



**Πανεπιστήμιο Πειραιώς**  
**Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών στη**  
**Βιομηχανική Διοίκηση και Τεχνολογία**  
**Ειδίκευση: Logistics Management**

Τίτλος διπλωματικής εργασίας

**Logistics εμβολιασμού: Χωροθέτηση κόμβων αποθήκευσης εμβολίων  
και τροφοδοσία εμβολιαστικών κέντρων**

**Αμπελιώτης Νικόλαος**

**A.M. TML1922**

Επιβλέπον καθηγητής:

Ειρηνάκης Παύλος

Πειραιάς, Μάιος 2023

## Δήλωση

Η εργασία αυτή είναι πρωτότυπη και εκπονήθηκε αποκλειστικά και μόνο για την απόκτηση του συγκεκριμένου μεταπτυχιακού τίτλου. Τα πνευματικά δικαιώματα χρησιμοποίησης του μη πρωτότυπου υλικού ΜΔΕ ανήκουν στο μεταπτυχιακό φοιτητή και το επιβλέπον μέλος ΔΕΠ εις ολόκληρο, δηλαδή εκάτερος μπορεί να κάνει χρήση αυτών χωρίς τη συναίνεση άλλου. Τα πνευματικά δικαιώματα χρησιμοποίησης του πρωτότυπου μέρους ΜΔΕ ανήκουν στον μεταπτυχιακό φοιτητή και τον επιβλέποντα από κοινού, δηλαδή δεν μπορεί ο ένας από τους δύο να κάνει χρήση αυτού χωρίς τη συναίνεση του άλλου. Κατ' εξαίρεση, επιτρέπεται η δημοσίευση του πρωτότυπου μέρους της διπλωματικής εργασίας σε επιστημονικό περιοδικό ή πρακτικά συνεδρίου από τον ένα εκ των δύο, με την προϋπόθεση ότι αναφέρονται τα ονόματα και των δύο ως συν-συγγραφέων. Στην περίπτωση αυτή προηγείται γραπτή ενημέρωση του μη συμμετέχοντα στη συγγραφή του επιστημονικού άρθρου. Δεν επιτρέπεται η κατά οποιοδήποτε τρόπο δημοσιοποίηση υλικού το οποίο έχει δηλωθεί εγγράφως ως απόρρητο.

## Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η ανάπτυξη ενός μοντέλου βέλτιστης χωροθέτησης ενδιάμεσων κέντρων αποθήκευσης εμβολίων κατά ιού Covid-19 στον νομό Αττικής. Για την επίλυση του ζητήματος της βελτιστοποίησης της αλυσίδας εφοδιασμού, αρχικά παρουσιάζεται μελέτη της βιβλιογραφίας που αφορά τέτοιου είδους προβλήματα (facility location). Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας μεικτό ακέραιο προγραμματισμό, το πρόβλημα μοντελοποιείται ως ένα Hub location problem. Ως δεδομένα, χρησιμοποιούνται οι τοποθεσίες των εμβολιαστικών κέντρων που βρίσκονται στην Αττική και γίνεται υπόθεση πως οι υποψήφιοι ενδιάμεσοι κόμβοι βρίσκονται σε πέντε σημεία που του νομού όπου σήμερα βρίσκεται η πλειοψηφία των κέντρων αποθήκευσης. Το μοντέλο δομείται στο λογισμικό CPLEX της IBM με τα αποτελέσματα που λαμβάνονται μετά την πρώτη εκτέλεση να δείχνουν πως οι δύο βέλτιστοι ενδιάμεσοι αποθηκευτικοί χώροι για τα σκευάσματα εμβολίων βρίσκονται στις περιοχές Κορωπί και Ταύρος.

## Abstract

This thesis studies the development of a model who finds the optimal location of intermediate storage centers for vaccines against the Covid-19 virus in the prefecture of Attica. To optimize the corresponding supply chain, a literature review on the corresponding problem (i.e., facility location) has been conducted. Then, using mixed integer programming, the problem is modeled as a Hub location problem. The locations of the vaccination centers located in Attica are used as data and it is assumed that the candidate intermediate nodes are located in five directions of the prefecture where the majority of the storage centers are located. The model is built in IBM's CPLEX software with the results obtained after the first run showing that the two optimal intermediate storage sites for vaccine formulations are located in the Koropi and Tavros regions.

## Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στους ανθρώπους που συνέβαλαν σημαντικά στην εκπόνηση της.

Ειδικότερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ειρηνάκη Παύλο, ο οποίος αφενός μου πρόσφερε την ευκαιρία να μελετήσω ένα πολύ ενδιαφέρον θέμα και αφετέρου οι συμβουλές του, οι παρατηρήσεις του, η καθοδήγηση του και ο χρόνος που αφιέρωσε οδήγησαν στην υλοποίηση της εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ πολύ τους γονείς μου Γιώργο και Δέσποινα που με την στήριξη, την υπομονή και την παρακίνηση τους όντας δίπλα μου σε κάθε μου προσπάθεια.

## Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη.....	3
Abstract .....	4
Ευρετήριο Εικόνων .....	8
Ευρετήριο Πινάκων.....	9
Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή.....	10
Κεφάλαιο 2 – Πανδημία, εμβολιασμός και ο ρόλος της εφοδιαστικής αλυσίδας .....	12
2.1 Η πανδημία λόγω Covid-19 .....	12
2.2 Ρόλος εφοδιαστικής αλυσίδας στην διαδικασία του εμβολιασμού.....	13
2.3 Διαχείρισης εμβολίων και εμβολιασμός κατά του COVID-19 στην Ελλάδα.....	14
2.3.1 Παραλαβή από παραγωγούς .....	15
2.3.2 Αποθήκευση .....	15
2.3.3 Διανομή στα εμβολιαστικά κέντρα .....	15
2.3.4 Αποθήκευση στα κέντρα εμβολιασμού.....	17
2.4 Χωροταξία των αποθηκευτικών κέντρων .....	17
Κεφάλαιο 3 – Μοντέλα χωροθέτησης – Βιβλιογραφική ανασκόπηση .....	19
3.1 Maximum distance models – Μοντέλα μέγιστης απόστασης.....	19
3.1.1 Set covering location problem .....	20
3.1.2 Maximal covering location problem .....	22
3.1.3 P-center problem .....	24
3.1.4 P-dispersion problem .....	25
3.2 Total or average distance models – Μοντέλα συνολικής ή μέσης απόστασης .....	26
3.2.1 P-median problem .....	27
3.2.2 Fixed charge location problem.....	28

3.2.3 Hub location problem.....	30
3.2.4 The maxisum location problem.....	32
Κεφάλαιο 4 – Μεθοδολογία.....	34
4.1 Περιγραφή του προβλήματος και μοντελοποίηση.....	34
4.2 Μοντελοποίηση.....	35
Κεφάλαιο 5 – Υπολογιστικά αποτελέσματα.....	38
5.1 Παρουσίαση δεδομένων.....	38
5.2 Μοντελοποίηση προβλήματος στο IBM ILOG CPLEX Optimization Studio.....	48
5.2.1 Παρουσίαση IBM ILOG CPLEX Optimization Studio.....	48
5.2.2 Δόμηση σεναρίου.....	49
5.3 Αριθμητικά αποτελέσματα.....	52
5.4 Ανάλυση ευαισθησίας (Sensitivity analysis).....	53
5.4.1 Σενάριο αύξησης παράγοντα έκπτωσης $\alpha$ .....	53
5.4.2 Σενάριο αλλαγής ζήτησης για εμβολιασμό.....	54
Κεφάλαιο 6 – Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	57
6.1 Συμπεράσματα.....	57
6.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	60
Βιβλιογραφία.....	62

## Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1 - Διαδικασία διαχείρισης εμβολίων και εμβολιασμού (Υπουργείο Υγείας,2020) .....	14
Εικόνα 2 - Σχέδιο προτεραιοποίησης εμβολιασμών πληθυσμιακών ομάδων (Υπουργείο Υγείας, 2021) .....	16
Εικόνα 3 - Ροή εμβολίων κατά του Covid-19 από τον παραγωγό στους πολίτες .....	18
Εικόνα 4 - Παρουσίαση δικτύου κόμβων στον νομό Αττικής. ....	39
Εικόνα 5 - Στατιστικά στοιχεία πρώτης εκτέλεσης στο λογισμικό της IBM .....	52
Εικόνα 6 - Γράφημα κόστους μετά την μεταβολή του εκπτωτικού παράγοντα $\alpha$ από 0,1 έως 0,38 .....	54
Εικόνα 7 - Ραβδόγραμμα ανάλυσης αναλογίας συνολικού κόστους κατά την ποσοστιαία μείωση της ζήτησης .....	56



## Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1 - Ζήτηση εμβολιαστικών κέντρων (τεμάχια εμβολίων) .....	40
Πίνακας 2 - Κόστος εγκατάστασης αποθηκευτικών χώρων (€) .....	42
Πίνακας 3 - Κόστος μεταφοράς ανά εμβόλιο από αρχικό κόμβο σε αποθήκες (€/εμβόλιο) .....	42
Πίνακας 4 - Κόστος μεταφοράς ανά εμβόλιο στις ενδοδιακινήσεις των αποθηκών (€/εμβόλιο) .....	43
Πίνακας 5 - Κόστος μεταφοράς ανά εμβόλιο από αποθήκες σε εμβολιαστικά κέντρα (€/εμβόλιο) .....	43
Πίνακας 6 – Αριθμητικά αποτελέσματα πρώτης εκτέλεσης .....	52
Πίνακας 7 - Αποτελέσματα με μείωση ζήτησης .....	55
Πίνακας 8 - Αποτελέσματα με αύξηση ζήτησης.....	55

## Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή

Η παρούσα εργασία προσπαθεί να επιλύσει ένα ζήτημα εφοδιαστικής αλυσίδας ενός υγειονομικού προβλήματος που έπληξε τον πλανήτη από τα τέλη του έτους 2019, την τοποθέτηση ενδιάμεσων αποθηκευτικών χώρων για τα εμβόλια κατά του Covid-19 πριν την διανομή τους στα εμβολιαστικά κέντρα του νομού Αττικής. Το θέμα αντιμετωπίστηκε ως ένα facility location problem καθώς προβλήματα τοποθέτησης εγκαταστάσεων έχουν εδραιωθεί να ερευνώνται στα πλαίσια της επιχειρησιακής έρευνας, η οποία ταυτίζεται άμεσα με την διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας. Τα τελευταία χρόνια έχει δημοσιευθεί μεγάλος αριθμός ερευνών σχετικά με τα προβλήματα βέλτιστης χωροθέτησης εγκαταστάσεων τα οποία στοχεύουν στην εύρεση της καλύτερης δυνατής διαμόρφωσης της αλυσίδας εφοδιασμού (Melo *et al.*, 2009).

Ένα πρόβλημα τοποθέτησης ενδιάμεσων κόμβων περιλαμβάνει ένα σύνολο εγκαταστάσεων οι οποίες καλούνται να εξυπηρετήσουν ένα σύνολο σημείων ζήτησης. Οι αποστάσεις, ο χρόνος μεταφοράς μεταξύ κόμβων και ζήτησης αλλά και το κόστος διακίνησης είναι κριτήρια τα οποία επηρεάζουν τον σχεδιασμό του δικτύου. Με γνώμονα τα παραπάνω κριτήρια, πιθανά ερωτήματα που θα πρέπει να απαντηθούν αφορούν τον ορισμό των ενδιάμεσων εγκαταστάσεων οι οποίες θα είναι ανοιχτές, θα εφοδιάζονται από τα σημεία προσφοράς και θα εξυπηρετούν την απαιτούμενη ζήτηση. Επίσης, από ποιον ενδιάμεσο κόμβο πρέπει να τροφοδοτείται το κάθε σημείο ζήτησης προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος του προβλήματος. Στην απάντηση αυτών των ερωτημάτων σε συνδυασμό με τους ιδιαίτερους περιορισμούς της κάθε περίπτωσης βελτιστοποίησης επικεντρώθηκαν έρευνες σχετικά με τον σχεδιασμό συστημάτων διανομής (Melo *et al.*, 2009).

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αφορμή για την εκπόνηση την παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η διανομή των εμβολίων για την καταπολέμηση του πανδημικού ιού Covid-19 στους πολίτες του νομού Αττικής. Αν και ο εμβολιασμός αποτελεί κατά κύριο λόγο αντικείμενο της βιολογίας και της ιατρικής επιστήμης, μια επιτυχημένη εκστρατεία για την καταπολέμηση μιας μολυσματικής νόσου είναι αδύνατο να επιτευχθεί χωρίς έναν σωστό προγραμματισμό διανομής. Η σημασία της εφοδιαστικής αλυσίδας του εμβολιασμού αποδεικνύεται από το

μέγεθος των ερευνών που έχουν πραγματοποιηθεί τα τελευταία χρόνια επάνω στο θέμα. Πάνω από το 90% των μελετών έγιναν από το 2005 και έπειτα ενώ οι περισσότερες από τις μισές από το 2011 και μετά. Τα συστήματα προμήθειας των εμβολίων θα πρέπει να σχεδιάζονται με τρόπο που θα μεγιστοποιείται η αποτελεσματικότητα και η ευελιξία. Για να γίνει αυτό, είναι αναγκαίο να απαντώνται τα ερωτήματα που προκύπτουν και αφορούν τον προγραμματισμό των Logistics, όπως η διαχείριση των αποθεμάτων, οι τοποθεσίες που θα αποθηκευτούν αυτά και το επίπεδο που θα στελεχωθούν. Τέλος, προβλήματα δρομολόγησης και προγραμματισμού παρουσιάζονται όταν χρησιμοποιούνται κινητές μονάδες εφοδιασμού (Duijzer, van Jaarsveld and Dekker, 2018).

Μελετώντας βιβλιογραφία σχετική με τις προαναφερθείσες έρευνες, η εργασία δομείται ως εξής. Στο πρώτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η πορεία της πανδημικής κρίσης στον πλανήτη και τον λόγο που η εφοδιαστική αλυσίδα λειτουργεί σαν ένα «εργαλείο» που διανέμει το εμβόλιο στους πολίτες. Αναλύονται οι διαδικασίες διαχείρισης των σκευασμάτων και γίνεται μια αρχική συνοπτική αναφορά στην προσέγγιση της μελέτης της εργασίας ως ένα facility location problem. Στην συνέχεια, πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση των βασικών μοντέλων χωροθέτησης που έχουν μελετηθεί έως την περίοδο συγγραφής της εργασίας, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην επίλυση του προβλήματος που κρίστηκε αντιμετώπισης. Στο επόμενο κεφάλαιο, αναφέρεται λεπτομερώς η μεθοδολογία ανάπτυξης του προβλήματος και κρίστηκε αντιμετώπισης η τελική μαθηματική μοντελοποίηση. Για την λήψη των αποτελεσμάτων που θα εξάγει το μοντέλο, έγινε η δόμηση του στο πρόγραμμα βελτιστοποίησης IBM ILOG CPLEX Optimization Studio. Μετά την παρουσίαση των αρχικών αποτελεσμάτων μελετώνται δύο υποθετικά σενάρια κάνοντας ανάλυση ευαισθησίας και σχολιάζονται τα αποτελέσματά τους. Τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της μελέτης και αναφέρονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

## Κεφάλαιο 2 – Πανδημία, εμβολιασμός και ο ρόλος της εφοδιαστικής αλυσίδας

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια ανασκόπηση της πανδημικής κρίσης που ξεκίνησε να πλήττει τον πλανήτη στα τέλη του 2019 και πως ο ρόλος της εφοδιαστικής αλυσίδας συμβάλει στην καταπολέμηση της. Επιπρόσθετα, μετά την συνοπτική ανάλυση των διαδικασιών διαχείρισης των σκευασμάτων εμβολίων κατά του Covid-19 έως την άφιξη τους στα εμβολιαστικά κέντρα, παρουσιάστηκε το βασικό αντικείμενο μελέτης της εργασίας αυτής το οποίο είναι η χωροταξία των κέντρων που θα αποθηκευτούν τα εμβόλια πριν διανεμηθούν στους πολίτες του νομού Αττικής.

### 2.1 Η πανδημία λόγω Covid-19

Στα τέλη Δεκεμβρίου 2019, στην πόλη Γουχάν της επαρχίας Χουμπέι της Κίνας, εντοπίστηκαν τα πρώτα κρούσματα πνευμονίας COVID-19 (Corona virus disease 2019). Η εξαιρετικά μεταδοτική ασθένεια εξαπλώθηκε γρήγορα σε ολόκληρο τον πλανήτη και στις 11 Μαρτίου του 2020 χαρακτηρίστηκε από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (ΠΟΥ) ως πανδημία. Αρχικά, η αντιμετώπιση της εξάπλωσης της νόσου θεωρείτο πολύ δύσκολη σε όλο τον κόσμο, διότι οι ασθενείς εμφάνιζαν συμπτώματα που μοιάζουν με την κοινή γρίπη. Επίσης, υπήρχε μεγάλη πιθανότητα μετάδοσης μέσω ασυμπτωματικών ανθρώπων ξενιστών, και τέλος δεν υπήρχε η απαραίτητη γνώση σχετικά με την ανοσολογία του πληθυσμού μέσω φαρμάκων, εμβολίων και άλλων μέτρων περιορισμού του ιού (Chatterjee *et al.*, 2021).

Ο κορωνοϊός, την χρονική περίοδο συγγραφής της παρούσας εργασίας, συμπλήρωσε ένα πλήρη ημερολογιακό κύκλο ενός έτους, τόσο στην Ελλάδα όσο και στον υπόλοιπο πλανήτη, μετρώντας 129.215.179 επιβεβαιωμένα κρούσματα και 2.820.098 θανάτους σύμφωνα με τον ΠΟΥ (Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας, 2021). Η ανάγκη για την ανοσοποίηση του πληθυσμού μέσω εμβολιασμού ώθησε κυβερνήσεις και φαρμακοβιομηχανίες σε έρευνα για την ανάπτυξη εμβολίων προς αντιμετώπιση του ιού. Σε αντίθεση με παρόμοιες καταστάσεις και πανδημίες του παρελθόντος, κατάφεραν να αναπτυχθούν διάφορα εμβόλια μέσω προηγμένης

βιοτεχνολογίας Από τον Φεβρουάριο του 2021 έως την ημερομηνία διατύπωσης της παρούσας εργασίας έχουν εγκριθεί από τον ΠΟΥ δέκα εμβόλια για δημόσια χρήση. Τα πιο διαδεδομένα παγκοσμίως είναι τα εμβόλια των Pfizer-BioNTech, Moderna, Sputnik V, Oxford-AstraZeneca και της Johnson & Johnson. Εφόσον το ζήτημα ανάπτυξης εμβολίων που επιτυγχάνουν σε πολύ μεγάλο ποσοστό την δημιουργία αντισωμάτων στους εμβολιαζόμενους λύθηκε επιτυχώς, ο επόμενος στόχος ήταν η άμεση κάλυψη της ζήτησης έτσι ώστε να επιτευχθεί η «ανοσία της αγέλης» (Jung, 2021).

