



Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας Οργάνωσης Παραγωγής και Βιομηχανικής Διοίκησης

ΜΑΜΟΥΣΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

**Επανασχεδιασμός Αλγόριθμου Αναφοράς Journey Planning
και Συγχρονισμός Μη Βασικών Γραμμών Υπεραστικών
Δρομολογίων Νομού Αττικής**

Επιβλέπων Καθηγητής: ΔΡ. ΓΕΩΡΓΙΟΣ Κ.Δ. ΣΑΧΑΡΙΔΗΣ

Βόλος, Φεβρουάριος 2018

ΜΕΛΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ

Λυμπερόπουλος Γεώργιος, Καθηγητής

Παντελής Δημήτριος, Αναπληρωτής Καθηγητής

Σαχαρίδης Γεώργιος, Επίκουρος Καθηγητής (Επιβλέπων)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα μέσα μαζικής συγκοινωνίας αποτελούν σημαντικό πυλώνα για κάθε Ευρωπαϊκή, και όχι μόνο, πόλη. Εξυπηρετούν καθημερινά μεγάλο ποσοστό πολιτών και η εύρυθμη λειτουργίας τους κρίνεται απαραίτητη για την ορθή εξυπηρέτησή τους. Η συνεισφορά των μέσων μαζικής μεταφοράς κλιμακώνεται όταν αναλογιστεί κανείς το μειωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα που προκαλούν αναλογικά με τη χρήση ιδιωτικών οχημάτων. Η εξάπλωση των δικτύων συντελεί στην ανάπτυξη απομακρυσμένων περιοχών με σημαντικό κοινωνικό και οικονομικό αντίκτυπο. Από κάθε άποψη, η συγκοινωνία είναι ένα κομβικό τμήμα κάθε πόλης και σε ευρύτερη κλίμακα ο συνδυασμός πολλαπλών δικτύων είναι σε θέση να επιτρέψει σε οποιοδήποτε επιβάτη την μετάβασή του σε οποιοδήποτε σημείο της Ευρώπης. Η εν λόγω δυνατότητα απαντάται από την έννοια “co-modality” και εισήχθη από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή το 2006 στον τομέα της πολιτικής μεταφορών, προκειμένου να καθορίσουν την προσέγγιση της ολοκλήρωσης των τρόπων μεταφοράς και των συνδυασμών τους. Για την Ευρωπαϊκή Επιτροπή η συγκεκριμένη έννοια αποτελεί την «χρήση των διαφόρων μέσων μεταφοράς, μεμονωμένα και σε συνδυασμό με στόχο να επιτύχει τη βέλτιστη και βιώσιμη χρήση των πόρων». Η έννοια αυτή εισάγει μια νέα προσέγγιση για την ευρωπαϊκή πολιτική μεταφορών κατά την οποία κάποιος δεν αποσκοπεί να αντιτάξει τις οδικές μεταφορές έναντι των εναλλακτικών μέσων, αλλά να βρεθεί η βέλτιστη αξιοποίηση των μέσων και των συνδυασμών τους. Η ευελιξία αυτή ενισχύεται όταν ο σχεδιασμός κάθε δικτύου επεξεργάζεται καταλλήλως ώστε να επιλεγθούν οι βέλτιστες διαδρομές κάλυψης κάθε περιοχής, να ελαχιστοποιηθεί η αναμονή των επιβατών κατά την μετεπιβίβαση σε πολλαπλά μεταφορικά μέσα, να αξιοποιηθεί στοχευμένα ο στόλος κάθε οργανισμού μαζικής συγκοινωνίας κ.ά. Για την πλήρη αξιοποίηση των υπέρογκων δεδομένων των δικτύων απαιτείται η ψηφιοποίηση τους με συνέπεια το δυνατό επανασχεδιασμό τους σε υπολογιστικό περιβάλλον. Στην παρούσα πτυχιακή εργασία υλοποιείται η ψηφιοποίηση ενός εκ των μεγαλύτερων οργανισμών μαζικής συγκοινωνίας του Νομού Αττικής και αναπτύσσονται στοχευμένοι αλγόριθμοι με την χρήση Ακέραιου Προγραμματισμού με αντικείμενο το Journey Planning και τον επανασυγχρονισμό των γραμμών, εφαρμοσμένοι επί των παραπάνω ψηφιοποιημένων δεδομένων. Και στις δύο εφαρμογές παρατίθενται χαρακτηριστικά παραδείγματα που αναδεικνύουν την δυνατή αναβάθμιση των δικτύων μέσω υπολογιστικού περιβάλλοντος, σε σύγκριση με τις υφιστάμενες, μη βελτιστοποιημένες συνθήκες.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της παρούσας εργασίας, Δρ. Γεώργιο Κ. Δ. Σαχαρίδη, επίκουρο καθηγητή του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για την καθοδήγηση και την βοήθειά του κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου για την υπομονή τους κατά την απουσία μου για την υλοποίησή της.

Τέλος, ευχαριστώ πολύ τον μεταπτυχιακό φοιτητή Δημήτρη Ριζόπουλο για την συνεργασία μας και την παροχή όλων των απαραίτητων, για την εν λόγω μελέτη, πληροφοριών.

Περιεχόμενα

ΜΕΛΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	5
1. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΠΙΛΥΣΗΣ.....	9
1.1 Εισαγωγή	9
1.2 Στοιχεία δικτύου προς αναβάθμιση.....	9
1.3 Επίλογος	10
2. ΨΗΦΙΟΠΟΙΗΣΗ	11
2.1 Εισαγωγή	11
2.1.1 Ψηφιακή εισαγωγή δεδομένων	11
2.1.2 Χρονοδιαγράμματα δρομολογίων	13
2.2. Μορφοποίηση GTFS.....	17
2.2.1 Εισαγωγή	17
2.2.2 Δομή GTFS	18
2.3 Περιγραφή δικτύου ΚΤΕΛ Αττικής.....	19
2.3.1 Συγκοινωνιακό έργο	20
2.3.2 Βασικοί προορισμοί	24
2.3.3 Επίλογος	27
3. ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΝΕΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ JOURNEY PLANNING ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ.....	29
3.1 Εισαγωγή	29
3.2 Παρουσίαση Μοντέλου Αναφοράς.....	30
3.3 Παρουσίαση Νέου Μοντέλου	34
3.4 Σύγκριση Μαθηματικών Μοντέλων.....	37
3.4.1 Χρόνοι εκτέλεσης και μείωση περιορισμών	38
3.4.2 Μεταβλητές Απόφασης.....	38
3.4.3 Περιορισμοί.....	38
3.4.4 Αντικειμενική συνάρτηση	39
4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ CPLEX ...	41
4.1 Εισαγωγή	41
4.2 Δεδομένα εισαγωγής	41
4.3 Δίκτυο επιλεγμένων κόμβων.....	42
4.4 Περιεχόμενο κωδικών	45
4.5 Παραδείγματα και σύγκριση αποτελεσμάτων.....	46
4.6 Χρήσιμα συμπεράσματα	54

4.7 Επίλογος	55
5. ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΣ ΑΝΤΑΠΟΚΡΙΣΕΩΝ ΜΕ ΤΑ ΒΑΣΙΚΑ ΔΡΟΜΟΛΟΓΙΑ	57
5.1 Εισαγωγή	57
5.2 Προσδιορισμός δρομολογίων βασικών ανταποκρίσεων.....	57
5.3 Προεπεξεργασία δεδομένων	58
5.4 Περιγραφή μαθηματικών μοντέλων	61
5.4.1 Συγχρονισμός μετεπιβίβασης από βασική γραμμή σε ανταπόκριση	61
5.4.2 Συγχρονισμός μετεπιβίβασης από ανταπόκριση σε δρομολόγιο βασικής γραμμής	64
5.5 Εφαρμογή και εκτέλεση μαθηματικών μοντέλων επανασυγχρονισμού σε περιβάλλον Cplex	66
5.5.1 Εισαγωγή δεδομένων.....	67
5.5.2 Διαλογή δεδομένων εξεταζόμενων μετεπιβιβάσεων	68
5.5.3 Αποτύπωση μαθηματικών μοντέλων σε περιβάλλον Cplex	69
5.5.4 Παραδείγματα συγχρονισμού βασικών ανταποκρίσεων	69
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	81
ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ.....	99
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	100

1. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

1.1 Εισαγωγή

Οι αστικές συγκοινωνίες εντός του Νομού Αττικής αποτελούν ένα ιδιαίτερα διευρυμένο δίκτυο μέσω μαζικής μεταφοράς το οποίο απαρτίζεται από τα αστικά λεωφορεία της Αθήνας και τις τρεις γραμμές του Αττικού Μετρό, τα οποία εξυπηρετούν το επιβατικό κοινό των αστικών περιοχών, καθώς και τα υπεραστικά δρομολόγια εντός του νομού Αττικής τα οποία εκτείνονται μέχρι τις πιο απομακρυσμένες περιοχές της Αττικής, μεριμνώντας για την εξυπηρέτηση μεγάλου αριθμού επιβατών προς βασικούς, μεταξύ άλλων, κόμβους, όπως παραδείγματος χάριν το Λιμάνι Ραφήνας, το Λιμάνι Λαυρίου, το Αεροδρόμιο Ελευθέριος Βενιζέλος κ.ά.

Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται ένα σύνολο μηχανισμών το οποίο έχει σαν τελικό σκοπό την βελτιστοποίηση του συγκοινωνιακού έργου που διεκπεραιώνεται από το δίκτυο των υπεραστικών δρομολογίων εντός του νομού Αττικής. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω:

1. της ψηφιοποίησης όλων των δρομολογίων του δικτύου,
2. της ανάπτυξης ενός βελτιωμένου προγράμματος Journey Planning, το οποίο διακρίνεται από μεγαλύτερη ευελιξία και ταχύτητα εκτέλεσης, συγκριτικά με αντίστοιχο υπάρχον πρόγραμμα αναφοράς,
3. του επανασυγχρονισμού των δρομολογίων ανταπόκρισης του δικτύου με σκοπό την ελαχιστοποίηση της διάρκειας αναμονής για μετεπιβίβαση.

1.2 Στοιχεία δικτύου προς αναβάθμιση

Σε αντίθεση με τα αστικά λεωφορεία και τις γραμμές του Μετρό, το προαναφερθέν δίκτυο των υπεραστικών δρομολογίων εντός του νομού δεν έχει αναπτυχθεί σε ψηφιακό υπόβαθρο, προσβάσιμο από το ευρύ επιβατικό κοινό. Το εν λόγω κενό εμποδίζει την αποτύπωση του δικτύου σε ψηφιακές πλατφόρμες, σχεδιασμένες για την εξυπηρέτηση και πληροφόρηση των επιβατών και επίσης καθιστά αδύνατη την επεξεργασία του δικτύου σε ψηφιακά μέσα με σκοπό το συγχρονισμό δρομολογίων μετεπιβίβασης ώστε να ελαχιστοποιείται η αναμονή και να βελτιώνεται η εξυπηρέτηση των επιβατών.

Εξαιτίας αυτών, κρίνεται απαραίτητη η ψηφιοποίηση του συγκεκριμένου δικτύου η οποία μελετάται λεπτομερώς σε επόμενο Κεφάλαιο.

Στη συνέχεια, με βάση την αρχιτεκτονική του ψηφιοποιημένου πλέον δικτύου αναπτύσσεται ένα μαθηματικό μοντέλο για την επίλυση του προβλήματος Journey Planning με στόχο την εφαρμογή όσο το δυνατόν λιγότερων περιορισμών και την ανάδειξη χρήσιμων διαφορών συγκριτικά με αντίστοιχο μαθηματικό μοντέλο αναφοράς, το οποίο επιδέχεται βελτίωσης.

Τέλος, με την αξιοποίηση του πλήρους μεγέθους των ψηφιοποιημένων δεδομένων, πραγματοποιείται μία επέμβαση στα υφιστάμενα, μη βελτιστοποιημένα χρονοδιαγράμματα του δικτύου, επί των οποίων σχεδιάζεται και εκτελείται πρόγραμμα συγχρονισμού μεταξύ των βασικών γραμμών και των δρομολογίων ανταπόκρισης, το οποίο εξάγει τις ιδανικές ώρες εκκίνησης των ανταποκρίσεων με κριτήριο τη λιγότερη δυνατή αναμονή των επιβατών

1.3 Επίλογος

Στα επόμενα κεφάλαια αναλύεται και επεκτείνεται ο ανωτέρω κορμός. Διασαφηνίζονται όλες οι απαραίτητες διαδικασίες και μέθοδοι που χρησιμοποιούνται και περιγράφονται πλήρως τα ανεπτυγμένα μαθηματικά μοντέλα, συνοδευόμενα από αποτελέσματα εξαγωγής των αντίστοιχων προγραμμάτων σε περιβάλλον Cplex. Ως πρώτη προτεραιότητα, αρχικά παρατίθεται η διαδικασία της ψηφιοποίησης επί της οποίας επεξηγείται και η δομή του δικτύου.

2. ΨΗΦΙΟΠΟΙΗΣΗ

2.1 Εισαγωγή

Κομβικό ρόλο στην συλλογή και αποτύπωση των δεδομένων του δικτύου των ΚΤΕΛ Αττικής, τα οποία πραγματοποιούν τα προαναφερθέντα υπεραστικά δρομολόγια εντός του νομού, συνετέλεσε η ψηφιοποίηση όλων των δεδομένων που προκύπτουν από το δίκτυο. Ως ψηφιοποίηση ορίζεται η διαδικασία μετατροπής όλων των στοιχείων και πληροφοριών που απορρέουν από το δίκτυο των ΚΤΕΛ Αττικής αναφορικά με ζωτικά χαρακτηριστικά του, όπως είναι οι συντεταγμένες των στάσεων, οι ώρες εκκίνησης κάθε δρομολογίου, η χάραξη κάθε διαδρομής σε ψηφιακό χαρτογραφικό υπόβαθρο κ.α., σε ψηφιακή μορφή για την εισαγωγή τους σε υπολογιστικό περιβάλλον, ώστε να μπορέσουν να αποθηκευτούν και να γίνουν αντικείμενο επεξεργασίας από τον χρήστη.

Πιο συγκεκριμένα, όλη η μελέτη και βελτιστοποίηση του δικτύου δεν θα ήταν δυνατή αν σε προπαρασκευαστικό στάδιο δεν καθορίζονταν πλήρως βασικότατα δεδομένα όπως είναι οι ακριβείς συντεταγμένες κάθε στάσης, η λεπτομερής χαρτογράφηση όλων των διαδρομών του δικτύου, η έγκυρη απόσταση μεταξύ συνεχόμενων στάσεων, η σειρά αλληλουχίας τους, ο ορισμός των συμπεριλαμβανομένων στάσεων κάθε δρομολογίου καθώς και οι ώρες εκκίνησής τους.

2.1.1 Ψηφιακή εισαγωγή δεδομένων

Πιο αναλυτικά, η εν λόγω ψηφιοποίηση πραγματοποιήθηκε πάνω στην διαδικτυακή πλατφόρμα `gtfs editor` η οποία παρέχει ως εργαλείο το χαρτογραφικό υπόβαθρο των `OpenStreetMaps`, όπου και καθορίστηκαν λεπτομερώς όλα τα προαναφερθέντα δεδομένα.

Ως μεγαλύτερη προτεραιότητα, πρώτη ενέργεια είναι ο εντοπισμός κάθε στάσης του δικτύου και η έγκυρη εισαγωγή της εντός των χαρτών της πλατφόρμας συμπεριλαμβανομένης και της αντίστοιχης ονομασίας της στάσης, σύμφωνα με το δίκτυο των ΚΤΕΛ Αττικής. Σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη αυτού του σταδίου συνετέλεσε η παράθεση όλων των στάσεων των κεντρικών δρομολογίων του δικτύου στην αντίστοιχη ιστοσελίδα των ΚΤΕΛ Αττικής, συνοδευόμενων από διαδικτυακό υπερσύνδεσμο ο οποίος παρέχει την ακριβή τοποθεσία τους.

Εν συνεχεία, πραγματοποιείται η χαρτογράφηση κάθε διαδρομής ξεχωριστά, με πρώτη ενέργεια την επιλογή των στάσεων που περιλαμβάνονται στην εν λόγω διαδρομή, λαμβάνοντας πάντα υπόψιν την σωστή αλληλουχία τους την οποία ακολουθούν τα οχήματα του δικτύου των ΚΤΕΛ Αττικής κατά την πραγματοποίηση του δρομολογίου.

Κατόπιν, ακολουθεί η έγκυρη και λεπτομερής χάραξη του δρομολογίου, εντός της διαδικτυακής πλατφόρμας, βασιζόμενη στις ήδη συμπεριλαμβανόμενες στάσεις, με κριτήριο την σωστή διαδρομή την οποία ακολουθούν τα οχήματα, σε συμφωνία πάντα με τον σωστό προσανατολισμό των οδών (άνοδος- κάθοδος) καθώς και την τήρηση του Κώδικα Οδικής Κυκλοφορίας.

Κατά την εκτέλεση αυτού του σταδίου, δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην σωστή, από σχεδιαστικής άποψης, χάραξη των διαδρομών. Συγκεκριμένα το σύνολο των ευθύγραμμων τμημάτων κάθε χαρτογράφησης, συμφωνεί πλήρως με τις οδούς που ακολουθεί, όπως αυτές αποτυπώνονται από τους χάρτες OpenStreetMaps, με άμεσο αποτέλεσμα την καλαισθητή απεικόνιση των διαδρομών κατά την χρήση και επεξεργασία των ψηφιοποιημένων δεδομένων, αλλά ακόμα πιο σημαντικά, την ακριβή καταμέτρηση των αποστάσεων μεταξύ διαδοχικών στάσεων και κατ' επέκταση την συνολική διανυόμενη απόσταση κάθε δρομολογίου.

Σημαντική συνέπεια της παραπάνω συνοχής διαδικασιών αποτελεί, εν συνεχεία, ο υπολογισμός των χρονικών αποστάσεων μεταξύ δύο στάσεων, αλλά και η εύρεση εκτιμώμενου χρόνου άφιξης σε κάθε στάση του δικτύου. Οι εν λόγω υπολογισμοί απαιτούν την προαναφερθείσα ακριβή καταμέτρηση των χιλιομετρικών αποστάσεων.

Η εκτίμηση των χρόνων βασίζεται στην πρόβλεψη μίας μέσης ταχύτητας κάθε διαδρομής η οποία λαμβάνει υπόψιν δυναμικούς παράγοντες όπως η κυκλοφοριακή συμφόρηση των οδικών αρτηριών, αλλά και στατικούς όπως η δυνατότητα ανάπτυξης υψηλής ταχύτητας των οχημάτων, για τις διαδρομές που πραγματοποιούνται εντός της Εθνικής ή Αττικής οδού, ή αντίθετα, ο περιορισμός της ταχύτητας των οχημάτων λόγω πολλαπλών στροφών των ορεινών διαδρομών ή εξαιτίας των περιορισμών του Κώδικα Οδικής Κυκλοφορίας.

Εργαλεία για την εν λόγω πρόβλεψη αποτελούν ψηφιακά μέσα και πλατφόρμες, σχετικές με την οδική κυκλοφορία.

2.1.2 Χρονοδιαγράμματα δρομολογίων

Κατόπιν των συγκεκριμένων σταδίων, ακολουθεί ο ορισμός όλων των χρόνων εκκίνησης για κάθε δρομολόγιο. Πιο αναλυτικά, τα δεδομένα που απορρέουν από την ιστοσελίδα του δικτύου των ΚΤΕΛ Αττικής αφορούν κατά κύριο λόγο τις ώρες διέλευσης από συγκεκριμένες στάσεις ή περιοχές, χωρίς να διασαφηνίζουν αν πρόκειται για αφετηρία νέου δρομολογίου ή απλή διέλευση, η οποία με την σειρά της δεν συνοδεύεται από τον τόπο αφετηρίας.

