



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΚΡΗΤΗΣ**

Πολυτεχνείο Κρήτης

Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Επιβλέπων Καθηγητής: Σταυρουλάκης Γεώργιος

**Εκτίμηση Αντοχής Και Ασφάλειας Έναντι Κατάρρευσης
Γέφυρας Κερίτη**

MENEMENHS ΙΩΑΝΝΗΣ

ΧΑΝΙΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2019

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επιβλέποντα Καθηγητή κ. Γεώργιο Σταυρουλάκη και τους συνεργάτες του τόσο για την καθοδήγησή τους και την παροχή βοηθημάτων και πηγών όσο και για την άριστη συνεργασία. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την στήριξη που μου πρόσφεραν όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά.....	4
1.2 Είδη γεφυρών.....	4
1.3 Είδη τοιχοποιίας.....	5
1.4 Σκοπός εργασίας.....	5

2. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ

2.1 Θλιπτική αντοχή τοιχοποιίας.....	6
2.2 Εφελκυστική αντοχή τοιχοποιίας.....	7
2.3 Διατμητική αντοχή τοιχοποιίας.....	7

3. ΓΕΦΥΡΑ ΠΟΤΑΜΟΥ ΚΕΡΙΤΗ

3.1 Ιστορική ανασκόπηση.....	8
3.2 Κατασκευή και ιδιότητες.....	8
3.3 Γεωμετρία	9

4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΟΡΤΙΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

4.1 Γενικά.....	10
4.2 Επιλογή οχήματος.....	10

5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ RING

5.1 Γενικά.....	12
5.2 Ορισμός παραμέτρων.....	12
5.3 Ανάλυση μόνο με το βάρος της γέφυρας στην πρώτη καμάρα	14
5.4 Ανάλυση με την μέγιστη πιθανή φόρτιση στην πρώτη καμάρα	14
5.5 Ανάλυση μόνο με το βάρος της γέφυρας στην δεύτερη καμάρα	15
5.6 Ανάλυση με την μέγιστη πιθανή φόρτιση στην δεύτερη καμάρα	15
5.7 Ανάλυση μόνο με το βάρος της γέφυρας στην τρίτη καμάρα	16
5.8 Ανάλυση με την μέγιστη πιθανή φόρτιση στην τρίτη καμάρα	16

5.9 Ανάλυση μόνο με το βάρος της γέφυρας σε ολόκληρη την γέφυρα	17
5.10 Ανάλυση με την μέγιστη πιθανή φόρτιση σε ολόκληρη την γέφυρα....	18
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	20
8.ΠΑΡΑΡΤΗΤΑ.....	21

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Γενικά

Από την αρχαία κιόλας εποχή με την ανακάλυψη των κάρων και άλλων συσκευών μεταφοράς, ο άνθρωπος προχώρησε στην δημιουργία δικτύων για την διευκόλυνση και καλύτερη εκμετάλλευσή τους. Το πρόβλημα στην δημιουργία των δικτύων αυτών προέκυψε από τις διάφορες εδαφικές ανωμαλίες όπως γκρεμοί και ποτάμια. Αρχικά ο άνθρωπος αναγκαζόταν να διανύει χιλιόμετρα καταναλώνοντας πολλούς πόρους για την αποφυγή την εμποδίων αυτών, όμως με τους αιώνες η ανάπτυξη της τεχνολογίας τον οδήγησε στην δημιουργία τεχνικών κατασκευών για την ζεύξη σημείων υπεράνω του μεσολαβούντος εμποδίου. Οι τεχνικές και αρχιτεκτονικές αυτές κατασκευές ονομάζονται γέφυρες.

Είδη γεφυρών

Η βασική λειτουργία της γέφυρας είναι η επένδυση ενός σταθερού καταστρώματος που προορίζεται για τη μεταφορά πεζών, αυτοκινήτων ή τρένων, αντέχοντας το βάρος της κυκλοφορίας και των φυσικών δυνάμεων αλλά σίγουρα το βάρος της ίδιας της κατασκευής του. Διάφορα είναι τα υλικά που μπορούν να βοηθήσουν τους σχεδιαστές να επιτύχουν το στόχο τους. Εδώ είναι η κατανομή όλων των κοινών τύπων υλικών που χρησιμοποιούνται στην ιστορική και σύγχρονη κατασκευή γέφυρας:

- Ξύλο, είναι ένα εξαιρετικό υλικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία μικρών έως μεσαίων γεφυρών που ταιριάζουν καλύτερα στις μεταφορές πεζών ή χαμηλού βάρους αυτοκινήτων.
- Πέτρα, η πέτρα είναι ένα εξαιρετικό, μακράς διαρκείας φυσικό υλικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή γεφυρών που μπορούν να διαρκέσουν για αιώνες. Τα τεμάχια πέτρας μπορούν ακόμη να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή πολύ μεγάλων δομών γέφυρας που δεν χρησιμοποιούν ακόμη σκυρόδεμα
- Σκυρόδεμα και κράματα χάλυβα, που σε συνδυασμό με την παρουσία καλωδίων και άλλων σύγχρονων υλικών, αυτοί οι τύποι γεφυρών αντιπροσωπεύουν την πλειοψηφία όλων των γεφυρών που χρησιμοποιούνται σήμερα στις δημόσιες μεταφορές πεζών, αυτοκινήτων και τρένων.
- Προηγμένα υλικά, η σύγχρονη βιομηχανία επιτρέπει στους κατασκευαστές γέφυρων να αποκτήσουν πρόσβαση σε ένα ευρύ φάσμα προηγμένων υλικών που προσφέρουν αξιοσημείωτα πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές κατασκευαστικές διαδικασίες.

Τα διάφορα είδη των γεφυρών εξαρτώνται επίσης από την γεωμετρία και την τεχνική στήριξης της γέφυρας και γενικότερα την δομή. Με βάση αυτούς τους διαχωρισμούς οι γέφυρες κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες.

- Γέφυρα με τραβέρσες
- Γέφυρα με προβόλους
- Γέφυρα δέσμης
- Κρεμαστή γέφυρα
- Καλωδιακή γέφυρα
- Τοξωτή γέφυρα

Είδη τοιχοποιίας γεφυρών

Όπως αναφέραμε τα υλικά κατασκευής των γεφυρών ποικίλουν ανάλογα τις διάφορες παραμέτρους που καλείται να καλύψει η εκάστοτε κατασκευή, όπως για παράδειγμα το μήκος, το κόστος κ.ά. έτσι η επιλογή των υλικών αυτών στις γέφυρες που απαιτούν κατασκευή τοιχοποιίας θέλει ιδιαίτερη προσοχή.

- Πέτρινη τοιχοποιία. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των πέτρινων κατασκευών ήταν και είναι το χαμηλό κόστος συντήρησης και η διαχρονική αρχιτεκτονική αισθητική, η οποία σέβεται το περιβάλλον και εναρμονίζεται με το φυσικό τοπίο, χαρακτηριστικά που χρειαζόμαστε σε κατασκευές υψηλού κόστους. Οι τοιχοποιίες αυτές μπορούν να αναλυθούν περαιτέρω σε :
 - i. Αργολιθοδομές : οι ακανόνιστες σε μορφή πέτρες δομούνται με τη χρήση κονιάματος και στις γωνίες τοποθετούνται επεξεργασμένοι ακρογωνιαίοι λίθοι, τα λεγόμενα αγκωνάρια.
 - ii. Λιθοδομές με τη χρήση ημίξεστων λίθων: οι ημιεπεξεργασμένες σε ορθογώνια η πολυγωνική μορφή πέτρες δομούνται με τη χρήση κονιάματος.
 - iii. Λιθοδομές με τη χρήση ξεστών λίθων: οι επεξεργασμένοι λίθοι σε ορθογώνια μορφή χρησιμοποιούνται κυρίως στις γωνίες και στα ανοίγματα.
- Τοιχοποιία από τούβλα. Τα πλεονεκτήματα στις κατασκευές από τούβλα, εκτός από την μεγάλη αντοχή και το χαμηλό κόστος, είναι η ευελιξία που προσφέρουν χάρη στο μικρό μέγεθός τους στην γεωμετρία της κατασκευής και η ευκολότερη μελέτη τους, που οδηγούν σε μικρότερες αστοχίες.