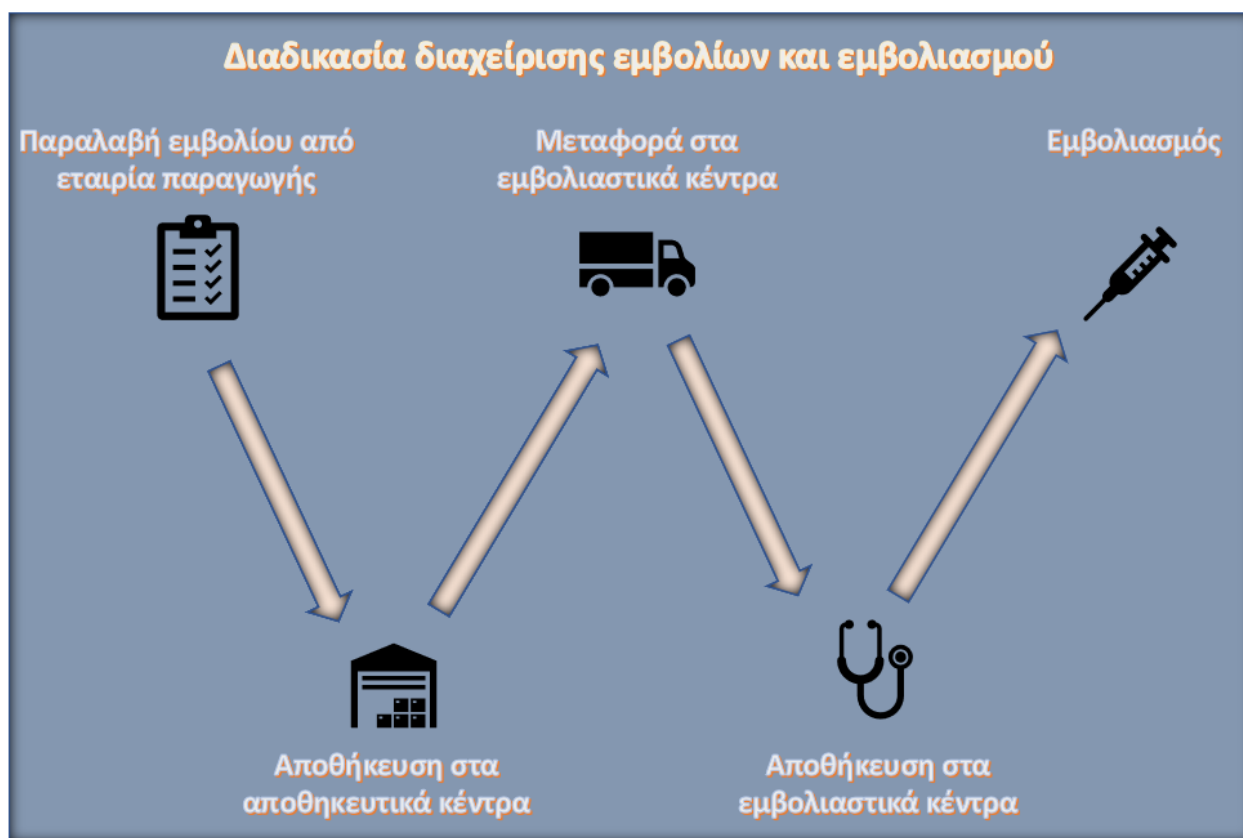
## 2.2 Ρόλος εφοδιαστικής αλυσίδας στην διαδικασία του εμβολιασμού

Ευρέως γνωστό είναι πως η διαδικασία του εμβολιασμού αποτελεί πεδίο της ιατρικής επιστήμης και της βιολογίας. Παρόλα αυτά όμως είναι αδύνατο να εκτελεστεί αποτελεσματικά χωρίς μια ευέλικτη και ισχυρή εφοδιαστική αλυσίδα. Η σημασία των logistics του εμβολιασμού αποδεικνύεται από τον αυξανόμενο αριθμό μελετών επί του θέματος τα τελευταία χρόνια. Σύμφωνα με τον ΠΟΥ, η διαδικασία του εμβολιασμού χωρίζεται σε δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αποτελεί η διαδικασία μελέτης και ανάπτυξής του κατάλληλου προϊόντος, δηλαδή του εμβολίου το οποίο θα ανοσοποιήσει τον πληθυσμό. Το δεύτερο στάδιο αφορά την εφοδιαστική αλυσίδα του εμβολιασμού το οποίο μπορεί να διαιρεθεί σε τρεις επιμέρους διαδικασίες. Η πρώτη διαδικασία αφορά την παραγωγή των εμβολίων, δηλαδή ποιος είναι ο αριθμός εμβολίων που πρέπει να παραχθούν και πότε. Η δεύτερη αφορά την κατανομή του προϊόντος στον πληθυσμό. Οι διαθέσιμες δόσεις συχνά δεν επαρκούν για τον εμβολιασμό ολοκλήρου του πληθυσμού, ειδικά σε περιπτώσεις ξαφνικών εξάρσεων όπως η πανδημία του COVID-19, γι' αυτό γίνεται διαχωρισμός του πληθυσμού σε ομάδες υψηλού και χαμηλού κινδύνου, αλλά και σε ομάδες υψηλής και χαμηλής μεταδοτικότητας. Απαιτείται προσεκτική ανάλυση για να προσδιοριστεί σε ποια ομάδα ή ομάδες πρέπει να δοθεί προτεραιότητα. Τρίτον, η διαδικασία της διανομής των εμβολίων από τους παρασκευαστές στον τελικό καταναλωτή. Είναι πολύ σημαντική λήψη αποφάσεων όσο αναφορά την διαχείριση των αποθεμάτων, πιο συγκεκριμένα, ποιες είναι οι κατάλληλες θέσεις αποθήκευσης των εμβολίων, των εμβολιαστικών κέντρων, ποια η ιδανική χωρητικότητά τους, πως αυτά πρέπει να στελεχώνονται έτσι ώστε η διανομή να γίνεται με σταθερό ρυθμό στο

επιθυμητό επίπεδο. Τέλος, μεγάλη πολυπλοκότητα παρουσιάζει η μελέτη περιπτώσεων δρομολόγησης και προγραμματισμού που χρησιμοποιούνται κινητές μονάδες εμβολιασμού (Duijzer, van Jaarsveld and Dekker, 2018).

### 2.3 Διαχείρισης εμβολίων και εμβολιασμός κατά του COVID-19 στην Ελλάδα

Το επιχειρησιακό σχέδιο εμβολιασμού της Ελλάδας αναφέρει όλα τα στάδια διαχείρισης των εμβολίων και του εμβολιασμού, αρχίζοντας από την παραλαβή των εμβολίων από τις φαρμακευτικές εταιρίες που τα παράγουν, την αποθήκευση τους στα κέντρα αποθήκευσης, τη διανομή και αποθήκευση των εμβολίων στα κέντρα εμβολιασμού και τη διαδικασία των εμβολισμών στους πολίτες



Εικόνα 1 - Διαδικασία διαχείρισης εμβολίων και εμβολιασμού (Υπουργείο Υγείας, 2020)

### 2.3.1 Παραλαβή από παραγωγούς

Το επιχειρησιακό σχέδιο προβλέπει την διασφάλιση όλων των απαραίτητων συνθηκών κατά την μεταφορά των εμβολίων εντός της χώρας, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται απόλυτα η ακεραιότητα τους από τους διανομείς των φαρμακευτικών. Τα αποθηκευτικά κέντρα ενημερώνονται για τις επικείμενες παραλαβές από το κέντρο συντονισμού του Υφυπουργείου Πολιτικής Προστασίας και Διαχείρισης Κρίσεων μέσω μιας κεντρικής εφαρμογής που αναπτύχθηκε από το Υπουργείο Ψηφιακής Διακυβέρνησης με στόχο την διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας των εμβολίων. Τα κέντρα αποθήκευσης στελεχώνονται από επαρκή προσωπικό το οποίο είναι εκπαιδευμένο πλήρως για την τήρηση των προδιαγραφών (χρόνοι - θερμοκρασίες) διαχείρισης των εμβολίων κάθε φαρμακευτικής εταιρίας κατά την παραλαβή και την εκτέλεση όλων των ελέγχων και την τεκμηρίωση τους.

### 2.3.2 Αποθήκευση

Τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά και η κατανομή του πληθυσμού της Ελλάδας ήταν οι δύο παράγοντες οι οποίοι καθόρισαν την απόφαση για τον ορισμό πέντε (5) εγκεκριμένων αποθηκών των εμβολίων. Κάθε αποθηκευτικό κέντρο εφοδιάζει συγκεκριμένα εμβολιαστικά κέντρα με κριτήριο απόσταση μεταξύ τους και τον χρόνο κάλυψής της έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται ο χρόνος που τα εμβόλια παραμένουν σε κατάσταση μεταφοράς. Επίσης, τα κέντρα αποθήκευσης είναι εξοπλισμένα με επαρκή αριθμό ειδικών καταψυκτών στους οποίους μπορούν να αποθηκευτούν εμβόλια που απαιτούν συνθήκες φύλαξης από -70 έως -80°C, όπως αυτά των BioNTech/Pfizer. Τέλος, μετά το πέρας κάθε ημέρας πραγματοποιείται ποσοτική απογραφή του αποθέματος των εμβολίων.

### 2.3.3 Διανομή στα εμβολιαστικά κέντρα

Η διανομή στα εμβολιαστικά κέντρα γίνεται με βάση ένα σχέδιο προτεραιότητας εμβολιασμών το οποίο χωρίζει τους πολίτες σε πληθυσμιακές ομάδες (εικόνα 2) και στη ζήτηση για εμβολιασμό.



Εικόνα 2 - Σχέδιο προτεραιοποίησης εμβολιασμών πληθυσμιακών ομάδων (Υπουργείο Υγείας, 2021)

Το κέντρο συντονισμού του εμβολιασμού ενημερώνεται μέσω της εφαρμογής ραντεβού για τους επικείμενους εμβολιασμούς και έτσι προγραμματίζει τις ανάγκες των εμβολιαστικών κέντρων για απόθεμα εμβολίων. Στην συνέχεια, το κέντρο συντονισμού οργανώνει τις παραδόσεις σκευασμάτων μέσω μιας κεντρικής εφαρμογής εφοδιαστικής αλυσίδας η οποία έχει δημιουργηθεί σύμφωνα με έναν αλγόριθμο ο οποίος έχει βασιστεί στην ζήτηση. Έπειτα, τα αποθηκευτικά κέντρα λαμβάνοντας καθημερινή ενημέρωση από το κέντρο συντονισμού μέσω της κεντρικής εφαρμογής της εφοδιαστικής είναι υπεύθυνα για την διασφάλιση της αδιάκοπης ροής της εμβολιαστικής διαδικασίας.

Η μεταφορά των σκευασμάτων γίνεται σε ειδικά σχεδιασμένα κιβώτια, τα οποία διαθέτουν ειδικές συσκευές παρακολούθησης και καταγραφής των συνθηκών θερμοκρασίας που απαιτούνται για την ασφαλή συντήρηση των εμβολίων. Τέλος, κάθε κιβώτιο έχει επικολλημένο



ένα QR code το οποίο περιλαμβάνει όλες τις πληροφορίες για τις παρτίδες των εμβολίων που εμπεριέχονται σε αυτό.

#### 2.3.4 Αποθήκευση στα κέντρα εμβολιασμού

Τα εμβολιαστικά κέντρα αφού παραλάβουν με μεγάλη προσοχή τα κιβώτια που εμπεριέχουν σκευάσματα, προχωρούν σε ηλεκτρονική καταγραφή της παραλαβής μέσω της κεντρικής εφαρμογής εφοδιαστικής αλυσίδας που αναφέρθηκε παραπάνω. Εν συνεχεία αποθηκεύουν τα κιβώτια σύμφωνα με τις οδηγίες της εταιρίας που τα παρήγαγε και τηρώντας την βασική αρχή αποθήκευσης FEFO (first expired-first out), και προμηθεύουν με εμβόλια τις υπόλοιπες μονάδες ή μέσα εμβολιασμού όπως οίκους ευγηρίας, κέντρα φιλοξενίας προσφύγων, σωφρονιστικά κέντρα και λοιπές κλειστές δομές, κινητές μονάδες εμβολιασμού, βοήθεια στο σπίτι κλπ (Υπουργείο Υγείας, 2020).

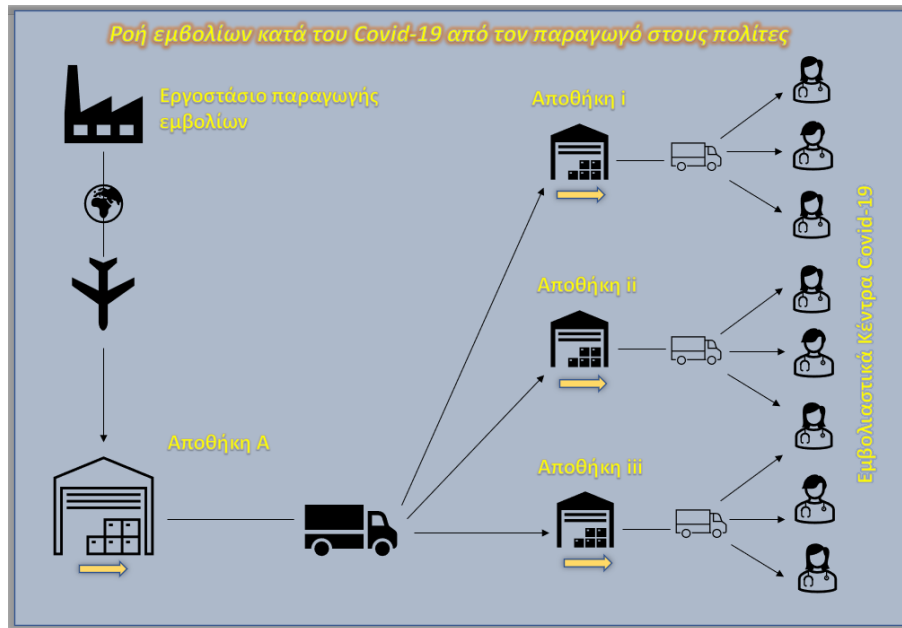
#### 2.4 Χωροταξία των αποθηκευτικών κέντρων

Η παρούσα εργασία εστιάζει στην ανάλυση της χωροταξίας των αποθηκευτικών κέντρων, όπου θα τοποθετηθούν τα σκευάσματα εμβολίων πριν την διανομή τους στα εμβολιαστικά κέντρα, ως ένα πρόβλημα τοποθεσίας διακριτών κόμβων.

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, τα προβλήματα τοποθεσίας διακριτών κόμβων, ή αλλιώς facility location problems (FLP), παρέχουν μια μεγάλη δεξαμενή μοντέλων που βασίζονται σε συστήματα μεταφοράς και τηλεπικοινωνιών. Οι κόμβοι είναι εγκαταστάσεις διαφόρων τύπων που εκτελούν εναλλαγή, ταξινόμηση, σύνδεση και ενοποίησης (πχ φορτίου, επιβατών και πληροφοριών) μεταξύ των σημείων προέλευσης και προορισμού. Σε γενικές γραμμές τα FLP συνιστώνται για τον εντοπισμό κόμβων εγκαταστάσεων κατά το σχεδιασμό ενός δικτύου διανομικών και τον καθορισμό της δρομολόγησης των ροών μέσω του δικτύου, ενώ ταυτόχρονα βελτιστοποιείται ένας στόχος κόστους ή υπηρεσιών (Alumur *et al.*, 2021).

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ένα απλό παράδειγμα ροής εμβολίων που παράγονται σε φαρμακοβιομηχανίες του εξωτερικού προς τα εμβολιαστικά κέντρα της Ελλάδας, για να γίνει καλύτερα κατανοητή η προσέγγιση της μελέτης για την χωροταξία των κέντρων αποθήκευσης στον ελλαδικό χώρο. Αρχικά, μετά την παραγωγή τους τα σκευάσματα εμβολίων μεταφέρονται

μέσω αερομεταφοράς σε μια κεντρική αποθήκη (Αποθήκη Α – κόμβος 0). Από εκεί, πριν γίνει η διανομή τους ανάλογα με τις ανάγκες του εκάστοτε κέντρου εμβολιασμού (κόμβοι προορισμού), μεταφέρονται μέσω οδικής μεταφοράς στις εγκεκριμένες αποθήκες (Αποθήκες i, ii και iii – ενδιάμεσοι κόμβοι). Τέλος, στόχος είναι η βέλτιστη χωροταξία των τριών ενδιάμεσων κόμβων αποθήκευσης με γνώμονα την ζήτηση και το κόστος μεταφοράς στα εμβολιαστικά κέντρα.



Εικόνα 3 - Ροή εμβολίων κατά του Covid-19 από τον παραγωγό στους πολίτες

## Κεφάλαιο 3 – Μοντέλα χωροθέτησης – Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν τα βασικά μοντέλα χωροθέτησης εγκαταστάσεων τα οποία έχουν διαχωριστεί σε δύο κατηγορίες με κριτήριο την απόσταση (μέγιστη και μέση απόσταση) και άλλων μεγεθών που σχετίζονται με αυτή όπως το κόστος και ο χρόνος κάλυψης μιας διαδρομής ή η ικανοποίηση της ζήτησης. Η πρώτη κατηγορία με τα προβλήματα που βασίζονται στην μέγιστη απόσταση αποτελείται από τα εξής:

1. Set covering location problem
2. Maximal covering location problem
3. P-center location problem
4. P-dispersion location problem

Ενώ η δεύτερη που βασίζεται στη μέση απόσταση αποτελείται από τα:

1. P-median location problem
2. Fixed charge location problem
3. Hub location problem
4. Maxisum location problem

Σε όλα τα μοντέλα, βασικό ζήτημα αποτελεί η χωροθέτηση νέων εγκαταστάσεων προκειμένου να βελτιστοποιηθεί κάποιος στόχος. Οι τοποθεσίες των ήδη υπάρχοντων εγκαταστάσεων που καλούνται να καλύψουν την ζήτηση, οι θέσεις των σημείων ζήτησης και το συνολικό δίκτυο θεωρούνται δεδομένα.

### 3.1 Maximum distance models – Μοντέλα μέγιστης απόστασης

Για να γίνουν πιο κατανοητά όσα αναφερθούν παρακάτω για τα μοντέλα μέγιστης απόστασης η ενότητα ξεκινά με ένα παράδειγμα χωροθέτησης σχολείων σε μια περιφέρεια της Ελλάδας. Αρχικά, οι μαθητές οι οποίοι κατοικούν σε ακτίνα ενός χιλιομέτρου από το κοντινότερο σχολείο, πηγαίνουν σε αυτό με τα πόδια. Για τους υπόλοιπους, οι οποίοι μένουν σε απόσταση μεγαλύτερη του ενός χιλιομέτρου (μέγιστη απόσταση), έχει μεριμνήσει η υπηρεσία δημόσιας συγκοινωνίας να παραχωρείται δωρεάν εισιτήριο για την μεταφορά τους από και προς το σχολείο. Έτσι, η περιφέρεια έχοντας ως στόχο να ελαχιστοποιήσει το κόστος από τα δωρεάν

εισιτήρια που δίνονται καθημερινά, καλείται να επαναπροσαρμόσει τις τοποθεσίες των σχολικών εγκαταστάσεων προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι μαθητές που χρησιμοποιούν δημόσια συγκοινωνία με δημόσια δαπάνη.

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, σε ορισμένα προβλήματα χωροθέτησης εγκαταστάσεων, η μέγιστη απόσταση κάλυψης θεωρείται δεδομένη και δίνεται εκ των προτέρων (a priori). Επίσης, a priori μέγιστες αποστάσεις κάλυψης καλούνται ως καλυπτόμενες αποστάσεις (covering distances), στο παραπάνω παράδειγμα είναι το ένα χιλιόμετρο κάλυψης. Πολύ σημαντικό είναι πως η ζήτηση ικανοποιείται πλήρως μόνο στην περίπτωση που η πιο κοντινή εγκατάσταση είναι τοποθετημένη εντός της καλυπτόμενης απόστασης, ενώ δεν ικανοποιείται αν βρίσκεται εκτός αυτής, στο παραπάνω παράδειγμα οι μαθητές που βρίσκονται εκτός της μέγιστης απόστασής δικαιούνται δωρεάν μεταφορά (Hamacher, 2022).

### 3.1.1 Set covering location problem

Η πρώτη έρευνα πάνω στο πρόβλημα κάλυψης της τοποθεσίας έγινε με την μελέτη του set covering location problem (SCLP) πριν 50 χρόνια από τους Toregas C., Swain R., Revelle C. και Bergman L. Στόχος ήταν η τοποθεσία του ελάχιστου αριθμού εγκαταστάσεων που απαιτούνται έτσι ώστε να καλυφθεί όλη η ζήτηση των κόμβων (Toregas *et al.*, 1971). Η μοντελοποίηση του συγκεκριμένου προβλήματος είναι η εξής:

#### Παράμετροι

***D*** : το σύνολο της ζήτησης των κόμβων *i*

***P*** : το σύνολο των υποψήφιων θέσεων εγκαταστάσεων *j*

***r<sub>ij</sub>*** : η απόσταση μεταξύ του κόμβου ζήτησης *i* και την υποψήφιας θέσης εγκατάστασης *j*

***L<sub>c</sub>*** : η απόσταση κάλυψης

***N<sub>i</sub>*** = { *j* | *r<sub>ij</sub>* < *L<sub>c</sub>* } το σύνολο όλων των υποψήφιων τοποθεσιών που μπορούν να καλύψουν τη ζήτηση στο σημείο *i*

### Μεταβλητές

$X_j$  : Δυαδική μεταβλητή απόφασης για την εγκατάσταση στη θέση  $j$ , 1 στην περίπτωση που κρίνεται θετικά η χωροθέτηση στη θέση  $j$  και 0 αν όχι

### Αντικειμενική συνάρτηση

$$\text{Minimize } \sum_j X_j, \forall j \in P \quad (2.1)$$

### Περιορισμοί

$$\sum_{j \in N_i} x_j \geq 1, \forall i \in D \quad (2.2)$$

$$x_j \in \{0,1\}, \forall j \in P \quad (2.3)$$

Στόχος της αντικειμενικής συνάρτησης 2.1 είναι να ελαχιστοποιήσει τον αριθμό των εγκαταστάσεων που θα τοποθετηθούν. Με τον περιορισμό 2.2 επιβεβαιώνεται το γεγονός πως κάθε κόμβος ζήτησης καλύπτεται από μια εγκατάσταση τουλάχιστον. Η μεταβλητή απόφασης 2.3 παίρνει την τιμή 1 αν η απόφαση για την εγκατάσταση στην τοποθεσία  $j$  κρίνεται θετικά και 0 αν όχι. Επίσης, οι περιορισμοί της μοντελοποίησης του προβλήματος προϋποθέτουν πως κάθε σημείο ζήτησης καλύπτεται από τουλάχιστον μια εγκατάσταση. Τις περισσότερες φορές όμως, αυτό απαιτεί την τοποθέτηση πάρα πολλών εγκαταστάσεων, με αποτέλεσμα να είναι οικονομικά ασύμφορο. Ακόμα, αν ο σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού σταθερού κόστους της χωροθέτησης και όχι ο αριθμός των εγκαταστάσεων που θα τοποθετηθούν, τότε η αντικειμενική συνάρτηση θα μπορούσε να γενικευθεί και να συμπεριληφθούν σε αυτή συγκεκριμένα κόστη χωροθέτησης σαν συντελεστές των μεταβλητών απόφασης. Οι δύο παραπάνω εκδοχές του set covering location problem θεωρούνται NP – hard (non-deterministic polynomial time – hard) (Garey, 1979).