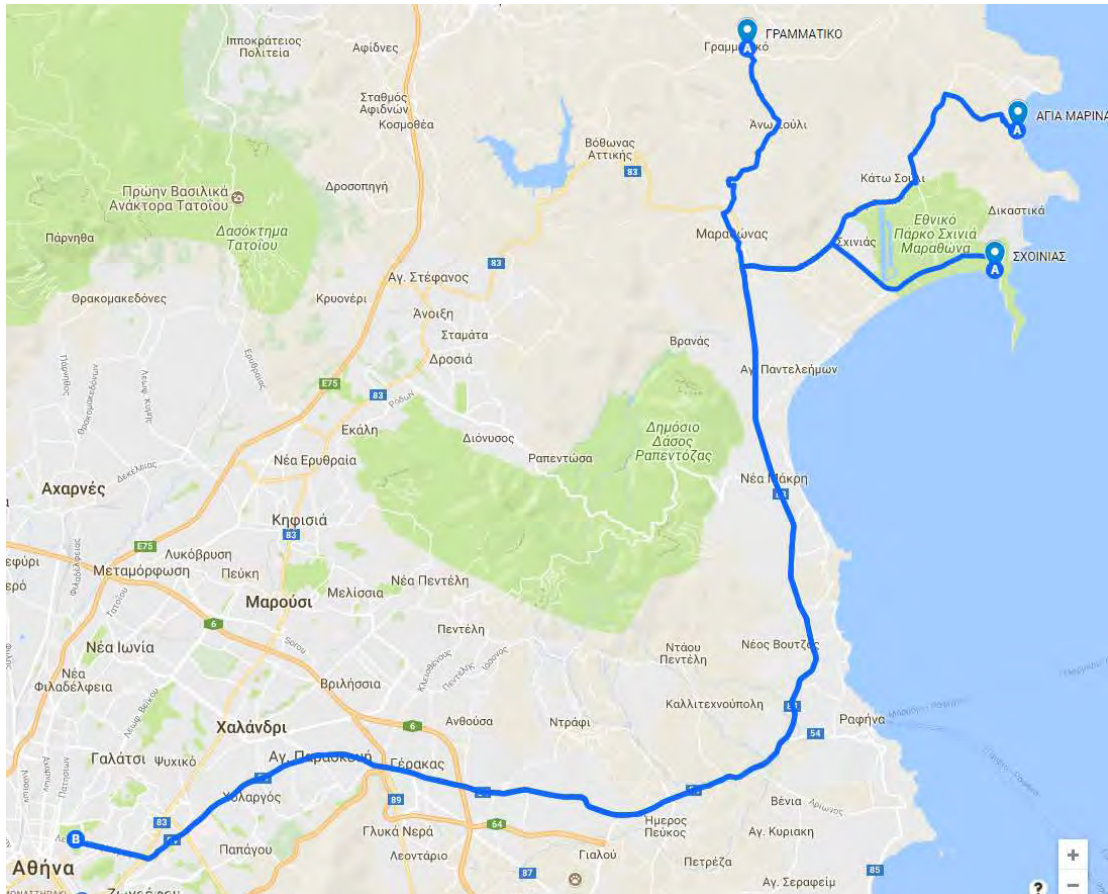
Η εν λόγω απροσδιοριστία απαιτεί μία σύμπτυξη όλων των ενδιάμεσων χρόνων διέλευσης σε ένα δρομολόγιο το οποίο συνοδεύεται από ώρα εκκίνησης, σημείο αφετηρίας και τερματισμού καθώς και από τυχόν ενδιάμεσες παρακάμψεις. Ενδεικτικό παράδειγμα αποτελεί η διαδρομή με το όνομα «Μαραθώνας-Ραφήνα-Αθήνα» η οποία, συνοδευόμενη και από τις αντίστοιχες ώρες εκκίνησης, καθιστά προφανές ότι η ονομασία των δρομολογίων είναι αρκετή για να προσδιορίσει με σαφήνεια όλες τις απαραίτητες πληροφορίες.

Επομένως, οφείλει να οριστεί σε αυτό το σημείο ότι για τον προσδιορισμό ενός δρομολογίου απαιτούνται 4 χαρακτηριστικά:

- 1) το σημείο αφετηρίας,
- 2) το σημείο τερματισμού,
- 3) τυχόν ενδιάμεσες παρακάμψεις,
- 4) ώρα εκκίνησης.

Η προαναφερθείσα σύμπτυξη επιτυγχάνεται με την μελέτη των γεωγραφικών θέσεων των περιοχών που καλύπτει το δίκτυο των ΚΤΕΛ Αττικής ούτως ώστε να γίνεται κατανοητό ποιες από αυτές συμπεριλαμβάνονται στο ίδιο δρομολόγιο κρίνοντας από την χρονική διαφορά των χρόνων διέλευσής τους αλλά και από την γεωγραφική τους απόσταση από τις κεντρικές οδικές αρτηρίες που ακολουθούν τα οχήματα του δικτύου.

Παραδείγματος χάριν, μελετώντας τις περιοχές που εξυπηρετούνται από τα ΚΤΕΛ Αττικής στην Ανατολική Αττική από τα αντίστοιχα χρονοδιαγράμματα της ιστοσελίδας τους, γίνεται εύκολα αντιληπτό καταρχήν ότι όλες οι απομακρυσμένες περιοχές όπως το Γραμματικό, η Αγία Μαρίνα και ο Σχοινιάς αποτελούν αποκλειστικά σημεία αφετηρίας και σε καμία περίπτωση δεν είναι ενδιάμεσες στάσεις άλλων δρομολογίων.



Εικόνα 1: Απομακρυσμένες Διαδρομές Ανατολικής Αττικής

Συνεπώς προκύπτει ότι οι ώρες διέλευσης από το Γραμματικό προς την Αθήνα αποτελούν ώρες εκκίνησης. Εν συνεχεία γίνεται προφανές από τις γεωγραφικές θέσεις των περιοχών ότι όλα τα δρομολόγια από το Γραμματικό συμπεριλαμβάνουν εξ' ορισμού την διέλευση από το Μαραθώνα. Ανατρέχοντας τώρα στις ώρες διέλευσης του Μαραθώνα απορρίπτουμε ως ώρες εκκίνησης αυτές που απέχουν 10 έως 15 λεπτά από την ώρα εκκίνησης του Γραμματικού, καθώς γίνεται αντιληπτό ότι αποτελούν ώρες διέλευσης του δρομολογίου που ξεκίνησε από το Γραμματικό. Η ίδια αλληλουχία ακολουθείται και για τα δρομολόγια της Αγίας Μαρίνας τα οποία κάνουν παράκαμψη εντός του Μαραθώνα.

ΓΡΑΜΜΑΤΙΚΟ – ΑΘΗΝΑ	ΜΑΡΑΘΩΝΑΣ – ΑΘΗΝΑ
06:50 ΜΕΣΩ ΠΑΡΑΛΙΑΣ	05:15
	06:00
08:45 ΜΕΣΩ ΠΑΡΑΛΙΑΣ	06:30 ΜΕΣΩ ΑΝΑΤΟΛΗΣ
11:00	07:00 ΜΕΣΩ ΠΑΡΑΛΙΑΣ
12:45 ΜΕΣΩ ΠΑΡΑΛΙΑΣ	08:15
15:00	08:50
17:00	09:00 ΜΕΣΩ ΠΑΡΑΛΙΑΣ
19:45 ΜΕΣΩ ΠΑΡΑΛΙΑΣ	10:10
22:00 ΜΕΣΩ ΡΑΦΗΝΑΣ	11:15
	12:00 ΜΕΣΩ ΠΑΡΑΛΙΑΣ
	13:00 ΜΕΣΩ ΠΑΡΑΛΙΑΣ
	14:00 ΜΕΣΩ ΠΑΡΑΛΙΑΣ
	15:15
	16:00 ΜΕΣΩ ΠΑΡΑΛΙΑΣ
	16:40
	17:15
	18:15 ΜΕΣΩ ΠΑΡΑΛΙΑΣ
	19:15
	20:00 ΜΕΣΩ ΠΑΡΑΛΙΑΣ
	21:15 ΜΕΣΩ ΡΑΦΗΝΑΣ
	22:15 ΜΕΣΩ ΡΑΦΗΝΑΣ

Εικόνα 2: Ώρες διέλευσης/ αφετηρίας Γραμματικού και Μαραθώνα (πηγή: www.ktelattikis.gr)

Κατόπιν απόρριψης όλων των ωρών διέλευσης από το Μαραθώνα που υπάγονται στο Γραμματικό ή την Αγία Μαρίνα, προκύπτει ότι όλες οι εναπομείνουσες ώρες διέλευσης στον πίνακα "Μαραθώνας- Αθήνα" αποτελούν ώρες αφετηρίας από τον Μαραθώνα.

Αναλόγως επεξεργάζεται και η περίπτωση της Αγίας Μαρίνας με το Κάτω Σούλι αλλά και η πλειοψηφία των διελεύσεων της Νέας Μάκρης οι οποίες πολλές φορές συμπεριλαμβάνονται σε δρομολόγια πιο απομακρυσμένων περιοχών.

Αντιστρόφως αλλά με την ίδια λογική επεξεργάζονται και τα δρομολόγια από Αθήνα. Ωστόσο, κύριο ζητούμενο αυτή την φορά αποτελεί όχι η εύρεση του σημείου αφετηρίας, αλλά αυτή του σημείου τερματισμού. Αντιστοίχως προκύπτει ότι το δρομολόγιο των 5:30 "Αθήνα- Γραμματικό" υπερκαλύπτει αυτό των 5:30 του "Αθήνα- Μαραθώνας" με αποτέλεσμα να συγκαταλέγονται και οι δύο ώρες εκκίνησης σε ένα δρομολόγιο, το "Αθήνα- Γραμματικό".

ΑΘΗΝΑ – ΜΑΡΑΘΩΝΑΣ	ΑΘΗΝΑ – ΓΡΑΜΜΑΤΙΚΟ
<u>05:30</u>	05:30
06:00	07:00
06:20 ΜΕΣΩ ΠΑΡΑΛΙΑΣ	09:00 ΜΕΣΩ ΠΑΡΑΛΙΑΣ
	11:00
<u>07:00</u>	13:00
07:30 ΜΕΣΩ ΠΑΡΑΛΙΑΣ	15:00
08:15	18:00
<u>09:00 ΜΕΣΩ ΠΑΡΑΛΙΑΣ</u>	20:00 ΜΕΣΩ ΠΑΡΑΛΙΑΣ
10:00	
<u>11:00</u>	
12:00 ΜΕΣΩ ΠΑΡΑΛΙΑΣ	
12:30	
<u>13:00</u>	
14:00 ΜΕΣΩ ΠΑΡΑΛΙΑΣ	
<u>15:00</u>	
15:30	
16:00 ΜΕΣΩ ΠΑΡΑΛΙΑΣ	
17:00	
<u>18:00</u>	
19:00	
<u>20:00 ΜΕΣΩ ΠΑΡΑΛΙΑΣ</u>	
21:00	
22:30 ΜΕΣΩ ΡΑΦΗΝΑΣ	

Εικόνα 3: Ώρες αφετηρίας προς Γραμματικό και Μαραθώνα (πηγή: www.ktelattikis.gr)

Από αυτήν την αλληλουχία των διαδικασιών καταλήγουν να διαχωριστούν όλες οι ώρες εκκίνησης από τις ώρες διέλευσης και να καθοριστούν όλα τα δρομολόγια του δικτύου.

Μετά τον προσδιορισμό όλων των δρομολογίων του δικτύου, ακολουθεί η εισαγωγή των ωρών εκκίνησης του καθενός καθώς και η ώρα διέλευσής του από κάθε στάση. Λαμβάνοντας υπόψιν ότι κατά τις προηγούμενες διαδικασίες, έχουν οριστεί με ακρίβεια η μέση ταχύτητα των δρομολογίων και οι ενδιάμεσες αποστάσεις των στάσεων, προκύπτουν οι αντίστοιχες ώρες διέλευσής τους.

Κατ' επέκταση, σε αυτό το σημείο, έχουν πλέον τροποποιηθεί όλα τα απαραίτητα δεδομένα σε ψηφιακή μορφή. Με την εξαγωγή των ολοκληρωμένων δεδομένων, από τα ψηφιακά μέσα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την εν λόγω ψηφιοποίηση, λαμβάνονται αρχεία κειμένου τα οποία αφορούν τις ώρες διέλευσης, τις συντεταγμένες των στάσεων και όλα τα υπόλοιπα στοιχεία, τα οποία συνδυαστικά, παρέχουν στον χρήστη όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για την μελέτη, αξιοποίηση και βελτιστοποίηση της χρήσης του εν λόγω δικτύου.

Η συγκεκριμένη μορφοποίηση των εξαγόμενων δεδομένων ονομάζεται GTFS (General Transit Feed Specification) αποτελεί βασικό πυλώνα της μεταχείρισης των δεδομένων συγκοινωνίας και μελετάται εκτενέστερα σε επόμενη παράγραφο.

2.2. Μορφοποίηση GTFS

2.2.1 Εισαγωγή

Ως GTFS (General Transit Feed Specification) ορίζεται μία κοινή μορφοποίηση των χρονοδιαγραμμάτων των μέσων μαζικής μεταφοράς και των αντίστοιχων γεωγραφικών πληροφοριών τους. Η εν λόγω μορφοποίηση επιτρέπει αφενός στους οργανισμούς συγκοινωνιών να δημοσιοποιήσουν τα δεδομένα των δικτύων τους και αφετέρου στους προγραμματιστές να αξιοποιήσουν αυτά τα δεδομένα για την ανάπτυξη σχετικών εφαρμογών.

Τα δεδομένα αποτυπώνονται σε ένα σύνολο αρχείων κειμένου τα οποία περιέχουν καθοριστικές πληροφορίες του δικτύου όπως είναι τα απαραίτητα δεδομένα κάθε στάσης, τα χρονοδιαγράμματα των δρομολογίων, τις αντίστοιχες χαρτογραφήσεις κ.α. Η μορφοποίηση των GTFS χρησιμοποιείται σε ένα μεγάλο εύρος τύπων εφαρμογών όπως είναι οι εφαρμογές Σχεδιασμού Διαδρομών (Trip Planners), οι εφαρμογές κινητών περί χρήσης μέσων μαζικής συγκοινωνίας, το λογισμικό παραγωγής χρονοδιαγραμμάτων και λοιπά προγράμματα.

Από την δημιουργία της εν λόγω μορφοποίησης, μέχρι σήμερα, τα GTFS έχουν καθιερωθεί παγκοσμίως ως η πιο διαδεδομένη μορφοποίηση δεδομένων των συγκοινωνιών προκαθορισμένων διαδρομών. Πληθώρα οργανισμών επιλέγουν να δημοσιοποιούν τα GTFS δεδομένα τους με το κοινό, ενώ άλλοι παρέχουν πρόσβαση μόνο σε επιλεγμένες πλατφόρμες-συνεργάτες. Μέχρι τις αρχές του 2016 υπολογιζόταν ότι περίπου 1000 οργανισμοί συγκοινωνιών παγκοσμίως, διέθεταν στο ευρύ κοινό τα GTFS δεδομένα του δικτύου τους.

2.2.2 Δομή GTFS

Η μορφοποίηση GTFS αποτελείται από έξι έως δεκατρία αρχεία τύπου CSV (Comma-separated values) με κατάληξη .txt, περιλαμβανόμενα εντός ενός αρχείου .zip. Το σύνολο των εν λόγω CSV πινάκων συνδυαστικά, περιγράφει με σαφήνεια τις διεργασίες των μέσων συγκοινωνιών, όπως αυτές γίνονται αντιληπτές από τους χρήστες τους. Η δομή είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε να παρέχει μεν λειτουργικότητα κατά την χρήση της στον προγραμματισμό σχεδιασμού ταξιδιών, και να είναι αξιοποιήσιμη δε σε περαιτέρω εφαρμογές όπως η ανάλυση των επιπέδων εξυπηρέτησης και των μετρήσεων γενικής απόδοσης. Σε αντίθεση με άλλες μορφοποιήσεις δεδομένων συγκοινωνίας, τα GTFS περιλαμβάνουν αποκλειστικά τις προκαθορισμένες δραστηριότητες των αντίστοιχων δικτύων και δεν περιέχουν ‘real-time’ πληροφορίες. Τα παρακάτω 6 αρχεία είναι απαραίτητα για την σύσταση της μορφοποίησης των GTFS.

Τα βασικά αυτά αρχεία είναι τα εξής:

- agency.txt,
Παρέχει πληροφορίες για το πρακτορείο συγκοινωνιών όπως η ονομασία, η ιστοσελίδα και τα στοιχεία επικοινωνίας.
- stops.txt,
Προσδιορίζει την γεωγραφική θέση κάθε στάσης του δικτύου.
- routes.txt,
Καθορίζει τις γραμμές του δικτύου, οι οποίες με την σειρά τους περιέχουν διάφορες διαδρομές.
- trips.txt,
Προσδιορίζει κάθε διαδρομή ξεχωριστά.
- stop_times.txt,
Καθορίζει τις ώρες άφιξης και αναχώρησης (οι οποίες σχεδόν πάντα ταυτίζονται) κάθε στάσης, όπως και την αλληλουχία πρόσβασης των λεωφορείων προς αυτές.
- calendar.txt.
Καθορίζει τις μέρες της εβδομάδας κατά τις οποίες ισχύουν τα αντίστοιχα δρομολόγια.

Δευτερεύοντα αρχεία των GTFS:

- calendar_dates.txt,
- fare_attributes.txt,
- fare_rules.txt,

- shapes.txt,
- frequencies.txt,
- transfers.txt,
- feed_info.txt.

2.3 Περιγραφή δικτύου ΚΤΕΛ Αττικής

Το ΚΤΕΛ Νομού Αττικής, με διάφορες νομικές μορφές καλύπτει το συγκοινωνιακό έργο του Νομού Αττικής ήδη από τη δεκαετία του 1920. Η χρονολογία που σηματοδότησε ωστόσο την ιστορία του ήταν το 1952, όταν και δημιουργήθηκε το «Κοινό Ταμείο Εισπράξεως Λεωφορείων», ενώ από το 1955 μέχρι και σήμερα αποτελεί τον αποκλειστικό συγκοινωνιακό φορέα στην περιφέρεια του Νομού. Η νομική μορφή του ΚΤΕΛ το Σεπτέμβριο του 2003 μετατράπηκε σε Ανώνυμη Εταιρεία και με διακριτικό τίτλο «ΚΤΕΛ ΝΟΜΟΥ ΑΤΤΙΚΗΣ ΑΝΩΝΥΜΗ ΜΕΤΑΦΟΡΙΚΗ ΕΤΑΙΡΕΙΑ».

Σήμερα η ΚΤΕΛ Ν. Αττικής Α.Ε. διατηρεί αποκλειστικά όλες τις υπεραστικές λεωφορειακές γραμμές του νομού Αττικής, καθώς και τη διανομαρχιακή γραμμή Θεσσαλονίκης, σε συνεργασία με το ΚΤΕΛ Ν. Θεσσαλονίκης α.ε., καθώς από το 1991 έχει αναλάβει την λεωφορειακή γραμμή Αθηνών – Θεσσαλονίκης – Αθηνών.

Ο οχηματικός στόλος του ΚΤΕΛ Ν. Αττικής είναι 136 λεωφορεία τα οποία ανήκουν σε φυσικά πρόσωπα και ακόμα πέντε λεωφορεία ιδιοκτησίας της ίδιας της εταιρείας. Η ΚΤΕΛ Ν. Αττικής Α.Ε. διοικείται από 7μελες αιρετό Δ.Σ. Το ανθρώπινο δυναμικό του ΚΤΕΛ είναι περίπου 400 άτομα το οποίο περιλαμβάνει 16 διοικητικούς υπαλλήλους, 15 Σταθμάρχες, 6 ελεγκτές, 30 εισπράκτορες μόνιμους και 100 έκτακτους και 200 οδηγούς.

Τα κεντρικά γραφεία της ΚΤΕΛ Ν. Αττικής Α.Ε. βρίσκονται στο Πεδίον του Άρεως. Επίσης, στο Πεδίον του Άρεως βρίσκονται τα σταθμαρχεία Λαυρίου, Ραφήνας, Ωρωπού, Νέας Μάκρης, Σουνίου και Θεσσαλονίκης ενώ από το Θησείο γίνονται οι αναχωρήσεις των λεωφορείων προς Μέγαρα, Ελευσίνα, Βίλια και Ερυθρές.

Τα τελευταία χρόνια η εταιρεία βρίσκεται σε διαδικασία εκσυγχρονισμού τόσο σε επίπεδο τεχνολογίας (συστήματα εντοπισμού οχημάτων), όσο και σε επίπεδο παροχής υπηρεσιών (μηνιαίες κάρτες απεριορίστων μετακινήσεων, παροχή δωρεάν wi-fi).

2.3.1 Συγκοινωνιακό έργο

Η ΚΤΕΛ Ν. Αττικής α.ε. είναι ο συγκοινωνιακός φορέας που εκτελεί δρομολόγια σε όλες τις υπεραστικές λεωφορειακές γραμμές του νομού Αττικής. Με δεκάδες αναχωρήσεις δρομολογίων από τις αφετηρίες σε Πεδίον Άρεως και Θησείο προς όλες τις περιοχές του νομού και στις ενδιάμεσες διαδρομές τους, όπως απεικονίζονται στον παρακάτω οδικό χάρτη της εταιρείας:



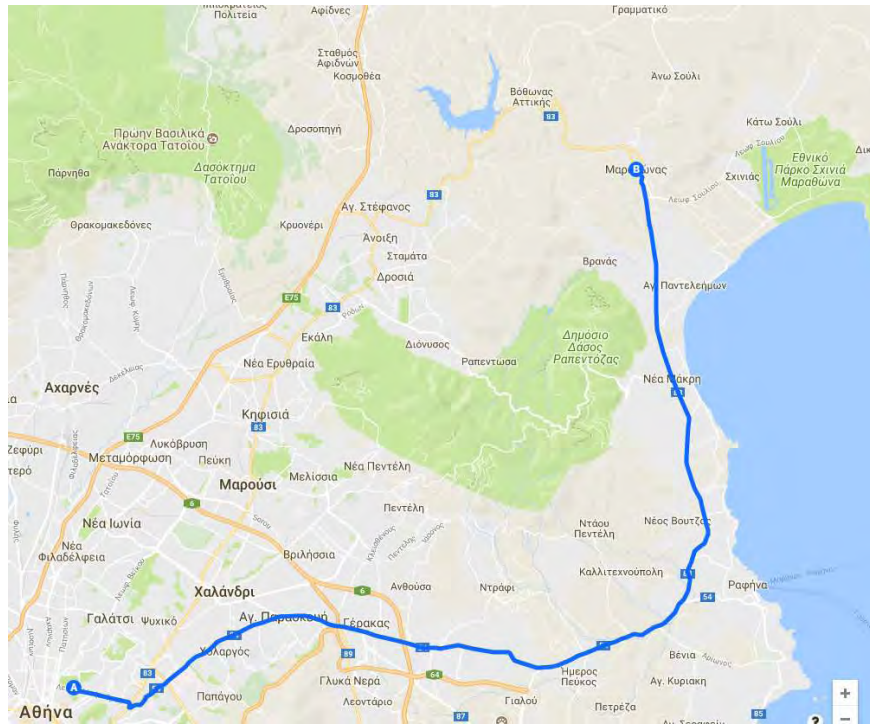
Εικόνα 4: Συγκοινωνιακό δίκτυο ΚΤΕΛ Αττικής (πηγή: www.ktelattikis.gr)

Το δίκτυο των ΚΤΕΛ Αττικής εκτείνεται προς 5 κύριες κατευθύνσεις με τα αντίστοιχα σημεία αναφοράς:

- Ανατολικά προς Μαραθώνα και Ραφήνα.