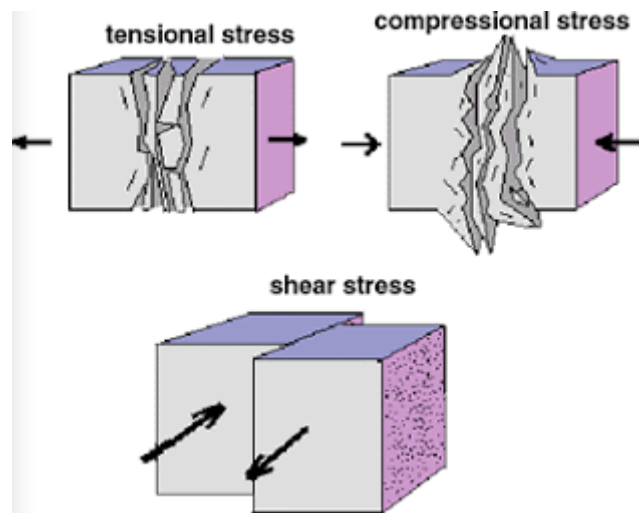
Σκοπός εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η εκτίμηση αντοχής και ασφάλειας έναντι κατάρρευσης στην πέτρινη γέφυρα του ποταμού Κερίτη. Οι πέτρινες γέφυρες αποτελούν απροσδιόριστες δομές συμπίεσης που αντιστέκονται σε φορτία που οφείλονται κυρίως στο ίδιο βάρος της γέφυρας και στο πάχος της τοιχοποιίας. Έτσι η εκτίμηση θα γίνει αρχικά θα ιδίο βάρος της γέφυρας και στην συνέχεια για το μέγιστο πιθανό φορτίο που θα κληθεί να αντέξει, πρώτα για την γεωμετρία όλης της γέφυρας και στην συνέχεια για κάθε καμάρα ξεχωριστά. Για την μελέτη αυτή έγινε χρήση ενός υπολογιστικού εργαλείου, limitState RING 3.2 το οποίο σου δίνει την επιλογή να ορίσεις την γεωμετρία της γέφυρας, τις ιδιότητες των υλικών κατασκευής της, και να σου δώσει τα αποτελέσματα της ανάλυσης για προσομοιωμένο φορτίο οχημάτων.

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΗΣ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ

Η διάρκεια και η αξιοπιστία κάθε κατασκευής εξαρτάται όχι μόνο από την σχεδίαση αλλά και από την ποιότητα των υλικών κατασκευής της. Έτσι όταν αναφερόμαστε σε κατασκευές μεγάλου κόστους που προορίζονται για συνεχή χρήση, επιζητούμε την μέγιστη δυνατή ποιότητα. Στην περίπτωση των γεφυρών η ποιότητα αυτή σχετίζεται άμεσα από τις μηχανικές ιδιότητες της τοιχοποιίας.

Η τοιχοποιία αποτελεί το πιο βασικό δομικό υλικό για όλα τα είδη κατασκευών στην ιστορία. Μηχανικά το υλικό της τοιχοποιίας θεωρείται ισχυρό στην θλίψη, δεν παύει όμως να είναι επιρρεπές στην διάτμηση και στον εφελκυσμό. Αυτό, σε συνδυασμό με την συνεχή ανάπτυξη των επιστημών και την ανάγκη της αύξησης της ασφάλειας της ποιότητας κατασκευής, οδήγησε στην ανακάλυψη τρόπων ενίσχυσης των μηχανικών ιδιοτήτων, μειώνοντας ταυτόχρονα τις αστοχίες και το κόστος.



Εικόνα 1 Τα είδη των πιέσεων

Θλιπτική αντοχή τοιχοποιίας

Η θλιπτική αντοχή της τοιχοποιίας αποτελεί βασικό παράγοντα στην ανάλυση της συμπεριφοράς του έργου, παρόλα αυτά η προσέγγιση και ο προσδιορισμός αυτής της παραμέτρου είναι εξαιρετικά δύσκολα. Αυτό συμβαίνει γιατί στην πραγματική κατασκευή υπάρχουν πολλοί παράγοντες που μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία, οι οποίοι σε πειραματικό επίπεδο δεν μπορούν να μελετηθούν. Μερικοί από αυτούς τους παράγοντες είναι:

- ❖ Τα χαρακτηριστικά του κονιάματος, που προκύπτουν από την σύνθεση του μείγματος και το σχετικό πάχος σε σχέση με το λιθόσωμα
- ❖ Τα χαρακτηριστικά των λιθοσωμάτων, δηλαδή πόσο συμπαγή είναι, το είδος και το μέγεθος των οπών κ.α.

Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την θλιπτική αντοχή είναι:

- ❖ Το υλικό και η γεωμετρία του αρμού
- ❖ Ο τρόπος κατανομής και μετάδοσης των φορτίων και των τάσεων
- ❖ Οι διατμήσεις στο σώμα του τοίχου

Για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής πρέπει να γνωρίζουμε τις παρακάτω μηχανικές ιδιότητες:

K: συντελεστής για τον τύπο δόμησης και πλίνθων (Συνήθως μεταξύ 0,4-0,6)

f_{bc} : θλιπτική αντοχή πλίνθου

f_{mc} : θλιπτική αντοχή κονιάματος

E: μέτρο ελαστικότητας τοιχοποιίας

ν : λόγος Poisson

Εφελκυστική αντοχή τοιχοποιίας

Όπως αναφέραμε και νωρίτερα η εφελκυστική αντοχή της τοιχοποιίας είναι κατά πολύ μικρότερη από την θλιπτική. Έχει μεγάλο εύρος τιμών καθώς εξαρτάται από την σχέση συνεργασίας που παρουσιάζει το κονίαμα με πλίνθους και από την γωνία της δύναμης ως προς τους οριζόντιους αρμούς που θεωρούνται πιο αδύναμα επίπεδα. Άλλοι παράγοντες που καθορίζουν την εφελκυστική αντοχή είναι όπως και στην θλιπτική τα χαρακτηριστικά του κονιάματος, που προκύπτουν από την σύνθεση του μείγματος, το είδος του τοιχοσώματος και η συνεργασία μεταξύ αυτών των δύο.

Διατμητική αντοχή τοιχοποιίας

Διατμητική αστοχία προκύπτει κυρίως από την κακή συνεργασία κονιάματος και πλίνθου οδηγώντας σε διατμητική ολίσθηση μέσω αποκόλλησης των αρμών του κονιάματος. Άλλη μορφή διάτμησης έχουμε από συνδυασμό φορτίσεων. Όταν για παράδειγμα η τοιχοποιία λειτουργεί σαν ομοιογενές υλικό και οι μηχανικές ιδιότητες ορίζονται από τους πλίνθους εμφανίζεται διαγώνια εφελκυστική ρηγμάτωση.