### 3.1.2 Maximal covering location problem

Στο μοντέλο που αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, ουσιαστικά δεν υπάρχει κανένας περιορισμός στον προϋπολογισμό. Σε πραγματικές συνθήκες όμως το κόστος είναι ένας παράγοντας ο οποίος πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη. Στο παράδειγμα της μετακίνησης των μαθητών προς τις σχολικές εγκαταστάσεις που παρουσιάστηκε παραπάνω, είναι δεδομένο πως η σχολική περιφέρεια θα ήθελε να υπάρχει ένα σχολείο σε κοντινή απόσταση για όλους τους μαθητές για να μην χρειάζεται κανείς να χρησιμοποιεί την δημόσια συγκοινωνία. Όμως, για να ικανοποιηθεί αυτό το ζήτημα απαιτούνται περισσότερα σχολεία από όσα είναι διατεθειμένα να χτιστούν. Ο στόχος της διατύπωσης του maximal covering location problem (MCLP) ήταν η οριοθέτηση του αριθμού των εγκαταστάσεων που θα χωρομετρηθούν, έστω  $n$ , έτσι ώστε να επιτευχθεί μεγιστοποίηση στην ζήτηση που καλύπτεται. Βάζοντας όριο στον αριθμό των μονάδων που θα εγκατασταθούν, το MCLP υποθέτει πως μπορεί να μην είναι αρκετές για να καλύψουν όλους τους κόμβους ζήτησης. Στην περίπτωση αυτή, το μοντέλο διαμορφώνει την χωροθέτηση με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να καλύπτεται το μεγαλύτερο μέρος της ζήτησης (Church, 1974).

Η μοντελοποίηση του προβλήματος της μέγιστης κάλυψης είναι η παρακάτω:

#### Παράμετροι

Οι παράμετροι του set covering problem και ακόμα οι:

$d_i$  : η ζήτηση στο κόμβο  $i$

$n$  : ο αριθμός των εγκαταστάσεων που θα τοποθετηθούν

#### Μεταβλητές

Οι μεταβλητές του set covering problem και:

$Z_i$  : Δυαδική μεταβλητή απόφασης για την κάλυψη της ζήτησης στον κόμβο  $i$ , 1 στην περίπτωση που καλύπτεται, και 0 αν όχι

#### Αντικειμενική συνάρτηση

$$\text{Maximize } \sum_i d_i Z_i, \forall i \in D \quad (2.4)$$

### Περιορισμοί

Οι περιορισμοί του set covering problem και οι εξής:

$$\sum_j x_j - z_i \geq 0, \quad \forall i \in D \text{ και } \forall j \in N_i \quad (2.5)$$

$$\sum_j x_j = n, \quad \forall j \in P \quad (2.6)$$

$$z_i \in \{0,1\}, \quad \forall i \in D \quad (2.7)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση έχει ως στόχο την μεγιστοποίηση της συνολικής κάλυψης της ζήτησης. Με τον περιορισμό 2.5 εξασφαλίζεται πως η ζήτηση στον κόμβο  $i$  δεν είναι καλυμμένη αν δεν εγκατασταθεί μονάδα σε μία από τις θέσεις που καλύπτει τις ανάγκες του κόμβου  $i$ . Επίσης ο περιορισμός 2.6 βάζει όριο στον αριθμό των μονάδων που μπορούν να χωροθετηθούν. Τέλος ο περιορισμός 2.7, όπως και ο 2.3 του προηγούμενου μοντέλου, έχουν δυαδική φύση για την απόφαση της κάλυψης της ζήτησης των κόμβων  $i$  και της χωροθέτησης εγκατάστασης στη κάθε υποψήφια θέση  $j$  αντίστοιχα. Αρκετά ενδιαφέρον αποτελεί το γεγονός πως οι περιορισμοί 2.5 και 2.3 μπορούν να αντικαταστήσουν τον περιορισμό 2.7 με  $z_i \leq 1, \forall i \in D$  (Church, 1974). Όπως το μοντέλο SCLP, έτσι και το μοντέλο MCLP θεωρείται και αυτό NP-hard αλλά μπορεί να επιλυθεί αποτελεσματικά αν χρησιμοποιηθούν ευρετικοί αλγόριθμοι (Megiddo, Zemel and Hakimi, 1983).

Δεδομένων των περιορισμών που αναφέρθηκαν παραπάνω και προσθέτοντας σαν παραμέτρους τις:

$R$  : ως τη μέγιστη απόσταση που μπορεί να υπάρχει μεταξύ ενός κόμβου ζήτησης και μιας εγκατάστασης και

$M_i = \{j \mid r_{ij} \leq R\}$  το σύνολο όλων των υποψήφιας μονάδων  $j$  που η απόσταση τους από τους κόμβους  $i$  είναι μικρότερη της μέγιστης απόστασης  $R$

Το MCLP μπορεί να τροποποιηθεί προσθέτοντας τον παρακάτω περιορισμό:

$$\sum_{j \in M_i} x_j \geq 1, \quad i \in D \quad (2.8)$$

Δηλαδή, θα εγκατασταθεί τουλάχιστον μια μονάδα  $j$  που ανήκει στο σύνολο  $M_i$ .

### 3.1.3 P-center problem

Από τα πιο γνωστά NP – hard προβλήματα χωροθέτησης είναι το  $p$  - center πρόβλημα. Το μοντέλο επίλυσης του, έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση της μέγιστης απόστασης μεταξύ κάθε κόμβου ζήτησης και της κοντινότερης μονάδας προσφοράς. Βασική προϋπόθεση αποτελεί πως ο αριθμός των εγκαταστάσεων που θα τοποθετηθούν είναι προκαθορισμένος και ισούται με  $p$ . Έως σήμερα δεν έχει βρεθεί κάποιος αρκετά ακριβής και ευρετικός τρόπος επίλυσης προβλημάτων πολλών μεταβλητών (Hakimi S.L, 1964).

Για το βασικό μοντέλο  $p$  – center έχουν αναπτυχθεί ορισμένες παραλλαγές από τις οποίες ξεχωρίζουν οι “vertex”  $p$  – center problem και το “absolute”  $p$  – center problem. Το πρώτο, περιορίζει το σύνολο των υποψήφιων θέσεων χωροθέτησης στους κόμβους δικτύου, ενώ το δεύτερο επιτρέπει την χωροθέτηση των εγκαταστάσεων σε οποιοδήποτε σημείο κατά το μήκος των τόξων του δικτύου. Τα δύο προαναφερθέντα μοντέλα μπορούν να είναι είτε σταθμισμένα είτε όχι. Αυτό σημαίνει πως σε ένα μη σταθμισμένο μοντέλο όλοι οι κόμβοι ζήτησης αντιμετωπίζονται με ίση βαρύτητα, ενώ σε ένα σταθμισμένο υπάρχουν συντελεστές βαρύτητας οι οποίοι σχετίζονται με την ζήτηση των κόμβων.

Με δεδομένα όλα τα παραπάνω η μοντελοποίηση του  $p$  – center problem είναι η παρακάτω:

#### Παράμετροι

Οι παράμετροι των παραπάνω προβλημάτων.

#### Μεταβλητές

$W$  : ως τη μέγιστη απόσταση που μπορεί να υπάρχει μεταξύ ενός κόμβου ζήτησης και μιας εγκατάσταση

$y_{ij}$  : Δυαδική μεταβλητή απόφασης η οποία παίρνει την τιμή 1 στην περίπτωση που η ζήτηση του κόμβου  $i$  ανατίθεται να καλυφθεί από την εγκατάσταση  $j$ , και 0 αν όχι.

Και οι μεταβλητές που παρουσιάστηκαν παραπάνω.

#### Αντικειμενική συνάρτηση

Minimize  $W$

(2.9)



### Περιορισμοί

$$\sum_j x_j = n, \quad \forall j \in P \quad (2.6)$$

$$\sum_j y_{ij} = 1, \quad \forall i \in D \text{ και } \forall j \in P \quad (2.10)$$

$$y_{ij} - x_j \leq 0, \quad \forall i \in D \text{ και } \forall j \in P \quad (2.11)$$

$$W - \sum_j d_i r_{ij} y_{ij} \geq 0, \quad \forall i \in D \text{ και } \forall j \in P \quad (2.12)$$

$$x_j \in \{0,1\}, \quad \forall j \in P \quad (2.3)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in D \text{ και } \forall j \in P \quad (2.13)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση της συνολικής μέγιστης απόστασης σταθμισμένη ως προς τη ζήτηση κάθε κόμβου ζήτησης και της κοντινότερης μονάδας με δυνατότητα εξυπηρέτησης. Ο περιορισμός (2.6) σχολιάστηκε παραπάνω. Ο περιορισμός (2.10) εξασφαλίζει πως κάθε κόμβος θα πρέπει να ανατεθεί σε μια ακριβώς εγκατάσταση. Ακόμα, ο (2.11) περιορίζει τις αναθέσεις των κόμβων ζήτησης μόνο σε εγκαταστάσεις που έχουν δυνατότητα εξυπηρέτησης. Επίσης, ο περιορισμός (2.12) ορίζει το χαμηλότερο όριο της μέγιστης σταθμισμένης απόστασης σε σχέση με τη ζήτηση, η οποία ελαχιστοποιείται. Ο περιορισμός χωροθέτησης (2.3) σχολιάστηκε παραπάνω. Τέλος, ο περιορισμός (2.13) εξασφαλίζει ότι η ζήτηση σε έναν κόμβο μπορεί να ανατεθεί σε μόνο μια εγκατάσταση (Hakimi S.L, 1964).

#### 3.1.4 P-dispersion problem

Μέχρι στιγμής, όσα προαναφέρθηκαν αφορούν την ελαχιστοποίηση της απόστασης μεταξύ των νέων μονάδων εγκατάστασης και των κόμβων ζήτησης. Αντιθέτως το p – dispersion problem διαφέρει από αυτά, πρώτον γιατί αφορά την απόσταση μεταξύ των νέων εγκαταστάσεων και δεύτερον ο στόχος τους είναι η μεγιστοποίηση της ελάχιστης απόστασης μεταξύ κάθε ζεύγους εγκαταστάσεων.

Για την μοντελοποίηση αυτού του προβλήματος θα χρησιμοποιηθούν οι παράμετροι και οι μεταβλητές των παραπάνω αλλά και οι:

**Παράμετρος S** : μια μεγάλη σταθερά

**Μεταβλητή  $T$**  : η ελάχιστη απόσταση μεταξύ κάθε ζεύγους εγκαταστάσεων

Αντικειμενική συνάρτηση

$$\text{Maximize } T \tag{2.14}$$

Περιορισμοί

$$\sum_j x_j = n, \quad \forall j \in P \tag{2.6}$$

$$T + (S - r_{ij})Z_i + (S - r_{ij})x_j \leq 2S - r_{ij}, \quad \forall i, j \in P, i < j \tag{2.15}$$

$$x_j \in \{0,1\}, \quad \forall j \in P \tag{2.3}$$

Στόχος της αντικειμενικής είναι η μεγιστοποίηση της απόστασης ανάμεσα στις δύο πλησιέστερες εγκαταστάσεις. Οι περιορισμοί (2.6) και (2.3) αναφέρθηκαν σε παραπάνω μοντέλο. Τέλος, με τον περιορισμό (2.15) ορίζεται ο ελάχιστος διαχωρισμός μεταξύ κάθε ζεύγους μονάδων που θα εγκατασταθούν. Αξίζει να σημειωθεί πως αν ο  $x_i$  ή ο  $x_j$  είναι μηδέν, ο περιορισμός δεν είναι δεσμευτικός. Ωστόσο αν και οι δυο είναι ίσοι με το 1, τότε ο περιορισμός είναι ίσος με το  $T \leq r_{ij}$ . Με αποτέλεσμα, η μεγιστοποίηση του  $T$  να αναγκάσει τη μικρότερη απόσταση ανάμεσα στις μονάδες να γίνει όσο το δυνατό μεγαλύτερη.

### 3.2 Total or average distance models – Μοντέλα συνολικής ή μέσης απόστασης

Υπάρχουν περιπτώσεις προβλημάτων χωροθέτησης που ο βασικός στόχος σχετίζεται με την συνολική απόσταση μεταξύ των εγκαταστάσεων και των κόμβων ζήτησης αντί με την ελαχιστοποίηση της μέγιστης απόστασης που αναφέρθηκε παραπάνω. Παράδειγμα θα μπορούσε να αποτελέσει η χωροθέτηση Κέντρων Εξυπηρέτησης Πελατών (ΚΕΠ) στην περιφέρεια της Αττικής με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται η συνολική απόσταση που έχουν να διανύσουν οι πολίτες για να φτάσουν στο πιο κοντινό κέντρο. Ενώ ένα παράδειγμα στον ιδιωτικό τομέα θα μπορούσε να είναι η τοποθέτηση μονάδων παραγωγής. Τα μοντέλα συνολικής ή μέσης απόστασης θεωρούνται αρκετά αποτελεσματικότερα σε σχέση τα μοντέλα ελαχιστοποίησης της μέγιστης απόστασης.

### 3.2.1 P-median problem

Ένα κλασικό μοντέλο αυτής της κατηγορίας προβλημάτων είναι το p-median problem (Hakimi, 1964). Το μοντέλο αυτό εντοπίζει τις τοποθεσίες των p εγκαταστάσεων προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η συνολική απόσταση σταθμισμένη ως προς τη ζήτηση των κόμβων που καλούνται να καλύψουν οι εγκαταστάσεις που αυτού έχουν ανατεθεί (Hakimi, 1965).

Η μοντελοποίηση του μοντέλου είναι η παρακάτω:

#### Παράμετροι και Μεταβλητές

Αναφέρθηκαν παραπάνω.

#### Αντικειμενική Συνάρτηση

$$\text{Minimize } \sum_i \sum_j d_{ij} r_{ij} y_{ij} \quad (2.16)$$

#### Περιορισμοί

$$\sum_j x_j = n, \quad \forall j \in P \quad (2.6)$$

$$\sum_j y_{ij} = 1, \quad \forall i \in D \text{ και } \forall j \in P \quad (2.10)$$

$$y_{ij} - x_j \leq 0, \quad \forall i \in D \text{ και } \forall j \in P \quad (2.11)$$

$$x_j \in \{0,1\}, \quad \forall j \in P \quad (2.3)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in D \text{ και } \forall j \in P \quad (2.13)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση της συνολικής απόστασης σταθμισμένη ως προς τη ζήτηση. Αξίζει να σημειωθεί πως όλοι οι περιορισμοί είναι ακριβώς ίδιοι με αυτούς που διατυπώθηκαν στο p-center πρόβλημα. Συμπερασματικά, η παραπάνω μοντελοποίηση ελαχιστοποιεί τη μέση απόσταση μεταξύ των εγκαταστάσεων και των κόμβων ζήτησης (Toregas and ReVelle, 1972). Ακόμα, σύμφωνα με την βιβλιογραφία, όπως στο p-center

πρόβλημα έτσι και στο p-median υπάρχει τρόπος επίλυσης σε πολυωνυμικό χρόνο για σταθερές τιμές p, αλλά για μεταβλητές τιμές του θεωρείται NP-hard (Garey, 1979).

### 3.2.2 Fixed charge location problem

Στο p-median μοντέλο γίνονται τρεις βασικές παραδοχές που τις περισσότερες φορές δεν είναι κατάλληλες για ορισμένα σενάρια χωροθέτησης. Αρχικά, υποθέτει πως τα σταθερά κόστη για την χωροθέτηση μιας μονάδας προσφοράς είναι ίδια. Ακόμα, θεωρεί πως οι εγκαταστάσεις που πρόκειται να χωροθετηθούν δεν διαθέτουν την παραγωγική ικανότητα σε σχέση με την ζήτηση που μπορούν να εξυπηρετήσουν το οποίο στην βιβλιογραφία αναφέρεται ως «uncapacitated» πρόβλημα. Τέλος, υποθέτει πως ο αριθμός των εγκαταστάσεων που θα χωροθετηθούν είναι γνωστός εκ των προτέρων (a priori).

Οι τρεις παραπάνω υποθέσεις «χαλαρώνουν» στο fixed charge location problem (FCLP) διότι στόχος του είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους μεταφοράς και εγκατάστασης. Το FCLP ορίζει το βέλτιστο αριθμό μονάδων εγκατάστασης και την χωροθέτησή τους, καθώς επίσης σε ποιους κόμβους ζήτησης θα ανατεθεί κάθε μονάδα. Ακόμα, γνωρίζοντας πως οι εγκαταστάσεις έχουν την ικανότητα παραγωγής, οι κόμβοι ζήτησης μπορούν να ανατεθούν στην κοντινότερη εγκατάσταση, όπως στα προηγούμενα μοντέλα.

Η μοντελοποίηση του FCLP είναι η παρακάτω:

#### Παράμετροι και Μεταβλητές

Συμπεριλαμβανομένων των δεδομένων που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα μοντέλα προστίθενται οι εξής παράμετροι και μεταβλητές:

$c_j$ : το σταθερό κόστος χωροθέτησης μιας μονάδας σε μια υποψήφια θέση j

$g_j$ : η χωρητικότητα μιας εγκατάστασης στην υποψήφια θέση j

$k$ : μοναδιαίο κόστος ζήτησης ανά μονάδα απόστασης

#### Αντικειμενική Συνάρτηση

$$\text{Minimize } \sum_j c_j x_j + k \sum_i \sum_j d_i r_{ij} y_{ij}, \forall i \in D \text{ και } \forall j \in P \quad (2.17)$$

### Περιορισμοί

$$\sum_j y_{ij} = 1, \forall i \in D \text{ και } \forall j \in P \quad (2.10)$$

$$y_{ij} - x_j \leq 0, \forall i \in D \text{ και } \forall j \in P \quad (2.11)$$

$$\sum_j d_i y_{ij} - g_j x_j \leq 0, \forall i \in D \text{ και } \forall j \in P \quad (2.18)$$

$$x_j \in \{0,1\}, \forall j \in P \quad (2.3)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\}, \forall i \in D \text{ και } \forall j \in P \quad (2.13)$$

Στόχος της αντικειμενικής συνάρτησης στο πρόβλημα του σταθερού κόστους (2.17) είναι η ελαχιστοποίηση στο άθροισμα του κόστους εγκατάστασης μονάδων προσφοράς και του συνολικού κόστους μετακίνησης. Πιο συγκεκριμένα, το δεύτερο μέρος της αντικειμενικής συνάρτησης αναφέρεται σε απόσταση σταθμισμένη ως προς την ζήτηση. Ακόμα, ο περιορισμός (2.18) βάζει όριο στην συνολική ζήτηση που θα ανατεθεί σε μια μονάδα προσφοράς να μην υπερβεί τη χωρητικότητά της. Η λειτουργία των υπόλοιπων περιορισμών είναι παρόμοια με τα προαναφερθέντα προβλήματα. Επίσης με την χαλάρωση του περιορισμού (2.13), δίνεται η δυνατότητα σε έναν κόμβο ζήτησης να εξυπηρετείται από πολλές εγκαταστάσεις προσφοράς (Balinski, 1965).