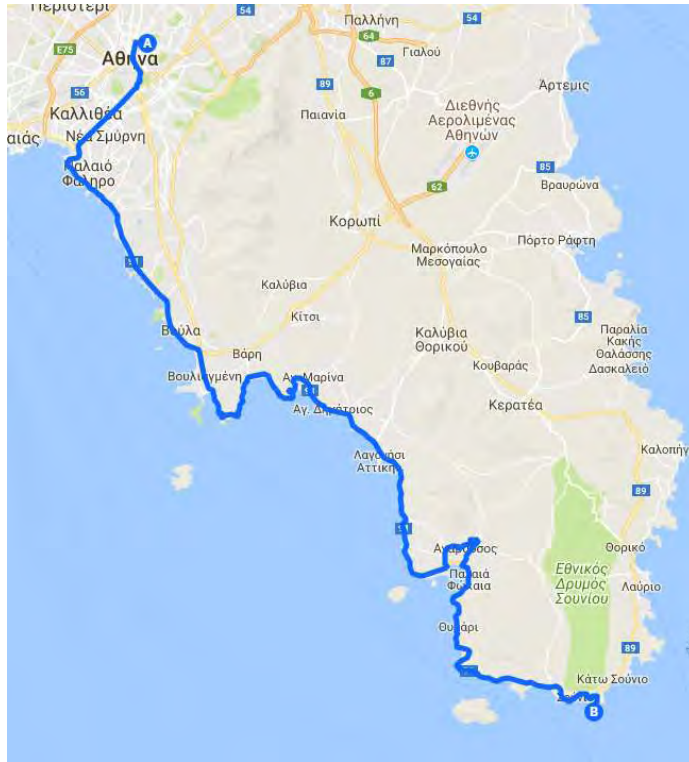
Η εν λόγω γραμμή με αφετηρία το Πεδίον του Άρεως διέρχεται από τις κεντρικές οδικές αρτηρίες Λεωφ. Αλεξάνδρας, Λεωφ. Μεσογείων, Λεωφ. Μαραθώνος και

εξυπηρετεί σημαντικές περιοχές όπως η Νέα Μάκρη, το Γραμματικό, ο Σχοινιάς και το λιμάνι της Αγίας Μαρίνας κ.α.



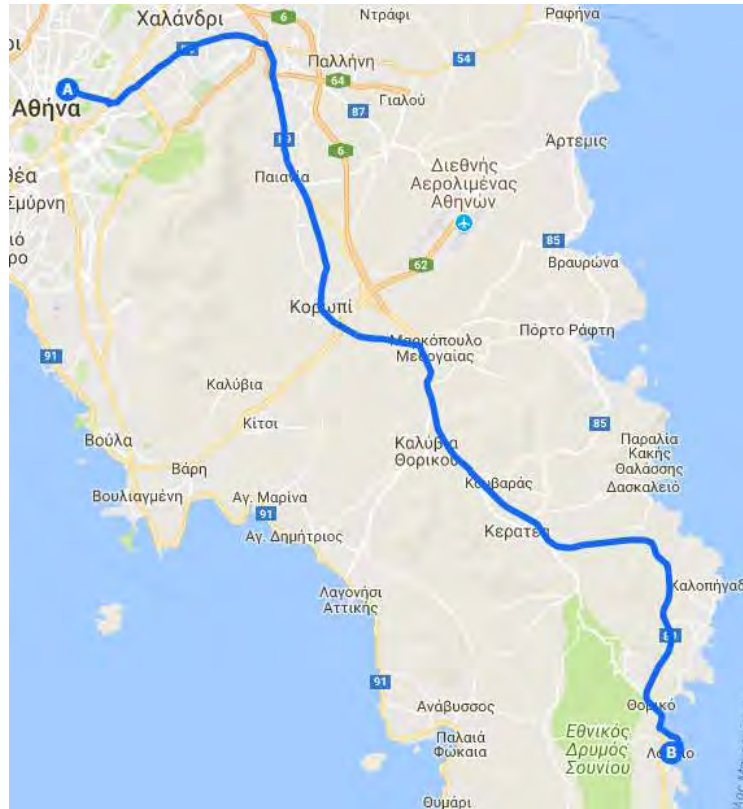
Εικόνα 5: Ενδεικτική διαδρομή προς Ανατολική Αττική

- Νότια παραλιακός προς Σούνιο.
 Τα δρομολόγια έχουν αφητηρία το Πεδίο του Άρεως και διέρχονται από το κέντρο της Αθήνας (Πλ. Κλαυθμώνος, Σύνταγμα, σταθμός μετρό Συγγρού - ΦΙΞ) και την λεωφόρο Συγγρού, έπειτα εισέρχονται στην λεωφόρο Ποσειδώνος ακολουθώντας μία διαδρομή δίπλα στην θάλασσα περνώντας από περιοχές όπως Γλυφάδα, Βούλα, Βουλιαγμένη, Βάρκιζα, Λαγονήσι, Σαρωνίδα, Ανάβυσσος και Λεγριναί.



Εικόνα 6: Παραλιακή διαδρομή προς Σούνιο

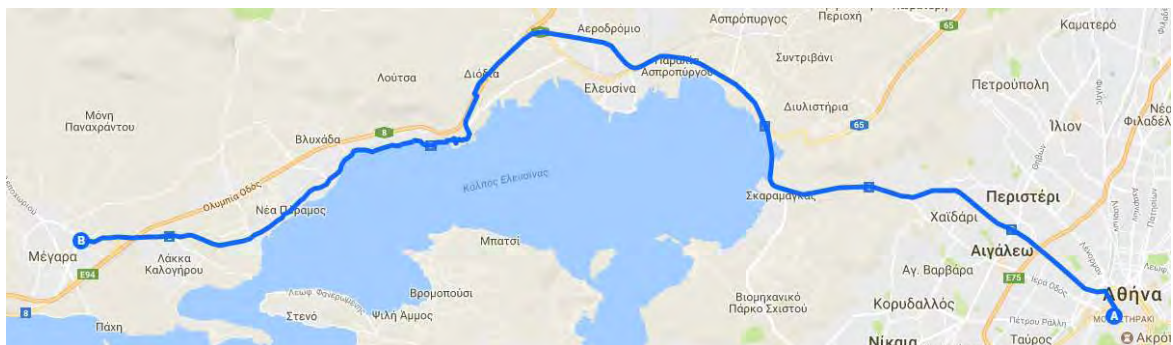
- Νότια μέσω Μεσογείων Περιοχών προς Λαύριο.
 Η γραμμή με αφετηρία το Πεδίον του Άρεως διέρχεται από τις κεντρικές οδικές αρτηρίες Λεωφ. Αλεξάνδρας, Λεωφ. Μεσογείων και Λεωφ. Λαυρίου. Εξυπηρετεί επίσης τις περιοχές Παιανία, Κερατέα, Μαρκόπουλο κ.α. Η τελευταία αποτελεί σημαντικό κόμβο καθώς από το σταθμαρχείο του Μαρκοπούλου ξεκινούν τα δρομολόγια προς Βραυρώνα, Πόρτο Ράφτη και Αυλάκι.



Εικόνα 7: Ενδεικτική διαδρομή προς Λαύριο

- Δυτικά προς Μέγαρα

Η εν λόγω γραμμή με αφετηρία το Θησείο - Πλατεία Αγίων Ασωμάτων διέρχεται από την Λεωφ. Αθηνών μέχρι την Ελευσίνα και κατόπιν διακλαδώνεται προς τις περιοχές Βίλια, Ερυθρές μέσω της οδού Ελευσίνας- Θηβών και προς Μέγαρα, Κινέτα, μέσω της παλιάς Εθνικής Οδού Αθηνών- Κορίνθου. Με ανταπόκριση εξυπηρετούνται οι περιοχές Πόρτο Γερμενό, Αλεποχώρι.

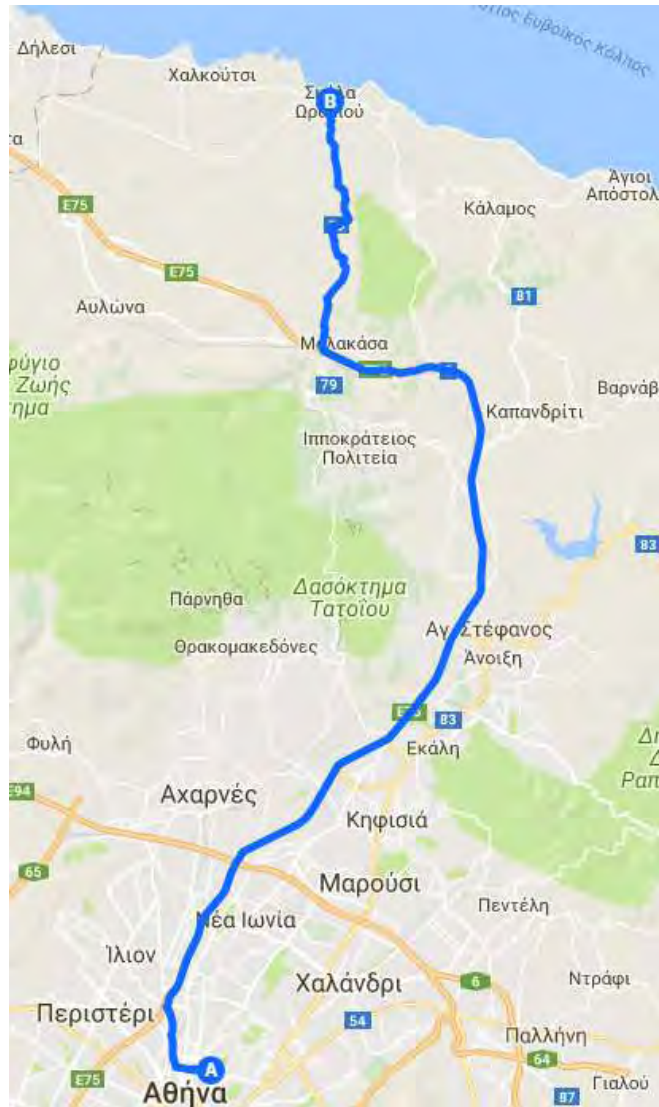


Εικόνα 8: Ενδεικτική διαδρομή προς Δυτική Αττική

- Βόρεια προς Ωρωπό

Τα δρομολόγια έχουν αφετηρία το Πεδίον του Άρεως και εκτείνονται είτε μέσω της Εθνικής Οδού, είτε μέσω της Λεωφόρου Κηφισίας. Κατόπιν διέρχονται από το

Καπανδρίτι με προορισμό τους Αγίους Αποστόλους, τη Μαλακάσα ή το Μαρκόπουλο
 Ωρωπού με προορισμό την Σκάλα Ωρωπού, το Δήλεσι και το Χαλκούτσι.



Εικόνα 9: Ενδεικτική διαδρομή προς Ωρωπό

2.3.2 Βασικοί προορισμοί

Μαραθώνας

Ο Μαραθώνας είναι κωμόπολη της βορειοανατολικής Αττικής και έδρα του ομώνυμου δήμο και είναι από τους πιο ιστορικούς δήμους της Ελλάδας παγκοσμίως. Ο Μαραθώνας έχει πάνω από 5000 χρόνια ζωντανής ιστορίας. Είναι η περιοχή όπου διεξήχθη η πασίγνωστη ανά τον κόσμο Μάχη του Μαραθώνα, η φυσική εστία του Κλασικού Μαραθώνιου. Η μακραίωνη

ιστορία, τα καλαίσθητα μουσεία και ο ιδιαίτερου φυσικού κάλους υδροβιότοπος του Σχοινιά παίζουν σημαντικό ρόλο στην τουριστική απήχηση της περιοχής.

Τουριστικά σημεία ενδιαφέροντος: Αρχαιολογικό Μουσείο Μαραθώνα, Αρχαιολογικός Χώρος Μαραθώνα – Τύμβος, Μουσείο Μαραθωνίου Δρόμου, Φράγμα και Τεχνητή Λίμνη Μαραθώνα, Πευκοδάσος του Σχινιά.

Αεροδρόμιο Ελευθέριος Βενιζέλος

Ένας από τους πιο κομβικούς προορισμούς του δικτύου είναι το αεροδρόμιο Ελευθέριος Βενιζέλος. Συνδέεται με το Λιμάνι της Ραφήνας μέσω της περιοχής Άρτεμις και εξυπηρετεί έναν τεράστιο αριθμό επιβατών, ειδικότερα κατά του καλοκαιρινούς μήνες, λόγω της μετάβασης τουριστών από το αεροδρόμιο προς το Λιμάνι της Ραφήνας και τελικώς, προς τουριστικούς προορισμούς.

Λιμάνι Ραφήνας - Λιμάνι Αγ. Μαρίνας

Η ΚΤΕΛ Ν. Αττικής α.ε., με αφετηρία το Πεδίον του Άρεως, ενώνει καθημερινά την Αθήνα με το λιμάνι της Ραφήνας και της Αγίας Μαρίνας Γραμματικού. Καθημερινά υπάρχουν περισσότερα από τριάντα δρομολόγια προς το λιμάνι της Ραφήνας ενώ τους καλοκαιρινούς μήνες ο αριθμός των δρομολογίων αυξάνεται καθώς η επιβατική ζήτηση αυξάνεται, ενώ παρέχεται και η δυνατότητα για προσθήκη έκτακτων δρομολογίων μέσα στην ημέρα ανάλογα με την ζήτηση καθώς και η τροποποίηση των δρομολογίων αναχώρησης από το λιμάνι ανάλογα με την άφιξη του κάθε πλοίου. Επίσης, από το λιμάνι της Ραφήνας αναχωρούν και λεωφορεία με προορισμό το διεθνές αεροδρόμιο Αθηνών "Ελ. Βενιζέλος".

Λιμάνι Ραφήνας

Το λιμάνι άρχισε να κατασκευάζεται στις αρχές του 20ου αιώνα όταν τα πρώτα ατμόπλοια έφτασαν στο γραφικό αλιευτικό λιμανάκι της Ραφήνας. Τη δεκαετία του 1930 οι ανάγκες μεγάλωσαν και το λιμάνι επεκτάθηκε. Τη δεκαετία του 1960 ξεκινούν σημαντικές εργασίες βελτίωσης των λιμενικών εγκαταστάσεων με την κατασκευή νέων κρηπιδωμάτων. Μετά από πολλές παρεμβάσεις και αναμορφώσεις, η Ραφήνα είναι πλέον ένα σύγχρονο λιμάνι που κατατάσσεται στους λιμένες Διεθνούς Ενδιαφέροντος.

Από την Ραφήνα εκτελούνται όλο το χρόνο καθημερινά δρομολόγια προς Άνδρο, Τήνο, Μύκονο και έχει την αποκλειστική σύνδεση με το Μαρμάρι Ευβοίας. Τους καλοκαιρινούς μήνες συγκεντρώνει σημαντικό μέρος της κίνησης προς τα νησιά των Κυκλάδων (Πάρο, Νάξο, Ίο, Σύρο και Σαντορίνη) εξυπηρετώντας τόσο την επιβατική και τουριστική όσο και την εμπορευματική κίνηση όλων των παραπάνω προορισμών.

Λιμάνι Αγ. Μαρίνας

Το νεόδμητο λιμάνι της Αγίας Μαρίνας Γραμματικού βρίσκεται στο δήμο Μαραθώνα. Με τους υπερσύγχρονους χερσαίους χώρους του, έχει την δυνατότητα να εξυπηρετήσει πολλαπλές δραστηριότητες τόσο της ακτοπλοΐας (εμπορευματική, επιβατική κίνηση) όσο και της αλιείας. Το λιμάνι της Αγ. Μαρίνας έχει την αποκλειστική σύνδεση με τη νότια Εύβοια και συγκεκριμένα με καθημερινά δρομολόγια προς τον Αλμυροπόταμο και τα Νέα Στύρα.

Μέγαρα - Νέα Πέραμος

Το ΚΤΕΛ Ν. Αττικής ενώνει καθημερινά την Αθήνα με τα Μέγαρα και την Νέα Πέραμο με δρόμολόγια που αναχωρούν κάθε μισή ώρα από την πλατεία Αγίων Ασωμάτων στο Θησείο (πλησίον του ηλεκτρικού σταθμού) και διερχόμενα από την λεωφόρο Αθηνών. Σε απόσταση περίπου 35 χλμ από την αφετηρία, ο επισκέπτης θα συναντήσει την Νέα Πέραμο Αττικής (Μεγ. Πεύκο). Συνεχίζοντας την διαδρομή, σε 10 χλμ περίπου βρίσκονται τα Μέγαρα μία από τις αρχαιότερες πόλεις της Ελλάδος. Σημεία ενδιαφέροντος της πόλης των Μεγάρων είναι το λαογραφικό μουσείο καθώς και το αρχαιολογικό μουσείο σε συνδυασμό με την κρήνη του Θεαγένους και την Νέα Κρήνη. Κατά τους καλοκαιρινούς μήνες αρκετό κόσμο προσελκύει η παραλία της Βαρέας στα Μέγαρα και η παραλία του Αλεποχωρίου στην ευρύτερη περιοχή.

Σούνιο

Τα λεωφορεία με προορισμό το Σούνιο έχουν αφετηρία το Πεδίον του Άρεως και διέρχονται από το κέντρο της Αθήνας (Πλ. Κλαυθμόνος, Σύνταγμα, σταθμός μετρό Συγγρού - ΦΙΕ) και την λεωφόρο Συγγρού, έπειτα εισέρχονται στην λεωφόρο Ποσειδώνος ακολουθώντας μία διαδρομή δίπλα στην θάλασσα περνώντας από περιοχές όπως Γλυφάδα, Βούλα, Βουλιαγμένη, Βάρκιζα, Λαγονήσι, Σαρωνίδα, Ανάβυσσος και Λεγραινά.

Λιμάνι Λαυρίου

Το Λαύριο απέχει περίπου 50 χλμ. από το κέντρο της Αθήνας και βρίσκεται πολύ κοντά στο διεθνές αεροδρόμιο Αθηνών "Ελ. Βενιζέλος". Το μεγάλο μήκος των ακτών αποτελεί σημαντικό φυσικό πόρο, το ίδιο και ο φυσικός δρυμός του Σουνίου που εμπίπτει στα όρια του Δήμου κατά μεγάλο μέρος. Το Λιμάνι του Λαυρίου αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς θαλάσσιους κόμβους με εξέχουσα γεωφυσική και στρατηγική θέση. Έχει καθοριστεί ως ένα από τα λιμάνια εθνικής σημασίας αναλαμβάνοντας ουσιαστικό και συμπληρωματικό ρόλο προς τον λιμένα του Πειραιά και το ευρύτερο σύστημα Λιμένων της Αττικής. Σήμερα, το λιμάνι εξυπηρετεί πολλαπλές δραστηριότητες, οι οποίες αφορούν την ακτοπλοΐα, τους τομείς σκαφών αναψυχής, κρουαζιερόπλοιων, την αλιεία και τον εμπορικό τομέα. Το λιμάνι του Λαυρίου, συνδέει ακτοπλοϊκά την Αττική με τις Κυκλάδες (Πάρο, Νάξο, Κύθνο, Κέα, Σύρο κτλ.) αλλά και μερικά νησιά των Δωδεκανήσων και του βορείου Αιγαίου (Ψαρά και Μεστά Χίου).

2.3.3 Επίλογος

Συνοψίζοντας, σε αυτό το σημείο έχουν πλέον διασαφηνιστεί όλα τα απαραίτητα στοιχεία που αφορούν την δομή των ΚΤΕΛ Αττικής και την αρχιτεκτονική του δικτύου, ο τρόπος μεταχείρισης των συγκοινωνιακών δεδομένων, οι διαδικασίες αποτύπωσής τους σε ψηφιακά μέσα καθώς και η σύσταση της νέας μορφοποίησής τους. Το στάδιο αυτό αποτελεί σημαντική βάση επί της οποίας αναπτύσσονται οι εφαρμογές τις οποίες πραγματεύονται τα επόμενα κεφάλαια.

3. ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΝΕΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ JOURNEY PLANNING ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

3.1 Εισαγωγή

Παρακάτω ακολουθεί η περιγραφή ενός μοντέλου αναφοράς για το πρόβλημα Journey Planning. Κατόπιν παρατίθεται ένα βελτιωμένο μοντέλο, με την αντίστοιχη ανάλυσή του, σκοπός του οποίου ήταν η εκτέλεσή του σε μικρότερο χρονικό διάστημα από το μοντέλο αναφοράς, υπό την εφαρμογή όσο το δυνατόν λιγότερων περιορισμών καθώς και την εύρεση της ίδιας βέλτιστης λύσης.

Και τα δύο μοντέλα έχουν στόχο την ανάδειξη της βέλτιστης διαδρομής με την εύρεση του πιο αποδοτικού συνδυασμού δρομολογίων του δικτύου συγκοινωνίας με σκοπό την ελαχιστοποίηση της διάρκειας επιβίβασης.

Στα μοντέλα εισάγονται από τον χρήστη η στάση εκκίνησης και τερματισμού, καθώς και οι επιθυμητές ώρες εκκίνησης και άφιξης στον προορισμό.

Ως δεδομένα έχουν εισαχθεί οι ώρες διέλευσης των λεωφορείων από τις αντίστοιχες στάσεις. Κατόπιν υπολογίζονται οι χρονικές διάρκειες μεταξύ δύο στάσεων, αν αυτές συνδέονται με κάποια γραμμή, διαφορετικά η διάρκεια αρχικοποιείται ως ένας πολύ μεγάλος αριθμός (M).

Οι αλγόριθμοι εξάγουν την ελάχιστη δυνατή συνολική διάρκεια επιβίβασης, καθώς και τις μεταβλητές απόφασης που αποτυπώνουν σε ποιες στάσεις έγινε επιβίβαση, με ποιόν προορισμό, με ποια γραμμή και με ποιον αύξοντα αριθμό δρομολογίου.

Η παραπάνω περιγραφή αφορά και τους δύο αλγορίθμους, αναφοράς και νέο και παρακάτω περιγράφονται τα μαθηματικά μοντέλα τους. Στο τέλος του κεφαλαίου τοποθετείται η σύγκριση των δύο και η ανάλυση των διαφορών τους.

3.2 Παρουσίαση Μοντέλου Αναφοράς

Παρακάτω περιγράφεται το μοντέλο αναφοράς για το πρόβλημα Journey Planning.

Nomenclature	
<u>Index-Related terminology</u>	
i, j, h	Indices used to represent nodes of the network,
k	Index used to represent the modes or transport,
n	Index used to represent the trip.
<u>Data-related Terminology</u>	
$C_{i,j,k}$	Cost of transportation from node i to node j with mode k,
$TT_{i,j,k}$	Travel Time of transportation from node i to node j with mode k,
$ToD_{i,j,k,n}$	Time of departure of trip n with mode k from node i to j. If no such transfer exists this variable's value is initialized to zero,
N	Number of nodes,
M	Number of modes of transport,
L	Maximum Number of trips in all available modes,
S	The departure station, which is the nearest network node to user's starting point,
T	The arrival station, which is the nearest network node to user's ending point,
a	Weight coefficient for cost in the objective function (a=0 in this version),
b	Weight coefficient for travel time in the objective function (b=1),
DT	Departure time of the user from the starting point,
AT	Latest arrival time of the user to the ending point.

<u>Decision variable terminology</u>	
$X_{i,j,k,n}$	Binary Variable used to represent whether a transfer is made from i to j with mode k and trip n. X is equal to 1 when transfer is made and 0 when it is not,
$S_{i,j,k,n}$	Non-negative continuous variable used to represent the departure time of i to j with k and n. If the transfer is not made, S is equal to 0.

ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ

$$MIN \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^L (\bar{a} * \overline{C_{i,j,k}} + \bar{b} * \overline{TT_{i,j,k}}) * X_{i,j,k,n}$$

ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ

$$\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^L X_{S,j,k,n} = 1$$

Ο περιορισμός εξασφαλίζει ότι υπάρχει μετάβαση από την στάση εκκίνησης σε μία ακριβώς στάση αποβίβασης, μίας γραμμής και ενός δρομολογίου.

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^L X_{i,T,k,n} = 1$$

Εξασφαλίζεται ότι σίγουρα θα φτάσει ο χρήστης στην τελική στάση αποβίβασης και μάλιστα με ένα ακριβώς τελικό δρομολόγιο.

$$\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^L X_{i,j,k,n} \leq 1, \forall i \neq T$$

Εξασφαλίζεται ότι για κάθε επιβίβαση δεν αντιστοιχούν περισσότερες της μίας, στάσεις αποβίβασης.

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^L X_{i,h,k,n} - \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^L X_{h,j,k,n} = 0, \forall h \neq S, T$$

Εξασφαλίζεται ότι ο χρήστης θα φύγει από οποιονδήποτε ενδιάμεσο κόμβο επισκεφτεί. Εξαιρούνται ο αρχικός κόμβος S και ο τελικός κόμβος T.

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^L X_{i,S,k,n} = 0$$

Εξασφαλίζει ότι το ταξίδι μας δεν θα διαβεί ξανά από τον αρχικό κόμβο S.

$$\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^L X_{T,j,k,n} = 0$$

Εξασφαλίζει ότι άπαξ και το ταξίδι φτάσει στον τελικό κόμβο T, δεν θα φύγει από αυτόν.

$$\overline{ToD}_{i,h,k,n} - BigM * (1 - X_{i,j,k,n}) \leq S_{i,j,k,n} \leq \overline{ToD}_{i,h,k,n} + BigM * (1 - X_{i,j,k,n}), \forall i, j, k, n$$

Όταν πραγματοποιείται η μετάβαση από τον κόμβο i στον j με την γραμμή k και το δρομολόγιο n, τότε το S λαμβάνει την τιμή της ToD.

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^L S_{i,h,k,n} + \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^L (\overline{TT}_{i,h,k} * X_{i,h,k,n}) - \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^L S_{h,j,k,n} \leq 0, \forall h \neq S, T$$

Εξασφαλίζει την χρονική συνοχή του προβλήματος.

$$\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^L S_{S,j,k,n} - \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^L S_{i,j,k,n} - \left(1 - \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^L X_{i,j,k,n} \right) * BigM \leq 0, \forall i \neq S$$

Εξασφαλίζει ότι η ώρα αναχώρησης από τον κόμβο S είναι η μικρότερη από όλες τις ώρες επιβίβασης.

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^L S_{i,T,k,n} - \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^L S_{i,j,k,n} \geq 0, \forall j \neq T$$

Εξασφαλίζει ότι η ώρα της τελευταίας επιβίβασης είναι η μεγαλύτερη όλων.

$$S_{i,j,k,n} - BigM * X_{i,j,k,n} \leq 0, \forall i, j, k, n$$

Αρχικοποιεί το S ως μηδέν για την περίπτωση που δεν υπάρχει μετάβαση από τον κόμβο i στον j με την γραμμή k και το δρομολόγιο n.

$$\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^L S_{S,j,k,n} \geq \overline{DT}$$

Εξασφαλίζει ότι η ώρα επιβίβασης από την πρώτη στάση είναι ίση ή μεγαλύτερη της επιθυμητής ώρας αναχώρησης του χρήστη.

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^L S_{i,T,k,n} + \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^L X_{i,T,k,n} * \overline{TT_{i,T,k}} \leq \overline{AT}$$

Το άθροισμα της τελευταίας ώρας επιβίβασης και της ώρας ταξιδιού της τελευταίας μετάβασης πρέπει να είναι μικρότερο της επιθυμητής ώρας άφιξης του χρήστη.

3.3 Παρουσίαση Νέου Μοντέλου

Παρακάτω περιγράφεται το νέο μοντέλο Journey Planning.

Nomenclature	
<u>Index-Related terminology</u>	
i, j, h	Indices used to represent nodes of the network,
k	Index used to represent the modes or transport,
n	Index used to represent the trip.
<u>Data-related Terminology</u>	
$C_{i,j,k}$	Cost of transportation from node i to node j with mode k ,
$TT_{i,j,k}$	Travel Time of transportation from node i to node j with mode k ,
$ToD_{i,j,k,n}$	Time of departure of trip n with mode k from node i to j . If no such transfer exists this variable's value is initialized to zero,
N	Number of nodes,
M	Number of modes of transport,
L	Maximum Number of trips in all available modes,
S	The departure station, which is the nearest network node to user's starting point,
T	The arrival station, which is the nearest network node to user's ending point,
a	Weight coefficient for cost in the objective function ($a=0$ in this version),
b	Weight coefficient for travel time in the objective function ($b=1$),
DT	Departure time of the user from the starting point,
AT	Latest arrival time of the user to the ending point,
$BigM$	A very large number.

<u>Decision variable terminology</u>	
$X_{i,j,k,n}$	Binary Variable used to represent whether a transfer is made from i to j with mode k and trip n . X is equal to 1 when transfer is made and 0 when it is not.

ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ

$$MIN \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^L (\bar{a} * \overline{C_{i,j,k}} + \bar{b} * \overline{TT_{i,j,k}}) * X_{i,j,k,n} + X_{i,j,k,n} * (\overline{ToD_{i,T,k,n}} + \overline{TT_{i,T,k}}) / BigM$$

ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ (ΚΟΙΝΟΙ)

$$\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^L X_{S,j,k,n} = 1$$

Ο περιορισμός εξασφαλίζει ότι υπάρχει μετάβαση από την στάση επιβίβασης σε μία ακριβώς στάση αποβίβασης, μίας γραμμής και ενός δρομολογίου.

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^L X_{i,T,k,n} = 1$$

Εξασφαλίζεται ότι σίγουρα θα φτάσει ο χρήστης στην τελική στάση αποβίβασης και μάλιστα με ένα ακριβώς τελικό δρομολόγιο.

$$\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^L X_{T,j,k,n} = 0$$

Εξασφαλίζει ότι άπαξ και το ταξίδι φτάσει στον τελικό κόμβο T, δεν θα φύγει από αυτόν.

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^L X_{i,S,k,n} = 0$$

Εξασφαλίζει ότι το ταξίδι μας δεν θα διαβεί ξανά από τον αρχικό κόμβο S.

$$\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^L X_{i,j,k,n} \leq 1, \forall i \neq T$$

Εξασφαλίζεται ότι για κάθε επιβίβαση δεν αντιστοιχούν περισσότερες της μίας, στάσεις αποβίβασης.

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^L X_{i,h,k,n} - \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^L X_{h,j,k,n} = 0, \forall h \neq S, T$$

Εξασφαλίζεται ότι ο χρήστης θα φύγει από οποιονδήποτε ενδιάμεσο κόμβο επισκεφτεί. Εξαιρούνται ο αρχικός κόμβος S και ο τελικός κόμβος T.

ΕΠΙΠΡΟΣΘΕΤΟΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ:

Όπως γίνεται φανερό από την επεξήγηση των μεταβλητών απόφασης, στο νέο μοντέλο έχει εξαλειφθεί η μεταβλητή απόφασης S η οποία αφορούσε την ώρα αναχώρησης από τον κόμβο i στον j με την γραμμή k και το δρομολόγιο n. Αντ' αυτού αντικαταστάθηκε από την έκφραση $X[i][j][k][n] * ToD[i][j][k][n]$. Τα πλεονεκτήματα αυτής της αντικατάστασης αναλύονται σε επόμενη παράγραφο. Από την εν λόγω αλλαγή προκύπτουν οι παρακάτω επιπρόσθετοι ή τροποποιημένοι περιορισμοί με τις αντίστοιχες φυσικές σημασίες:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^L [\overline{ToD}_{i,h,k,n} * X_{i,h,k,n} + (\overline{TT}_{i,h,k}) * X_{i,h,k,n}] - \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^L \overline{ToD}_{h,j,k,n} * X_{h,j,k,n} \leq 0 \forall h \neq S, T$$

Επιβάλλει την χρονική συνοχή του προβλήματος, ορίζοντας ότι η ώρα αναχώρησης από μια στάση είναι μεγαλύτερη από την ώρα αναχώρησης προς αυτήν την στάση αυξημένη με τον απαιτούμενο χρόνο ταξιδιού.

$$\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^L [\overline{ToD}_{S,j,k,n} * X_{S,j,k,n} - \overline{ToD}_{i,j,k,n} * X_{i,j,k,n} + X_{i,j,k,n} * BigM] \leq BigM, \forall i \neq T$$

Ορίζει ότι η ώρα αναχώρησης από την αφετηρία είναι η μικρότερη ώρα όλων των αναχωρήσεων.

$$\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^L \overline{ToD}_{S,j,k,n} * X_{S,j,k,n} \geq DT$$

Ορίζει ότι η ώρα αναχώρησης από την αφετηρία γίνεται μετά από την ώρα στην οποία ο επιβάτης θέλει να ξεκινήσει το ταξίδι του.

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^L X_{i,T,k,n} * (\overline{ToD}_{i,T,k,n} + \overline{TT}_{i,T,k,n}) \leq \overline{AT}$$

Το άθροισμα της τελευταίας ώρας επιβίβασης και της ώρας ταξιδιού της τελευταίας μετάβασης πρέπει να είναι μικρότερο ή ίσο της επιθυμητής ώρας άφιξης του χρήστη.

3.4 Σύγκριση Μαθηματικών Μοντέλων

Σε αυτό το σημείο κρίνεται χρήσιμη η σύγκριση των δύο μοντέλων και η επισήμανση των διαφορών τους. Να επισημανθεί ότι για την σύγκρισή τους έχουν εισαχθεί τα ίδια ακριβώς δεδομένα στάσεων και δρομολογίων και στους δύο αλγόριθμους καθώς και τα ίδια σημεία έναρξης και προορισμού από τον χρήστη, με κοινές επιθυμητές ώρες έναρξης και άφιξης.

3.4.1 Χρόνοι εκτέλεσης και μείωση περιορισμών

Το νέο μοντέλο που αναπτύχθηκε εκτελείται σε λιγότερο από το μισό χρόνο και αποτελείται από σημαντικά λιγότερους περιορισμούς, κάνοντας το πιο σύντομο και ευέλικτο, χωρίς ωστόσο να στερείται ακρίβειας σε σχέση με το ενδεικτικό μοντέλο. Αντιθέτως, κατόπιν τροποποίησης και της αντικειμενικής συνάρτησης, επιτυγχάνεται καλύτερο αποτέλεσμα το οποίο πέραν της ελαχιστοποίησης του χρόνου επιβίβασης, μεριμνά και για την νωρίτερη δυνατή διεκπεραίωση του ταξιδιού.

3.4.2 Μεταβλητές Απόφασης

Βασική τροποποίηση αποτελεί η εξάλειψη της μεταβλητής απόφασης S η οποία αφορούσε την ώρα αναχώρησης από τον κόμβο i στον j με την γραμμή k και το δρομολόγιο n . Την θέση της πήρε η έκφραση $X[i][j][k][n]*ToD[i][j][k][n]$. Η νέα αυτή έκφραση αποτυπώνει πλήρως τις πληροφορίες που έδινε η μεταβλητή S , αξιοποιώντας μεγέθη που ούτως ή άλλως υπήρχαν στο μαθηματικό μοντέλο, χωρίς δηλαδή να το επιβαρύνει περαιτέρω υπολογιστικά. Αποτέλεσμα αυτής της αλλαγής είναι η μείωση των μεταβλητών απόφασης στο μισό, από 11.250 σε 5.625.

3.4.3 Περιορισμοί

Η απαλοιφή της μεταβλητής απόφασης S με τον κατάλληλο χειρισμό και τροποποίηση των περιορισμών, καταφέρνει εξαιρετική μείωση του πλήθους των περιορισμών τους οποίους απαιτείται να εκτελέσει υπολογιστικά ο αλγόριθμος. Συγκεκριμένα, για το παρόν πρόβλημα οι περιορισμοί του ενδεικτικού μοντέλου που ήταν 17.000 μειώθηκαν σε μόλις 100, στο νέο μοντέλο.

Συγκεκριμένα, από οι περιορισμοί που εξαλείφονται είναι οι εξής:

- οι περιορισμοί συνοχής που αφορούν την μεταβλητή S και δίνουν τιμή στη μεταβλητή ToD όταν πραγματοποιείται η μετάβαση από τον κόμβο i στον j με την γραμμή k και το δρομολόγιο n (11.250 περιορισμοί) :

$$\overline{ToD}_{i,h,k,n} - BigM * (1 - X_{i,j,k,n}) \leq S_{i,j,k,n} \leq \overline{ToD}_{i,h,k,n} + BigM * (1 - X_{i,j,k,n}), \forall i, j, k, n$$

- Ο περιορισμός που μηδενίζει την τιμή S στην περίπτωση που δεν πραγματοποιείται η αντίστοιχη μετάβαση (5.625 περιορισμοί):

$$S_{i,j,k,n} - BigM * X_{i,j,k,n} \leq 0, \forall i, j, k, n$$

- Ο περιορισμός που εξασφαλίζει ότι η ώρα αναχώρησης προς τον τελικό προορισμό θα είναι η μεγαλύτερη όλων, ο οποίος καλύπτεται πλήρως από τον συνδυασμό προηγούμενων περιορισμών:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^L S_{i,T,k,n} - \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^L S_{i,j,k,n} \geq 0, \forall j \neq T$$

3.4.4 Αντικειμενική συνάρτηση

Εξίσου σημαντική βελτίωση που προκύπτει από το νέο κώδικα οφείλεται στην διαφορετική αντικειμενική συνάρτηση.

Η αντικειμενική συνάρτηση του ενδεικτικού μοντέλου είναι η εξής :

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^L (\overline{TT}_{i,j,k}) * X_{i,j,k,n}$$

Η οποία να μεν ελαχιστοποιεί τον χρόνο επιβίβασης, ωστόσο με κανέναν τρόπο δεν φροντίζει ο επιβάτης να επιβιβάζεται στο νωρίτερο δυνατό δρομολόγιο.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα:

Σύμφωνα με την εκτέλεση των δύο μοντέλων σε περιβάλλον Cplex, η οποία μελετάται εκτενώς σε επόμενο κεφάλαιο, για σημείο εκκίνησης την στάση S=18, και τελικό προορισμό την στάση T=13, με ώρα εκκίνησης DT=7:00 και αργότερη δυνατή ώρα άφιξης AT=20:00, το ενδεικτικό πρόγραμμα δίνει αποτέλεσμα την τελευταία μετάβαση από την 14 στην 13 να πραγματοποιείται στις 16:40 ενώ υπάρχει διαθέσιμη μετάβαση ίδιας διάρκειας επιβίβασης στις

8:40 η οποία σύμφωνα με τα δεδομένα TD και TT είναι εφικτή κ μπορεί να βρεθεί ακόμα και επισκοπικά.

Αντιθέτως η αντικειμενική συνάρτηση του νέου κώδικα είναι η παρακάτω:

$$MIN \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^L (\bar{a} * \overline{C_{i,j,k}} + \bar{b} * \overline{TT_{i,j,k}}) * X_{i,j,k,n} + X_{i,j,k,n} * (\overline{ToD_{i,T,k,n}} + \overline{TT_{i,T,k}}) / BigM$$

Όπου BigM ένας μεγάλος αριθμός BigM=10.000.000.000.000.

Επίσης, σημειώνεται ότι το δεύτερο μέλος αφορά την ώρα άφιξης στον τελικό προορισμό και ότι η διαίρεση με το BigM εξασφαλίζει ότι η τιμή της τελικής συνάρτησης δεν θα αλλοιωθεί εξαιτίας της εν λόγω τροποποίησης.

4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ CPLEX

4.1 Εισαγωγή

Μετά την ανάλυση των δύο μαθηματικών μοντέλων κρίνεται σκόπιμη η ανάπτυξη του αντίστοιχου κώδικα του νέου μοντέλου και η εκτέλεσή του, ώστε να αξιοποιηθεί πλήρως πάνω σε ενδεικτικά δεδομένα που βασίζονται στην αρχιτεκτονική του δικτύου των ΚΤΕΛ Αττικής, το οποίο μελετήθηκε εκτενέστερα σε προηγούμενο κεφάλαιο.