Από τα παραπάνω κατανοούμε ότι η μελέτη πρέπει να επικεντρωθεί στην εφελκυστική και διατμητική αντοχή της τοιχοποιίας. Ένα βασικό στοιχείο που μας βοηθάει στην συγκεκριμένη ανάλυση είναι η γραμμή ώθησης, που προκύπτει από τα φορτία. Όσο η γραμμή ώθησης βρίσκεται εξολοκλήρου εντός της τοιχοποιίας και δεν διασχίζει καμία άρθρωση, η γέφυρα δεν κινδυνεύει από κατάρρευση. Αυτό συμβαίνει όταν η γωνία θ , που σχηματίζεται ανάμεσα στην γραμμή ώθησης και στα στοιχεία της τοιχοποιίας, είναι μικρότερη του $\tan^{-1}(\mu)$, όπου μ ο συντελεστής τριβής. Για τον υπολογισμό των φορτίων για τα οποία η γραμμή ώθησης βρίσκεται εντός της τοιχοποιίας θα χρησιμοποιηθεί ένας συντελεστής λ ή αλλιώς συντελεστής επάρκειας, ο οποίος αν πολλαπλασιαστεί με το φορτίο που εξετάζουμε θα μας δώσει το μέγιστο δυνατό φορτίο που αντέχει η τοιχοποιία.

ΓΕΦΥΡΑ ΠΟΤΑΜΟΥ ΚΕΡΙΤΗ

Η γέφυρα του ποταμού Κερίτη στον Αλικιανό Χανίων ήταν μία τρίτοξη πέτρινη γέφυρα κατασκευασμένη το 1912 που για πάνω από 100 χρόνια εξυπηρετούσε τις μετακινήσεις των κατοίκων της περιοχής, ενώ η ιδιαίτερη κατασκευή και ομορφιά της την είχαν χαρακτηρίσει διατηρητέο μνημείο.

Ιστορική ανασκόπηση

Από ιστορικής σκοπιάς, η γέφυρα του Κερίτη η οποία κτίστηκε υπό την αιγίδα του τότε πρωθυπουργού της χώρας Ελευθέριου Βενιζέλου, αποτέλεσε τόσο ένα δείγμα ειδικού τεχνικού έργου των αρχών του 20ου αιώνα όσο και ένα ιστορικό μνημείο, το οποίο έχει συνδεθεί με τις θυσίες των Χανιωτών κατά την επιχείρηση ‘ΕΡΜΗΣ’. Πιο συγκεκριμένα, κάτω από αυτή τη γέφυρα εκτελέστηκαν από τον κατοχικό στρατό κατά τη διάρκεια της Μάχης της Κρήτης, 118 άντρες από τα γύρω χωριά. Λόγω αυτού του συμβάντος, έχουν γραφτεί ποικίλα παραδοσιακά τραγούδια και η γέφυρα θεωρείται για τους ντόπιους ένας πυλώνας ελευθερίας, επανάστασης και θυσίας που δεν πρέπει ποτέ να λησμονηθεί.

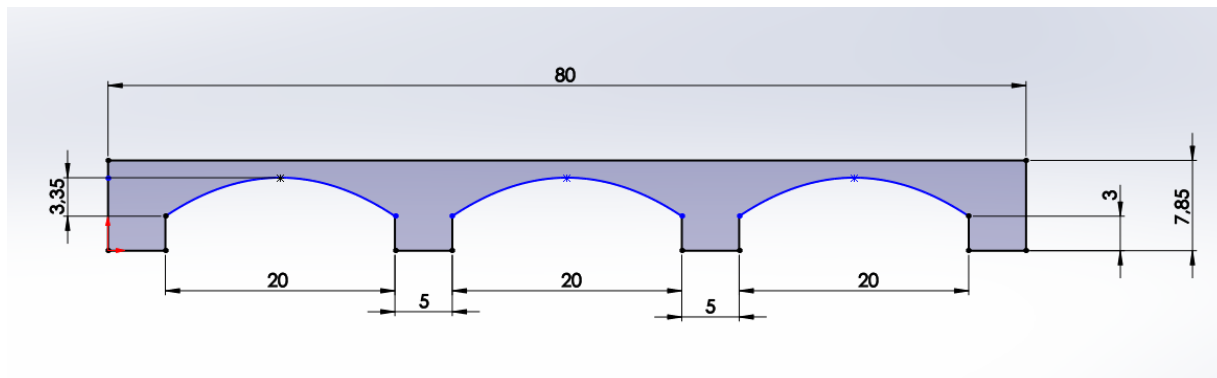
Κατασκευή και ιδιότητες

Για την ανάλυση της γέφυρας έπρεπε να εκτιμηθούν οι ιδιότητες των υλικών κατασκευής και ειδικότερα της τοιχοποιίας της αψίδας που αποτελεί το βασικότερο κομμάτι, του χώματος που περιέχεται μέσα και τέλος της ασφάλτου.

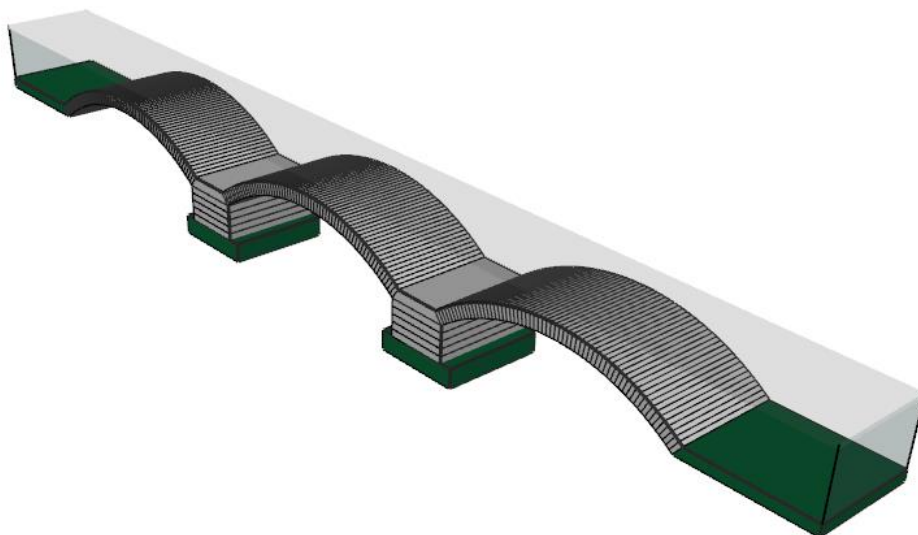
- Για την τοιχοποιία έχουμε,
 - ειδικό βάρος: 19.6 kN/m³
 - θλιπτική αντοχή: 5 N/mm²
 - συντελεστές τριβής: 0.6
- Για το χώμα έχουμε,
 - Ειδικό βάρος: 19 kN/m³
 - Γωνία εσωτερικής τριβής: 37(degrees)
 - Συνεκτικότητα: 10 kN/m²
 - Τριβή: 0.6
- Για την ασφάλτο έχουμε,
 - Ειδικό βάρος: 18 kN/m³
 - Γωνία διάδοσης ζωντανών φορτίων: 26.6 (degrees)

Γεωμετρία

Η γεωμετρία σχεδιάστηκε στο solidworks όπως φαίνεται στην Εικόνα 2. Οι μονάδες μέτρησης των διαστάσεων αντιστοιχούν σε μέτρα και απεικονίζεται η πλαϊνή όψη από την βάση των θεμελίων έως και το ύψος του οδοστρώματος. Τέλος το πλάτος της γέφυρας είναι 8 μέτρα.