Ο περιορισμός (2.19) αναγκάζει τη ζήτηση να ανατεθεί μόνο σε εγκαταστάσεις με δυνατότητα εξυπηρέτησης, γι' αυτό ο περιορισμός (2.11) δεν είναι απαραίτητος στην διαμόρφωση αυτή. Επίσης, ο περιορισμός (2.13) ορίζει πως όλη η ζήτηση ενός κόμβου θα πρέπει να ανατεθεί σε μια εγκατάσταση. Επιπλέον, όπως έγινε αναφορά σε προηγούμενο πρόβλημα, η ζήτηση μπορεί να ικανοποιείται από μια μονάδα η οποία δεν είναι αναγκαία η πλησιέστερη της διότι οι μονάδες προσφοράς διαθέτουν και παραγωγική ικανότητα. Τέλος, αν ο περιορισμός (2.18) δεν συμπεριληφθεί, τότε το μοντέλο μετατρέπεται σε uncapacitated fixed charge location problem και η ζήτηση κάθε κόμβου μπορεί να καλυφθεί πλήρως από την κοντινότερη σε αυτή εγκατάσταση (Silva and De La Figuera, 2007).

### 3.2.3 Hub location problem

Ένα πεδίο το οποίο τα τελευταία χρόνια έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον αρκετών ερευνητών που ασχολούνται με την μελέτη των facility location προβλημάτων είναι τα hub location problems (HLP). Στόχος αυτών των προβλημάτων είναι ο εντοπισμός ενός συνόλου πλήρως διασυνδεδεμένων εγκαταστάσεων που ονομάζονται ενδιάμεσοι κόμβοι, οι οποίοι χρησιμεύουν για την μεταφόρτωση, εναλλαγή κυκλοφορίας και διασύνδεση μεταξύ καθορισμένων προελεύσεων και προορισμών. Μια θετική ροή φορτίου ή πληροφορίας σχετίζεται με κάθε ζεύγος προέλευσης-προορισμού η οποία χαρακτηρίζεται με ένα μέγεθος όπως η απόσταση, ο χρόνος ή το κόστος. Στο μοντέλο των HLP οι μετακινήσεις μεταξύ μονάδων προσφοράς και κόμβων ζήτησης πραγματοποιούνται συνήθως μεταξύ ενός ή δύο ενδιάμεσων συνδέσεων (Campbell, 1994). Αρκετά μοντέλα έχουν διατυπωθεί για την επίλυση τέτοιου είδους προβλημάτων. Στην παρούσα ενότητα θα αναλυθεί η μοντελοποίηση του p-hub location problem.

#### Παράμετροι

$N_i = \{j \mid r_{ij} < L_c\}$  το σύνολο όλων των υποψήφιων τοποθεσιών που μπορούν να καλύψουν τη ζήτηση στο σημείο  $i$

$f_{ij}$ : ροή μεταξύ των εγκαταστάσεων  $i$  και των κόμβων ζήτησης  $j$

$q_{ij}$ : μοναδιαίο κόστος μεταφοράς μεταξύ κόμβων  $i$  και  $j$

$\alpha$ : παράγοντας έκπτωσης για τις μεταφορές μεταξύ των κόμβων,  $0 < \alpha < 1$

#### Μεταβλητές

$X_j$ : Δυαδική μεταβλητή απόφασης για την εγκατάσταση στη θέση  $j$ , 1 στην περίπτωση που κρίνεται θετικά η χωροθέτηση στη θέση  $j$  και 0 αν όχι

$y_{ij}$ : Δυαδική μεταβλητή απόφασης η οποία παίρνει την τιμή 1 στην περίπτωση που η ζήτηση του κόμβου  $i$  ανατίθεται να καλυφθεί από την εγκατάσταση  $j$

### Αντικειμενική συνάρτηση

$$\text{Minimize } \sum_i \sum_j f_{ij} \left( \sum_k q_{ik} y_{ik} + \sum_m q_{jm} y_{jm} + \alpha \sum_k \sum_k q_{km} y_{ik} y_{jm} \right) \quad (2.20)$$

### Περιορισμοί

$$\sum_j x_j = n, \quad \forall j \in N \quad (2.6)$$

$$\sum_j y_{ij} = 1, \quad \forall i \in D \text{ και } \forall j \in P \quad (2.10)$$

$$y_{ij} - x_j \leq 0, \quad \forall i \in D \text{ και } \forall j \in P \quad (2.11)$$

$$x_j \in \{0,1\}, \quad \forall j \in P \quad (2.3)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in D \text{ και } \forall j \in P \quad (2.13)$$

Στόχος της αντικειμενικής συνάρτησης (2.20) του HLP μοντέλου είναι η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος από τα εξής κόστη:

1. Κόστος μετακίνησης από το κόμβο προέλευσης στον ενδιάμεσο κόμβο
2. Κόστος μετακίνησης από τον ενδιάμεσο κόμβο στον κόμβο προορισμού
3. Κόστος μετακίνησης μεταξύ των ενδιάμεσων κόμβο

Το μοντέλο υποθέτει πως οι ροές οποιουδήποτε ζευγαριού εγκατάστασης-κόμβου ζήτησης θα περάσουν μέσω ενός ενδιάμεσου κόμβου (hub). Οι περιορισμοί (2.6) και (2.13) είναι ίδιοι με εκείνους του p-median προβλήματος. Επίσης ο περιορισμός (2.10) εξασφαλίζει πως κάθε κόμβος προορισμού πρέπει να ανατεθεί σε ακριβώς ένα hub. Όμως, στην περίπτωση που ένας κόμβος προορισμού έχει ιδιαίτερα μεγάλες ανάγκες κάλυψης ζήτησης, ο περιορισμός (2.10) μπορεί να χαλαρώσει έτσι ώστε να μπορεί να εξυπηρετηθεί άμεσα από δύο ή περισσότερους κόμβους προσφοράς.

Πριν την εξήγηση του παράγοντα έκπτωσης  $\alpha$  είναι σημαντικό να γίνει αναφορά στις ποικίλες παραλλαγές των HLPs. Γενικά, υπάρχουν ορισμένες διαφορές μεταξύ τους, όπως ο αριθμός των hubs τα οποία θα εγκατασταθούν, ο τρόπος που αυτά συνδέονται μεταξύ τους, ο τρόπος που οι κόμβοι που δεν είναι hubs διασυνδέονται με εκείνους που είναι hubs, ανάλογα με την

χωρητικότητα των hubs και πολλές άλλες. Πιο συγκεκριμένα, οι τέσσερις παραλλαγές που παρουσιάστηκαν στην μελέτη του Campbell το 1992 είναι οι εξής:

- Το p-hub location problem
- Το p-hub median problem
- Το uncapacitated hub location problem
- Το p-hub center problem
- Το hub covering problem

Όλα τα μοντέλα υποστηρίζουν τρεις βασικές παραδοχές. Αρχικά όλα τα hubs συνδέονται μεταξύ τους, δηλαδή το δίκτυο είναι συνεχές. Ανάλογα του όγκου μεταφοράς μεταξύ των τόξων, δημιουργούνται οικονομίες κλίμακας οι οποίες καθορίζονται από τον παράγοντα έκπτωσης  $\alpha$ ,  $0 < \alpha < 1$ , ο οποίος διαμορφώνει το κόστος μεταφοράς των ρών όλων των ζευγών κόμβων. Η δεύτερη κοινή παραδοχή είναι πως ο παράγοντας έκπτωσης είναι ανεξάρτητος από την ποσότητα ροής που αποστέλλεται μεταξύ ενός ζεύγους κόμβων και είναι ίδιος σε όλα τα τόξα ροής. Τρίτον, όλες οι ροές μεταξύ των κόμβων πρέπει να περάσουν απαραίτητα από τουλάχιστον ένα hub (Mirzaghafour, 2013).

Ακόμη και ένα μεσαίου μεγέθους HLP είναι αρκετά δύσκολο να επιλυθεί με τον βέλτιστο τρόπο. Για αυτό, το 1996 προτάθηκαν ορισμένοι ευρετικοί αλγόριθμοι από τους Ernst & Krishnamoorthy για την αντιμετώπιση τέτοιου είδους προβλημάτων

### 3.2.4 The maxisum location problem

Σε αντίθεση με τα μοντέλα μέσης απόστασης που αναφέρθηκαν παραπάνω, τα οποία υποθέτουν πως το ζητούμενο είναι η χωροθέτηση εγκαταστάσεων όσο το δυνατό πλησιέστερα στην ζήτηση, το maxisum location problem (MLP) έχει ως στόχο την τοποθέτηση μονάδων μακριά από τους κόμβους ζήτησης. Παραδείγματος χάρη, μια περιφέρεια της χώρας έχει στόχο την χωροθέτηση «ανεπιθύμητων» εγκαταστάσεων όπως εργοστάσια παραγωγής ενέργειας, χώροι συγκέντρωσης απορριμμάτων κ.α. να είναι όσο το δυνατό πιο απομακρυσμένα από τις κατοικίες των πολιτών (κόμβοι ζήτησης).

Το MLP αναζητά τις τοποθεσίες η εγκαταστάσεων προκειμένου η συνολική απόσταση, η οποία είναι σταθμισμένη ως προς τη ζήτηση μεταξύ των κόμβων ζήτησης και των μονάδων που έχουν



ανατεθεί, να είναι η μέγιστη. Η μοντελοποίηση του προβλήματος είναι όμοια με εκείνη του  $p$  – median problem με δύο σημαντικές διαφορές οι οποίες θα αναφερθούν μετά την διατύπωση της.

### Παράμετροι και Μεταβλητές

Αναφέρθηκαν στα παραπάνω μοντέλα.

### Αντικειμενική συνάρτηση

$$\text{Maximize } \sum_i \sum_j d_i r_{ij} y_{ij} \quad (2.21)$$

### Περιορισμοί

$$\sum_j x_j = n, \quad \forall j \in P \quad (2.6)$$

$$\sum_j y_{ij} = 1, \quad \forall i \in D \text{ και } \forall j \in P \quad (2.10)$$

$$y_{ij} - x_j \leq 0, \quad \forall i \in D \text{ και } \forall j \in P \quad (2.11)$$

$$\sum_{k=1}^m y_{i(k)i} - x_{(m)i} \geq 0, \quad \forall i \in D \text{ και } m=1, \dots, N-1 \quad (2.22)$$

$$x_j \in \{0,1\}, \quad \forall j \in P \quad (2.3)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in D \text{ και } \forall j \in P \quad (2.13)$$

Η πρώτη διαφορά, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, είναι ότι η αντικειμενική συνάρτηση έχει ως στόχο την μεγιστοποίηση της συνολικής απόστασης σταθμισμένη ως προς τη ζήτηση, και όχι την ελαχιστοποίησή της όπως στο  $p$  – median πρόβλημα. Επίσης η αντικειμενική συνάρτηση υποχρεώνει τη ζήτηση να ανατεθεί στη πιο απομακρυσμένη εγκατάσταση. Ακόμα με τον περιορισμό (2.22) επιβεβαιώνεται πως οι απαιτήσεις της ζήτησης ανατίθενται στη κοντινότερη μονάδα εγκατάστασης. Ο  $(k)_i$  είναι ο δείκτης  $k$  πιο απομακρυσμένης υποψήφιας θέσης τοποθέτησης από τον κόμβο ζήτησης  $i$ . Τέλος, ο περιορισμός αναφέρει ότι αν η  $m$  κοντινότερη εγκατάσταση στο κόμβο ζήτησης  $i$  είναι ανοιχτή, τότε η ζήτηση του κόμβου  $i$  θα πρέπει να ανατεθεί σε αυτή την μονάδα ή σε μια πλησιέστερη εγκατάσταση.

## Κεφάλαιο 4 – Μεθοδολογία

### 4.1 Περιγραφή του προβλήματος και μοντελοποίηση

Η οργάνωση και η υλοποίηση του σχεδίου για την εμβολιαστική κάλυψη του πληθυσμού κατά του COVID-19, είναι ίσως η μεγαλύτερη πρόκληση που έχει αντιμετωπίσει η ελληνική κυβέρνηση τα τελευταία χρόνια σε επίπεδο εφοδιαστικής αλυσίδας. Σύμφωνα με την παρουσίαση Εθνικού Σχεδίου εμβολιαστικής κάλυψης για COVID-19 (Υπουργείο Υγείας, 2020) χίλια δεκαοχτώ (1018) εμβολιαστικά κέντρα σε όλη την επικράτεια θα διανέμουν το εμβόλιο στους πολίτες. Δεδομένων των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών της χώρας μας και της κατανομής του πληθυσμού της, τα εμβόλια θα αποθηκεύονται σε πέντε (5) εγκεκριμένες αποθήκες που πληρούν όλα τα απαραίτητα πρωτόκολλα πιστοποίησης. Είναι εύκολα αντιληπτό, πως η αποτελεσματική διαχείριση όλων των επιπέδων της αλυσίδας εφοδιασμού κάτω από τις ιδιαίτερες συνθήκες της πανδημίας, σε συνδυασμό με την ανάγκη για άμεση λειτουργία του συστήματος εφοδιασμού, αποτελεί αρκετά περίπλοκο αντικείμενο μελέτης και χρήζει ζωτική σημασία η ανάλυση του.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, θα προσεγγίσουμε το σύστημα εμβολιασμού της Υγειονομικής περιφέρειας Αττικής ως Hub Location Problem, υποδεικνύοντας ποιες είναι οι ιδανικότερες θέσεις τοποθέτησης των δύο (2) χώρων αποθήκευσης του εμβολίου που θα προμηθεύουν τα ογδόντα έξι (86) εμβολιαστικά κέντρα. Θα υποθέσουμε πως ο αρχικός κόμβος προέλευσης των εμβολίων είναι το αεροδρόμιο Ελευθέριος Βενιζέλος, όπου τα εμβόλια θα φθάσουν από το εξωτερικό μέσω αερομεταφοράς, από το οποίο είναι απαραίτητο να μεταφερθούν σε ένα από τα δύο (2) κέντρα αποθήκευσης πριν εφοδιάσουν τα κέντρα εμβολιασμού.

Πιο συγκεκριμένα, ορίζεται το δίκτυο  $H$  το οποίο περιλαμβάνει 6 κόμβους,  $(1, \dots, 6)$  οι οποίοι αποτελούν το σύνολο των πιθανών εγκαταστάσεων που μπορούν να λειτουργήσουν σαν hub (κέντρο αποθήκευσης). Το σύνολο αυτό διαιρείται σε δύο υποσύνολα για τις ανάγκες του προβλήματος, το πρώτο σύνολο  $k$  όπως και το δεύτερο σύνολο  $l$  περιλαμβάνουν όλα τα hubs και δημιουργήθηκαν με στόχο να συμπεριληφθούν στο μοντέλο οι ενδοδιακινήσεις μεταξύ των αποθηκών.

Στην συνέχεια, ορίζεται το δίκτυο  $N$  το οποίο περιλαμβάνει όλους του κόμβους οι οποίοι δεν είναι πιθανά hubs.

Αναλυτικότερα, αρχικός κόμβος  $i$  ή κόμβος 0, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ορίζεται ο κόμβος προέλευσης του εμβολίου δηλαδή το αεροδρόμιο Ελ. Βενιζέλος και ως  $j$  ο τελικός κόμβος ή κόμβος προορισμού δηλαδή το (κέντρο εμβολιασμού)  $j$  ( $1, \dots, 86$ ). Επιπλέον, οι μεταβλητές απόφασης για το αν θα εγκατασταθεί ένα hub σε μια από τις υποψήφιες θέσεις θέτονται οι δυαδικές μεταβλητές  $X_k$  και  $X_l$  με τιμή 1 αν η απόφαση είναι θετική για την εγκατάσταση στην αντίστοιχη θέση και 0 αν όχι.

Η ζητούμενη ποσότητα από τον κόμβο προέλευσης  $i$  στον κόμβο προορισμού  $j$  ορίζεται ως  $D_{ij}$ . Αν υπάρχει ροή από τον αρχικό κόμβο  $i$  στον τελικό κόμβο  $j$  μέσω του hub  $k$  και  $l$  ορίζεται με την δυαδική μεταβλητή ως  $F_{ij}^{kl}$ , με τιμή 1 αν η απόφαση είναι θετική για την ροή και 0 αν όχι. Επίσης,  $C_{ij}^{kl}$  θέτουμε το μοναδιαίο κόστος διακίνησης από τον κόμβο  $i$  στον κόμβο  $j$  μέσω των hubs. Επιπρόσθετα, το κόστος εγκατάστασης του κάθε υποψήφιου Hub ορίζεται ως  $I_k$  και  $I_l$ . Τέλος, σύμφωνα με την βιβλιογραφία σε θέματα που αφορούν Hub Location Problems, οι οικονομίες κλίμακας που δημιουργούνται αντιπροσωπεύονται από έναν παράγοντα έκπτωσης ο οποίος συμβολίζεται με  $\alpha$  και κυμαίνεται μεταξύ  $0 < \alpha < 1$ . Όσο οι οικονομίες κλίμακας βελτιώνονται τόσο ο παράγοντας  $\alpha$  μειώνεται. Η έκπτωση εφαρμόζεται σε όλες τις συνδεσιμότητες μεταξύ των κόμβων, ανεξάρτητα από το μέγεθος της μεταφερόμενης ποσότητας (ροής). Πιο συγκεκριμένα, το μοναδιαίο κόστος μεταφοράς υπολογίζεται ως  $C_{ij}^{kl} = C_{ik} + \alpha * C_{kl} + C_{lj}$  και υπολογίζει το κόστος από τον κόμβο  $i$  στον κόμβο  $j$  μέσω των σταθμών  $k$  και  $l$  (O'Kelly and Bryan, 1998).

Βασικός στόχος του παρόντος προβλήματος αποτελεί η επιλογή χωροθέτησης των αποθηκευτικών χώρων hubs με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους.