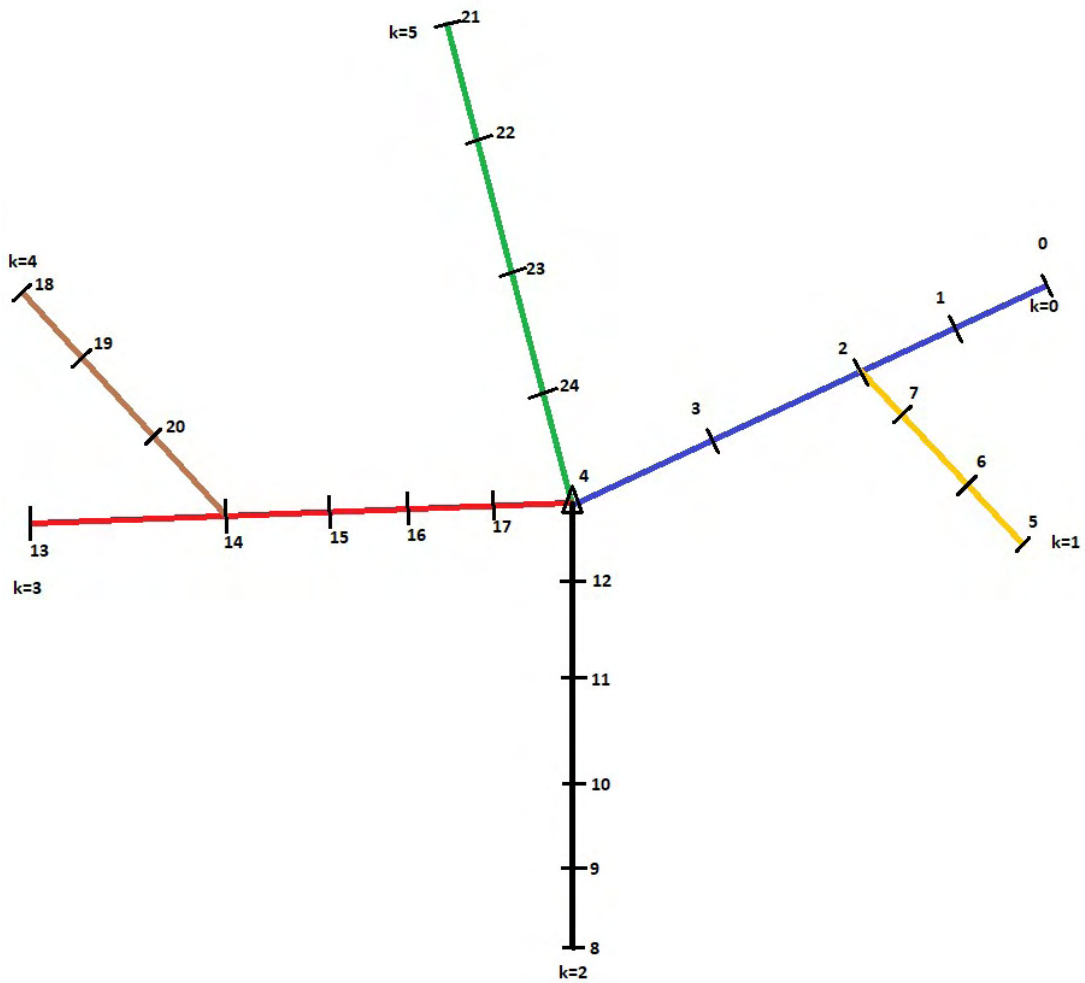
Ο εν λόγω κώδικας αποσκοπεί πρωτίστως στην άρτια εφαρμογή όλων όσων περιλαμβάνει το νέο μαθηματικό μοντέλο με στόχο την εξαγωγή της βέλτιστης λύσης αλλά και την επίτευξη ενός μικρότερου χρόνου εκτέλεσης από αυτόν του μοντέλου αναφοράς, εκμεταλλευόμενος την σημαντική μείωση των περιορισμών, που αναφέρεται σε προηγούμενο κεφάλαιο. Επίσης, μέσω της εκτέλεσης των κωδικών, αναφοράς και νέου, είναι δυνατή η κατανόηση της βελτίωσης της νέας αντικειμενικής συνάρτησης, μέσω της σύγκρισης των εξαγόμενων αποτελεσμάτων για κοινά δεδομένα.

4.2 Δεδομένα εισαγωγής

Στους παρακάτω κώδικες έχουν εισαχθεί ενδεικτικά δεδομένα τα οποία βασίζονται στη μορφή του δικτύου των ΚΤΕΛ Αττικής και αποτυπώνουν τον τρόπο σύνδεσης των βασικών γραμμών σε σημαντικούς κόμβους του δικτύου. Τα εν λόγω δεδομένα κρίνονται αρκετά ώστε να αναδείξουν τα πλεονεκτήματα του νέου μαθηματικού μοντέλου ενώ ταυτόχρονα το μέγεθός τους περιορίζεται στις 25, για την ομαλή εκτέλεση του μοντέλου αναφοράς, εξαιτίας της πολυπλοκότητάς του.

4.3 Δίκτυο επιλεγμένων κόμβων

Η νέα αποτύπωση του δικτύου περιλαμβάνει τις τέσσερις κύριες κατευθύνσεις του δικτύου, οι οποίες συνδέονται όλες μεταξύ τους μέσω του κεντρικού κόμβου 4, που αντιπροσωπεύει την αφετηρία του Πεδίου του Άρεως. Επιπρόσθετα, περιέχονται και 2 σημαντικές διακλαδώσεις που αφορούν την μετεπιβίβαση από Ραφήνα προς αεροδρόμιο, και από Μέγαρο προς Αλεποχώρι, σύμφωνα με το παρακάτω σχέδιο:



Εικόνα 1: Σκαρίφημα προσομοίωσης δικτύου ΚΤΕΛ Αττικής

Οι αριθμημένες γραμμές αφορούν τους εξής προορισμούς:

- η γραμμή k=0 αντιστοιχεί στην ανατολική γραμμή προς Ραφήνα και Μαραθώνα

- και εκτείνεται από τον κόμβο 0 μέχρι και τον κόμβο 4,
- η γραμμή $k=1$ στη σύνδεση του Λιμανιού της Ραφήνας με το Αεροδρόμιο και εκτείνεται από τον κόμβο 5 μέχρι τον 2,
 - η γραμμή $k=2$ στη νότια γραμμή προς Λαύριο από τον κόμβο 8 έως τον 4,
 - η γραμμή $k=3$ στη δυτική γραμμή προς Μέγαρα- Κινέτα από τον κόμβο 13 έως τον 4,
 - η γραμμή $k=4$ στη σύνδεση Μεγάρων- Αλεποχωρίου από τον κόμβο 19 έως το 14,
 - και τέλος, η γραμμή $k=5$ στη βόρεια γραμμή προς Ωρωπό, από τον κόμβο 21 έως τον 4.

Κάθε κόμβος αντιπροσωπεύει το κέντρο βασικών περιοχών του δικτύου σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα:

i	Περιοχή
0	Μαραθώνας
1	Νέα Μάκρη
2	Ραφήνα
3	Γέρακας
4	Πεδίον του Άρεως
5	Αεροδρόμιο Ελ. Βενιζέλος
6	Άρτεμις
7	Υπαπαντή
8	Λαύριο
9	Κερατέα
10	Μαρκόπουλο
11	Κορωπί
12	Παιανία
13	Κινέτα
14	Μέγαρα
15	Νέα Πέραμος
16	Ελευσίνα
17	Σκαραμαγκάς
18	Αιγιρούσες
19	Αλεποχώρι
20	Άνω Αλεποχώρι
21	Δήλεσι
22	Ωρωπός
23	Μαλακάσα
24	Διόδια Αφιδνών

Εικόνα 2: Πίνακας αντιστοιχίας κόμβων- περιοχών

Ενδεικτικά, η χρονική απόσταση των διελεύσεων από διαδοχικές στάσεις έχει οριστεί σταθερή 10 λεπτά, ανεξάρτητα της ώρας εκτέλεσης του δρομολογίου, και τα δρομολόγια όλων των γραμμών έχουν οριστεί σε ένα πρωινό και ένα απογευματινό και για τις δύο κατευθύνσεις κάθε διαδρομής.

Αρχικά εισάγονται οι ώρες διέλευσης ($TD[i][j][k][n]$) των κόμβων του δικτύου, σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα:

k=0			k=3		
n=0	Μαραθώνας- Αθήνα	8:00	n=12	Κινέτα- Αθήνα	8:00
n=1	Μαραθώνας- Αθήνα	16:00	n=13	Κινέτα- Αθήνα	16:00
n=2	Αθήνα- Μαραθώνας	8:00	n=14	Αθήνα- Κινέτα	8:00
n=3	Αθήνα- Μαραθώνας	16:00	n=15	Αθήνα- Κινέτα	16:00
k=1			k=4		
n=4	Αεροδρόμιο- Ραφήνα	7:00	n=16	Αλεποχώρι- Μέγαρο	7:00
n=5	Αεροδρόμιο- Ραφήνα	15:00	n=17	Αλεποχώρι- Μέγαρο	15:00
n=6	Ραφήνα- Αεροδρόμιο	9:00	n=18	Μέγαρο- Αλεποχώρι	9:00
n=7	Ραφήνα- Αεροδρόμιο	17:00	n=19	Μέγαρο- Αλεποχώρι	17:00
k=2			k=5		
n=8	Λαύριο- Αθήνα	8:00	n=20	Ωρωπός- Αθήνα	8:00
n=9	Λαύριο- Αθήνα	16:00	n=21	Ωρωπός- Αθήνα	16:00
n=10	Αθήνα- Λαύριο	8:00	n=22	Αθήνα- Ωρωπός	8:00
n=11	Αθήνα- Λαύριο	16:00	n=23	Αθήνα- Ωρωπός	16:00

Εικόνα 3:Πίνακας Δρομολογίων

Μετά από κατάλληλη επεξεργασία εντός του κώδικα, προκύπτουν οι αντίστοιχες χρονικές αποστάσεις όλων κόμβων μεταξύ τους ($TT[i][j][k]$), οι οποίες είναι εμφανές ότι είναι ανεξάρτητες του δείκτη n , καθώς όπως προαναφέρθηκε, είναι ανεξάρτητες της ώρας που πραγματοποιείται το δρομολόγιο. Στην περίπτωση που δύο κόμβοι δεν συνδέονται μεταξύ τους με την ίδια γραμμή, τότε τα μεγέθη αυτά ορίζονται ως μηδέν για την ώρα διέλευσης ($TD[i][j][k][n]$) και ως $M = 10.000.000.000.000$, για την χρονική απόσταση μεταξύ των εν λόγω κόμβων ($TT[i][j][k]$). Στον παρακάτω πίνακα υπενθυμίζεται η φυσική σημασία των δεικτών:

Index-Related terminology

i, j, h	Indices used to represent nodes of the network,
k	Index used to represent the modes or transport,
n	Index used to represent the trip.

4.4 Περιεχόμενο κωδικών

Πέραν των κοινών αυτών δεδομένων, στους δύο κώδικες περιλαμβάνονται επίσης:

- οι σταθερές που εισάγονται από τον χρήστη και περιγράφουν τον κόμβο έναρξης του ταξιδιού (S), τον κόμβο όπου επιθυμεί να φτάσει (T), την ωριότερη δυνατή ώρα έναρξης του ταξιδιού (DT) και την αργότερη δυνατή ώρα άφιξης στον προορισμό του(AT), (οι ώρες DT και AT μετατρέπονται από μορφή ώρας σε πλήθος λεπτών, για παράδειγμα το 8:00 μετατρέπεται σε 480),
- τα πλήθη των κόμβων, γραμμών και δρομολογίων, αντίστοιχα (imax, jmax, kmax, nmax, hmax),
- όλοι οι περιορισμοί σύμφωνα με τα αντίστοιχα μαθηματικά μοντέλα,
- οι μεταβλητές απόφασης: $S[i][j][k][n]$ για τον κώδικα αναφοράς και οι κοινοί $X[i][j][k][n]$ και για τους 2, όπως αυτές ορίστηκαν σε προηγούμενη παράγραφο:

Decision variable terminology

$X_{i,j,k,n}$	Binary Variable used to represent whether a transfer is made from i to j with mode k and trip n. X is equal to 1 when transfer is made and 0 when it is not,
$S_{i,j,k,n}$	Non-negative continuous variable used to represent the departure time of i to j with k and n. If the transfer is not made, S is equal to 0.

- η αντικειμενική συνάρτηση σύμφωνα με το αντίστοιχο μαθηματικό μοντέλο,
- και τέλος, οι εντολές εκτύπωσης των αποτελεσμάτων μετά την εκτέλεση κάθε κώδικα (κατόπιν επεξεργασίας, οι ώρες επιβίβασης εκτυπώνονται σε μορφή ώρας ΩΩ:ΛΛ, και όχι σε πλήθος λεπτών.)

4.5 Παραδείγματα και σύγκριση αποτελεσμάτων

Η υλοποίηση των προγραμμάτων πραγματοποιήθηκε σε προσωπικό υπολογιστή τα χαρακτηριστικά του οποίου είναι τα εξής:

- Επεξεργαστής: Intel(R) Core(TM) i7-7700 CPU @ 3.60GHz,
- Εγκατεστημένη μνήμη: 8,00 GB,
- Λογισμικό: Windows 10 Pro 64-bit.

Στο παράρτημα Α παρατίθενται τα αναλυτικά αποτελέσματα που εξήχθησαν κατά την εκτέλεση των δύο κωδικών για δέκα παραδείγματα. Παρακάτω ακολουθούν τα συνοπτικά αποτελέσματα των παραδειγμάτων, κατά τα οποία έχουν εισαχθεί από τον χρήστη διάφοροι επιθυμητοί προορισμοί, κόμβοι αφετηρίας και επιθυμητές ώρες ταξιδιού. Τα αποτελέσματα κάθε εκτέλεσης περιλαμβάνουν:

- χρήσιμες πληροφορίες για την διαδικασία εκτέλεσης του κώδικα, όπως χρόνος εκτέλεσης και πλήθος περιορισμών και μεταβλητών απόφασης που εφαρμόστηκαν,
- τη συνολική διάρκεια επιβίβασης στα λεωφορεία «Solution value»,
- και τέλος, το σύνολο των μεταβλητών απόφασης που ενεργοποιήθηκαν ($X[i][j][k][n]=1$), συνοδευόμενες από τις αντίστοιχες ώρες επιβίβασης του χρήστη σε κάθε λεωφορείο ($TD[i][j][k][n]$).

Παράδειγμα 1

Για κόμβο εκκίνησης $S=9$ και κόμβο προορισμού $T=21$, εντός του χρονικού παραθύρου $(DT- AT) = (7:00- 17:00)$ και οι δύο κώδικες εξάγουν το ίδιο αποτέλεσμα, με κοινή βέλτιστη λύση:

```
Solution status = Optimal
Solution value = 80
Xijkn(4,23,5,23)=1
TDijkn(4,23,5,23)=16:00
Xijkn(9,10,2,8)=1
TDijkn(9,10,2,8)=8:10
Xijkn(10,12,2,8)=1
TDijkn(10,12,2,8)=8:20
Xijkn(12,4,2,8)=1
TDijkn(12,4,2,8)=8:40
Xijkn(23,21,5,23)=1
TDijkn(23,21,5,23)=16:20
Press any key to continue . . .
```

Εικόνα 4: Κοινή εκτύπωση για παράδειγμα 1

Όπου υποδηλώνεται η μετεπιβίβαση από το δρομολόγιο $n=8$ στο $n=23$ στον κόμβο $i=4$. Ωστόσο, σύμφωνα με τους πίνακες του παραρτήματος Α, οι χρόνοι εκτέλεσης αντιστοιχούν σε 0,16sec για το νέο κώδικα και 0,77sec για το κώδικα αναφοράς, ενώ οι εφαρμοσμένοι περιορισμοί αντιστοιχούν σε 100 για το νέο κώδικα και 270.070 για το κώδικα αναφοράς

Παράδειγμα 2

Για κόμβο εκκίνησης $S=6$ και κόμβο προορισμού $T=19$, εντός του χρονικού παραθύρου $(DT-AT) = (6:00-20:00)$ και οι δύο κώδικες εξάγουν:

```
Solution status = Optimal
Solution value = 100
Xijkn(2,4,0,0)=1
TDijkn(2,4,0,0)=8:20
Xijkn(4,15,3,15)=1
TDijkn(4,15,3,15)=16:00
Xijkn(6,2,1,4)=1
TDijkn(6,2,1,4)=7:10
Xijkn(14,19,4,19)=1
TDijkn(14,19,4,19)=17:00
Xijkn(15,14,3,15)=1
TDijkn(15,14,3,15)=16:30
Press any key to continue . . .
```

Εικόνα 5: Κοινή εκτύπωση για παράδειγμα 2

Σύμφωνα με τους πίνακες του παραρτήματος Α, οι χρόνοι εκτέλεσης αντιστοιχούν σε 0,20sec για το νέο κώδικα και 0,84sec για το κώδικα αναφοράς, ενώ οι εφαρμοσμένοι περιορισμοί αντιστοιχούν σε 96 για το νέο κώδικα και 269.893 για το κώδικα αναφοράς.

Παράδειγμα 3

Για κόμβο εκκίνησης S=18 και κόμβο προορισμού T=13, εντός του χρονικού παραθύρου (DT- AT) = (7:00- 20:00) ο νέος κώδικας εξάγει:

```
Solution status = Optimal
Solution value = 40
Xijkn(14,13,3,14)=1
TDijkn(14,13,3,14)=8:40
Xijkn(18,14,4,16)=1
TDijkn(18,14,4,16)=7:00
```

Εικόνα 6: Εκτύπωση νέου κώδικα για παράδειγμα 3

Όπου υποδηλώνεται η μετεπιβίβαση από το δρομολόγιο n=16 στο n=14 στον κόμβο i=14. Ωστόσο ο κώδικας αναφοράς εξάγει τα εξής αποτελέσματα:

```
Solution status = Optimal
Solution value = 40
Xijkn(14,13,3,15)=1
TDijkn(14,13,3,15)=16:40
Xijkn(18,14,4,16)=1
TDijkn(18,14,4,16)=7:00
Press any key to continue . . .
```

Εικόνα 7: Εκτύπωση κώδικα αναφοράς για παράδειγμα 3

Τα οποία αποτελούν χαρακτηριστικό παράδειγμα της αδυναμίας του κώδικα αναφοράς να διακρίνει την καλύτερη επιλογή μετεπιβιβάσεων στην πολύ πιθανή περίπτωση πολλαπλών βέλτιστων λύσεων ως προς την ελαχιστοποίηση χρόνου επιβίβασης.

Πιο συγκεκριμένα, η ανωτέρω λύση έχει όμοιο ελαχιστοποιημένο κόστος με αυτό του νέου κώδικα, ωστόσο προτείνει την επιβίβαση στο δρομολόγιο n=15 στις 16:40, γεγονός που προκαλεί στον χρήστη περιττή αναμονή 8 επιπλέον ωρών στον κόμβο i=14, καθώς η αντικειμενική συνάρτηση του κώδικα αναφοράς δε μεριμνά για την βέλτιστη, από πρακτικής άποψης, λύση ακόμα και μεταξύ λύσεων με όμοιο κόστος συνάρτησης.

Αντιθέτως, ο νέος κώδικας, χωρίς να επηρεάζει το κόστος συνάρτησης που εξάγει, μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης:

$$MIN \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^L (\bar{a} * \overline{C_{i,j,k}} + \bar{b} * \overline{TT_{i,j,k}}) * X_{i,j,k,n} + X_{i,j,k,n} * (\overline{ToD_{i,T,k,n}} + \overline{TT_{i,T,k}}) / BigM$$

Εξάγει ως λύση, την εφικτή επιβίβαση στο τελευταίο λεωφορείο στις 8:40 και επιτυγχάνει την διάκριση της πιο πρακτικής διαδρομής, αποκλειστικά στην περίπτωση πολλαπλών βέλτιστων λύσεων.

Επίσης, σύμφωνα με τους πίνακες του παραρτήματος A, οι χρόνοι εκτέλεσης αντιστοιχούν σε 0,36sec για το νέο κώδικα και 0,78sec για το κώδικα αναφοράς, ενώ οι εφαρμοσμένοι περιορισμοί αντιστοιχούν σε 100 για το νέο κώδικα και 269.892 για το κώδικα αναφοράς

Παράδειγμα 4

Για κόμβο εκκίνησης $S=13$ και κόμβο προορισμού $T=18$, εντός του χρονικού παραθύρου $(DT-AT) = (7:00-23:00)$ ο νέος κώδικας εξάγει:

```
Solution status = Optimal
Solution value = 40
Xijkn(13,14,3,12)=1
TDijkn(13,14,3,12)=8:00
Xijkn(14,18,4,18)=1
TDijkn(14,18,4,18)=9:00
```

Εικόνα 8: Εκτύπωση νέου κώδικα για παράδειγμα 4

Όπου υποδηλώνεται η μετεπιβίβαση από το δρομολόγιο $n=12$ στο $n=18$ στον κόμβο $i=14$. Αντιθέτως, όπως και σε προηγούμενο παράδειγμα, ο κώδικας αναφοράς εξάγει διαφορετικό αποτέλεσμα:

```
Solution status = Optimal
Solution value = 40
Xijkn(13,14,3,12)=1
TDijkn(13,14,3,12)=8:00
Xijkn(14,18,4,19)=1
TDijkn(14,18,4,19)=17:00
```

Εικόνα 9: Εκτύπωση κώδικα αναφοράς για παράδειγμα 4

το οποίο ναι μεν συμφωνεί με το κόστος συνάρτησης του νέου κώδικα, ωστόσο παραβλέπει την εφικτή νωρίτερη μετεπιβίβαση των 9:00 στο δρομολόγιο $n=18$ καθυστερώντας την

ολοκλήρωση του ταξιδιού κατά 8 ώρες και προδίδει την σημασία της βελτίωσης επί της αντικειμενικής συνάρτησης στο νέο κώδικα.