Εικόνα 2. Η γεωμετρία της γέφυρας



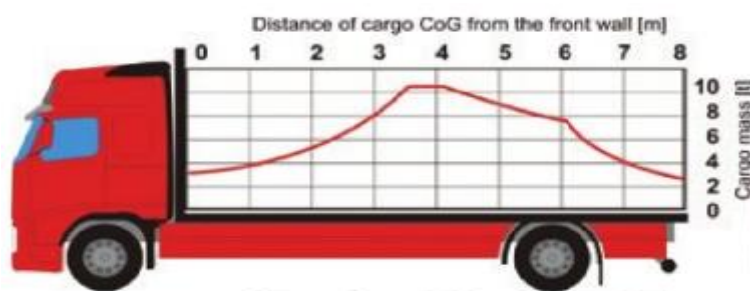
Εικόνα 3 Η γέφυρα σχεδιασμένη στο RING

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΟΡΤΙΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

Γενικά

Για να έχει η προσέγγιση την μέγιστη δυνατή ασφάλεια θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας το χειρότερο σενάριο, όπου στην προκειμένη περίπτωση αντιστοιχεί στο όχημα με το μεγαλύτερο φορτίο ανά άξονα. Ακόμα θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας τις ανάγκες που ικανοποιεί η γέφυρα και την χρήση του δικτύου στο οποίο ανήκει. Το επαρχιακό δίκτυο της επαρχίας της νέας Κυδωνίας εξυπηρετεί κυρίως δρομολόγια λεωφορείων και ΚΤΕΛ καθώς και φορτηγών έως και 13.6 μέτρα.

Όταν τοποθετείται οποιοδήποτε φορτίο πάνω σε ένα όχημα, δεν πρέπει να γίνεται υπέρβαση των μέγιστων επιτρεπτών διαστάσεων, φορτίων άξονα και συνολικών βαρών. Σύμφωνα με τις ευρωπαϊκές κατευθυντήριες γραμμές για ασφαλή στοιβασία των φορτίων για οδική μεταφορά το όχημα θα πρέπει να είναι σε θέση να αντέξει 0,8 του βάρους του φορτίου εμπρός 0,5 του βάρους του φορτίου πλάγια και προς τα πίσω και 0,6 του βάρους του φορτίου πλάγια αν υπάρχει κίνδυνος ανατροπής του φορτίου. Παράδειγμα διαγράμματος κατανομής του φορτίου σε τυπικό διαξονικό φορτηγό χωρητικότητας 18 τόνων φαίνεται στην Εικόνα 4



Εικόνα 4

Επιλογή οχήματος

Επειδή εξετάζουμε την περίπτωση του οχήματος με το μεγαλύτερο φορτίο ανά άξονα, υποθέτουμε ότι το όχημα είναι διαξονικό και φέρει το μέγιστο επιτρεπτό φορτίο σύμφωνα με τον ΚΟΚ, δηλαδή 19 τόνων. Οι διαστάσεις και η κατανομή των φορτίων στην σχεδίαση του οχήματος έγινε με βάση το μοντέλο λεωφορείου της Mercedes-Benz Turismo (15 RHD, C410.540-13) καθώς πληρούσε όλες της προϋποθέσεις και είχε το μικρότερο μήκος ανάμεσα σε πολλά αντίστοιχα μοντέλα με το ίδιο βάρος. Το μικρότερο μήκος του οχήματος θα μας βοηθήσει να προσεγγίσουμε στην συνέχεια το χειρότερο πιθανό σενάριο αφού θα αυξηθεί ο αριθμός των αξόνων των οχημάτων που χωράνε στην γέφυρα. Ο πίνακας με τις διαστάσεις και τα βάρη φαίνεται στην Εικόνα 6. Για να δημιουργήσουμε το όχημα στο περιβάλλον του RING άνοιξα από την καρτέλα φορτία την βάση με τα ήδη αποθηκευμένα οχήματα που διαθέτει το πρόγραμμα και ορίσαμε το Turismo όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.

Tourismo (15 RHD, C 410.540-13)



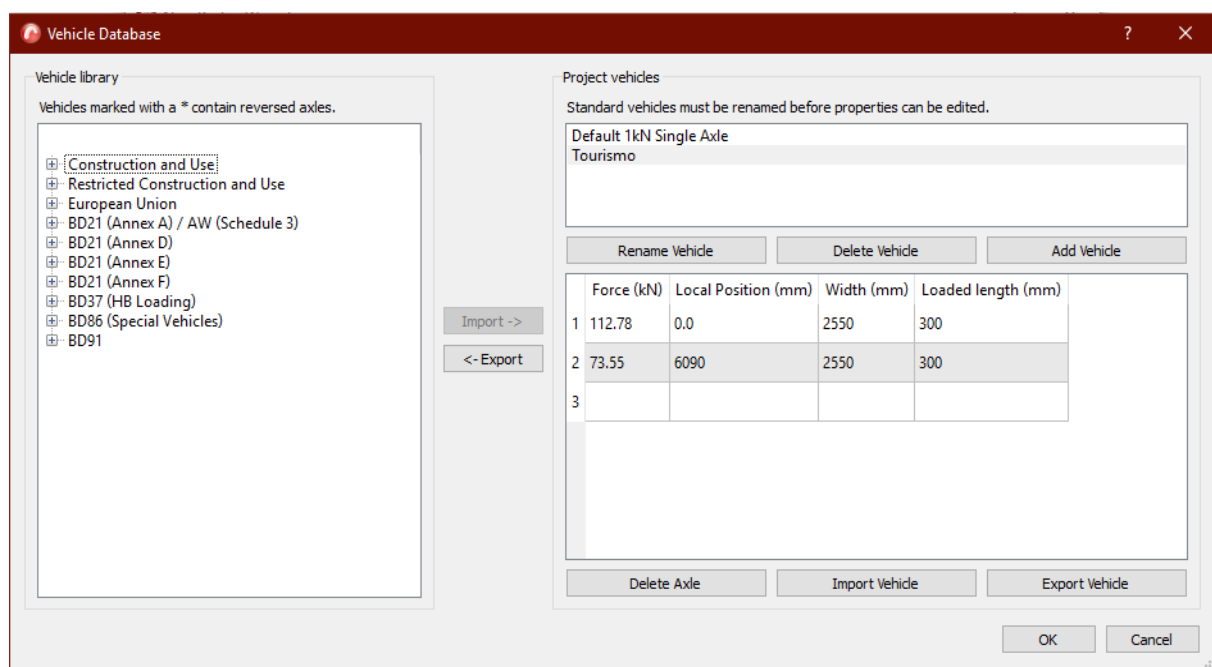
Εικόνα 5

	Tourismo
Vehicle length	12,295 mm
Vehicle width	2,550 mm
Vehicle height (incl. air conditioning system)	approx. 3,680 mm
Wheelbase, front axle-drive axle	6,090 mm
Wheelbase, drive axle-trailing axle	—
Forward/rear overhang	2,890/3,315 mm
Angle of approach/departure	7° / 6,9°
Tyre size	295/80 R 22.5
Seats (standard, without optional extras)	1 / 51
Step height door 1 / door 2	approx. 355/365 mm
Internal door width door 1 / door 2	770/590-650 mm**
Standing height in aisle	approx. 2,014 mm
Height of floor, driver's area (above road surface)	approx. 910 mm
Height of floor, aisle (above road surface)	approx. 1,370 mm
Platform height (above aisle floor)	150 mm
Waistline height (above platforms)	750 mm
Luggage shelf	approx. 1,5 m³
Luggage compartment / capacity	approx. 9,9 m³
- with toilet	approx. -1.2 m³
- with driver's sleeping cab	approx. -1.6 m³
Fuel tank capacity	approx. 480 l
Capacity of AdBlue® additive tank	approx. 40 l
Gross vehicle weight, max. permissible*	19,500 kg
Axle loads, max. permissible*	
- Front axle	7,500 kg
- Drive axle	11,500 kg
- Trailing axle	—