## 4.2 Μοντελοποίηση

Παραπάνω, αναφέρθηκαν οι μεταβλητές και οι συμβολισμοί τους, του προβλήματος που καλούμαστε να επιλύσουμε. Για την καλύτερη κατανόηση της μοντελοποίησης του προβλήματος, αναφέρονται συγκεντρωμένοι παρακάτω:

### Μεταβλητές

$F_{ij}^{kl}$  : Δυαδική μεταβλητή απόφασης που δείχνει αν υπάρχει ροή από τον αρχικό Κόμβο  $i$  στον τελικό κόμβο  $j$  διαμέσου των hubs  $k$  και  $l$

$X_k$  : Δυαδική μεταβλητή απόφασης για την εγκατάσταση του πιθανού hub στη θέση  $k$

$Y_l$  : Δυαδική μεταβλητή απόφασης για την εγκατάσταση του πιθανού hub στη θέση  $l$

### Παράμετροι

$H$  : Δίκτυο πιθανών εγκαταστάσεων hubs,  $h (1, \dots, 6)$

- $k$  : θέση του πρώτου hub
- $l$  : θέση του δεύτερου hub

$N$  : Δίκτυο non-hub κόμβων το οποίο περιλαμβάνει

- $i$  : Αρχικός κόμβος προέλευσης ή κόμβος 0, δηλαδή το αεροδρόμιο Ελ. Βενιζέλος
- $j$  : Τελικός κόμβος προορισμού,  $j (1, \dots, 86)$

$D_{ij}$  : Ζητούμενη ποσότητα μεταφοράς μεταξύ κόμβων  $i$  και  $j$

$C_{ij}^{kl}$  : Μεταφορικό κόστος από τον κόμβο  $i$  στον κόμβο  $j$  μεταξύ  $k$  και  $l$

$I_k$  : Κόστος εγκατάστασης του κάθε πιθανού hub  $k$

$I_l$  : Κόστος εγκατάστασης του κάθε πιθανού hub  $l$

$\alpha$  : παράγοντας έκπτωσης για μεταφορές μεταξύ των κόμβων

### Αντικειμενική συνάρτηση

$$\text{Minimize } \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l C_{ij}^{kl} \cdot D_{ij} \cdot F_{ij}^{kl} + \sum_k X_k \cdot I_k + \sum_l Y_l \cdot I_l \quad (4.1)$$

## Περιορισμοί

$$\sum_k \sum_l F_{ij}^{kl} = 1 \quad \forall i, j \quad (4.2)$$

$$F_{ij}^{kl} \leq X_k \quad \forall i, j, k \quad (4.3)$$

$$F_{ij}^{kl} \leq Y_l \quad \forall i, j, l \quad (4.4)$$

$$\sum_k X_k \cdot I_k \leq \sum_l Y_l \cdot I_l \quad (4.5)$$

$$\sum_k X_k = 1 \quad (4.6)$$

$$\sum_l Y_l = 1 \quad (4.7)$$

$$F_{ij}^{kl} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, k, l \quad (4.8)$$

$$X_k, Y_l \in \{0,1\} \quad \forall k, l \quad (4.9)$$

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η αντικειμενική συνάρτηση ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος το οποίο περιλαμβάνει το μεταφορικό κόστος των εμβολίων και το κόστος εγκατάστασης των δύο hubs από τα οποία θα διοχετεύονται τα εμβόλια στα κέντρα εμβολιασμού. Το πρώτο μέρος της αντικειμενικής συνάρτησης, αντικατοπτρίζει το κόστος μεταφοράς μεταξύ ενός non-hub κόμβου και του κόμβου προορισμού, μέσω του hub στο οποίο έχει ανατεθεί να το εφοδιάζει. Επίσης, είναι σημαντικό να διευκρινίσουμε πως υπολογίζεται το μοναδιαίο κόστος μεταφοράς  $C_{ij}$  διαμέσου των hubs λαμβάνοντας υπόψη τον παράγοντα έκπτωσης  $\alpha$ ,  $C_{ij}^{kl} = C_{ik} + \alpha * C_{kl} + C_{lj}$ . Στο δεύτερο μέρος και στο τρίτο μέρος παρουσιάζεται το συνολικό κόστος εγκατάστασης των υποψήφιων hubs. Με τον πρώτο περιορισμό διασφαλίζεται η σύνδεση του κάθε ζεύγους αρχικού και τελικού κόμβου  $(i, j)$  με ένα μόνο hub. Με τον δεύτερο και τον τρίτο περιορισμό εξασφαλίζεται πως θα υπάρξει ροή από τον αρχικό κόμβο προς τον τελικό αν οι κόμβοι  $k$  και  $l$  έχουν επιλεγεί για να λειτουργήσουν ως hub. Ο 4.6 και 4.7 περιορισμοί διασφαλίζουν πως θα επιλεγθούν από ένα hub από τα σύνολα πιθανών εγκαταστάσεων, ενώ ο περιορισμός 4.5 διασφαλίζει πως δεν θα επιλεγθεί το ίδιο hub από τα δύο σύνολα. Ο περιορισμός 4.8 εξασφαλίζει πως η ροή μεταξύ των συνδέσμων είναι θετική μέσω των hub  $k$  και  $l$  είναι δυαδική και παίρνει τιμή 0 ή 1. Τέλος, οι μεταβλητές απόφασης για την εγκατάσταση του κάθε πιθανού hub έχουν δυαδική μορφή και παίρνουν την τιμή 0 ή 1.

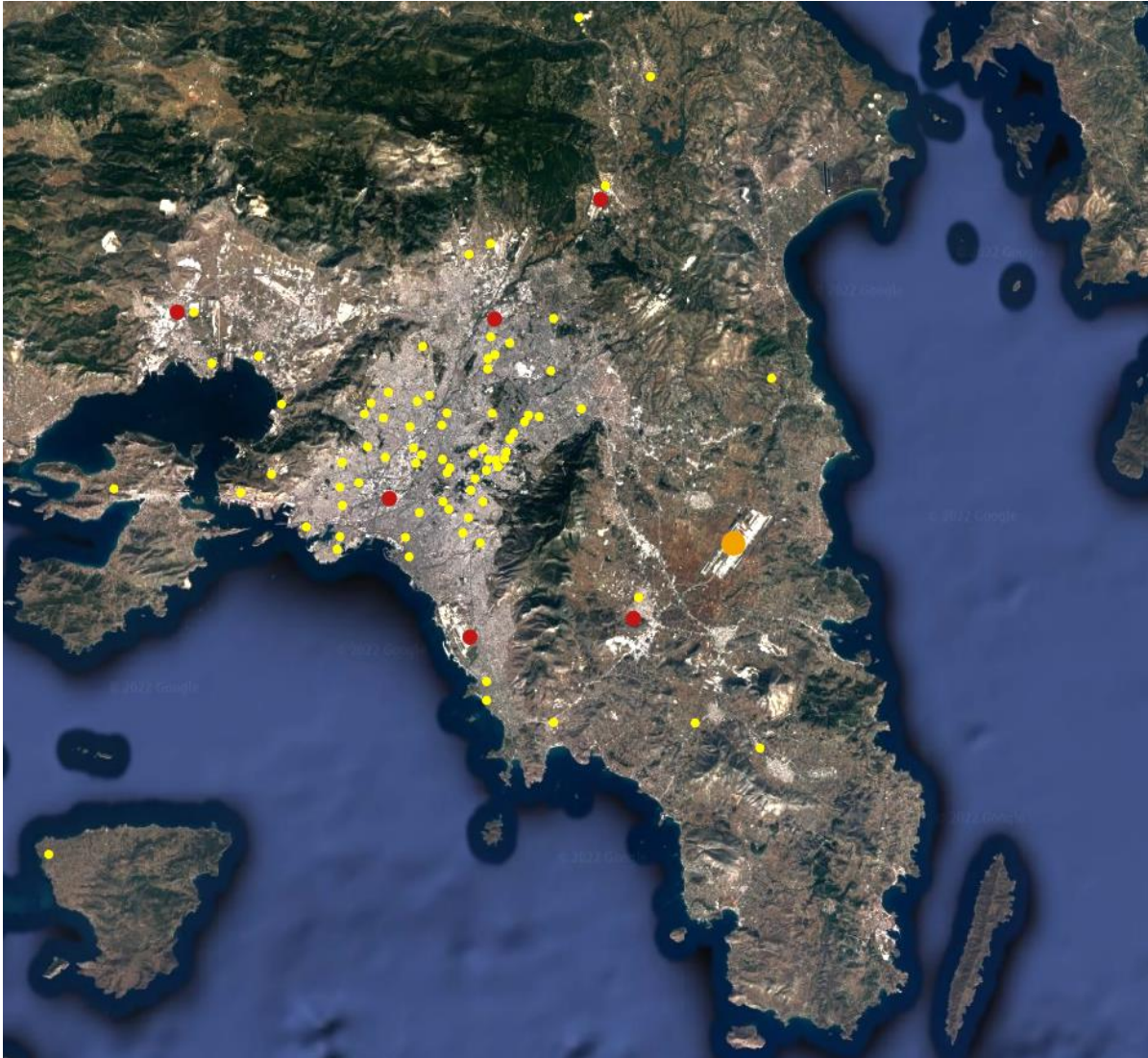
## Κεφάλαιο 5 – Υπολογιστικά αποτελέσματα

### 5.1 Παρουσίαση δεδομένων

Στη ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για να επιλυθεί το μοντέλο της παρούσας εργασίας.

Πιο αναλυτικά, οι έξι κόμβοι του δικτύου  $H$  που προαναφέρθηκαν στο κεφάλαιο της μοντελοποίησης, τοποθετήθηκαν σε σημεία της Αττικής τα οποία εξυπηρετούν διαχρονικά την εφοδιαστική αλυσίδα της πόλης και γενικότερα τον ελλαδικό χώρο. Αποθηκευτικοί χώροι στις περιοχές Ταύρος, Μάνδρα, Ελληνικό, Μεταμόρφωση, Κορωπί και Άγιος Στέφανος είναι οι ενδιάμεσοι κόμβοι που θα τροφοδοτήσουν με εμβόλια τα ογδόντα έξι εμβολιαστικά κέντρα του νομού. Η ροή των σκευασμάτων εμβολίων ξεκινά από τον αρχικό κόμβο, το αεροδρόμιο Ελευθέριος Βενιζέλος, συνεχίζει στις έξι πιθανές αποθήκες, και καταλήγει στους πολίτες μέσω των κέντρων εμβολιασμού.

Στον παρακάτω χάρτη απεικονίζονται οι τοποθεσίες των σημείων που προαναφέρθηκαν με διαφορετικούς χρωματισμούς. Με χρώμα κίτρινο παρουσιάζονται τα εμβολιαστικά κέντρα, με κόκκινο τα πιθανά κέντρα αποθήκευσης και με πορτοκαλί ο αρχικός κόμβος προέλευσης.



*Εικόνα 4 - Παρουσίαση δικτύου κόμβων στον νομό Αττικής.*

Δημιουργήθηκαν πλασματικά δεδομένα όπως η ζήτηση των εμβολιαστικών κέντρων, τα κόστη εγκατάστασης των αποθηκευτικών χώρων και το κόστος μεταφοράς εμβολίων τα οποία βοήθησαν στην λήψη αποτελεσμάτων και παρουσιάζονται στους παρακάτω.



Πίνακας 1 - Ζήτηση εμβολιαστικών κέντρων (τεμάχια εμβολίων)

Ζήτηση <i>Dij</i> (εμβόλια)		ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΟ ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΣ ΒΕΝΙΖΕΛΟΣ
		<i>i</i>
ΝΙΚΑΙΑΣ - ΑΓ.ΠΑΝΤΕΛΕΗΜΩΝ (1ο)	<i>j1</i>	54660
Γ.Ν.Π. ΤΖΑΝΕΙΟ (1ο)	<i>j2</i>	105059
ΓΝΔΑ "Η ΑΓΙΑ ΒΑΡΒΑΡΑ" (1ο)	<i>j3</i>	34247
ΩΝΑΣΕΙΟ ΚΑΡΔΙΟΧΕΙΡΟΥΡΓΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ (1ο)	<i>j4</i>	43599
Κ.Υ. ΚΑΜΙΝΙΩΝ	<i>j5</i>	6900
Κ.Υ. ΝΙΚΑΙΑΣ	<i>j6</i>	11500
Κ.Υ. ΠΕΙΡΑΙΑ	<i>j7</i>	18400
ΜΕΓΑ ΕΜΒΟΛΙΑΣΤΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ (2ο)	<i>j8</i>	201602
Κ.Υ. ΔΡΑΠΕΤΣΩΝΑΣ (2ο)	<i>j9</i>	8050
Κ.Υ. ΚΑΛΛΙΘΕΑΣ	<i>j10</i>	21850
Τ.Ι. Π. ΦΑΛΗΡΟΥ (2ο)	<i>j11</i>	8149
Κ.Υ. ΚΕΡΑΜΕΙΚΟΥ (2ο)	<i>j12</i>	14950
Κ.Υ. Ν.ΚΟΣΜΟΥ (2ο)	<i>j13</i>	17250
Κ.Υ. 1ο ΠΕΡΙΣΤΕΡΙΟΥ	<i>j14</i>	27600
Κ.Υ. ΑΙΓΑΛΕΩ	<i>j15</i>	39100
Κ.Υ. 2ο ΠΕΡΙΣΤΕΡΙΟΥ	<i>j16</i>	22540
Κ.Υ. ΧΑΙΔΑΡΙΟΥ (2ο)	<i>j17</i>	17825
Κ.Υ. ΑΓΙΟΥ ΙΕΡΟΘΕΟΥ (2ο)	<i>j18</i>	9200
Κ.Υ. ΙΛΙΟΥ (2ο)	<i>j19</i>	14950
Κ.Ε.Φ.Ο.Κ. ΛΕΝΟΡΜΑΝ (2ο)	<i>j20</i>	15049
Π.Γ.Ν. ΑΤΤΙΚΟΝ (1ο)	<i>j21</i>	79504
ΕΘΝΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	<i>j22</i>	54459
Κ.Υ. ΑΓΙΩΝ ΑΝΑΡΓΥΡΩΝ	<i>j23</i>	16905
ΝΟΣΟΚΟΜΕΙΟ ΘΕΙΑΣ ΠΡΟΝΟΙΑΣ «ΠΑΜΜΑΚΑΡΙΣΤΟΣ» (1ο)	<i>j24</i>	32738
Κ.Υ. ΠΕΡΑΜΑΤΟΣ (2ο)	<i>j25</i>	10051
Κ.Υ. 1ο ΣΑΛΑΜΙΝΑΣ	<i>j26</i>	37950
Κ.Υ. ΑΙΓΙΝΑΣ (1ο)	<i>j27</i>	17176
Γ.Ν. ΑΘΗΝΩΝ "ΕΥΑΓΓΕΛΙΣΜΟΣ"	<i>j28</i>	151547
Κ.Υ. Ν.ΚΟΣΜΟΥ (2ο)	<i>j29</i>	15615
Κ.Υ. ΑΘΗΝΑΣ (2ο)	<i>j30</i>	30873
Τ.Ι. ΥΜΗΤΤΟΥ (2ο)	<i>j31</i>	7949
Γ.Ν. ΜΑΙΕΥΤΗΡΙΟ «ΕΛΕΝΑ ΒΕΝΙΖΕΛΟΥ» (1ο)	<i>j32</i>	12491
ΠΑΘΟΛΟΓΙΚΟ ΝΟΣΟΚΟΜΕΙΟ ΑΘΗΝΩΝ «ΑΓΙΑ ΕΛΕΝΗ - ΣΠΗΛΙΟΠΟΥΛΕΙΟ» (1ο)	<i>j33</i>	18161
Γ.Ν. ΑΘΗΝΩΝ «ΑΛΕΞΑΝΔΡΑ» (1ο)	<i>j34</i>	99535
Κ.Υ. ΑΛΕΞΑΝΔΡΑΣ	<i>j35</i>	22149
Κ.Υ. ΠΑΓΚΡΑΤΙΟΥ (2ο)	<i>j36</i>	16887
ΕΛΛΗΝΙΚΟΣ ΕΡΥΘΡΟΣ ΣΤΑΥΡΟΣ - Γ.Ν. ΑΘΗΝΩΝ «ΚΟΡΓΙΑΛΕΝΕΙΟ-ΜΠΕΝΑΚΕΙΟ» (1ο)	<i>j37</i>	30949
Γ.Ν. ΝΟΣΗΜΑΤΩΝ ΘΩΡΑΚΟΣ ΑΘΗΝΩΝ "ΣΩΤΗΡΙΑ" (1ο)	<i>j38</i>	64064



Γ.Ν. ΠΑΙΔΩΝ ΑΘΗΝΑΣ "ΑΓΙΑ ΣΟΦΙΑ" (1ο)	j39	100204
Γ.Ν. ΑΘΗΝΩΝ «Η ΕΛΠΙΣ» (1ο)	j40	38603
Γ.Ν. ΑΘΗΝΩΝ «ΙΠΠΟΚΡΑΤΕΙΟ» (1ο)	j41	81979
Γ.Ν. ΠΑΙΔΩΝ ΑΘΗΝΑΣ "ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ & ΑΓΛΑΪΑ ΚΥΡΙΑΚΟΥ"	j42	124957
Γ.Ν. ΑΘΗΝΩΝ «ΛΑΙΚΟ» (1ο)	j43	125090
Γ.Ν. ΑΘΗΝΩΝ «Γ. ΓΕΝΝΗΜΑΤΑΣ» (1ο)	j44	163838
Κ.Υ. ΖΩΓΡΑΦΟΥ	j45	15047
Κ.Υ. ΠΛ.ΑΤΤΙΚΗΣ (2ο)	j46	7949
Κ.Υ. ΓΑΛΑΤΣΙΟΥ (2ο)	j47	20364
Κ.Υ. Ν.ΙΩΝΙΑΣ (2ο)	j48	20659
ΜΕΓΑ ΕΜΒΟΛΙΑΣΤΙΚΟ ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ	j49	318704
Κ.Υ. ΒΥΡΩΝΑ	j50	13071
Κ.Υ. ΗΛΙΟΥΠΟΛΗΣ	j51	30121
Κ.Υ. ΔΑΦΝΗΣ (2ο)	j52	18147
Κ.Υ. ΓΛΥΦΑΔΑΣ (2ο)	j53	18080
Γ.Ν. ΑΣΚΛΗΠΕΙΟ ΒΟΥΛΑΣ (1ο)	j54	61603
Κ.Υ. ΚΟΡΩΠΙΟΥ	j55	18165
Κ.Υ. ΒΑΡΗΣ	j56	10019
Κ.Υ. ΚΑΛΥΒΙΩΝ (2ο)	j57	20486
Κ.Υ. ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ & ΑΠΟΘΕΡΑΠΕΙΑΣ ΚΕΡΑΤΕΑΣ "Κ.ΠΡΙΦΤΗΣ"	j58	10424
Κ.Υ. ΑΓ.ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ	j59	15049
Κ.Υ. ΡΑΦΗΝΑΣ (2ο)	j60	13315
Τ.Ι. ΧΟΛΑΡΓΟΥ (2ο)	j61	10398
Γ.Ν. ΑΘΗΝΩΝ «ΣΙΣΜΑΝΟΓΛΕΙΟ» (1ο)	j62	91644
ΓΕΝΙΚΟ ΝΟΣΟΚΟΜΕΙΟ ΠΑΙΔΩΝ «ΠΑΙΔΩΝ ΠΕΝΤΕΛΗΣ» (1ο)	j63	87064
Κ.Υ. ΑΜΑΡΟΥΣΙΟΥ	j64	31913
Τ.Ι. ΒΡΙΛΗΣΣΙΩΝ (2ο)	j65	7949
Κ.Υ. ΧΑΛΑΝΔΡΙΟΥ (2ο)	j66	18159
Τ.Ι. ΝΕΟΥ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ	j67	15028
Γ.Ν. ΝΕΑΣ ΙΩΝΙΑΣ «ΚΩΝΣΤΑΝΤΟΠΟΥΛΕΙΟ»	j68	12494
ΚΕΝΤΡΟ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΡΑΥΜΑΤΙΩΝ - Γ.Ν. ΑΘΗΝΩΝ «ΚΑΤ» (1ο)	j69	17600
ΠΟΛΥΚΛΙΝΙΚΗ ΟΛΥΜΠΙΑΚΟΥ ΧΩΡΙΟΥ (2ο)	j70	49094
Τ.Ι. ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗΣ	j71	5394
Κ.Υ. ΑΓΙΟΥ ΣΤΕΦΑΝΟΥ	j72	22556
Κ.Υ. ΚΑΠΑΝΔΡΙΤΙΟΥ (2ο)	j73	30443
ΚΥ ΑΧΑΡΝΩΝ (2ο)	j74	9950
Κ.Υ. Ν.ΦΙΛΑΔΕΛΦΕΙΑΣ (2ο)	j75	18165
Κ.Υ. ΕΛΕΥΣΙΝΑΣ 1ο & 2ο	j76	15063
Κ.Υ. ΑΣΠΡΟΠΥΡΓΟΥ (2ο)	j77	22715
Γ.Ν. ΕΛΕΥΣΙΝΑΣ ΘΡΙΑΣΙΟ	j78	101170
Κ.Υ. ΜΕΓΑΡΩΝ 1ο - Κ.Υ. ΜΕΓΑΡΩΝ 2ο (ΣΥΣΤΕΓΑΖΟΝΤΑΙ) 2ο	j79	32957
ΚΕΝΤΡΟ ΔΙΑΓΝΩΣΗΣ & ΙΑΤΡΙΚΗΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ, ΑΘΗΝΑ	j80	3094
Τ.Ι. ΨΥΧΙΚΟΥ	j81	5407
ΔΙΚΑΣΤΙΚΕΣ ΦΥΛΑΚΕΣ ΚΟΡΥΔΑΛΛΟΥ	j82	2049
ΕΙΔΙΚΟ ΚΑΤΑΣΤΗΜΑ ΚΡΑΤΗΣΗΣ ΝΕΩΝ ΑΥΛΩΝΑΣ	j83	1504
ΚΕΝΤΡΟ ΦΙΛΟΞΕΝΙΑΣ ΠΡΟΣΦΥΓΩΝ ΣΚΑΡΑΜΑΓΚΑ	j84	5649

ΚΕΝΤΡΟ ΦΙΛΟΞΕΝΙΑΣ ΠΡΟΣΦΥΓΩΝ ΕΛΑΙΩΝΑ	j85	13315
ΚΕΝΤΡΟ ΦΙΛΟΞΕΝΙΑΣ ΠΡΟΣΦΥΓΩΝ ΣΧΙΣΤΟΥ	j86	10509

Πίνακας 2 - Κόστος εγκατάστασης αποθηκευτικών χώρων (€)

<b>Κόστος εγκατάστασης <math>I_k, I_l</math> (€)</b>		
ΤΑΥΡΟΣ	$k1, l1$	80000
ΜΑΝΔΡΑ	$k2, l2$	30000
ΕΛΛΗΝΙΚΟ	$k3, l3$	60000
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ	$k4, l4$	100000
ΚΟΡΩΠΙ	$k5, l5$	80000
ΆΓΙΟΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ	$k6, l6$	40000

Οι τρεις παρακάτω πίνακες παρουσιάζουν το μεταφορικό κόστος ανάμεσα στους κόμβους. Για τον υπολογισμό του κόστους, αρχικά έγινε καταγραφή της χιλιομετρικής απόστασης μεταξύ των κόμβων και στην συνέχεια ορίστηκε υποθετικά η τιμή μεταφοράς ανά μονάδα σκευάσματος εμβολίου ίση με 0,000004 €.