Επίσης, σύμφωνα με τους πίνακες του παραρτήματος A, οι χρόνοι εκτέλεσης αντιστοιχούν σε 0,36sec για το νέο κώδικα και 0,76sec για το κώδικα αναφοράς, ενώ οι εφαρμοσμένοι περιορισμοί αντιστοιχούν σε 100 για το νέο κώδικα και 269.898 για το κώδικα αναφοράς

Παράδειγμα 5

Για κόμβο εκκίνησης $S=14$ και κόμβο προορισμού $T=23$, εντός του χρονικού παραθύρου $(DT- AT) = (7:00- 23:00)$ και οι δύο κώδικες εξάγουν το ίδιο αποτέλεσμα, με κοινή βέλτιστη λύση, χωρίς να προκύπτει κάποια διαφοροποίηση:

```
Solution status = Optimal
Solution value = 60
Xijkn(4,24,5,23)=1
TDijkn(4,24,5,23)=16:00
Xijkn(14,17,3,12)=1
TDijkn(14,17,3,12)=8:10
Xijkn(17,4,3,12)=1
TDijkn(17,4,3,12)=8:40
Xijkn(24,23,5,23)=1
TDijkn(24,23,5,23)=16:10
Press any key to continue . . . .
```

Εικόνα 10: Κοινή εκτύπωση για παράδειγμα 5

Όπου υποδηλώνεται η μετεπιβίβαση από το δρομολόγιο $n=12$ στο $n=23$ στον κόμβο $i=14$.

Επίσης, σύμφωνα με τους πίνακες του παραρτήματος A, οι χρόνοι εκτέλεσης αντιστοιχούν σε 0,17sec για το νέο κώδικα και 0,68sec για το κώδικα αναφοράς, ενώ οι εφαρμοσμένοι περιορισμοί αντιστοιχούν σε 95 για το νέο κώδικα και 269.900 για το κώδικα αναφοράς

Παράδειγμα 6

Το εν λόγω παράδειγμα αποσκοπεί στον έλεγχο τήρησης των χρονικών παραθύρων που εισάγει ο χρήστης. Σκοπίμως εξετάζεται ταξίδι με κόμβο εκκίνησης $S=21$ και κόμβο προορισμού $T=6$, εντός του χρονικού παραθύρου $(DT- AT) = (20:00- 23:00)$. Ορθώς, και οι δύο κώδικες εξάγουν σφάλμα λόγω μη εφικτής λύσης:

```

C:\windows\system32\cmd.exe
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP      0
Infeasible column 'Xijkn(i21,,j22,k3,n21)'.
Presolve time = 0.05 sec. (49.41 ticks)

Root node processing (before b&c):
  Real time                = 0.06 sec. (60.90 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time                = 0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average)     = 0.00 sec.
  Wait time (average)     = 0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) = 0.06 sec. (60.90 ticks)
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP      0

Root node processing (before b&c):
  Real time                = 0.00 sec. (0.00 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time                = 0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average)     = 0.00 sec.
  Wait time (average)     = 0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) = 0.00 sec. (0.00 ticks)
Failed to optimize LP.
Unknown exception caught
Press any key to continue . . .
    
```

Εικόνα 11: Εκτύπωση νέου κώδικα για παρ. 6

```

C:\windows\system32\cmd.exe
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP      0
Implied bounds make row '#####'
Presolve time = 0.53 sec. (584.66 ticks)

Root node processing (before b&c):
  Real time                = 0.55 sec. (613.27 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time                = 0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average)     = 0.00 sec.
  Wait time (average)     = 0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) = 0.55 sec. (613.27 ticks)
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP      0

Root node processing (before b&c):
  Real time                = 0.00 sec. (0.00 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time                = 0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average)     = 0.00 sec.
  Wait time (average)     = 0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) = 0.00 sec. (0.00 ticks)
Failed to optimize LP.
Unknown exception caught
Press any key to continue . . .
    
```

Εικόνα 12: Εκτύπωση κώδικα αναφοράς για παρ.6

Παράδειγμα 7

Για κόμβο εκκίνησης S=19 και κόμβο προορισμού T=5, εντός του χρονικού παραθύρου (DT- AT) = (7:00- 23:00) και οι δύο κώδικες εξάγουν το ίδιο αποτέλεσμα, με κοινή βέλτιστη λύση, χωρίς να προκύπτει κάποια διαφοροποίηση:

```
Solution status = Optimal
Solution value = 110
Xijkn(2,5,1,7)=1
TDijkn(2,5,1,7)=17:00
Xijkn(4,2,0,3)=1
TDijkn(4,2,0,3)=16:00
Xijkn(14,16,3,12)=1
TDijkn(14,16,3,12)=8:10
Xijkn(16,4,3,12)=1
TDijkn(16,4,3,12)=8:30
Xijkn(19,14,4,16)=1
TDijkn(19,14,4,16)=7:10
```

Εικόνα 13: Κοινή εκτύπωση για παράδειγμα 7

Επίσης, σύμφωνα με τους πίνακες του παραρτήματος Α, οι χρόνοι εκτέλεσης αντιστοιχούν σε 0,22sec για το νέο κώδικα και 0,83sec για το κώδικα αναφοράς, ενώ οι εφαρμοσμένοι περιορισμοί αντιστοιχούν σε 97 για το νέο κώδικα και 269.891 για το κώδικα αναφοράς

Παράδειγμα 8

Για κόμβο εκκίνησης $S=20$ και κόμβο προορισμού $T=17$, εντός του χρονικού παραθύρου $(DT-AT) = (7:00- 23:00)$ επιβεβαιώνεται για άλλη μία φορά η διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων λόγω διαφορετικής αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία μεταθέτει την μετεπιβίβαση από το δρομολόγιο $n=16$ στο $n=12$ στον κόμβο $i=14$ κατά 6 ώρες:

```
Solution status = Optimal
Solution value = 40
Xijkn(14,17,3,12)=1
TDijkn(14,17,3,12)=8:10
Xijkn(20,14,4,16)=1
TDijkn(20,14,4,16)=7:20
```

```
Solution status = Optimal
Solution value = 40
Xijkn(14,17,3,13)=1
TDijkn(14,17,3,13)=16:10
Xijkn(20,14,4,16)=1
TDijkn(20,14,4,16)=7:20
```

Εικόνα 14: Εκτύπωση νέου κώδικα για παρ. 8 Εικόνα 15: Εκτύπωση κώδικα αναφοράς για παρ. 2

Επίσης, σύμφωνα με τους πίνακες του παραρτήματος Α, οι χρόνοι εκτέλεσης αντιστοιχούν σε 0,39sec για το νέο κώδικα και 1,61sec για το κώδικα αναφοράς, ενώ οι εφαρμοσμένοι περιορισμοί αντιστοιχούν σε 100 για το νέο κώδικα και 269.891 για το κώδικα αναφοράς

Παράδειγμα 9

Για κόμβο εκκίνησης $S=0$ και κόμβο προορισμού $T=5$, εντός του χρονικού παραθύρου $(DT-AT) = (7:00- 9:00)$ εξετάζεται η τήρηση του περιορισμού άφιξης μέχρι την ώρα AT :

```
C:\windows\system32\cmd.exe
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP      0
Infeasibility row '|||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||'
Presolve time = 0.06 sec. (64.92 ticks)

Root node processing (before b&c):
  Real time = 0.06 sec. (76.40 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time = 0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average) = 0.00 sec.
  Wait time (average) = 0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) = 0.06 sec. (76.40 ticks)
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP      0

Root node processing (before b&c):
  Real time = 0.00 sec. (0.00 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time = 0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average) = 0.00 sec.
  Wait time (average) = 0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) = 0.00 sec. (0.00 ticks)
Failed to optimize LP.
Unknown exception caught
Press any key to continue . . .
```

Εικόνα 16: Εκτύπωση νέου κώδικα για παράδειγμα 9

```
C:\windows\system32\cmd.exe
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP      0
Infeasibility row '|||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||'
Presolve time = 0.27 sec. (316.41 ticks)

Root node processing (before b&c):
  Real time = 0.30 sec. (345.02 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time = 0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average) = 0.00 sec.
  Wait time (average) = 0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) = 0.30 sec. (345.02 ticks)
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP      0

Root node processing (before b&c):
  Real time = 0.00 sec. (0.00 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time = 0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average) = 0.00 sec.
  Wait time (average) = 0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) = 0.00 sec. (0.00 ticks)
Failed to optimize LP.
Unknown exception caught
Press any key to continue . . .
```

Εικόνα 17: Εκτύπωση κώδικα αναφοράς για παράδειγμα 9

Ορθώς και οι δύο κώδικες εξάγουν σφάλμα μη εφικτότητας.

Παράδειγμα 10

Για κόμβο εκκίνησης $S=1$ και κόμβο προορισμού $T=9$, εντός του χρονικού παραθύρου $(DT-AT) = (7:00-20:00)$ και οι δύο κώδικες εξάγουν το ίδιο αποτέλεσμα, με κοινή βέλτιστη λύση, χωρίς να προκύπτει κάποια διαφοροποίηση:

```
Solution status = Optimal
Solution value = 70
Xijkn(1,4,0,0)=1
TDijkn(1,4,0,0)=8:10
Xijkn(4,10,2,11)=1
TDijkn(4,10,2,11)=16:00
Xijkn(10,9,2,11)=1
TDijkn(10,9,2,11)=16:30
```

Εικόνα 18: Κοινή εκτύπωση για παράδειγμα 10

Όπου υποδηλώνεται η μετεπιβίβαση μεταξύ των δρομολογίων $n=0$ και $n=11$ στον κόμβο $i=4$.

Επίσης, σύμφωνα με τους πίνακες του παραρτήματος Α, οι χρόνοι εκτέλεσης αντιστοιχούν σε 0,16sec για το νέο κώδικα και 0,74sec για το κώδικα αναφοράς, ενώ οι εφαρμοσμένοι περιορισμοί αντιστοιχούν σε 97 για το νέο κώδικα και 269.894 για το κώδικα αναφοράς

4.6 Χρήσιμα συμπεράσματα

Κατόπιν της επεξήγησης της προσομοίωσης του δικτύου ΚΤΕΛ Αττικής σε συγκεκριμένο πλήθος κόμβων, της αντιστοίχισης των κόμβων σε βασικές περιοχές του δικτύου, της αποτύπωσης των δρομολογίων κάθε γραμμής, της δομής των κωδικών και τέλος, του περιεχομένου των αποτελεσμάτων, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα για το νέο κώδικα:

1. **Μεγάλη μείωση του χρόνου εκτέλεσης** συγκριτικά με τον κώδικα αναφοράς. Συγκεκριμένα, από τις μετρήσεις των χρόνων τόσο σε δευτερόλεπτα, όσο και σε ticks προκύπτει ο νέος κώδικας εκτελείται κατά μέσο όρο 3.46 φορές γρηγορότερα από τον κώδικα αναφοράς.
2. **Σημαντική μείωση στους εφαρμοσμένους περιορισμούς.** Πιο αναλυτικά, ήδη από την σύγκριση των μαθηματικών μοντέλων ήταν φανερή η διαφορά των απαιτούμενων περιορισμών για την εκτέλεσή τους. Για το συγκεκριμένο πλήθος δεδομένων εισαγωγής, οι 17.000 περιορισμοί του μοντέλου αναφοράς μειώνονται σε μόλις 100 στο νέο μοντέλο. Αναλόγως, από τις πληροφορίες που εξάγουν οι κώδικες προκύπτουν

σημαντικές διαφορές οι οποίες κατά μέσο όρο προσμετρώνται σε 269.916 για τον κώδικα αναφοράς και 98 για το νέο.

3. **Επιλογή νωρίτερης διαδρομής σε περίπτωση πολλαπλών λύσεων.** Χωρίς επιβολή περαιτέρω περιορισμών, ο νέος κώδικας λαμβάνει υπόψιν του την εύλογη σημασία της νωρίτερης δυνατής άφιξης όταν προκύπτει η ίδια διάρκεια επιβίβασης για περισσότερων του ενός συνδυασμού. Η διαίρεση της ώρας άφιξης με το μεγάλο $M=1.000.000.000.000$ αποτελεί έναν ελάχιστο συντελεστή βαρύτητας ο οποίος λαμβάνεται υπόψιν από τον κώδικα μόνο σε περίπτωση πολλαπλών λύσεων και επιτυγχάνει να προσδίδει στον χρήστη αμετάβλητο και ακριβές κόστος συνάρτησης όσον αφορά τη διάρκεια επιβίβασής του. Σημαντική απόρροια αυτού αποτελεί, σε πολλές περιπτώσεις, η άφιξη του χρήστη σε πολύ πιο σύντομο χρονικό διάστημα σε σύγκριση με τον κώδικα αναφοράς.
4. **Σταθερή συνέπεια στην εξαγωγή μη εφικτότητας,** ομοίως και με τον κώδικα αναφοράς, για περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει προγραμματισμένο δρομολόγιο για τους κόμβους και το χρονικό παράθυρο που εισάγει ο χρήστης. Η ‘οπτική γωνία’ αυτού του συμπεράσματος αποσκοπεί στην επιβεβαίωση ότι ο νέος κώδικας τηρεί στοιχειώδεις διαδικασίες όπως η διαπίστωση απουσίας εφικτής λύσης, όταν αυτό τυγχάνει.

4.7 Επίλογος

Στο παραπάνω κεφάλαιο ολοκληρώθηκε ο τελικός σκοπός της ανάπτυξης του νέου μαθηματικού μοντέλου περί Journey Planning, ο οποίος είναι η εφαρμογή του σε υπολογιστικό περιβάλλον, η προσθήκη κρίσιμων βελτιώσεων και η ευέλικτη εξαγωγή βέλτιστης λύσης και χρήσιμων πληροφοριών για τον καλύτερο δυνατό σχεδιασμό του ταξιδιού του χρήστη. Η εκτέλεσή του σε σύγκριση με τον αντίστοιχο κώδικα αναφοράς, είχε ως αποτέλεσμα την ανάδειξη χρήσιμων διαφορών και συμπερασμάτων και τον προσδιορισμό κομβικών χαρακτηριστικών του μοντέλου αναφοράς, τα οποία επιδέχονταν βελτίωσης, συνοδευόμενα από χαρακτηριστικά παραδείγματα.

Ταυτόχρονα αξιοποιήθηκε σε επίπεδο προσομοίωσης, η αρχιτεκτονική του δικτύου των ΚΤΕΛ Αττικής ακόμα και σε περιορισμένο πλήθος στάσεων. Στην συνέχεια, τα δεδομένα του εν λόγω δικτύου αξιοποιούνται σε πλήρη βαθμό σε επόμενο κεφάλαιο το οποίο πραγματεύεται τον επανασυγχρονισμό πολλαπλών δρομολογίων των ΚΤΕΛ Αττικής, με στόχο την βελτιστοποίησή του, σύμφωνα με κριτήρια τα οποία αναλύονται εντός του κεφαλαίου.

5. ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΣ ΑΝΤΑΠΟΚΡΙΣΕΩΝ ΜΕ ΤΑ ΒΑΣΙΚΑ ΔΡΟΜΟΛΟΓΙΑ

5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται οι μέθοδοι και διαδικασίες που ακολουθήθηκαν με σκοπό τον επαναπροσδιορισμό των ανταποκρίσεων του δικτύου των ΚΤΕΛ Αττικής, με κριτήριο την καλύτερη εξυπηρέτηση των επιβατών και πιο συγκεκριμένα, την ελαχιστοποίηση της αναμονής μετεπιβίβασης. Στο εν λόγω πρόβλημα αξιοποιούνται στο πλήρες μέγεθός τους, τόσο τα ψηφιοποιημένα δεδομένα του δικτύου των ΚΤΕΛ Αττικής, όσο και οι δυνατότητες μεταχείρισης που προσφέρει η μορφοποίηση των GTFS, επί της οποίας γίνεται η διαλογή των απαραίτητων δρομολογίων για κάθε παράδειγμα.

Εντός του κεφαλαίου περιγράφονται τα δρομολόγια που τροποποιούνται, οι διαδικασίες προεπεξεργασίας των δεδομένων GTFS που προέκυψαν από την ψηφιοποίηση που αναλύθηκε εκτενώς στο Κεφάλαιο 1, το μαθηματικό μοντέλο εκ του οποίου εξάγονται τα τελικά αποτελέσματα, η δομή του αντίστοιχου κώδικα σε υπολογιστικό περιβάλλον και τέλος παρατίθενται τα τελικά αποτελέσματα συγχρονισμού.

5.2 Προσδιορισμός δρομολογίων βασικών ανταποκρίσεων

Σε προηγούμενο κεφάλαιο περιεγράφηκαν οι κυριότερες διαδρομές του δικτύου, οι οποίες εκτείνονται προς όλες τις κατευθύνσεις του Νομού Αττικής και εκκινούν όλες, χωρίς εξαίρεση, από κεντρικούς κόμβους της Αθήνας, όπως το Πεδίον του Άρεως και το Θησείο. Συμπληρωματικά, είναι απαραίτητη η αναφορά επιπλέον δρομολογίων τα οποία αποτελούν τις ανταποκρίσεις με προορισμό απομακρυσμένες περιοχές του νομού, όπως το Σούνιο, και οι οποίες εκκινούν από βασικούς κόμβους του δικτύου, όπως το λιμάνι της Ραφήνας, το λιμάνι του Λαυρίου, το σταθμαρχείο Μαρκοπούλου κ.α.

Τις βασικότερες, λοιπόν, ανταποκρίσεις αποτελούν τα εξής δρομολόγια:

1. Λιμάνι Ραφήνας- Αεροδρόμιο Ελευθέριος Βενιζέλος,
2. Σταθμαρχείο Μαρκοπούλου- Αεροδρόμιο Ελευθέριος Βενιζέλος,
3. Σταθμαρχείο Μαρκοπούλου- Πόρτο Ράφτη- Αυλάκι,

4. Λιμάνι Λαυρίου- Σούνιο,
5. Βίλια- Πόρτο Γερμενό,
6. Μέγαρα- Πάχη,
7. Καπανδρίτι- Βαρνάβας
8. Καπανδρίτι- Μάζι

Οι συγκεκριμένες διαδρομές στη συνέχεια θα αποτελέσουν το υλικό προς βελτιστοποίηση, ελαχιστοποιώντας την αναμονή των επιβατών που αποβιβάστηκαν από τα βασικά δρομολόγια του δικτύου των ΚΤΕΛ Αττικής

5.3 Προεπεξεργασία δεδομένων

Η ολοκλήρωση της ψηφιοποίησης του δικτύου είχε ως τελικό αποτέλεσμα την εξαγωγή μίας ομάδας αρχείων κειμένου τα οποία αποτελούν τη μορφοποίηση GTFS και απαιτούν την κατάλληλη επεξεργασία ώστε να λάβουν μια μορφή συμβατή με τις εντολές εισαγωγής και εξαγωγής δεδομένων που χρησιμοποιούνται στον κώδικα και να αξιοποιηθούν.

Υπενθυμίζεται ότι τα εξαγόμενα αρχεία των GTFS από την πλατφόρμα gtfs editor, είναι δέκα σε πλήθος με τις εξής ονομασίες:

- agency,
- calendar,
- calendar_dates,
- frequencies,
- routes,
- shapes,
- stop_times,
- stops,
- transfers,
- trips.

Το περιεχόμενο των οποίων αναλύεται στο Κεφάλαιο 1.

Το εν λόγω σύνολο επεξεργάζεται καταλλήλως ώστε στο τελικό στάδιο αυτής της διαδικασίας να προκύψουν τα εξής 28 αρχεία εισαγωγής:

- BUS_TRIP_ID_1,
- BUS_TIMES,
- BUS_STOPS_ID,
- BUS_STOP_SEQUENCE,
- BUS_SERVICE_ID_2 ,
- BUS_TRIP_ID_2,
- BUS_SERVICE_ID_1,
- BUS_MONDAY,
- BUS_TUESDAY,
- BUS_WEDNESDAY,
- BUS_THURSDAY,
- BUS_FRIDAY,
- BUS_SATURDAY,
- BUS_SUNDAY,
- TRAIN_TRIP_ID_1,
- TRAIN_TIMES,
- TRAIN_STOPS_ID,
- TRAIN_STOP_SEQUENCE,
- TRAIN_SERVICE_ID_2 ,
- TRAIN_TRIP_ID_2,
- TRAIN_SERVICE_ID_1,
- TRAIN_MONDAY,
- TRAIN_TUESDAY,
- TRAIN_WEDNESDAY,
- TRAIN_THURSDAY,
- TRAIN_FRIDAY,
- TRAIN_SATURDAY,
- TRAIN_SUNDAY.

Σημαντική ενέργεια κατά την προεπεξεργασία αφορά τη μέτρηση των ωρών διέλευσης από κάθε στάση σε πλήθος λεπτών αντί της μορφής ΩΩ:ΛΛ. Για παράδειγμα βάσει της εν λόγω τροποποίησης η ώρα 7:00 αντιστοιχεί στον αριθμό 420. Πιο αναλυτικά, κατόπιν εισαγωγής του αρχείου stop_times σε φύλλο εργασίας του Excel εμφανίζονται οι στήλες: trip_id, arrival_time, departure_time , stop_id, stop_sequence. Στη συνέχεια επεμβαίνουμε στην στήλη arrival_time και εκτελούμε την παραπάνω τροποποίηση.