* Depends on country of registration (example is for Germany)

** depending on seating arrangement

Εικόνα 6



Εικόνα 7

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ RING

Γενικά

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως οι πέτρινες γέφυρες αποτελούν υπερστατικές δομές συμπίεσης που αντιστέκονται σε φορτία που οφείλονται κυρίως στο ίδιο βάρος της γέφυρας και στο πάχος της τοιχοποιίας. Οι μηχανικοί γενικά ενδιαφέρονται πρωτίστως στην προφύλαξη από την κατάσταση της τελικής οριακής κατάστασης (δηλ. της δομικής κατάρρευσης), κατά συνέπεια εξετάζουν αρχικά την συμπεριφορά της γέφυρας ως προς τα παραπάνω φορτία.

Η πραγματοποίηση οριακής ανάλυσης με το χέρι δεν είναι αδύνατη, αν για παράδειγμα γίνει επιλογή ενός πιθανού μηχανισμού κατάρρευσης, χρησιμοποιώντας ισορροπία για τον υπολογισμό του φορτίου κατάρρευσης και δοκιμάζοντας πιθανούς μηχανισμούς κατάρρευσης μέχρι να βρεθεί ο βέλτιστος. Παρόλα αυτά στην περίπτωση της γέφυρας, η τοξωτή γεωμετρία καθιστά μια τέτοια διαδικασία εξαιρετικά επίπονη και ευάλωτη σε ανθρώπινο λάθος.

Το πρόγραμμα limitstate:RING το οποίο χρησιμοποιείται για την ανάλυση χρησιμοποιεί αυστηρές μαθηματικές τεχνικές βελτιστοποίησης για να καθορίσει γρήγορα και με ακρίβεια το αποτέλεσμα. Για να το πραγματοποιήσει αυτό, προσεγγίζει την δομή της τοιχοποιίας της γέφυρας ως μια συναρμολόγηση άκαμπτων μπλοκ και χρησιμοποιεί μεθόδους υπολογιστικής οριακής ανάλυσης α) για να αναλύσει την τελική οριακή κατάσταση, καθορίζοντας το ποσό του ζωντανού φορτίου που μπορεί να εφαρμοστεί μέχρι την δομική κατάρρευση και β) επιτρέπει την μελέτη του τρόπου ανταπόκρισης όταν τα υποστηρίγματα υφίστανται μικρές κινήσεις. Αξίζει να σημειωθεί ότι το ίδιο βάρος αποτελεί, λόγω της μορφής του τοξωτού φορέα, σταθεροποιητικό παράγοντα για την κατασκευή.

Αντίστοιχα τα αποτελέσματα που επιστρέφει το πρόγραμμα είναι α) ο συντελεστής επάρκειας για το συγκεκριμένο φορτίο και β) η συμπεριφορά της γέφυρας όταν υποβάλλεται σε κινήσεις στήριξης. Ο συντελεστής επάρκειας αποτελεί έναν πολλαπλασιαστή ο οποίος αν εφαρμοστεί στο συγκεκριμένο πρότυπο ζωντανών φορτίων που θέσαμε, θα οδηγήσει σε κατάρρευση. Στις δομές τοιχοποιίας η ροπή αντίστασης μεταβάλλεται συνεχώς και αυτό μπορεί να καταστήσει τα συμβατικά διαγράμματα δύσκολα να ερμηνευτούν. Στην μελέτη της συμπεριφοράς της γέφυρας σε κινήσεις στήριξης το RING, για να κάνει μια πιο χρήσιμη προσέγγιση, σχεδιάζει την εκκεντρότητα της δύναμης συμπίεσης ή ώσης σε κάθε διατομή (όπου εκκεντρότητα = ροπή / ώθηση)

Ορισμός παραμέτρων

Ανοίγοντας το πρόγραμμα βρισκόμαστε σε ένα παράθυρο που θα πρέπει να αρχίσουμε να προσθέτουμε πληροφορίες σχετικά με την γέφυρα. Κάθε φορά που ολοκληρώνουμε ένα βήμα πατάμε το πλήκτρο Next και μεταφερόμαστε στην επόμενη καρτέλα [βλ. Παράρτημα 1].

- Στην πρώτη καρτέλα με το όνομα **Project** ορίζουμε τις γενικές πληροφορίες της γέφυρας όπως τον τύπο της, το εγκάρσιο πλάτος της τοιχοποιίας, το όνομα και άλλα σχόλια σχετικά με αυτήν.
- Στην συνέχεια πηγαίνουμε στην καρτέλα **Geometry** όπου ορίζουμε την γεωμετρία της γέφυρας. Εδώ έχουμε την δυνατότητα να προσθέσουμε καμάρες, στηρίγματα, και ενδιάμεσες κολώνες καθώς ορίζουμε επίσης το είδος της πέτρας της τοιχοποιίας και το ύψος του γεμίματος της γέφυρας και του οδοστρώματος.

- c) Σειρά έχει η καρτέλα **Partial Factors** όπου μας δίνεται η επιλογή αν θέλουμε να αλλάξουμε τους συντελεστές, και
- d) η καρτέλα **Materials** όπου πρέπει να ορίσουμε αναλυτικά τις ιδιότητες των υλικών για την τοιχοποιία, το υλικό γεμίσματος και το οδόστρωμα.

Για την τοιχοποιία είναι δυνατόν να προσδιοριστούν

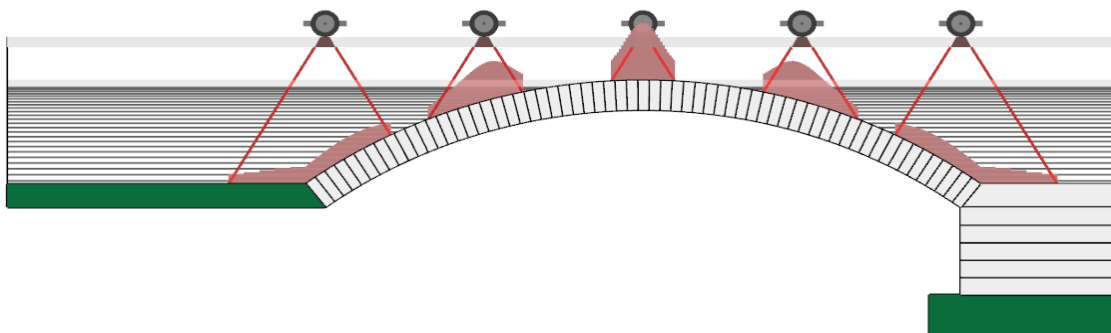
- ίδιες ιδιότητες για όλη την γέφυρα
- διαφορετικά σύνολα ιδιοτήτων για τις καμάρες και τα στηρίγματα
- διαφορετικές ιδιότητες για κάθε καμάρα, στήριξη ή κολώνα ξεχωριστά.

Για την πλήρωση εκτός από τις ιδιότητες του εδάφους μπορούμε επίσης να επιλέξουμε αν η κατανομή των ζωντανών φορτίων θέλουμε να είναι ομοιόμορφη ή να υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση Boussinesq που είναι η προεπιλεγμένη επιλογή.