Πίνακας 3 - Κόστος μεταφοράς ανά εμβόλιο από αρχικό κόμβο σε αποθήκες (€/εμβόλιο)

<b>Μεταφορικό κόστος <math>C_{ik}, C_{il}</math> (€/εμβόλιο)</b>		ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΟ ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΣ ΒΕΝΙΖΕΛΟΣ
		$i$
ΤΑΥΡΟΣ	$k1, l1$	0,1496
ΜΑΝΔΡΑ	$k2, l2$	0,2132
ΕΛΛΗΝΙΚΟ	$k3, l3$	0,104
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ	$k4, l4$	0,134
ΚΟΡΩΠΙ	$k5, l5$	0,0368
ΆΓΙΟΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ	$k6, l6$	0,1428

Πίνακας 4 - Κόστος μεταφοράς ανά εμβόλιο στις ενδοδιακινήσεις των αποθηκών (€/εμβόλιο)

Μεταφορικό κόστος $C_{kl}$ (€/εμβόλιο)	ΤΑΥΡΟΣ		ΜΑΝΔΡΑ	ΕΛΛΗΝΙΚΟ	ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΚΟΡΩΠΙ	ΆΓΙΟΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ
	l1		l2	l3	l4	l5	l6
ΤΑΥΡΟΣ	k1	0	0,104	0,0552	0,0752	0,1408	0,1068
ΜΑΝΔΡΑ	k2	0,1048	0	0,1612	0,1068	0,2072	0,1384
ΕΛΛΗΝΙΚΟ	k3	0,0588	0,1612	0	0,126	0,078	0,1632
ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ	k4	0,0752	0,1104	0,1184	0	0,1272	0,0376
ΚΟΡΩΠΙ	k5	0,1364	0,2096	0,0784	0,1232	0	0,1368
ΆΓΙΟΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ	k6	0,1144	0,1496	0,1732	0,0464	0,1664	0

Πίνακας 5 - Κόστος μεταφοράς ανά εμβόλιο από αποθήκες σε εμβολιαστικά κέντρα (€/εμβόλιο)

Μεταφορικό κόστος $C_{kj}$ , $C_{lj}$ (€/εμβόλιο)	ΤΑΥΡΟΣ		ΜΑΝΔΡΑ	ΕΛΛΗΝΙΚΟ	ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ	ΚΟΡΩΠΙ	ΆΓΙΟΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ
	k1, l1		k2, l2	k3, l3	k4, l4	k5, l5	k6, l6
ΝΙΚΑΙΑΣ - ΑΓ. ΠΑΝΤΕΛΗΜΩΝ (1ο)	j1	0,0196	0,0996	0,0752	0,0656	0,1372	0,1096
Γ.Ν.Π. ΤΖΑΝΕΙΟ (1ο)	j2	0,0268	0,1236	0,07	0,0944	0,132	0,134
ΓΝΔΑ "Η ΑΓΙΑ ΒΑΡΒΑΡΑ" (1ο)	j3	0,0228	0,0748	0,0788	0,0612	0,1684	0,1052
ΩΝΑΣΕΙΟ ΚΑΡΔΙΟΧΕΙΡΟΥΡΓΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ (1ο)	j4	0,0196	0,1192	0,0476	0,0904	0,1096	0,138
Κ.Υ. ΚΑΜΙΝΙΩΝ	j5	0,0168	0,1004	0,0664	0,072	0,1284	0,1164
Κ.Υ. ΝΙΚΑΙΑΣ	j6	0,0196	0,0872	0,0804	0,0704	0,1424	0,1148
Κ.Υ. ΠΕΙΡΑΙΑ	j7	0,0212	0,1208	0,0672	0,0916	0,1292	0,1312
ΜΕΓΑ ΕΜΒΟΛΙΑΣΤΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΠΡΟΜΗΘΕΑΣ (2ο)	j8	0,084	0,1164	0,0816	0,0272	0,1024	0,0608
Κ.Υ. ΔΡΑΠΕΤΣΩΝΑΣ (2ο)	j9	0,0316	0,0876	0,0784	0,1028	0,1404	0,1424
Κ.Υ. ΚΑΛΛΙΘΕΑΣ	j10	0,014	0,1148	0,0468	0,086	0,118	0,1392
Τ.Ι. Π. ΦΑΛΗΡΟΥ (2ο)	j11	0,0228	0,1268	0,0404	0,0976	0,1024	0,1372

Κ.Υ. ΚΕΡΑΜΕΙΚΟΥ (2ο)	j12	0,012	0,0976	0,0576	0,0636	0,1368	0,1104
Κ.Υ. Ν.ΚΟΣΜΟΥ (2ο)	j13	0,0168	0,1108	0,0416	0,082	0,1324	0,144
Κ.Υ. 1ο ΠΕΡΙΣΤΕΡΙΟΥ	j14	0,032	0,0908	0,066	0,042	0,1448	0,0856
Κ.Υ. ΑΙΓΑΛΕΩ	j15	0,0228	0,0824	0,0704	0,0544	0,1408	0,098
Κ.Υ. 2ο ΠΕΡΙΣΤΕΡΙΟΥ	j16	0,0324	0,0836	0,0732	0,0572	0,1428	0,1012
Κ.Υ. ΧΑΙΔΑΡΙΟΥ (2ο)	j17	0,0352	0,0708	0,0792	0,0604	0,1464	0,1044
Κ.Υ. ΑΓΙΟΥ ΙΕΡΟΘΕΟΥ (2ο)	j18	0,0392	0,0804	0,0868	0,052	0,1524	0,0964
Κ.Υ. ΙΛΙΟΥ (2ο)	j19	0,0476	0,0936	0,0724	0,0452	0,1588	0,0872
Κ.Ε.Φ.Ο.Κ. ΛΕΝΟΡΜΑΝ (2ο)	j20	0,0212	0,09	0,0596	0,0492	0,142	0,0928
Π.Γ.Ν. ΑΤΤΙΚΟΝ (1ο)	j21	0,0408	0,072	0,0896	0,0656	0,1516	0,11
ΕΘΝΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	j22	0,0452	0,088	0,0816	0,0348	0,1648	0,074
Κ.Υ. ΑΓΙΩΝ ΑΝΑΡΓΥΡΩΝ	j23	0,0336	0,0948	0,0752	0,0416	0,1584	0,0908
ΝΟΣΟΚΟΜΕΙΟ ΘΕΙΑΣ ΠΡΟΝΟΙΑΣ «ΠΑΜΜΑΚΑΡΙΣΤΟΣ» (1ο)	j24	0,0336	0,1004	0,0648	0,038	0,1524	0,0816
Κ.Υ. ΠΕΡΑΜΑΤΟΣ (2ο)	j25	0,0384	0,0892	0,1056	0,1292	0,1584	0,1468
Κ.Υ. 1ο ΣΑΛΑΜΙΝΑΣ	j26	0,084	0,1144	0,1376	0,2056	0,192	0,1808
Κ.Υ. ΑΙΓΙΝΑΣ (1ο)	j27	0,1656	0,2344	0,2124	0,2368	0,2668	0,2764
Γ.Ν. ΑΘΗΝΩΝ "ΕΥΑΓΓΕΛΙΣΜΟΣ"	j28	0,0272	0,1056	0,048	0,0716	0,1076	0,11
Κ.Υ. Ν.ΚΟΣΜΟΥ (2ο)	j29	0,0168	0,1108	0,0416	0,082	0,1156	0,144
Κ.Υ. ΑΘΗΝΑΣ (2ο)	j30	0,0212	0,0992	0,0488	0,058	0,1272	0,1036
Τ.Ι. ΥΜΗΤΤΟΥ (2ο)	j31	0,0268	0,1204	0,0368	0,0804	0,0964	0,12
Γ.Ν. ΜΑΙΕΥΤΗΡΙΟ «ΕΛΕΝΑ ΒΕΝΙΖΕΛΟΥ» (1ο)	j32	0,0312	0,1088	0,0536	0,0692	0,1132	0,1128
ΠΑΘΟΛΟΓΙΚΟ ΝΟΣΟΚΟΜΕΙΟ ΑΘΗΝΩΝ «ΑΓΙΑ ΕΛΕΝΗ - ΣΠΗΛΙΟΠΟΥΛΕΙΟ» (1ο)	j33	0,0324	0,112	0,0516	0,0696	0,1112	0,1156
Γ.Ν. ΑΘΗΝΩΝ «ΑΛΕΞΑΝΔΡΑ» (1ο)	j34	0,0312	0,1112	0,0504	0,0724	0,11	0,1152
Κ.Υ. ΑΛΕΞΑΝΔΡΑΣ	j35	0,0292	0,1064	0,0552	0,07	0,118	0,1104
Κ.Υ. ΠΑΓΚΡΑΤΙΟΥ (2ο)	j36	0,0292	0,1124	0,0384	0,0768	0,102	0,1164

ΕΛΛΗΝΙΚΟΣ ΕΡΥΘΡΟΣ ΣΤΑΥΡΟΣ - Γ.Ν. ΑΘΗΝΩΝ «ΚΟΡΓΙΑΛΕΝΕΙΟ- ΜΠΕΝΑΚΕΙΟ» (1ο)	j37	0,036	0,1132	0,0572	0,056	0,1168	0,0828
Γ.Ν. ΝΟΣΗΜΑΤΩΝ ΘΩΡΑΚΟΣ ΑΘΗΝΩΝ "ΣΩΤΗΡΙΑ" (1ο)	j38	0,0428	0,1364	0,0612	0,0544	0,1216	0,0812
Γ.Ν. ΠΑΙΔΩΝ ΑΘΗΝΑΣ "ΑΓΙΑ ΣΟΦΙΑ" (1ο)	j39	0,0348	0,1124	0,056	0,07	0,1152	0,1164
Γ.Ν. ΑΘΗΝΩΝ «Η ΕΛΠΙΣ» (1ο)	j40	0,0308	0,1084	0,0548	0,07	0,114	0,1124
Γ.Ν. ΑΘΗΝΩΝ «ΙΠΠΟΚΡΑΤΕΙΟ» (1ο)	j41	0,0336	0,112	0,0528	0,0724	0,1124	0,1168
Γ.Ν. ΠΑΙΔΩΝ ΑΘΗΝΑΣ "ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ & ΑΓΛΑΪΑ ΚΥΡΙΑΚΟΥ"	j42	0,0348	0,112	0,0556	0,0696	0,1152	0,116
Γ.Ν. ΑΘΗΝΩΝ «ΛΑΙΚΟ» (1ο)	j43	0,0348	0,112	0,0544	0,0712	0,1132	0,1192
Γ.Ν. ΑΘΗΝΩΝ «Γ. ΓΕΝΝΗΜΑΤΑΣ» (1ο)	j44	0,042	0,1372	0,0628	0,0556	0,1224	0,0816
Κ.Υ. ΖΩΓΡΑΦΟΥ	j45	0,0336	0,1156	0,0528	0,08	0,1144	0,1176
Κ.Υ. ΠΛ.ΑΤΤΙΚΗΣ (2ο)	j46	0,0272	0,0952	0,0636	0,0436	0,1528	0,0872
Κ.Υ. ΓΑΛΑΤΣΙΟΥ (2ο)	j47	0,0428	0,1104	0,07	0,0508	0,162	0,0892
Κ.Υ. Ν.ΙΩΝΙΑΣ (2ο)	j48	0,0484	0,1168	0,088	0,0204	0,1748	0,0688
ΜΕΓΑ ΕΜΒΟΛΙΑΣΤΙΚΟ ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΕΡΙΣΤΕΡΙ	j49	0,0352	0,0868	0,0828	0,0548	0,1468	0,0944
Κ.Υ. ΒΥΡΩΝΑ	j50	0,0332	0,1172	0,0412	0,0816	0,102	0,1212
Κ.Υ. ΗΛΙΟΥΠΟΛΗΣ	j51	0,0352	0,1288	0,0284	0,0884	0,088	0,1744
Κ.Υ. ΔΑΦΝΗΣ (2ο)	j52	0,026	0,1172	0,032	0,0816	0,0916	0,1484
Κ.Υ. ΓΛΥΦΑΔΑΣ (2ο)	j53	0,0692	0,1688	0,0152	0,1396	0,054	0,18
Γ.Ν. ΑΣΚΛΗΠΕΙΟ ΒΟΥΛΑΣ (1ο)	j54	0,0756	0,1692	0,0192	0,14	0,0496	0,1796
Κ.Υ. ΚΟΡΩΠΙΟΥ	j55	0,132	0,1936	0,0852	0,1188	0,0276	0,1364
Κ.Υ. ΒΑΡΗΣ	j56	0,0892	0,1908	0,0348	0,1616	0,0296	0,2012
Κ.Υ. ΚΑΛΥΒΙΩΝ (2ο)	j57	0,1356	0,2308	0,0812	0,1564	0,0448	0,264
Κ.Υ. ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ & ΑΠΟΘΕΡΑΠΕΙΑΣ	j58	0,2076	0,2396	0,1216	0,1652	0,068	0,2912

<b>ΚΕΡΑΤΕΑΣ "Κ.ΠΡΙΦΤΗΣ"</b>							
<b>Κ.Υ. ΑΓ.ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ</b>	<i>j59</i>	0,0624	0,1436	0,0816	0,0692	0,0876	0,0828
<b>Κ.Υ. ΡΑΦΗΝΑΣ (2ο)</b>	<i>j60</i>	0,14	0,1964	0,1408	0,1216	0,1024	0,132
<b>Τ.Ι. ΧΟΛΑΡΓΟΥ (2ο)</b>	<i>j61</i>	0,0484	0,1452	0,0688	0,058	0,0968	0,0776
<b>Γ.Ν. ΑΘΗΝΩΝ «ΣΙΣΜΑΝΟΓΛΕΙΟ» (1ο)</b>	<i>j62</i>	0,076	0,1272	0,0968	0,0312	0,0996	0,0628
<b>ΓΕΝΙΚΟ ΝΟΣΟΚΟΜΕΙΟ ΠΑΙΔΩΝ «ΠΑΙΔΩΝ ΠΕΝΤΕΛΗΣ» (1ο)</b>	<i>j63</i>	0,092	0,1436	0,1064	0,0616	0,1008	0,0756
<b>Κ.Υ. ΑΜΑΡΟΥΣΙΟΥ</b>	<i>j64</i>	0,088	0,12	0,0896	0,02	0,1264	0,0544
<b>Τ.Ι. ΒΡΙΛΗΣΣΙΩΝ (2ο)</b>	<i>j65</i>	0,076	0,1276	0,0976	0,0392	0,0976	0,0648
<b>Κ.Υ. ΧΑΛΑΝΔΡΙΟΥ (2ο)</b>	<i>j66</i>	0,0596	0,128	0,0792	0,0396	0,0948	0,0696
<b>Τ.Ι. ΝΕΟΥ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ</b>	<i>j67</i>	0,068	0,1	0,104	0,0116	0,1796	0,058
<b>Γ.Ν. ΝΕΑΣ ΙΩΝΙΑΣ «ΚΩΝΣΤΑΝΤΟΠΟΥΛ ΕΙΟ»</b>	<i>j68</i>	0,0624	0,1204	0,0892	0,0236	0,1704	0,0704
<b>ΚΕΝΤΡΟ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΡΑΥΜΑΤΙΩΝ - Γ.Ν. ΑΘΗΝΩΝ «ΚΑΤ» (1ο)</b>	<i>j69</i>	0,0928	0,1248	0,0948	0,0192	0,1308	0,046
<b>ΠΟΛΥΚΛΙΝΙΚΗ ΟΛΥΜΠΙΑΚΟΥ ΧΩΡΙΟΥ (2ο)</b>	<i>j70</i>	0,1	0,1316	0,1544	0,0312	0,2088	0,058
<b>Τ.Ι. ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗΣ</b>	<i>j71</i>	0,0648	0,1056	0,1092	0,0096	0,1756	0,0568
<b>Κ.Υ. ΑΓΙΟΥ ΣΤΕΦΑΝΟΥ</b>	<i>j72</i>	0,1124	0,144	0,1688	0,0432	0,2232	0,0076
<b>Κ.Υ. ΚΑΠΑΝΔΡΙΤΙΟΥ (2ο)</b>	<i>j73</i>	0,1528	0,1844	0,2092	0,0836	0,2636	0,048
<b>ΚΥ ΑΧΑΡΝΩΝ (2ο)</b>	<i>j74</i>	0,094	0,1256	0,1448	0,0252	0,2052	0,054
<b>Κ.Υ. Ν.ΦΙΛΑΔΕΛΦΕΙΑΣ (2ο)</b>	<i>j75</i>	0,046	0,1024	0,0964	0,0196	0,1628	0,0628
<b>Κ.Υ. ΕΛΕΥΣΙΝΑΣ 1ο &amp; 2ο</b>	<i>j76</i>	0,0908	0,0212	0,1472	0,108	0,2016	0,148
<b>Κ.Υ. ΑΣΠΡΟΠΥΡΓΟΥ (2ο)</b>	<i>j77</i>	0,074	0,0312	0,1304	0,092	0,1852	0,1316
<b>Γ.Ν. ΕΛΕΥΣΙΝΑΣ ΘΡΙΑΣΙΟ</b>	<i>j78</i>	0,102	0,0092	0,1584	0,1004	0,2128	0,14

<b>Κ.Υ. ΜΕΓΑΡΩΝ 1ο - Κ.Υ. ΜΕΓΑΡΩΝ 2ο (ΣΥΣΤΕΓΑΖΟΝΤΑΙ) 2ο</b>	<i>j79</i>	0,1676	0,0832	0,224	0,1744	0,2784	0,214
<b>ΚΕΝΤΡΟ ΔΙΑΓΝΩΣΗΣ &amp; ΙΑΤΡΙΚΗΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ, ΑΘΗΝΑ</b>	<i>j80</i>	0,0172	0,0948	0,0524	0,0548	0,1308	0,0992
<b>Τ.Ι. ΨΥΧΙΚΟΥ</b>	<i>j81</i>	0,0444	0,1344	0,066	0,0524	0,1028	0,0792
<b>ΔΙΚΑΣΤΙΚΕΣ ΦΥΛΑΚΕΣ ΚΟΡΥΔΑΛΛΟΥ</b>	<i>j82</i>	0,0216	0,0824	0,08	0,07	0,1344	0,1144
<b>ΕΙΔΙΚΟ ΚΑΤΑΣΤΗΜΑ ΚΡΑΤΗΣΗΣ ΝΕΩΝ ΑΥΛΩΝΑΣ</b>	<i>j83</i>	0,1992	0,2156	0,2556	0,13	0,31	0,0964
<b>ΚΕΝΤΡΟ ΦΙΛΟΞΕΝΙΑΣ ΠΡΟΣ ΦΥΓΩΝ ΣΚΑΡΑΜΑΓΚΑ</b>	<i>j84</i>	0,0616	0,0456	0,118	0,0912	0,1732	0,1308
<b>ΚΕΝΤΡΟ ΦΙΛΟΞΕΝΙΑΣ ΠΡΟΣ ΦΥΓΩΝ ΕΛΑΙΩΝΑ</b>	<i>j85</i>	0,012	0,09	0,0624	0,0576	0,1356	0,102
<b>ΚΕΝΤΡΟ ΦΙΛΟΞΕΝΙΑΣ ΠΡΟΣ ΦΥΓΩΝ ΣΧΙΣΤΟΥ</b>	<i>j86</i>	0,0456	0,0648	0,1072	0,1044	0,1616	0,1416

## 5.2 Μοντελοποίηση προβλήματος στο IBM ILOG CPLEX Optimization Studio

### 5.2.1 Παρουσίαση IBM ILOG CPLEX Optimization Studio

Στην επιχειρησιακή έρευνα χρησιμοποιούνται κυρίως μαθηματικές τεχνικές βελτιστοποίησης όπως η γραμμική ή ακέραια γραμμική βελτιστοποίηση στα πλαίσια λήψης αποφάσεων. Η χρήση αυτών των τεχνικών μπορεί να δημιουργήσει μοντέλα τα οποία έχουν την ικανότητα να απλοποιούν ένα πραγματικό πρόβλημα. Ανάλογα με την πολυπλοκότητα του προβλήματος, η δομημένη μορφή ενός μοντέλου απλοποιεί την πραγματικότητα, διότι είναι πολύ δύσκολη η λήψη μιας απόφασης χωρίς την συλλογή όλων των δεδομένων, τον καθορισμό των στόχων και την τοποθέτηση τους σε μια απλή εξίσωση. Συγκεκριμένα, η υψηλή υπολογιστική ισχύς, η μεγάλη χωρητικότητα αποθήκευσης και η διαθεσιμότητα λεπτομερών δεδομένων των προγραμμάτων στα οποία ένας χρήστης μπορεί να δημιουργήσει λεπτομερή μοντέλα, είναι πιο αναγκαία από ποτέ.