Πέραν αυτής της μετατροπής, το μόνο που απαιτείται για την δημιουργία των αρχείων εισαγωγής είναι η επιλογή συγκεκριμένων στηλών και η ξεχωριστή τους αποθήκευση ως αρχεία κειμένου με τις παραπάνω 28 ονομασίες.

Συγκεκριμένα, από το αρχείο stop_times οι στήλες trip_id, arrival_time, stop_id και stop_sequence αποθηκεύονται αντίστοιχα ως: BUS_TRIP_ID_1, BUS_TIMES, BUS_STOPS_ID και BUS_STOP_SEQUENCE. Ομοίως, από το αρχείο trips αντλούνται οι στήλες service_id και trip_id και αποθηκεύονται ως: BUS_SERVICE_ID_2 και BUS_TRIP_ID_2, αντίστοιχα. Τέλος, αντιστοιχίζονται από το αρχείο calendar οι στήλες: service_id, monday, tuesday, wednesday, thursday, friday, saturday και sunday στα αρχεία BUS_SERVICE_ID_1, BUS_MONDAY, BUS_TUESDAY, BUS_WEDNESDAY, BUS_THURSDAY, BUS_FRIDAY, BUS_SATURDAY και BUS_SUNDAY. Σημειώνεται ότι οι διαστάσεις των νέων αρχείων είναι ίσες με τις διαστάσεις της στήλης εκ της οποίας προήλθαν.

Η ίδια ακριβώς διαδικασία ακολουθείται και για τη δημιουργία των αρχείων με την ονομασία “TRAIN” τα οποία αφορούν τα δεδομένα των ανταποκρίσεων. Επισημαίνεται ότι η ονομασία “TRAIN” αφενός προκύπτει από την βιβλιογραφία και το ψηφιακό υπόβαθρο το οποίο ακολουθήθηκε πιστά ώστε να υλοποιηθεί ο εν λόγω συγχρονισμός του δικτύου των ΚΤΕΛ Αττικής, και τα οποία προφανώς αφορούσαν τον συγχρονισμό ενός δικτύου τραίνων με αντίστοιχα λεωφορείων. Αφετέρου, η διαφορετική αυτή ονομασία κρίθηκε εξυπηρετική ώστε να διακρίνονται με ευκολία τα αρχεία των βασικών διαδρομών από τις ανταποκρίσεις. Η βιβλιογραφία και η προέλευση του κώδικα που χρησιμοποιήθηκαν ως βάση για τον επανασυγχρονισμό του δικτύου, αναφέρονται στη συνέχεια του κεφαλαίου.

Τέλος, τα αρχεία εξαγωγής που εμφανίζονται, καταμετρώνται σε 6 αρχεία κειμένου με το παρακάτω περιεχόμενο:

- BAT, περιέχει τις ώρες άφιξης των βασικών γραμμών στον κόμβο μετεπιβίβασης προς τις ανταποκρίσεις, οι οποίες λειτουργούν ως δεδομένα του προβλήματος,
- BDT, περιέχει τις ώρες διέλευσης των βασικών γραμμών στον κόμβο μετεπιβίβασης από τις ανταποκρίσεις, οι οποίες επίσης λειτουργούν ως δεδομένα του προβλήματος,
- DTTV, περιέχει τις ώρες εκκίνησης των ανταποκρίσεων από τον κόμβο μετεπιβίβασης, οι οποίες αποτελούν μεταβλητές απόφασης,
- ATTV, περιέχει τις ώρες άφιξης των ανταποκρίσεων στον κόμβο μετεπιβίβασης, οι οποίες αποτελούν άθροισμα των αντίστοιχων DTTV συν το χρόνο μετάβασης στον τερματισμό τους,
- WT1, περιέχει τις διάρκειες αναμονής για μετεπιβίβαση από βασική γραμμή προς την ανταπόκριση, αποτελούν μεταβλητές απόφασης,

- WT2, περιέχει τις διάρκειες αναμονής για μετεπιβίβαση από την ανταπόκριση προς τις βασικές γραμμές, αποτελούν μεταβλητές απόφασης.

5.4 Περιγραφή μαθηματικών μοντέλων

Ο επανασυγχρονισμός των ανταποκρίσεων διαιρείται σε δύο μέρη. Κάθε μέρος επιλύεται βάσει διαφορετικού μαθηματικού μοντέλου. Το πρώτο αφορά την μετεπιβίβαση από τις βασικές γραμμές προς τα δρομολόγια ανταπόκρισης. Παραδείγματος χάριν, στο πρώτο μέρος εξετάζονται οι ώρες εκκίνησης των δρομολογίων από το Λιμάνι Ραφήνας προς το Αεροδρόμιο Ελευθέριος Βενιζέλος με σκοπό τον συντονισμό τους με τις ώρες άφιξης των βασικών γραμμών στο Λιμάνι.

Αντιστρόφως, το δεύτερο μέρος μελετά την μετεπιβίβαση από τις γραμμές ανταπόκρισης προς τις βασικές γραμμές. Σε αυτό το μέρος δηλαδή, συντονίζονται οι ώρες εκκίνησης από το Αεροδρόμιο προς το Λιμάνι της Ραφήνας ώστε να εξυπηρετούν την μετεπιβίβαση προς τη βασική γραμμή που εκκινεί από το Λιμάνι προς το κέντρο της Αθήνας με τη λιγότερη δυνατή αναμονή.

Επισημαίνεται ότι και στα δύο προβλήματα, οι ώρες διέλευσης των βασικών γραμμών αποτελούν στατικά δεδομένα επί των οποίων αναζητείται η κατάλληλη προσαρμογή των ωρών εκκίνησης των ανταποκρίσεων, αποτελώντας τις συνεχείς μεταβλητές απόφασης.

Παρότι, εκ πρώτης όψης, τα δύο αυτά προβλήματα φαίνονται να τηρούν αναλογίες οι οποίες ενδεχομένως να εξυπηρετούσαν στην συγχώνευση των μαθηματικών μοντέλων που τα επιλύουν, σε ένα κοινό, στην πράξη προκύπτει ότι απαιτούνται δύο διαφορετικές προσεγγίσεις, τόσο εξαιτίας της διαφορετικής αλληλουχίας μεταξύ βασικών γραμμών και ανταποκρίσεων, όσο και των διαφορετικών κριτηρίων υπό τα οποία μελετάται η καλύτερη εξυπηρέτηση των επιβατών σε κάθε περίπτωση. Οι εν λόγω αντιφάσεις διασαφηνίζονται σε επόμενη παράγραφο, κατά την ανάλυση των δύο μαθηματικών μοντέλων.

5.4.1 Συγχρονισμός μετεπιβίβασης από βασική γραμμή σε ανταπόκριση

Σκοπός του μαθηματικού αυτού μοντέλου είναι η μετατόπιση των ωρών εκκίνησης των ανταποκρίσεων από τον κοινό τους κόμβο με τις βασικές γραμμές, ούτως ώστε να

ελαχιστοποιείται η συνολική διάρκεια αναμονής όλων των εφικτών μετεπιβιβάσεων. Σημειώνεται ότι μία μετεπιβίβαση θεωρείται εφικτή όταν το δρομολόγιο της βασικής γραμμής καταφθάνει στον κόμβο μετεπιβίβασης αρκετά νωρίς ώστε να προλάβει την ανταπόκριση. Συνεπώς, προκύπτει ότι για κάθε ώρα εκκίνησης λογίζονται πολλαπλές διάρκειες αναμονής που αντιστοιχούν στα δρομολόγια των βασικών γραμμών τα οποία εξυπηρετεί.

Παρακάτω περιγράφεται το πρώτο μαθηματικό μοντέλο για το πρόβλημα του επανασυγχρονισμού.

Nomenclature	
<u>Index-Related terminology</u>	
i	Δείκτης του δρομολογίου της βασικής γραμμής το οποίο καταφθάνει στον κόμβο μετεπιβίβασης,
j	Δείκτης του δρομολογίου της ανταπόκρισης το οποίο εκκινεί από τον κόμβο μετεπιβίβασης,
<u>Data-related Terminology</u>	
I_{max}	Πλήθος δρομολογίων βασικής γραμμής που καταφθάνουν στον κόμβο μετεπιβίβασης,
J_{max}	Πλήθος δρομολογίων ανταπόκρισης που εκκινούν από τον κόμβο μετεπιβίβασης,
BAT_i	Ώρα άφιξης δρομολογίου i της βασικής γραμμής στον κόμβο μετεπιβίβασης,
TDT_j	Υφιστάμενη ώρα εκκίνησης της ανταπόκρισης j από τον κόμβο μετεπιβίβασης ,
IT	Μέσος απαιτούμενος χρόνος για την μετεπιβίβαση μεταξύ οχήματος βασικής γραμμής και ανταπόκρισης,
R	Παράμετρος που καθορίζει το δυνατό εύρος μετατόπισης της ώρας εκκίνησης της ανταπόκρισης γύρω από την αντίστοιχη υφιστάμενη,
M	Ένας πολύ μεγάλος αριθμός,
m	Ένας πολύ μικρός αριθμός.

<u>Decision variable terminology</u>	
$DTTV_j$	Συνεχής μεταβλητή που εκφράζει την ώρα εκκίνησης του δρομολογίου j της ανταπόκρισης,
$WT1_{i,j}$	Συνεχής μεταβλητή που εκφράζει την διάρκεια αναμονής, στον κόμβο μετεπιβίβασης, των επιβατών που κατέφθασαν με το δρομολόγιο i της βασικής γραμμής και αναχωρούν με το δρομολόγιο j της ανταπόκρισης,
$Y1_{i,j}$	Δυαδική μεταβλητή η οποία λαμβάνει την τιμή 1 όταν η βελτιστοποιημένη ώρα εκκίνησης του δρομολογίου j της ανταπόκρισης καθιστά εφικτή την μετεπιβίβαση από το δρομολόγιο i της βασικής γραμμής.

ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ

$$MIN \sum_{i=1}^{I_{max}} \sum_{j=1}^{J_{max}} WT1_{i,j}$$

ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ

$$TDT_j - R \leq DTTV_j, \quad \forall j$$

Ο περιορισμός ορίζει ότι οι βελτιστοποιημένες ώρες εκκίνησης των δρομολογίων ανταπόκρισης δεν μπορούν να είναι νωρίτερες από R λεπτά σε σχέση με τις αντίστοιχες υφιστάμενες.

$$DTTV_j \leq TDT_j + R, \quad \forall j$$

Ο περιορισμός ορίζει ότι οι βελτιστοποιημένες ώρες εκκίνησης των δρομολογίων ανταπόκρισης δεν μπορούν να είναι αργότερες από R λεπτά σε σχέση με τις αντίστοιχες υφιστάμενες.

$$Y1_{i,j} \geq m * (DTTV_j - BAT_i - IT), \quad \forall i, j$$

Ο περιορισμός ενεργοποιεί την μεταβλητή Y1 όταν είναι εφικτή η μετεπιβίβαση από το δρομολόγιο i στο j.

$$WT1_{i,0} \geq DTTV_0 - BAT_i - IT, \quad \forall i$$

Ο περιορισμός ορίζει την διάρκεια αναμονής για την μετεπιβίβαση από το δρομολόγιο i στην νωρίτερη ανταπόκριση της ημέρας. Ως αναμονή λογίζεται η χρονική διάρκεια από την άφιξη του δρομολογίου i με το οποίο ο επιβάτης κατέφθασε στον κόμβο μετεπιβίβασης μέχρι την εκκίνηση του δρομολογίου ανταπόκρισης, μειωμένη κατά την παράμετρο IT.

$$WT1_{i,j} \geq DTTV_j - BAT_i - IT - M * Y1_{i,j-1}, \quad \forall i, j > 1$$

Ο περιορισμός ενεργοποιείται μόνο στην περίπτωση που δεν υπάρχει εφικτή μετεπιβίβαση σε νωρίτερο δρομολόγιο ανταπόκρισης και ορίζει την διάρκεια αναμονής για την μετεπιβίβαση από το δρομολόγιο i στην ανταπόκριση j .

5.4.2 Συγχρονισμός μετεπιβίβασης από ανταπόκριση σε δρομολόγιο βασικής γραμμής

Σκοπός του μαθηματικού αυτού μοντέλου είναι η μετατόπιση των ωρών εκκίνησης των ανταποκρίσεων από τις απομακρυσμένες περιοχές που εξυπηρετούν, και κατ' επέκταση των ωρών άφιξής τους στον κοινό τους κόμβο με τις βασικές γραμμές, ούτως ώστε να ελαχιστοποιείται η διάρκεια αναμονής της πρώτης εφικτής μετεπιβίβασης, για κάθε δρομολόγιο ανταπόκρισης. Σημειώνεται ότι, σε αντίθεση με το μοντέλο του πρώτου μέρους, για κάθε δρομολόγιο ανταπόκρισης λογίζεται μία μοναδική διάρκεια αναμονής για την πρώτη εφικτή μετεπιβίβαση σε δρομολόγιο των βασικών γραμμών. Ο λόγος της εν λόγω διαφοροποίησης είναι το γεγονός ότι οι επιβάτες που καταφθάνουν από την απομακρυσμένη περιοχή στον κόμβο μετεπιβίβασης δεν έχουν όφελος να αναμένουν κάποια μετεπιβίβαση σε άλλο εφικτό δρομολόγιο, προς το κέντρο της Αθήνας, πέραν του πρώτου εφικτού.

Παρακάτω περιγράφεται το δεύτερο μαθηματικό μοντέλο για το πρόβλημα του επανασυγχρονισμού.

Nomenclature	
<u>Index-Related terminology</u>	
j	Δείκτης του δρομολογίου της ανταπόκρισης το οποίο καταφθάνει στον κόμβο μετεπιβίβασης,
k	Δείκτης του δρομολογίου της βασικής γραμμής το οποίο αναχωρεί από τον κόμβο μετεπιβίβασης.
<u>Data-related Terminology</u>	
J_{max}	Πλήθος δρομολογίων ανταπόκρισης που καταφθάνουν στον κόμβο μετεπιβίβασης,
K_{max}	Πλήθος δρομολογίων βασικής γραμμής που αναχωρούν από τον κόμβο μετεπιβίβασης,

TDT_j	Υφιστάμενη ώρα εκκίνησης της ανταπόκρισης j από τις απομακρυσμένες περιοχές προς τον κόμβο μετεπιβίβασης ,
TAT_j	Υφιστάμενη ώρα άφιξης της ανταπόκρισης j στον κόμβο μετεπιβίβασης από τις απομακρυσμένες περιοχές,
TTT_j	Απαιτούμενος χρόνος μετάβασης του δρομολογίου ανταπόκρισης j από την αφετηρία του μέχρι τον κόμβο μετεπιβίβασης,
BDT_k	Ώρα αναχώρησης δρομολογίου k της βασικής γραμμής από τον κόμβο μετεπιβίβασης,
IT	Μέσος απαιτούμενος χρόνος για την μετεπιβίβαση μεταξύ οχήματος βασικής γραμμής και ανταπόκρισης (interchange time),
R	Παράμετρος που καθορίζει το δυνατό εύρος μετατόπισης της ώρας εκκίνησης της ανταπόκρισης γύρω από την αντίστοιχη υφιστάμενη,
M	Ένας πολύ μεγάλος αριθμός,
m	Ένας πολύ μικρός αριθμός.

Decision variable terminology

$DTTV_j$	Συνεχής μεταβλητή που εκφράζει την ώρα εκκίνησης του δρομολογίου j της ανταπόκρισης,
$WT2_{j,k}$	Συνεχής μεταβλητή που εκφράζει την διάρκεια αναμονής, στον κόμβο μετεπιβίβασης, των επιβατών που κατέφθασαν με το δρομολόγιο j της ανταπόκρισης και αναχωρούν με το δρομολόγιο k της βασικής γραμμής,
$Y2_{j,k}$	Δυαδική μεταβλητή η οποία λαμβάνει την τιμή 1 όταν η βελτιστοποιημένη ώρα εκκίνησης του δρομολογίου j της ανταπόκρισης καθιστά εφικτή την μετεπιβίβαση στο δρομολόγιο k της βασικής γραμμής.

ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ

$$MIN \sum_{j=1}^{J_{max}} \sum_{k=1}^{K_{max}} WT2_{j,k}$$

ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ

$$TDT_j - R \leq DTTV_j, \quad \forall j$$

Ο περιορισμός ορίζει ότι οι βελτιστοποιημένες ώρες εκκίνησης των δρομολογίων ανταπόκρισης δεν μπορούν να είναι νωρίτερες από R λεπτά σε σχέση με τις αντίστοιχες υφιστάμενες.

$$DTTV_j \leq TDT_j + R, \quad \forall j$$

Ο περιορισμός ορίζει ότι οι βελτιστοποιημένες ώρες εκκίνησης των δρομολογίων ανταπόκρισης δεν μπορούν να είναι αργότερες από R λεπτά σε σχέση με τις αντίστοιχες υφιστάμενες.

$$Y_{2,j,k} \geq m * (BDT_k - DTTV_j - TTT_j - IT), \quad \forall j, k$$

Ο περιορισμός ενεργοποιεί την μεταβλητή Y_2 όταν είναι εφικτή η μετεπιβίβαση από το δρομολόγιο j στο k .

$$WT_{2,j,k} \geq BDT_k - DTTV_j - TTT_j - IT + 10000 * (1 - Y_{2,j,k}), \quad \forall j, k$$

Ο περιορισμός ορίζει την διάρκεια αναμονής για την μετεπιβίβαση από την ανταπόκριση j στο δρομολόγιο k της βασικής γραμμής. Ως αναμονή λογίζεται η χρονική διάρκεια από την άφιξη του δρομολογίου j με το οποίο ο επιβάτης κατέφθασε στον κόμβο μετεπιβίβασης μέχρι την αναχώρηση του δρομολογίου k , μειωμένη κατά την παράμετρο IT . Το τελευταίο γινόμενο εμποδίζει την τάση του μαθηματικού μοντέλου να καθυστερεί τις ώρες εκκίνησης της ανταπόκρισης καθιστώντας ανέφικτες τις περισσότερες μετεπιβιβάσεις ώστε να μην επιφέρουν επιπλέον διάρκεια αναμονής. Επιβαρύνει μεν το κόστος συνάρτησης με μία τεχνητή τιμή ($M=10000$), ωστόσο, όπως αναλύεται σε επόμενη παράγραφο, συντελεί στην ανάδειξη των βέλτιστων ωρών εκκίνησης της ανταπόκρισης που αποτελούν και το ζητούμενο του προβλήματος.

5.5 Εφαρμογή και εκτέλεση μαθηματικών μοντέλων επανασυγχρονισμού σε περιβάλλον Cplex

Μετά την περιγραφή του δικτύου των ΚΤΕΛ Αττικής αναφορικά με την δομή των γραμμών ανταπόκρισης, την επεξήγηση της κατάλληλης τροποποίησης των αρχείων GTFS σε

συμβατά δεδομένα εισαγωγής και την αποτύπωση των μαθηματικών μοντέλων, βάσει των οποίων επιλύεται το πρόβλημα συγχρονισμού των ανταποκρίσεων, κρίνεται πλέον σκόπιμη η ανάλυση του κώδικα σε περιβάλλον Cplex επί του οποίου εφαρμόζονται και εκτελούνται τα παραπάνω στοιχεία.

Πιο αναλυτικά, η δομή του κώδικα διαιρείται σε τρία κύρια τμήματα εξίσου ζωτικής σημασίας για την εφικτή και ορθή εξαγωγή των ζητούμενων αποτελεσμάτων. Η σειρά εμφάνισής τους είναι η εξής:

1. Εισαγωγή δεδομένων συγκοινωνιακού δικτύου,
2. Διαλογή πληροφοριών που εστιάζουν αποκλειστικά στα δρομολόγια βασικής γραμμής και ανταπόκρισης που μελετώνται στην εκάστοτε εκτέλεση,
3. Αποτύπωση μαθηματικού μοντέλου στο περιβάλλον της Cplex.

Σε αυτό το σημείο επισημαίνεται ότι τα πρώτα δύο τμήματα αντλήθηκαν από την βιβλιογραφία της Πτυχιακής Εργασίας του Ιωάννη Μάνου, για το τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, με τίτλο “Synchronization of timetables in Czech Republic”, η οποία πραγματεύεται το συγχρονισμό χρονοδιαγραμμάτων για μέσα συγκοινωνίας του κράτους της Τσεχίας.

Στη συνέχεια ακολουθεί λεπτομερής ανάλυση κάθε τμήματος του κώδικα, καθώς και τα αποτελέσματα επανασυγχρονισμού των βασικότερων ανταποκρίσεων του δικτύου.

