήμα A9: Πολικό διάγραμμα LED B 213 W

Εταιρεία: SCHREDER

Μοντέλο: GL2 Compact, Flat Glass Extra Clear Smooth, 5102, 336312

Τεχνικά χαρακτηριστικά: LED, 180W, 80 XP-G2, 700 mA, NW, Ασύμμετρο

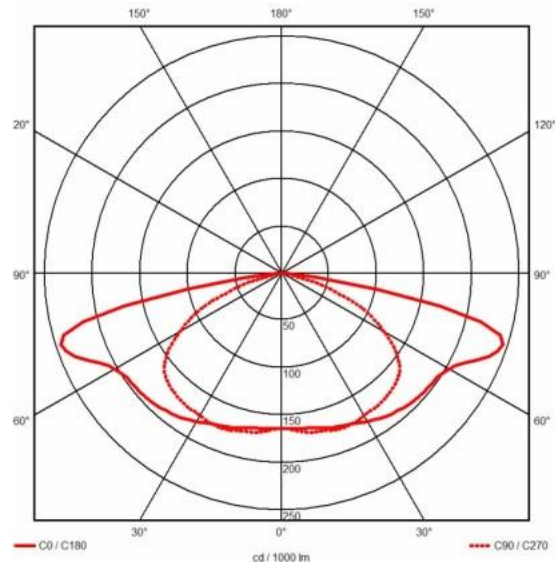


Σχήμα A10: Πολικό διάγραμμα LED B 180 W

Εταιρεία: SCHREDER

Μοντέλο: GL2 Compact, Flat Glass Extra Clear Smooth, 5103, 33632S

Τεχνικά χαρακτηριστικά: LED, 75W, 48 XP-G2, 500 mA, NW, Συμμετρικό

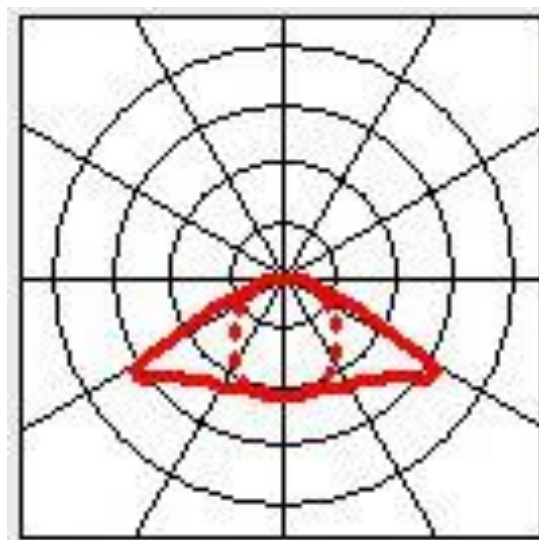


Σχήμα A11: Πολικό διάγραμμα LED B 75 W

Εταιρεία: Relux Demo

Μοντέλο: Tunnel II, 25901

Τεχνικά χαρακτηριστικά: Νατρίου Υψηλής Πίεσης, 1xST 100W, Συμμετρικό

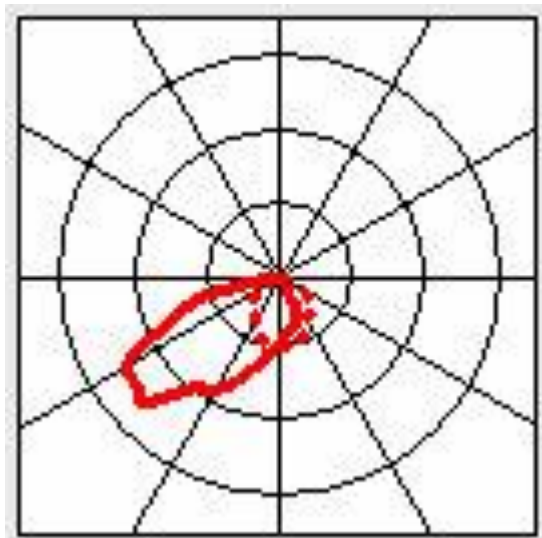


Σχήμα A12: Πολικό διάγραμμα φωτιστικού
N.Y.P. 100W

Εταιρεία: Relux Demo

Μοντέλο: Tunnel II, 25924

Τεχνικά χαρακτηριστικά: Νατρίου Υψηλής Πίεσης, 1×ST 250W, Ασύμμετρο

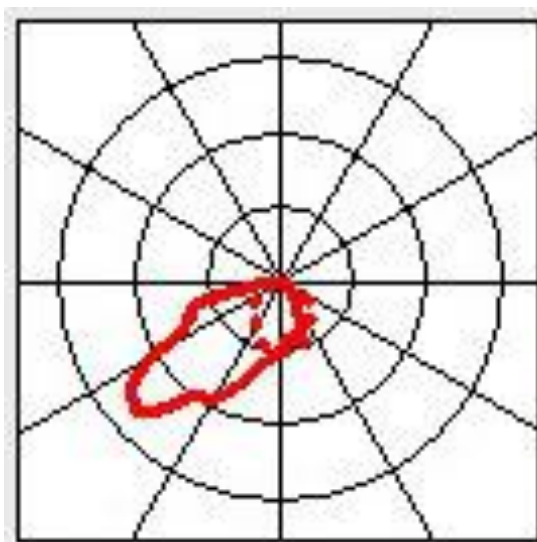


Σχήμα A13: Πολικό διάγραμμα φωτιστικού Ν.Υ.Π. 250W

Εταιρεία: Relux Demo

Μοντέλο: Tunnel II, 25921

Τεχνικά χαρακτηριστικά: Νατρίου Υψηλής Πίεσης, 1×ST 100W, Ασύμμετρο

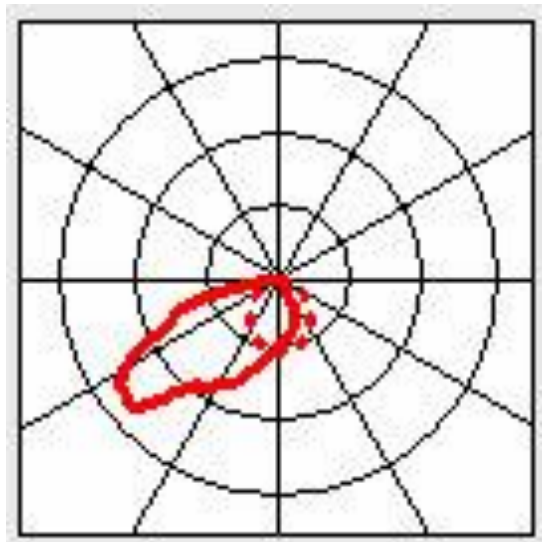


Σχήμα A14: Πολικό διάγραμμα φωτιστικού Ν.Υ.Π. 100W

Εταιρεία: Relux Demo

Μοντέλο: Tunnel II, 25926

Τεχνικά χαρακτηριστικά: Νατρίου Υψηλής Πίεσης, 1×ST 400W, Ασύμμετρο



Σχήμα A15: Πολικό διάγραμμα φωτιστικού Ν.Υ.Π. 400W