Πολλές εταιρείες χρησιμοποιούν προγράμματα βελτιστοποίησης για την δημιουργία περίπλοκων μοντέλων τα οποία τα προηγούμενα χρόνια υπήρχαν μόνο σε ερευνητική κλίμακα. Στο πλαίσιο της βελτιστοποίησης, για να λυθεί ένα επιχειρηματικό πρόβλημα ή αλλιώς ένα πρόβλημα προγραμματισμού, υπάρχουν δύο στάδια ανάλυσης. Αρχικά, το πρόβλημα πρέπει να μετατραπεί σε μαθηματική μορφή. Το μοντέλο που προκύπτει πρέπει να είναι διαμορφωμένο με τέτοιο τρόπο ώστε να περιέχει μεταβλητές απόφασης. Στην συνέχεια, οι καλύτερες δυνατές ή και βέλτιστες τιμές των μεταβλητών απόφασης καθορίζονται με την χρήση κατάλληλων μεθόδων που λαμβάνουν υπόψη τους τον στόχο (λύση προβλήματος).

Ενώ στο παρελθόν η έρευνα επικεντρωνόταν στην ατομική ανάπτυξη μεθόδων λύσεων που ήταν προσαρμοσμένες σε εξατομικευμένα προβλήματα, τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη της τεχνολογία και των ηλεκτρονικών υπολογιστών πολλά ισχυρά πακέτα λογισμικού είναι διαθέσιμα τόσο για την μοντελοποίηση όσο και την επίλυση προβλημάτων σχεδιασμού και λήψης αποφάσεων.



Το IBM ILOG CPLEX Optimization Studio είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο πακέτο λογισμικού για την μοντελοποίηση και την επίλυση προβλημάτων γραμμικής και ακέραιας γραμμικής βελτιστοποίησης. Το σημείο εκκίνησης για την ανάπτυξη του CPLEX Optimization Studio ήταν η μέθοδος επίλυσης CPLEX ή ο solver, ο οποίος αναπτύσσεται διαρκώς από τα τέλη του 1980 και έπειτα. Ιδιαίτερα τα τελευταία είκοσι χρόνια, ο χρόνος εκτέλεσης των μοντέλων έχει μειωθεί σε τεράστιο βαθμό και αυτό έχει αποτελέσει τεράστιο πλεονέκτημα στην χρήση τους. Ένας υπολογιστής το 1998 χρειαζόταν περισσότερες από είκοσι τέσσερις ώρες για την επίλυση ενός μοντέλου, ενώ το ίδιο μοντέλο ένας σύγχρονος υπολογιστής χρειάζεται μόλις πέντε δεύτερα. Η βάση του λογισμικού που ανέπτυξε η IBM είναι η γλώσσα μοντελοποίησης OPL (Optimization Programming Language) που εφηύρε και ανέπτυξε ο Pascal Van Hentenryck την δεκαετία του 1990. Η OPL επιτρέπει την ανάπτυξη μοντέλων σε περιγραφική μορφή η οποία παρόλο που είναι διατυπωμένη σε μαθηματική μορφή, είναι αρκετά προσιτή σε χρήστες που δεν έχουν άριστη εξοικείωση με τα μαθηματικά. Για αυτό τον λόγο, εκτός από ακαδημαϊκούς σκοπούς, χρησιμοποιείται πλέον από πολλές εταιρείες αντιμετωπίζοντας ζητήματα σε τομείς όπως η εφοδιαστική αλυσίδα, το μάρκετινγκ και η παραγωγή (Stefan N. et al., 2022).

### 5.2.2 Δόμηση σεναρίου

Η βέλτιστη λύση στο σενάριο βρέθηκε μέσω του προγράμματος IBM ILOG CPLEX Optimization Studio. Σε αυτή την υποενοότητα θα παρουσιαστεί ο τρόπος που δομήθηκε το σενάριο στο λογισμικό.

Αρχικά, δημιουργήθηκε το project το οποίο περιλάμβανε τρεις καρτέλες, την καρτέλα μοντελοποίησης, των δεδομένων και των ρυθμίσεων. Στην πρώτη καρτέλα κωδικοποιήθηκε το σενάριο με την τελική του μορφή να αναγράφεται παρακάτω.

```
//Sets
```

```
int max_i=...; range set_i=1..max_i; // Node i (Airport El.Venizelos)
int max_k=...; range set_k=1..max_k; // First group of potential hubs
int max_l=...; range set_l=1..max_l; // Second group of potential hubs
int max_j=...; range set_j=1..max_j; // Vaccination centers
```

```

//Parameters

float Demand[set_i][set_j]=...; // Demand of covid-19 vaccine
float Cost_ik[set_i][set_k]=...; // Transportation cost from node i to first hub (k)
float Cost_kl[set_k][set_l]=...; // Transportation cost from first hub (k) to second hub (l)
float Cost_lj[set_l][set_j]=...; // Transportation cost from second hub (l) to vaccination center (j)
float Instal_cost_k[set_k]=...; // Installation cost of first hub (k)
float Instal_cost_l[set_l]=...; // Installation cost of second hub (l)
float a=...;

//Decision Variables

dvar boolean x[set_k]; // Binary variable for choice of hub k
dvar boolean y[set_l]; // Binary variable for choice of hub l
dvar boolean F[set_i][set_j][set_k][set_l]; // Binary variable for the flow from node 0 to vaccination center
through hub k and hub l

//Objective function

dexpr float totalcost= sum(i in set_i, j in set_j, k in set_k, l in set_l) (Cost_ik[i][k] + a * Cost_kl[k][l] +
Cost_lj[l][j]) * Demand[i][j] * F[i][j][k][l] +
    sum(k in set_k) x[k] * Instal_cost_k[k] +
    sum(l in set_l) y[l] * Instal_cost_l[l];

minimize totalcost;

//Constraints

subject to{

constraint1:
forall (i in set_i)
  forall (j in set_j)
    sum (k in set_k)
      sum (l in set_l) F[i][j][k][l]==1;

constraint2:
forall (i in set_i, j in set_j, k in set_k, l in set_l)
  forall (k in set_k) x[k] >= F[i][j][k][l];

constraint3:

forall (i in set_i, j in set_j, k in set_k, l in set_l)
  forall (l in set_l) y[l] >= F[i][j][k][l];

constraint4:
sum (k in set_k) x[k]==1;

```

```

constraint5:
sum (l in set_l) y[l]==1;
}

```

Στην δεύτερη καρτέλα παρουσιάστηκαν τα δεδομένα του σεναρίου τα οποία αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Λόγω του μεγάλου όγκου τους, ενοποιήθηκε το αρχείο Excel στο οποίο βρίσκονταν συγκεντρωτικά οι πίνακες, με το λογισμικό της IBM, από το οποίο έγινε η άντληση τους.

```

max_i=1; // Node i
max_k=6; // The number of potential hubs of first group
max_l=6; // The number of potential hubs of second group
max_j=86; // The number of vaccination centers

SheetConnection excelsheet("D:\\VaccineProject\\VacProjectExcelData.xlsx");

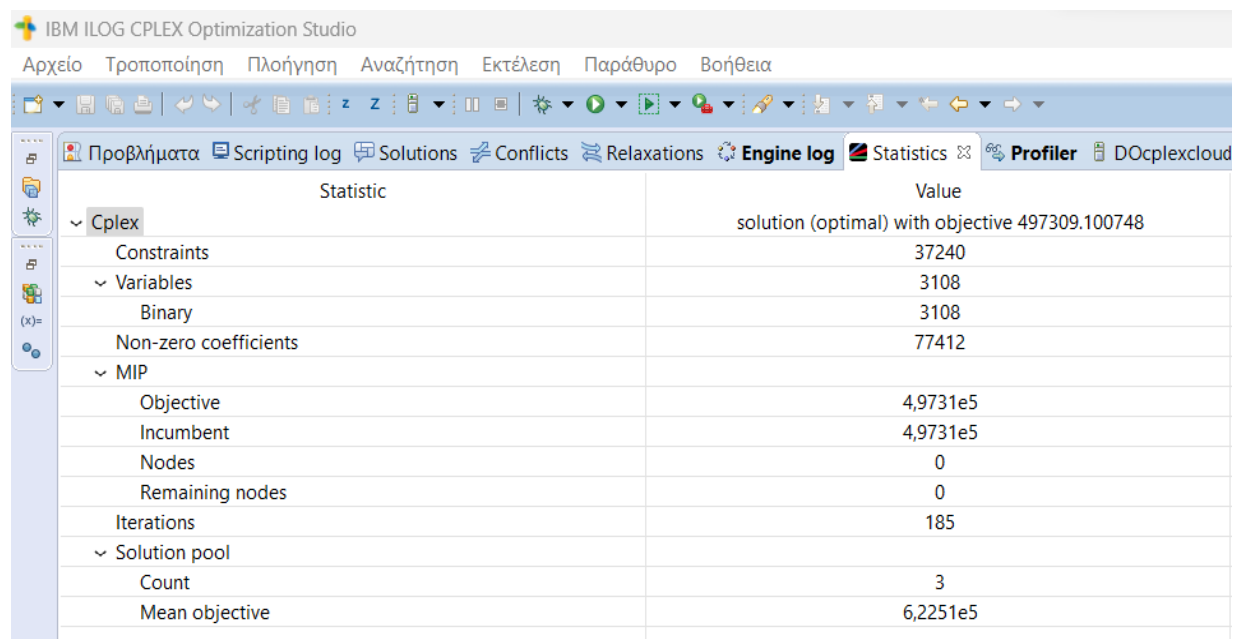
Demand from SheetRead(excelsheet,"Data1!C3:C88");
Cost_ik from SheetRead(excelsheet,"Data1!G3:G8");
Cost_kl from SheetRead(excelsheet,"Data2!C3:H8");
Cost_lj from SheetRead(excelsheet,"Data2!C13:C18");
Instal_cost_k from SheetRead(excelsheet,"Data2!K2:K7");
Instal_cost_l from SheetRead(excelsheet,"Data2!O2:O7");
a=0.1; // Discount factor

```

Τέλος η εκτέλεση του μοντέλου έγινε με τις υπάρχουσες ρυθμίσεις του προγράμματος και δεν έγιναν επιπλέον παραμετροποιήσεις.

### 5.3 Αριθμητικά αποτελέσματα

Στην πρώτη εκτέλεση του προβλήματος, η βέλτιστη λύση βρέθηκε σε 2,48 δευτερόλεπτα λαμβάνοντας υπόψιν 37.240 περιορισμούς και 3.108 μεταβλητές (εικόνα 5). Με τον παράγοντα έκπτωσης να είναι ίσος με  $\alpha = 0,1$ , η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης έγινε με την επιλογή των hubs που βρίσκονται στις τοποθεσίες Κορωπί και Ταύρος, με το συνολικό κόστος να ανέρχεται στα 497.309,10 € (πίνακας 6).



Statistic	Value
solution (optimal) with objective 497309.100748	
Constraints	37240
Variables	3108
Binary	3108
Non-zero coefficients	77412
MIP	
Objective	4,9731e5
Incumbent	4,9731e5
Nodes	0
Remaining nodes	0
Iterations	185
Solution pool	
Count	3
Mean objective	6,2251e5

Εικόνα 5 - Στατιστικά στοιχεία πρώτης εκτέλεσης στο λογισμικό της IBM

Πίνακας 6 – Αριθμητικά αποτελέσματα πρώτης εκτέλεσης

Βέλτιστη λύση ( $\alpha=0,1$ )	Κορωπί - Ταύρος	Ποσοστό επί του Συνολικό κόστους
Μεταφορικό κόστος	337.309,1 €	67,83 %
Κόστος εγκατάστασης	160.000 €	32,17 %
Συνολικό κόστος	497.309,10 €	

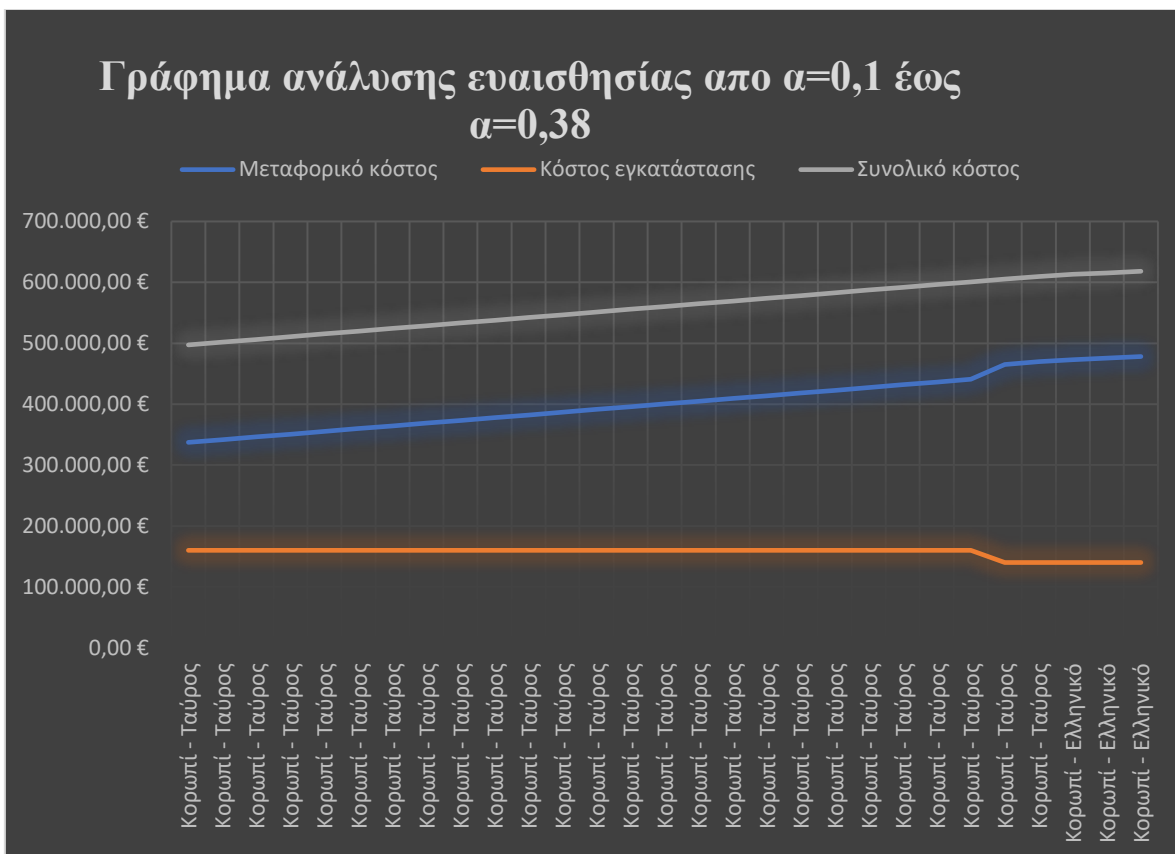
Παρατηρώντας τα αποτελέσματα της πρώτης εκτέλεσης του μοντέλου γίνεται αντιληπτό πως μεταφορικό κόστος, το οποίο επηρεάζεται άμεσα από την τοποθεσία που βρίσκονται οι πιθανοί κόμβοι αποθήκευσης, συμβάλει περισσότερο από 67% στην λήψη της απόφασής. Παρόλα αυτά, το κόστος που χρειάζεται ένας ενδιάμεσος κόμβος για να εγκατασταθεί αποτελεί αρκετά σημαντικό ποσοστό επί του συνόλου και αγγίζει το 33%. Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως υπάρχουν επιλογές με χαμηλότερα κόστη εγκατάστασης οι οποίες όμως δεν επιλέγονται σαν λύσεις διότι το μεταφορικό κόστος αυξάνεται τόσο που ωθεί την συνάρτηση συνολικού κόστους σε υψηλότερη τιμή.

#### 5.4 Ανάλυση ευαισθησίας (Sensitivity analysis)

Οι τιμές των παραμέτρων σε πραγματικά προβλήματα είναι εκτιμήσεις, το οποίο σημαίνει πως υπάρχει περιθώριο λάθους και απόκλισης από τα πραγματικά δεδομένα. Για τον λόγο αυτό, μετά τον εντοπισμό της λύσης σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, είναι πολύ σημαντικό να ακολουθείται ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity analysis). Η ανάλυση αυτή μελετά τις μεταβολές τις βέλτιστης λύσης όταν μεταβάλλεται η τιμή μιας ανεξάρτητης μεταβλητής εντός ορισμένων ορίων. Όσο μικρότερη είναι ευαισθησία, τόσο μεγαλύτερη βεβαιότητα υπάρχει πως η λύση είναι η βέλτιστη (Γκόγκος Χρήστος & Γεωργία Φουτσιτζή, 2018).

##### 5.4.1 Σενάριο αύξησης παράγοντα έκπτωσης $\alpha$

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια, μέσω το εκπτώτικου παράγοντα  $\alpha$  δημιουργούνται οικονομίες κλίμακας. Στην πρώτη εκτέλεση του μοντέλου, στον συντελεστή  $\alpha$  ορίστηκε η τιμή 0,1 όπως συνηθίζει να δίνεται σε αντίστοιχα Hub location problems. Όμως, η παρούσα εργασία προσπαθεί να επιλύσει ένα ζήτημα υγειονομικής κρίσης, σε πραγματικές συνθήκες οι αρμόδιοι οι οποίοι καλούνται να πάρουν αποφάσεις, έχουν ως βασικότερο μέλημά την καλύτερη εξυπηρέτηση του κοινωνικού συνόλου και στην συνέχεια την μείωση του κόστους. Έτσι, έγινε μία ανάλυση ευαισθησίας του παράγοντα έκπτωσης  $\alpha$  προκειμένου βρεθεί το σημείο που αλλάζει η βέλτιστη επιλογή του συνδυασμού κόμβων. Στην Εικόνα 6 παρουσιάζεται το γράφημα της ανάλυσης κόστους από  $\alpha=0,1$  έως  $\alpha=0,38$ .



Εικόνα 6 - Γράφημα κόστους μετά την μεταβολή του εκπτώτικου παράγοντα  $\alpha$  από 0,1 έως 0,38

#### 5.4.2 Σενάριο αλλαγής ζήτησης για εμβολιασμό

Ένα σενάριο το οποίο θα ήταν ενδιαφέρον για μελέτη είναι η αλλαγή στην ζήτηση για εμβολιασμό. Ανατρέχοντας πίσω στο 2009 σε ένα προηγούμενο περιστατικό υγειονομικής κρίσης που μια μετάλλαξη της γρίπης των χοίρων μεταφέρθηκε στον άνθρωπο και προκάλεσε την πανδημία γρίπης H1N1, παρατηρείται πως στην Ελλάδα το ποσοστό των πολιτών που εμβολιάστηκε κατά του ιού ήταν συντριπτικά μικρότερο από τον εμβολιασμό κατά του Covid-19. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου σε περιπτώσεις μικρότερης ζήτησης για εμβολιασμό (πίνακας 7).