- e) Η τελευταία καρτέλα **Loads** αναφέρεται στα φορτία που θα βάλουμε, με βάση τα οποία θα γίνει η ανάλυση.

Ανάλυση μόνο με το βάρος της γέφυρας στην πρώτη καμάρα

Για την ανάλυση μόνο με το βάρος της γέφυρας τοποθετήσαμε εικονικά έναν άξονα με πολύ μικρό φορτίο (1kN), για πέντε διαφορετικές θέσεις όπως φαίνεται στην εικόνα. Τα αποτελέσματα που πήραμε εμφανίζονται αναλυτικά στον Πίνακα 1. Ο μικρότερος συντελεστής επάρκειας παρατηρείται στο κέντρο της καμάρας, επομένως $\lambda=384$.



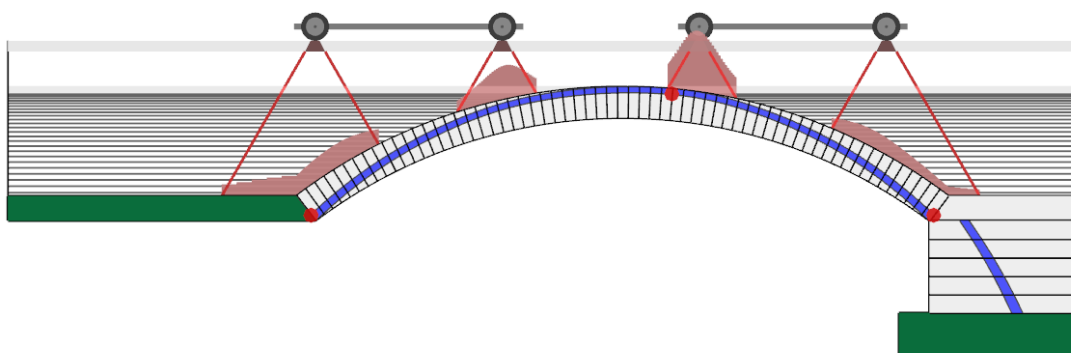
Εικόνα 8

TRIES	VEHICLES	POSITION (m)	ADEQUACY FACTOR
1	Default 1kN Single Axle	0	6.03E+03
2	Default 1kN Single Axle	5	603
3	Default 1kN Single Axle	10	384
4	Default 1kN Single Axle	15	970
5	Default 1kN Single Axle	20	3.1E+04

Πίνακας 1

Ανάλυση με την μέγιστη πιθανή φόρτιση στην πρώτη καμάρα

Για την ανάλυση αυτή θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας το μήκος του λεωφορείου που χρησιμοποιούμε το οποίο είναι 12,3 μέτρα. Η απόσταση που θα υποθέσουμε ότι απέχουν τα οχήματα θα είναι πολύ μικρότερη από την πραγματική έτσι ώστε τα αποτελέσματα που θα πάρουμε να περιέχουν το μικρότερο δυνατό κίνδυνο. Αν καταλήξουμε ότι η απόσταση μεταξύ των οχημάτων είναι 0,2 μέτρα, η ανάλυση έγινε κάνοντας τρεις δοκιμές, ξεκινώντας από διαφορετικές θέσεις όπως για παράδειγμα φαίνεται στην Εικόνα 9. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 2 με ελάχιστο συντελεστή επάρκειας $\lambda=3,88$.



Εικόνα 9 (TRY No.1)

TRIES	VEHICLES	POSITION (m)	TOTAL ADEQUACY FACTOR
1	Tourismo Mercedes-Benz	0	3.88
	Tourismo Mercedes-Benz	12,5	
2	Tourismo Mercedes-Benz	-9	5.81
	Tourismo Mercedes-Benz	3.5	
	Tourismo Mercedes-Benz	16	
3	Tourismo Mercedes-Benz	-5,545	11.7
	Tourismo Mercedes-Benz	6,955	
	Tourismo Mercedes-Benz	19,455	

Πίνακας 2

Ανάλυση μόνο με το βάρος της γέφυρας στην δεύτερη καμάρα

Ομοίως και για την δεύτερη τοποθετήσαμε εικονικά έναν άξονα με πολύ μικρό φορτίο (1kN), για πέντε διαφορετικές θέσεις. Τα αποτελέσματα που πήραμε εμφανίζονται αναλυτικά στον Πίνακα 3. Ο μικρότερος συντελεστής επάρκειας παρατηρείται πάλι στο κέντρο της καμάρας με $\lambda=384$.

TRIES	VEHICLES	POSITION (m)	ADEQUACY FACTOR
1	Default 1kN Single Axle	0	6.03E+03
2	Default 1kN Single Axle	5	603
3	Default 1kN Single Axle	10	384
4	Default 1kN Single Axle	15	603
5	Default 1kN Single Axle	20	6.03E+03

Πίνακας 3

Ανάλυση με την μέγιστη πιθανή φόρτιση στην δεύτερη καμάρα

Έγιναν οι ίδιες δοκιμές με αυτές της πρώτης καμάρας όπως φαίνεται στον Πίνακα 4. Ελάχιστος συντελεστής επάρκειας προκύπτει από την πρώτη δοκιμή με $\lambda=3,87$

TRIES	VEHICLES	POSITION (m)	TOTAL ADEQUACY FACTOR
1	Tourismo Mercedes-Benz	0	3.87
	Tourismo Mercedes-Benz	12,5	
2	Tourismo Mercedes-Benz	-9	5.81
	Tourismo Mercedes-Benz	3.5	
	Tourismo Mercedes-Benz	16	
3	Tourismo Mercedes-Benz	-5,545	11.7
	Tourismo Mercedes-Benz	6,955	
	Tourismo Mercedes-Benz	19,455	

Πίνακας 4

Ανάλυση μόνο με το βάρος της γέφυρας στην τρίτη καμάρα

Ομοίως με τις δύο προηγούμενες καμάρες προκύπτει μικρότερος συντελεστής επάρκειας $\lambda=384$ όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5

TRIES	VEHICLES	POSITION (m)	ADEQUACY FACTOR
1	Default 1kN Single Axle	0	3.1E+04
2	Default 1kN Single Axle	5	970
3	Default 1kN Single Axle	10	384
4	Default 1kN Single Axle	15	603
5	Default 1kN Single Axle	20	6.03E+03

Πίνακας 5

Ανάλυση με την μέγιστη πιθανή φόρτιση στην τρίτη καμάρα

Έγιναν οι ίδιες δοκιμές με τις δύο προηγούμενες όπως φαίνεται στον Πίνακα 6. Ελάχιστος συντελεστής επάρκειας προκύπτει από την πρώτη δοκιμή με $\lambda=6,39$

TRIES	VEHICLES	POSITION (m)	TOTAL ADEQUACY FACTOR
1	Tourismo Mercedes-Benz	0	12.7
	Tourismo Mercedes-Benz	12,5	
2	Tourismo Mercedes-Benz	-9	6.39
	Tourismo Mercedes-Benz	3.5	
	Tourismo Mercedes-Benz	16	
3	Tourismo Mercedes-Benz	-5,545	15.2
	Tourismo Mercedes-Benz	6,955	
	Tourismo Mercedes-Benz	19,455	

Πίνακας 6

Ανάλυση μόνο με το βάρος της γέφυρας σε ολόκληρη την γέφυρα

Για την ανάλυση μόνο με το βάρος της γέφυρα τοποθετήσαμε εικονικά έναν άξονα με πολύ μικρό φορτίο (1kN), για οκτώ διαφορετικές θέσεις όπως φαίνεται στην εικόνα. Τα αποτελέσματα που πήραμε εμφανίζονται αναλυτικά στον Πίνακα 7.