Πίνακας 7 - Αποτελέσματα με μείωση ζήτησης

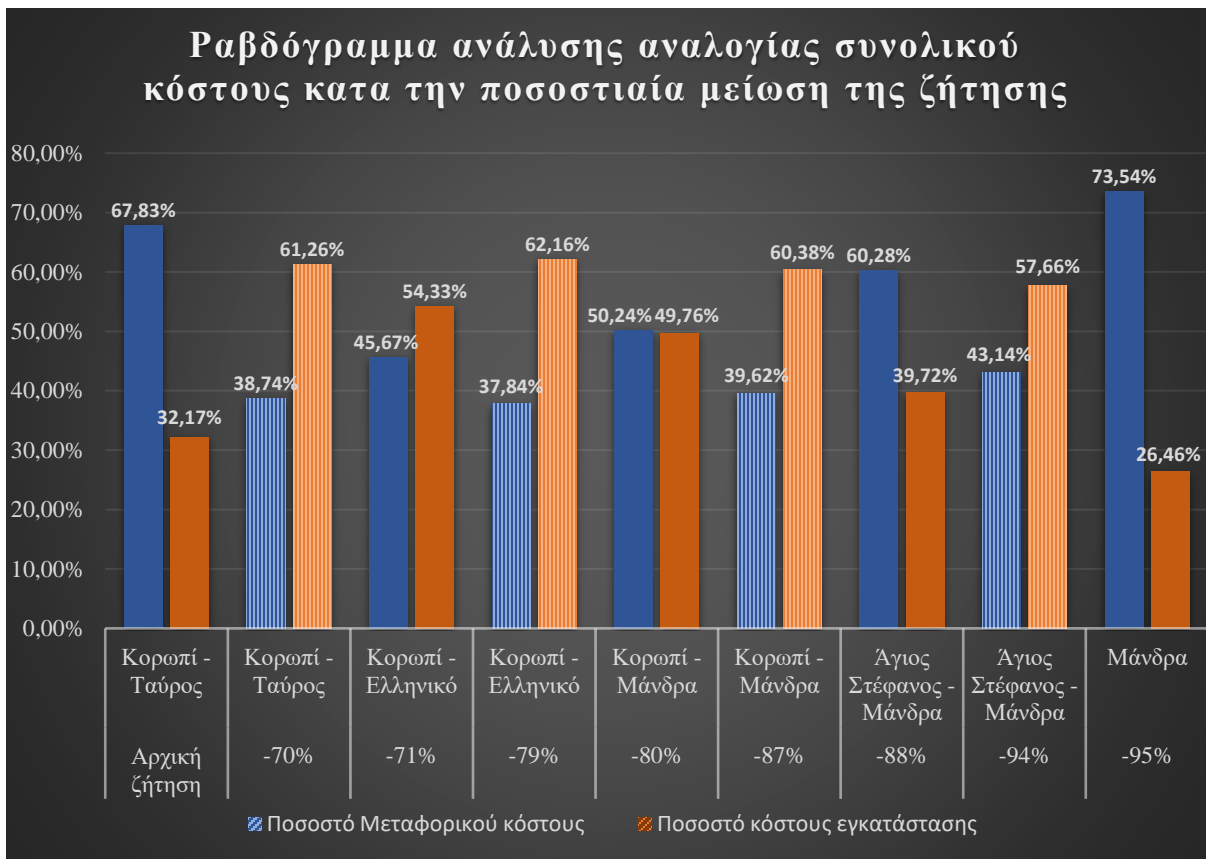
Μείωση ζήτησης	Βέλτιστη λύση	Ποσοστό Μεταφορικού κόστους	Ποσοστό κόστους εγκατάστασης	Μεταφορικό κόστος	Κόστος εγκατάστασης	Συνολικό κόστος	
Αρχική ζήτηση	Κορωπί Ταύρος	-	67,83%	32,17%	337.309,10 €	160.000,00 €	497.309,10 €
-71%	Κορωπί Ελληνικό	-	45,67%	54,33%	117.685,08 €	140.000,00 €	257.685,08 €
-80%	Κορωπί Μάνδρα	-	50,24%	49,76%	111.047,82 €	110.000,00 €	221.047,82 €
-88%	Άγιος Στέφανος Μάνδρα	-	60,28%	39,72%	106.212,30 €	70.000,00 €	176.212,30 €
-95%	Μάνδρα	-	73,73%	26,27%	83.398,94 €	30.000,00 €	113.398,94 €

Αντίθετα, όσο αυξάνεται το ποσοστό των εμβολιασμένων το μοντέλο κρατά σταθερή την επιλογή του και δεν ωθείται σε διαφορετική επιλογή ενδιάμεσων κόμβων. Ενδεικτικά, στον πίνακα 8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα με ποσοστιαία αύξηση της αρχικής ζήτησης.

Πίνακας 8 - Αποτελέσματα με αύξηση ζήτησης

Αύξηση ζήτησης	Βέλτιστη λύση	Ποσοστό Μεταφορικού κόστους	Ποσοστό κόστους εγκατάστασης	Μεταφορικό κόστος	Κόστος εγκατάστασης	Συνολικό κόστος	
Αρχική ζήτηση	Κορωπί Ταύρος	-	67,83%	32,17%	337.309,10 €	160.000,00 €	497.309,10 €
+10%	Κορωπί Ταύρος	-	69,87%	30,13%	371.040,01 €	160.000,00 €	531.040,01 €
+40%	Κορωπί Ταύρος	-	74,69%	25,31%	472.232,74 €	160.000,00 €	632.232,74 €
+80%	Κορωπί Ταύρος	-	79,14%	20,86%	607.156,38 €	160.000,00 €	767.156,38 €
+100%	Κορωπί Ταύρος	-	80,83%	19,17%	674.618,20 €	160.000,00 €	834.618,20 €
+200%	Κορωπί Ταύρος	-	86,35%	13,65%	1.011.927,30 €	160.000,00 €	1.171.927,30 €

Επιπρόσθετα, αν γίνει εστίαση στα οριακά σημεία που η λήψη απόφασης αλλάζει, τα ποσοστά αναλογίας κόστους διαφέρουν. Στο -71% το μεταφορικό κόστος είναι μικρότερο από το κόστος εγκατάστασης, στο -80% τα κόστη είναι σχεδόν ίσα, στο -88% το μεταφορικό κόστος είναι μεγαλύτερο κατά περίπου 20% από το κόστος εγκατάστασης, ενώ στο -95% η διαφορά έχει την μεγαλύτερη της τιμή.



Εικόνα 7 - Ραβδόγραμμα ανάλυσης αναλογίας συνολικού κόστους κατά την ποσοστιαία μείωση της ζήτησης



## Κεφάλαιο 6 – Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Στο παρόν κεφάλαιο επισημαίνονται τα βασικότερα συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν μετά την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και διατυπώνονται προτάσεις για περαιτέρω μελλοντική διερεύνηση.

### 6.1 Συμπεράσματα

Κύριος στόχος της μελέτης αποτέλεσε η διαμόρφωση ενός μοντέλου χωροθέτησης ενδιάμεσων αποθηκευτικών εγκαταστάσεων για τα σκευάσματα εμβολίων που θα εφοδιάζουν τα εμβολιαστικά κέντρα της Αττικής. Μετά από έρευνα σχετικής βιβλιογραφίας, διατυπώθηκε ένα υπόδειγμα μεικτού ακέραιου προγραμματισμού με βάση το Hub location problem και των μοντέλων P-hub median location problem και P-HLP with fixed link cost μέσω των οποίων βρέθηκε η βέλτιστη λύση του και έγιναν διάφορες αναλύσεις. Κύριος στόχος ήταν ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς και εγκατάστασης λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς που δημιουργήθηκαν κατά την διατύπωση του ζητήματος. Για τελική επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό της IBM, ILOG CPLEX Optimization Studio.

Ο μεγάλος όγκος των δεδομένων και οι στόχοι του προβλήματος καταχωρήθηκαν και διατυπώθηκαν στο πρόγραμμα της IBM. Μετά την πρώτη εκτέλεση, από τις 6 υποψήφιες εγκαταστάσεις επιλέχθηκαν ως βέλτιστες εκείνες που βρίσκονταν στις τοποθεσίες Ταύρος και Κορωπί με το συνολικό κόστος του έργου να ανέρχεται στα 497.309 €. Παρατηρείται πως το κόστος διακίνησης των εμβολίων συμβάλει κατά τα 2/3 στην λήψη της βέλτιστης απόφασης. Άρα, σε περίπτωση που οι αρχές ήθελαν να μειώσουν το συνολικό κόστος θα προτεινόταν να επικεντρωθούν στην εύρεση φθηνότερων μεταφορικών λύσεων.

Στην συνέχεια εξετάστηκαν δύο υποθετικά σενάρια με ανάλυση ευαισθησίας του γενετικού αλγορίθμου. Στην μελέτη του πρώτου σεναρίου όπου αναλύθηκαν περιπτώσεις διακύμανσης του εκπτώτικου παράγοντα  $\alpha$ , παρατηρείται πως όσο αυξάνεται το  $\alpha$ , αυξάνεται και το συνολικό κόστος (Εικόνα 6). Έως την τιμή 0,35 ο συνδυασμός των κόμβων που επιλέγεται είναι ίδιος (Κορωπί και Ταύρος) με το κόστος εγκατάστασης να είναι σταθερό. Για  $\alpha=0,36$  ο συνδυασμός

των ενδιάμεσων κόμβων αλλάζει και γίνεται Κορωπί - Ελληνικό με το συνολικό κόστος να εξακολουθεί να αυξάνεται από 609.792,54 € σε 613.049,99 € παρόλο που το κόστος εγκατάστασης μειώθηκε από 160.000 € σε 140.000 €. Το συμπέρασμα που βγαίνει μετά την διερεύνηση του πρώτου σεναρίου είναι παρόμοιο με εκείνο που προήλθε μετά την πρώτη εκτέλεση, και μας δείχνει πως το ποσοστό του μεταφορικού κόστους συμβάλει όλο και περισσότερο στην διαμόρφωση του συνολικού κόστους όσο επιτυγχάνονται μικρότερες οικονομίες κλίμακας. Άρα εξακολουθεί να προτείνεται επικέντρωση σε φθηνότερα μέσα μεταφοράς από ότι σε εύρεση οικονομικότερων εγκαταστάσεων.

Στο δεύτερο υποθετικό σενάριο εξετάστηκαν οι περιπτώσεις μείωσης και αύξησης της ζήτησης για εμβολιασμό. Για την πρώτη περίπτωση (Πίνακας 7) παρατηρείται πως όσο απαξιώνεται ο εμβολιασμός τόσο το μοντέλο ωθείται σε επιλογή συνδυασμού ενδιάμεσων κόμβων με χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης. Με ανάλυση ευαισθησίας που έγινε στο ποσοστό μείωσης στην αρχική ζήτηση, έως το -70% ο συνδυασμός των hubs παραμένει στις τοποθεσίες Κορωπί – Ταύρος. Όταν η ζήτηση μειώθηκε κατά 71% η επιλογή άλλαξε σε Κορωπί - Ελληνικό με κόστος εγκατάστασης να μειώνεται κατά 20.000 € από το αρχικό κόστος. Συνεχίζοντας την ανάλυση ευαισθησίας, στο -80% ο συνδυασμός των κόμβων αλλάζει σε Κορωπί – Μάνδρα με το κόστος εγκατάστασης να φθάνει στις 110.000 €. Στην συνέχεια, στο σημείο που η ζήτηση μειώθηκε κατά 88% από την αρχική πρόβλεψη, οι κόμβοι που επιλέγει το μοντέλο είναι οι Άγιος Στέφανος και Μάνδρα οι οποίες έχουν τα δύο χαμηλότερα κόστη εγκατάστασης από τα υπόλοιπα σημεία με το άθροισμά τους να είναι στις 70.000 €. Τέλος, όταν η μείωση φθάσει στο -95% το μοντέλο επιλέγει από τα δύο σύνολα των πιθανών κόμβων το ίδιο ενδιάμεσο hub το οποίο είναι η Μάνδρα με το ελάχιστο κόστος εγκατάστασης να είναι ίσο με 30.000 €.

Να σημειωθεί, πως αν η πρόβλεψη των αρμόδιων φορέων για ζήτηση εμβολίων ήταν αποθαρρυντική και τα ποσοστά των εμβολιασμένων ήταν χαμηλά όπως το σενάριο της παρούσας υποενότητας, θα μπορούσαν να μειώσουν τα εμβολιαστικά κέντρα στον νομό Αττικής. Να γίνει δηλαδή μια κεντρικοποίηση των σημείων που οι πολίτες θα μπορούσαν να ανατρέξουν για να προμηθευτούν το εμβόλιο κατά της πανδημίας.

Στην περίπτωση μεγαλύτερης συμμετοχής στον εμβολιασμό, παρατηρείται πως το συνολικό κόστος αυξάνεται λόγω αύξησης του μεταφορικού κόστους ενώ το ποσοστό του κόστους εγκατάστασης μειώνεται (Πίνακας 8).

Μια επιπλέον παρατήρηση που σημειώνεται από την ανάλυση της μείωσης της ζήτησης είναι πως από την αρχική ζήτηση έως την μείωση κατά 70%, που ο συνδυασμός παραμένει Κορωπί – Ταύρος, στην αναλογία συνολικού κόστους, το ποσοστό του μεταφορικού κόστους μειώνεται ενώ το ποσοστό εγκατάστασης αυξάνεται. Το μεταφορικό κόστος από το 67,83% φτάνει σταδιακά στο 38,74% επί του συνολικού κόστους, ενώ το ποσοστό του κόστους εγκατάστασης αυξάνεται από το 32,17% στο 61,26% επί του συνολικού. Το ίδιο συμβαίνει στα ποσοστά μεταφορικού κόστους και κόστους εγκατάστασης ανάμεσα στα οριακά ποσοστά μείωσης της ζήτησης πριν ο συνδυασμός των hubs αλλάξει, δηλαδή μεταξύ -71% έως -79%, από -80% έως -87%, από -88% έως -94% και από -95% και έπειτα.

Μια ακόμα παρατήρηση η οποία θα έκριζε μελέτης θα μπορούσε να είναι η ποσοστιαία αναλογία κόστους ακριβώς πριν τα οριακά σημεία που η απόφαση αλλάζει, η οποία είναι σχεδόν ίδια (-70%, -79%, -87% και -94) (Εικόνα 7).

## 6.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Εν κατακλείδι, κρίνεται αρκετά σημαντικό να προταθούν ορισμένα σημεία της παρούσας διπλωματικής εργασίας τα οποία θα έχριζαν να βελτιωθούν αλλά και προτάσεις για επέκταση της μελέτης.

Αρχικά, θα ήταν ενδιαφέρον αν δεδομένα που αφορούσαν την ζήτηση των εμβολιαστικών κέντρων, το κόστος μεταφοράς, το κόστος εγκατάστασης και τις θέσεις των υποψήφιων ενδιάμεσων κέντρων αποθήκευσης ήταν πραγματικά και δεν παράγονταν τυχαία.

Στην δημιουργία στοχαστικών μοντέλων χωροθέτησης, βασική προϋπόθεση για την άντληση ουσιαστικών συμπερασμάτων αποτελεί η προσαρμογή του προβλήματος σε πραγματικές συνθήκες.

Παρόλα αυτά, με άντληση πραγματικών δεδομένων από τις αρμόδιες αρχές και μικρές παραμετροποιήσεις στα φύλλα Excel που δημιουργήθηκαν, το μοντέλο που σχηματίστηκε με βάση το P-hub location problem, θα οδηγούσε σε σημαντικά συμπεράσματα.

Επιπρόσθετα, για ενδεχόμενη ανάπτυξη του θέματος θα μπορούσε να τοποθετηθεί στην εξίσωση ένας αριθμός κινητών μονάδων εμβολιασμού, όπως έχει συμβεί σε παρόμοιες πανδημικές κρίσεις και μαζική χορήγηση εμβολίων στον πληθυσμό. Το μέγεθος και η πολυπλοκότητα του συγκεκριμένου ζητήματος δεν επέτρεψαν την μελέτη τους στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, η έρευνα θα μπορούσε να επεκταθεί αν το μοντέλο εκτελούνταν σε διαφορετικά σημεία ενός χρονικού ορίζοντα χρησιμοποιώντας στατιστικά δεδομένα από προηγούμενες αντίστοιχες περιπτώσεις. Παραδείγματος χάρη, η ζήτηση για εμβόλιο για την αντιμετώπιση του Covid-19 δεν ήταν ίδια σε όλο το φάσμα της εμβολιαστικής εκστρατείας. Έτσι τα αποτελέσματα δεν θα ήταν όμοια αν η εκτέλεση του μοντέλου γινόταν σε διαφορετικές χρονικές περιόδους.

Κλείνοντας, αξίζει να σημειωθεί πως η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την αντιμετώπιση του παραπάνω ζητήματος θα μπορούσε να εφαρμοστεί στην επίλυση προβλημάτων παρόμοιας κλίμακας όπως η δημιουργία δικτύων εφοδιασμού μιας πολυεθνικής εταιρείας η οποία εμπορεύεται υλικά αγαθά, ή τοποθέτηση ενδιάμεσων κόμβων εφοδιασμού

σε λιμάνια και αεροδρόμια και γενικά σε περιπτώσεις που η δημιουργία δικτύων με ενδιάμεσους κόμβους θα επιτύχει εξοικονόμηση κόστους και ενέργειας.

## Βιβλιογραφία

Alumur, S. A. *et al.* (2021) 'Perspectives on modeling hub location problems', *European Journal of Operational Research*, 291(1), pp. 1–17. doi: 10.1016/j.ejor.2020.09.039.

Balinski, M. L. (1965) 'Integer Programming: Methods, Uses, Computations', *Management Science*, 12(3), pp. 253–313. doi: 10.1287/mnsc.12.3.253.

Campbell, J. F. (1994) 'Integer programming formulations of discrete hub location problems', *European Journal of Operational Research*, 72(2), pp. 387–405. doi: 10.1016/0377-2217(94)90318-2.

Chatterjee, Saptarshi *et al.* (2021) 'Studying the progress of COVID-19 outbreak in India using SIRD model', *Indian Journal of Physics*, 95(9), pp. 1941–1957. doi: 10.1007/s12648-020-01766-8.

Duijzer, L. E., van Jaarsveld, W. and Dekker, R. (2018) 'Literature review: The vaccine supply chain', *European Journal of Operational Research*, 268(1), pp. 174–192. doi: 10.1016/j.ejor.2018.01.015.

Garey M.R., Johnson D.S. (1979) 'Computers and Intractability: A guide to the Theory of NP-Completeness', W.H Freeman and Co

Hakimi, S. L. (1965) 'Optimum Distribution of Switching Centers in a Communication Network and Some Related Graph Theoretic Problems', *Operations Research*, 13(3), pp. 462–475. doi: 10.1287/opre.13.3.462.

Hakimi S.L (1964) 'Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph', *Operations Research*, 12(3), pp. 450–459.

Jung, J. (2021) 'Preparing for the Coronavirus Disease (COVID-19) Vaccination: Evidence, Plans,

and Implications', *Journal of Korean Medical Science*, 36(7), pp. 1–20. doi: 10.3346/jkms.2021.36.e59.

Megiddo, N., Zemel, E. and Hakimi, S. L. (1983) 'The Maximum Coverage Location Problem', *SIAM Journal on Algebraic Discrete Methods*, 4(2), pp. 253–261. doi: 10.1137/0604028.

Mirzaghafour, F. S. (2013) 'Modular Hub Location Problems', (February).

O'Kelly, M. E. and Bryan, D. L. (1998) 'Hub location with flow economies of scale', *Transportation Research Part B: Methodological*, 32B(8), pp. 605–616. doi: 10.1016/S0191-2615(98)00021-6.

M.T. Melo, S. Nickel and F. Saldanha-da-Gama (2009) 'Facility location and supply chain management', *European Journal of Operational Research*, 196, pp. 401-412. doi:10.1016/j.ejor.2008.05.007

Silva, F. J. F. and De La Figuera, D. S. (2007) 'A capacitated facility location problem with constrained backloging probabilities', *International Journal of Production Research*, 45(21), pp. 5117–5134. doi: 10.1080/00207540600823195.

Stefan Nickel, Claudius Steinhardt, Hans Schlenker and Wolfgang Burkart (2021) ' Decision Optimization with IBM ILOG CPLEX Optimization Studio: A Hands-On Introduction to Modeling with the Optimization Programming Language (OPL)', *Graduate Texts in Operations Research*, pp. 3-5, doi: 10.1007/978-3-662-6548-1

Toregas, C. *et al.* (1971) 'The Location of Emergency Service Facilities', *Operations Research*, 19(6), pp. 1363–1373. doi: 10.1287/opre.19.6.1363.

Toregas, C. and ReVelle, C. (1972) 'Optimal location under time or distance constraints', *Papers of the Regional Science Association*, pp. 131–143. doi: 10.1007/BF01961457.

Αλεξάνδρα Κοτοπούλη (2015) 'Ανάπτυξη πρότυπου βέλτιστης χωροθέτησης σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών ταξί', Σχολή αγρονόμων και τοπογράφων μηχανικών Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο

Γκόγκος Χρήστος, Γεωργία Φουτσιτζή (2018) 'Ανάλυση ευαισθησίας', Τμήμα Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

Νικολακόπουλος Γεώργιος (2019) ' Hub location problem στην εφοδιαστική αλυσίδα ζυθοποιίας', Τμήμα βιομηχανικής διοίκησης και τεχνολογίας Πανεπιστήμιο Πειραιά