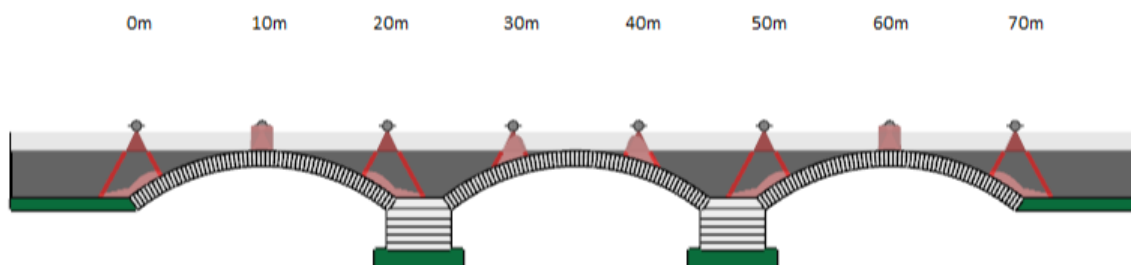


Image 10. Unitary axial loads

TRIES	VEHICLES	POSITION (m)	ADEQUACY FACTOR
1	Default 1kN Single Axle	0	1,71E+05
2	Default 1kN Single Axle	10	6,26E+04
3	Default 1kN Single Axle	20	1,71E+05
4	Default 1kN Single Axle	30	5,87E+04
5	Default 1kN Single Axle	40	5,87E+04
6	Default 1kN Single Axle	50	1,71E+05
7	Default 1kN Single Axle	60	6,26E+04
8	Default 1kN Single Axle	70	1,71E+05

Πίνακας 7

Παρατηρούμε ότι οι τιμές που παίρνει ο συντελεστής επάρκειας είναι πολύ μεγάλες. Λαμβάνοντας υπόψη μας τον μικρότερο από αυτούς έχουμε $\lambda=5,87E+04$ επομένως η αντοχή της γέφυρας είναι πολύ καλή και μπορούμε να προχωρήσουμε στην ανάλυση με μεγαλύτερη φόρτιση. Αυτό που παρατηρήθηκε είναι ότι όσο πιο κοντά στα πλαινά στηρίγματα ή στις κολώνες είναι τοποθετιμένος ο άξονας που εξετάζεται τόσο μεγαλύτερο συντελεστή επάρκειας έχει.

Ανάλυση με την χρήση φορτίου ενός φορτηγού σε ολόκληρη την γέφυρα

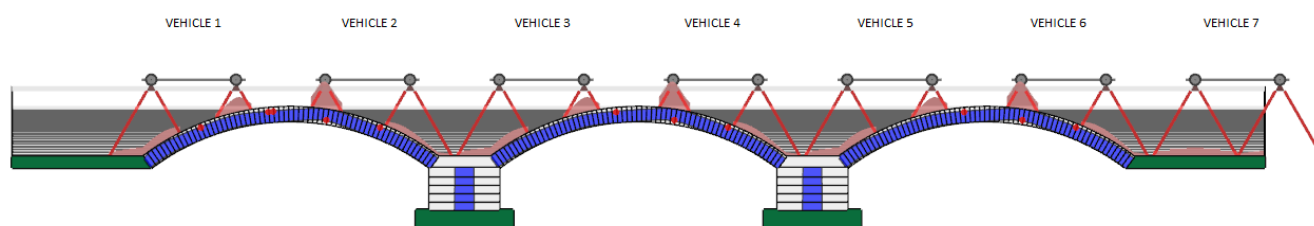
Πριν γίνει η ανάλυση με την μέγιστη δυνατή φόρτιση πρέπει να γίνει ανάλυση του φορτίου ενός φορτηγού σε διάφορα σημεία όπως φαίνεται παρακάτω.

TRIES	VEHICLES	POSITION (m)	ADEQUACY FACTOR
1	Tourismo Mercedes-Benz	0	138
2	Tourismo Mercedes-Benz	10	91.9
3	Tourismo Mercedes-Benz	20	257
4	Tourismo Mercedes-Benz	30	97.5
5	Tourismo Mercedes-Benz	40	99
6	Tourismo Mercedes-Benz	50	138
7	Tourismo Mercedes-Benz	60	91.9
8	Tourismo Mercedes-Benz	70	275

Ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας που προκύπτει είναι 91,9

Ανάλυση με την μέγιστη δυνατή φόρτιση σε ολόκληρη την γέφυρα

Για την ανάλυση αυτή όπως και στις προηγούμενες, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας το μήκος του λεωφορείου που χρησιμοποιούμε το οποίο είναι 12,3 μέτρα. Η απόσταση που θα υποθέσουμε ότι απέχουν τα οχήματα θα είναι πολύ μικρότερη από την πραγματική έτσι ώστε τα αποτελέσματα που θα πάρουμε να περιέχουν το μικρότερο δυνατό κίνδυνο. Αν καταλήξουμε ότι η απόσταση μεταξύ των οχημάτων είναι 0,2 μέτρα τα αποτελέσματα της ανάλυσης θα είναι τα παρακάτω.

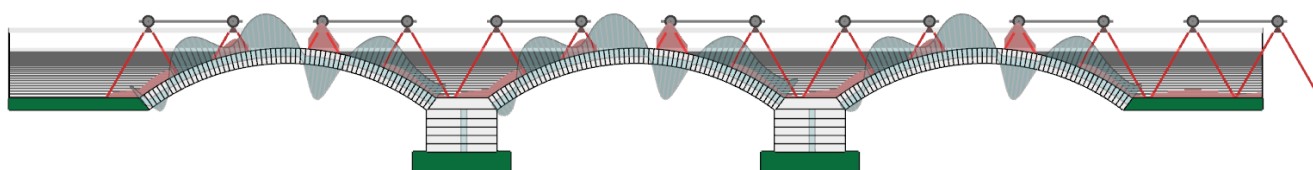


Εικόνα 11

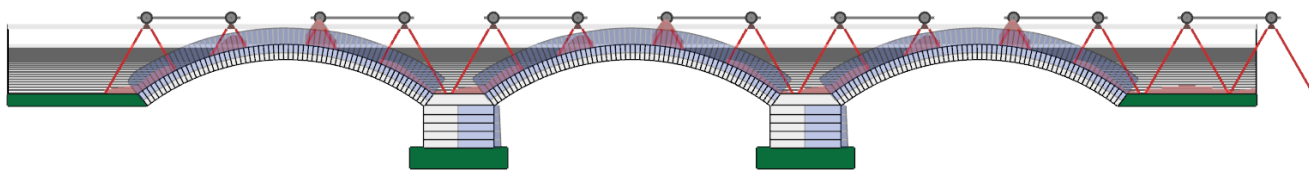
Πίνακας 8

TRIES	VEHICLES	POSITION (m)	TOTAL ADEQUACY FACTOR
1	Tourismo Mercedes-Benz	0	93
	Tourismo Mercedes-Benz	12,5	
	Tourismo Mercedes-Benz	25	
	Tourismo Mercedes-Benz	37,5	
	Tourismo Mercedes-Benz	50	
	Tourismo Mercedes-Benz	62,5	
	Tourismo Mercedes-Benz	75	

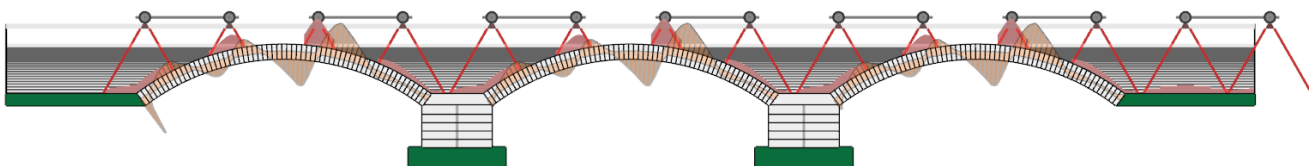
Από τον συντελεστή επάρκειας $\lambda=93$ αντιλαμβανόμαστε ότι για κινητά φορτία, φορτία δηλαδή που προέρχονται από οχήματα η γέφυρα δεν μπορεί να φτάσει στην κατάρρευση επομένως η αντοχή της είναι πολύ μεγάλη και η επικινδυνότητά της πολύ μικρή. Το πρόγραμμα μας επιστρέφει ακόμα τα παρακάτω τρία διαγράμματα για το μέγεθος του φορτίου που εφαρμόζεται πολλαπλασιασμένο με τον συντελεστή επάρκειας ή αλλιώς για την οριακή φόρτιση για τις συγκεκριμένες θέσεις των αξόνων. Με τα τρία αυτά διαγράμματα υπολογίζεται σχεδιαστικά η **εκκεντρικότητα** της δύναμης συμπίεσης ή ώσης (Εκκεντρικότητα = Axial Force / Moment), το **βάθος θραύσης** (Βάθος θραύσης = Αξονική δύναμη / (Αντοχή σύνθλιψης τοιχοποιίας x Πλάτος γεφυρών) όπως φαίνεται στην Εικόνα 11 και προβλέπεται πως θα εξελιχτεί η γεωμετρία της γέφυρας μετά την κατάρρευση (βλ. Εικόνα 15).



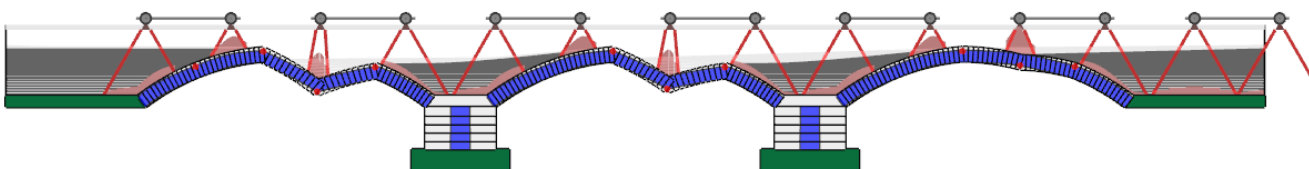
Εικόνα 12 Moment Diagram



Εικόνα 13 Normal force diagram



Εικόνα 14 shear force diagram



Εικόνα 15

ΠΗΓΕΣ ΚΑΙ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Limit analysis of a single span masonry bridge with unilateral frictional contact interfaces-G.A. Drosopoulos, G.E. Stavroulakis, C.V. Massalasa
- [2] Limit analysis of frictional block assemblies as a mathematical program with complementarity constraints -M.C. Ferris, F. Tin-Loi
- [3] Isogeometric analysis: a powerful numerical toolfor the elastic analysis of historical masonryarches -Antonio Cazzani, Marcello Malagù, and Emilio Turco
- [4] Dynamic Mechanical Properties-Christopher G Robertson
- [5] A Linear Complementarity Approach to the Frictionless Gripper Problem - A. M. Al-Fahed, G. E. Stavroulakis, P. D. Panagiotopoulos
- [6] Limit analysis by linear programming of 3D masonry structures with associative friction laws and torsion interaction effects - Francesco Portioli, Claudia Casapulla, Lucrezia Cascini, Mario D’Aniello, Raffaele Landolfo
- [7] Ευρωπαϊκές κατευθυντήριες γραμμές βέλτιστων πρακτικών 2014 για την ασφαλή στοίβαση των φορτίων για οδική μεταφορά-YEEE
- [8] An Adaptive Procedure for the Limit Analysis of FRP Reinforced Masonry Vaults and Applications - Andrea Chiozzi, Gabriele Milani, Nicola Grillanda and Antonio Tralli
- [9] The Theory behind Archie-M from OBVIS Masonry arch analysis software
- [10] Quasi-static tests of masonry walls repaired with reinforced mortar jacketing - J. Carrillo, L.E. Flores, J.A. Pincheira

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

New Bridge Wizard

General

Bridge type: ☒ Highway ☐ Railway (underline)

Effective bridge width: ☒ Specified (mm) ☐ Auto-computed

Bridge includes reinforcement ☐

Other details (optional)

Bridge name

Reference N°

Location

Map reference

Assessor name

Assessing organization

Comments:

Help Cancel <Back Next> Finish

Εικόνα 16 Καρτέλα Project

New Bridge Wizard

Left Abutment | Span 1 | Pier 1 | Span 2 | Pier 2 | Span 3 | Right Abutment | Fill Profile

Project

Geometry

Partial Factors

Materials

Loads

Backing height over abutment, h_b (mm) 0

Standard...

☐ Explicitly model this abutment

IMPORTANT: By default soil pressures are not applied behind an explicitly modelled abutment, to replicate an end standing pier.
(If soil is in practice present behind the abutment, standard practice would be to assume the abutment to be fixed, and not to explicitly model it.)

Height, h_s (mm)

Thickness at top, t_t (mm)

Thickness at base, t_b (mm)

Number of blocks, n

Help Cancel <Back Next> Finish

Εικόνα 17 Καρτέλα Geometry

New Bridge Wizard

Partial Factors

Factors applied to loads

Masonry unit weight, $\gamma_{f,m}$ 1

Fill unit weight, $\gamma_{f,f}$ 1

Surface fill / ballast unit weight, $\gamma_{f,sf}$ 1

Track load, $\gamma_{f,t}$ 1

Axle load, $\gamma_{f,l}$ 1

Dynamic, $\gamma_{f,dyn}$ 1

Factors applied to materials

Masonry strength, $\gamma_{m,ms}$ 1

Masonry friction, $\gamma_{m,mf}$ 1

Help Cancel <Back Next> Finish

Εικόνα 18 Καρτέλα Factors

New Bridge Wizard

Masonry Backfill Surface Fill

Specify properties for All masonry

All masonry Properties

Unit weight (kN/m^3) 20

Crushing properties

☒ Model crushing?

Compressive strength (N/mm^2) 5

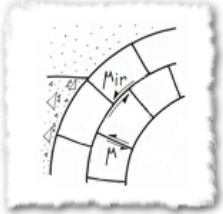
Sliding properties

☒ Model sliding (excluding inter-ring sliding)?

Standard friction coeff, μ 0.6

☒ Model inter-ring sliding?

Inter-ring friction coeff, μ_{ir} 0.5



Help Cancel <Back Next> Finish

Εικόνα 19 Καρτέλα Materials

New Bridge Wizard

Load Cases

Name Load Case 1 (1 of 1)

	Vehicle	Position	Mirror?	Dynamic Factor
1	Default 1kN Single Axle	1250	false	Not applied
2				

Delete Current Case Delete All Cases (Except Current) Add Load Case(s)...

Vehicle Database...

Click to traverse vehicle(s) across bridge.

Help Cancel <Back Next> Finish

Εικόνα 20 Καρτέλα Loads