5.5.1 Εισαγωγή δεδομένων

Ο μεγάλος όγκος δεδομένων που προέκυψε από την ψηφιοποίηση του δικτύου εισάγεται, κατόπιν της προαναφερθείσας τροποποίησής του, στον κώδικα μέσω εντολών εισαγωγής σε αντίστοιχους πίνακες, των οποίων οι διαστάσεις ορίζονται εξ αρχής ίσες με των αρχεία κειμένου από όπου αντλούν τα δεδομένα. Το πλήθος των πινάκων προκύπτει να είναι 28, όσα και τα αρχεία εισαγωγής. Επίσης, σε αυτό το σημείο δηλώνονται οι τύποι των πινάκων (ακέραιοι, δυαδικοί, αλφαριθμητικοί) και εισάγονται από τον χρήστη οι αριθμοί ταυτότητας (“STOPS_ID”) των κόμβων που αφορούν την μετεπιβίβαση από βασική γραμμή σε ανταπόκριση, καθώς και η επιθυμητή ημέρα της εβδομάδας, που μελετάται στο εκάστοτε παράδειγμα.

Τέλος, απαιτείται ο προσδιορισμός των παραμέτρων R και IT (interchange time), οι οποίες αναφέρθηκαν στα μαθηματικά μοντέλα και καθορίζουν το δυνατό εύρος μετατόπισης της ώρας εκκίνησης της ανταπόκρισης γύρω από την αντίστοιχη υφιστάμενη και το μέσο απαιτούμενο χρόνο για την μετεπιβίβαση μεταξύ οχήματος βασικής γραμμής και ανταπόκρισης, αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, για τη μελέτη του παρόντος δικτύου, προκειμένου να μειωθεί όσο το δυνατόν περισσότερο η αναμονή μετεπιβίβασης, χωρίς ωστόσο να αλλοιωθεί υπερβολικά η κατανομή των δρομολογίων κατά την διάρκεια της ημέρας, επιλέγεται η παράμετρος $R=45$ λεπτά. Αντίστοιχα ορίζεται η παράμετρος $IT=5$ λεπτά, καθώς η μετεπιβίβαση πραγματοποιούνται στο κοινό κόμβο των εκάστοτε δρομολογίων, χωρίς να απαιτείται επιπλέον χρόνος μετάβασης.

5.5.2 Διαλογή δεδομένων εξεταζόμενων μετεπιβιβάσεων

Κατόπιν της εισαγωγής εκτελείται η διαλογή αποκλειστικά των γραμμών που εμπλέκονται στον συντονισμό της ανταπόκρισης που μελετάται. Το στάδιο αυτό κρίνεται εξαιρετικά κρίσιμο καθώς μειώνει δραματικά τον όγκο των δεδομένων που εισέρχονται στο περιβάλλον της Cplex και επίσης, με τον κατάλληλο χειρισμό, καθορίζει τις γραμμές μεταξύ των οποίων μας ενδιαφέρει ο επανασυγχρονισμός.

Παραδείγματος χάριν, κατά τον συγχρονισμό της ανταπόκρισης «Πόρτο Γερμενό - Βίλια» με τις βασικές γραμμές, κρίνεται σκόπιμη η διαλογή των δρομολογίων βασικών γραμμών τα όποια όχι απλά διέρχονται από τα Βίλια αλλά και κατευθύνονται προς την Αθήνα. Αυτό επιτυγχάνεται παραμετροποιώντας το τμήμα της διαλογής κατά τέτοιο τρόπο ώστε οι αντλούμενες ώρες διέλευσης της βασικής γραμμής από τα Βίλια να κατέχουν σειρά αλληλουχίας στο δρομολογίο τους μικρότερο του 20.

Σε διαφορετική περίπτωση, δηλαδή αγνοώντας την κατεύθυνση, θα προέκυπτε ένας συγχρονισμός ο οποίος θα επηρεαζόταν από τα δρομολόγια που κατευθύνονται προς τον λιγότερο κομβικό προορισμό των Ερυθρών, προκαλώντας μεγαλύτερη αναμονή στην κύρια μάζα επιβατών που επιθυμούν την μετεπιβίβαση προς Αθήνα. Τονίζεται ότι κάθε μετεπιβίβαση από ανταπόκριση σε βασική γραμμή και αντιστρόφως, αποτελεί ξεχωριστή περίπτωση και τα δεδομένα διαλέγονται με διαφορετικά κριτήρια.

5.5.3 Αποτύπωση μαθηματικών μοντέλων σε περιβάλλον Cplex

Αποτελεί το κομβικότερο τμήμα του κώδικα. Απαρτίζεται από την δήλωση μεταβλητών, τους περιορισμούς και την αντικειμενική συνάρτηση, σε συμφωνία πάντα με τα μαθηματικά μοντέλα που περιγράφηκαν εντός του κεφαλαίου.

Για το συγχρονισμό της μετεπιβίβασης από βασική γραμμή σε ανταπόκριση, αποτυπώνεται, σε αυτό το σημείο του κώδικα, το μοντέλο της παραγράφου 5.4.1, ενώ για το συγχρονισμό της μετεπιβίβασης από ανταπόκριση σε δρομολόγιο βασικής γραμμής, αυτό της παραγράφου 5.4.2. Σημειώνεται ότι για τα δύο διαφορετικά μοντέλα διατηρείται αναλλοίωτος ο υπόλοιπος κορμός του κώδικα, με την προϋπόθεση πάντα ότι προσαρμόζεται καταλλήλως η διαλογή των δεδομένων, στο εκάστοτε παράδειγμα, όπως αυτό περιγράφηκε προηγουμένως.

Τέλος, τοποθετούνται οι εντολές εκτύπωσης οι οποίες εξάγουν αρχεία κειμένου με τις απαραίτητες πληροφορίες των βελτιστοποιημένων δρομολογίων που προκύπτουν συνοδευόμενες από τα στατικά δεδομένα του δικτύου που τις επηρέασαν. Οι εν λόγω πληροφορίες παρατίθενται στην επόμενη παράγραφο για κάθε ένα από τα παραδείγματα ανταποκρίσεων για τα οποία εκτελέστηκε ο κώδικας.

5.5.4 Παραδείγματα συγχρονισμού βασικών ανταποκρίσεων

Παρακάτω αποτυπώνονται τα αποτελέσματα του συγχρονισμού βασικών ανταποκρίσεων. Τα πρώτα 8 παραδείγματα αφορούν μετεπιβιβάσεις από βασική γραμμή σε ανταπόκριση και εξήχθησαν σύμφωνα με το πρώτο μαθηματικό μοντέλο. Στη συνέχεια ακολουθούν τα αποτελέσματα των μετεπιβιβάσεων της αντίθετης αλληλουχίας, δηλαδή από δρομολόγιο ανταπόκρισης σε βασική γραμμή, σύμφωνα με τον δεύτερο κώδικα.

Η υλοποίηση των προγραμμάτων πραγματοποιήθηκε σε προσωπικό υπολογιστή τα χαρακτηριστικά του οποίου είναι τα εξής:

- Επεξεργαστής: Intel(R) Core(TM) i7-7700 CPU @ 3.60GHz,
- Εγκατεστημένη μνήμη: 8,00 GB,
- Λογισμικό: Windows 10 Pro 64-bit.

Λιμάνι Ραφήνας – Αεροδρόμιο Ελευθέριος Βενιζέλος

DTTV	BAT	TDT
260	394	305
399	409	360
444	424	405
494	439	480
645	454	690
715	489	760
819	529	780
909	574	880
979	619	960
1029	664	1045
1089	709	1125
1179	754	1200
1230	784	1275
	814	
WT1=671	844	WT1=1488
	874	
	904	
	934	
	959	
	974	
	994	
	1024	
	1054	
	1084	
	1129	
	1174	
	1219	
	1264	
	1309	
	1354	
	1399	

Υπενθυμίζεται ότι η σημασία των αναγραφόμενων μεγεθών είναι η εξής:

- DTTV_j Συνεχής μεταβλητή που εκφράζει την ώρα εκκίνησης του δρομολογίου j της ανταπόκρισης,
- BAT_i Ώρα άφιξης δρομολογίου i της βασικής γραμμής στον κόμβο μετεπιβίβασης,
- TDT_j Υφιστάμενη ώρα εκκίνησης της ανταπόκρισης j από τον κόμβο μετεπιβίβασης ,
- WT1_{i,j} Συνεχής μεταβλητή που εκφράζει την διάρκεια αναμονής, στον κόμβο μετεπιβίβασης, των επιβατών που κατέφθασαν με το δρομολόγιο i της βασικής γραμμής και αναχωρούν με το δρομολόγιο j της ανταπόκρισης.

Για την ανάγνωση του πίνακα εστιάζουμε αρχικά στη μεσαία στήλη η οποία αναγράφει τις δεδομένες ώρες άφιξης των βασικών γραμμών στην Ραφήνα. Όπως είναι φανερό η πρώτη άφιξη (BAT=394) θα μετεπιβιβαστεί στο δεύτερο δρομολόγιο της ανταπόκρισης (DTTV=399) με διάρκεια αναμονής WT1=0 καθώς από την διαφορά τους αφαιρείται ο χρόνος μετεπιβίβασης μεταξύ των οχημάτων IT=5 λεπτά.

Εν συνεχεία, η δεύτερη άφιξη στη Ραφήνα (BAT=409) δεν είναι αρκετά έγκαιρη ώστε να μετεπιβιβαστεί στην πρώτη ανταπόκριση και προκαλεί διάρκεια αναμονής WT1=30 μέχρι την μετεπιβίβασή της στην τρίτη ανταπόκριση (DTTV=444) κ.ο.κ. Αξίζει να σημειωθεί ότι για την τρίτη, για παράδειγμα, ανταπόκριση προκύπτουν τρεις διάρκειες αναμονής από την δεύτερη, τρίτη και τέταρτη άφιξη της βασικής γραμμής, γεγονός το οποίο διαφοροποιεί τα δύο μαθηματικά μοντέλα, όπως και περιγράφηκε σε προηγούμενη παράγραφο.

Τέλος, στην τρίτη στήλη αναγράφονται οι υφιστάμενες ώρες εκκίνησης των ανταποκρίσεων. Γίνεται εμφανές ότι νέες εκκινήσεις των ανταποκρίσεων έχουν περιοριστεί εντός ενός εύρους ± 45 λεπτών, σύμφωνα με την παράμετρο R. Τα μεγέθη WT1 που αναγράφονται στο τέλος της πρώτης και τρίτης στήλης αφορούν την συνολική διάρκεια αναμονής μετά και πριν την βελτιστοποίηση αντίστοιχα.

Λιμάνι Λαυρίου – Σούνιο

DTTV	BAT	TDT
483	445	460
535	478	580
633	505	640
750	628	760
810	685	820
903	722	940
967	745	1000
1015	778	1060
	805	
WT1=319	842	WT1=644
	865	
	898	
	925	
	962	
	985	
	1018	
	1045	
	1078	
	1105	
	1138	
	1165	

1228
1288
1330
1390

Σταθμαρχείο Μαρκόπουλου – Αεροδρόμιο Ελευθέριος Βενιζέλος

DTTV	BAT	TDT
403	381	370
433	398	410
463	428	470
523	458	530
596	488	590
653	518	650
716	558	710
776	591	770
823	648	830
883	711	890
956	771	950
1013	798	1010
1076	818	1070
1133	858	1130
1196	878	1190
1260	918	1305
	951	
WT1=190	978	WT1= 870
	1008	
	1071	
	1128	
	1191	
	1248	
	1311	

Το παρόν παράδειγμα είναι χαρακτηριστικό καθώς δίνεται έμφαση στα κριτήρια επιλογής των γραμμών για τις οποίες βελτιστοποιείται η μετεπιβίβαση. Δεδομένου ότι η μετάβαση από το κέντρο της Αθήνας προς το αεροδρόμιο πραγματοποιείται με αστικά λεωφορεία, κρίθηκε χρησιμότερος ο συγχρονισμός των ανταποκρίσεων με τα δρομολόγια της βασικής γραμμής τα οποία έχουν αναχωρήσει από το Λαύριο, καθώς αυτή η μετεπιβίβαση κρίνεται πιθανότερη να συμβεί και πιο χρήσιμη για το επιβατικό κοινό. Φυσικά, επαφίεται στην ευχέρεια του χρήστη η εκάστοτε επιλογή κριτηρίων και η παρούσα αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα.

Μέγαρα – Πάχη

DTTV	BAT	TDT
497	425	470
635	462	600
872	477	840
1035	484	1080
	492	
WT1=1658	531	WT1=2723
	537	
	554	
	582	
	627	
	657	
	687	
	717	
	747	
	777	
	807	
	837	
	854	
	867	
	900	
	927	
	957	
	987	
	1011	
	1017	
	1047	
	1077	
	1094	
	1107	
	1137	
	1167	
	1197	
	1227	
	1272	
	1317	
	1347	
	1392	
	1437	

Μαρκόπουλο – Πόρτο Ράφτη – Αυλάκι

DTTV	BAT	TDT
433	395	460
475	428	520
611	455	580
640	578	640
700	606	700
760	635	760
820	668	820
880	695	880
940	728	940
1000	755	1000
1060	788	1060
1120	815	1120
1183	848	1180
1243	875	1240
1265	908	1310
WT1=324	935	
	968	WT1=567
	995	
	1028	
	1055	
	1088	
	1115	
	1146	
	1178	
	1238	
	1280	
	1311	
	1340	
	1401	

Βίλια – Πόρτο Γερμενό

DTTV	BAT	TDT
474	334	480
765	461	810
WT1= 639	469	
	569	WT1=842
	589	
	626	
	769	
	791	
	869	

Κεφάλαιο 5: Συγχρονισμός Ανταποκρίσεων με τα Βασικά δρομολόγια

874

941

1061

1129

1286

Καπανδρίτι – Βαρνάβας

DTTV

437

785

985

WT1=1745

BAT

368

428

430

432

478

528

548

641

644

718

738

829

834

870

913

944

1015

1028

1137

1199

1311

1323

TDT

420

830

1030

WT1= 3457

Καπανδρίτι – Μάζι

DTTV

483

900

985

WT1= 2062

BAT

368

428

430

432

478

528

548

TDT

450

945

1030

WT1= 2812

641
644
718
738
829
834
870
913
944
1015
1028
1137
1199
1311
1323

Στη συνέχεια ακολουθούν παραδείγματα μετεπιβιβάσεων από δρομολόγιο ανταπόκρισης προς δρομολόγιο βασικής γραμμής, σύμφωνα με το δεύτερο μαθηματικό μοντέλο.

Σούνιο – Λαύριο

DTTV	ATTV	BDT	TDT
518	535	330	540
578	595	360	600
698	715	390	720
788	805	420	810
878	895	450	900
938	955	480	960
1058	1075	510	1050
		540	
		600	
WT2=0		660	
		720	
		750	
		780	

810
840
870
900
930
960
1020
1080
1140
1200
1260

Υπενθυμίζεται ότι η σημασία των επιπλέον μεγεθών του πίνακα είναι οι εξής:

- BDT_k Ωρα αναχώρησης δρομολογίου k της βασικής γραμμής από τον κόμβο μετεπιβίβασης,
- $ATTV_j$ Βελτιστοποιημένη ώρα άφιξης του δρομολογίου j της ανταπόκρισης στον κόμβο μετεπιβίβασης.

Όπως προκύπτει από τον πίνακα, οι νέες ώρες εκκίνησης επιφέρουν μηδενική αναμονή για την μετεπιβίβαση στις βασικές γραμμές. Σημειώνεται ότι σύμφωνα με αυτό το μαθηματικό μοντέλο, κάθε ανταπόκριση μετατοπίζεται ώστε να ελαχιστοποιηθεί η διάρκεια αναμονής μόνο για την πρώτη εφικτή μετεπιβίβαση. Πράγματι, οι ανταποκρίσεις στη συγκεκριμένη περίπτωση προσαρμόζονται απόλυτα ώστε να γίνεται άμεση μετεπιβίβαση στη βασική γραμμή από το όγδοο της δρομολόγιο και έπειτα. Τα πρώτα επτά ωστόσο αναχωρούν τόσο νωρίς που δεν προκύπτει σε αυτά εφικτή μετεπιβίβαση.

Αεροδρόμιο Ελευθέριος Βενιζέλος – Λιμάνι Ραφήνας

DTTV	ATTV	BDT	TDT
320	348	355	275
322	350	390	335
357	385	420	370
387	415	450	425
501	529	480	530
612	640	510	630
707	735	534	740
777	805	540	800
807	835	570	850
897	925	600	920

Κεφάλαιο 5: Συγχρονισμός Ανταποκρίσεων με τα Βασικά δρομολόγια

957	985	645	1000
1047	1075	690	1080
1137	1165	740	1160
1227	1255	780	1245
1321	1349	810	1340
		840	
		870	
WT2=2		900	
		930	
		960	
		990	
		1020	
		1050	
		1080	
		1125	
		1170	
		1215	
		1260	
		1354	
		1362	
		1369	
		1399	

Πόρτο Ράφτη – Αυλάκι – Μαρκόπουλο

DTTV	ATTV	BDT	TDT
343	376	381	365
390	423	398	425
450	483	428	485
520	553	458	545
610	643	488	605
673	706	518	665
733	766	558	725
760	793	591	785
820	853	648	845
880	913	711	905
940	973	771	965
1090	1123	798	1085
1153	1186	818	1145
1210	1243	858	1205
1273	1306	878	1265
		918	
		951	
		978	
WT2= 0		1008	

Κεφάλαιο 5: Συγχρονισμός Ανταποκρίσεων με τα Βασικά δρομολόγια

1071
1128
1191
1248
1311

Πόρτο Γερμενό – Βίλια

DTTV	ATTV	BDT	TDT
555	584	334	540
840	869	469	840
		480	
		589	
		769	
WT2=0		810	
		874	
		1129	

Βαρνάβα – Καπανδρίτι

DTTV	ATTV	BDT	TDT
405	415	368	420
815	825	420	860
1013	1023	428	1005
		450	
		478	
		528	
WT2=0		548	
		641	
		644	
		718	
		738	
		829	
		830	
		834	
		913	
		944	
		945	
		1028	

1030

1137

1199

1311

1323

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

```

C:\windows\system32\cmd.exe
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP          0
Tried aggregator 2 times.
MIP Presolve eliminated 269840 rows and 179690 columns.
MIP Presolve modified 404672 coefficients.
Aggregator did 230 substitutions.
Reduced MIP has 54 rows, 80 columns, and 487 nonzeros.
Reduced MIP has 80 binaries, 0 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
Presolve time = 0.67 sec. (695.92 ticks)
Found incumbent of value 80.000000 after 0.69 sec. (726.75 ticks)
Probing fixed 53 vars, tightened 0 bounds.
Probing changed sense of 1 constraints.
Probing time = 0.02 sec. (0.18 ticks)
Tried aggregator 3 times.
MIP Presolve eliminated 35 rows and 63 columns.
MIP Presolve modified 147 coefficients.
Aggregator did 4 substitutions.
Reduced MIP has 13 rows, 13 columns, and 65 nonzeros.
Reduced MIP has 13 binaries, 0 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
Presolve time = 0.02 sec. (2.59 ticks)
Probing fixed 3 vars, tightened 0 bounds.
Probing time = 0.00 sec. (0.02 ticks)
Tried aggregator 3 times.
MIP Presolve eliminated 10 rows and 10 columns.
MIP Presolve modified 17 coefficients.
Aggregator did 3 substitutions.
All rows and columns eliminated.
Presolve time = 0.02 sec. (2.27 ticks)

Root node processing (before b&c):
  Real time                =    0.75 sec. (741.32 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time                =    0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average)     =    0.00 sec.
  Wait time (average)     =    0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) =    0.75 sec. (741.32 ticks)
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP          0

Root node processing (before b&c):
  Real time                =    0.02 sec. (2.06 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time                =    0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average)     =    0.00 sec.
  Wait time (average)     =    0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) =    0.02 sec. (2.06 ticks)
Solution status = Optimal
Solution value = 80
Xijkn(4,21,5,23)=1
TDijkn(4,21,5,23)=16:00
Xijkn(9,10,2,8)=1
TDijkn(9,10,2,8)=8:10
Xijkn(10,4,2,8)=1
TDijkn(10,4,2,8)=8:20
Press any key to continue . . . █

```

Εικόνα 1: Εκτύπωση κώδικα αναφοράς για παράδειγμα 1

```

C:\windows\system32\cmd.exe
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP      0
Tried aggregator 1 time.
MIP Presolve eliminated 82 rows and 89964 columns.
MIP Presolve modified 596 coefficients.
Reduced MIP has 18 rows, 36 columns, and 140 nonzeros.
Reduced MIP has 36 binaries, 0 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
Presolve time = 0.11 sec. (158.59 ticks)
Found incumbent of value 80.000019 after 0.13 sec. (170.92 ticks)
Probing fixed 11 vars, tightened 0 bounds.
Probing changed sense of 1 constraints.
Probing time = 0.00 sec. (0.05 ticks)
Tried aggregator 3 times.
MIP Presolve eliminated 5 rows and 21 columns.
MIP Presolve modified 20 coefficients.
Aggregator did 5 substitutions.
Reduced MIP has 8 rows, 10 columns, and 35 nonzeros.
Reduced MIP has 10 binaries, 0 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
Presolve time = 0.02 sec. (0.60 ticks)
Probing fixed 4 vars, tightened 0 bounds.
Probing time = 0.00 sec. (0.01 ticks)
Tried aggregator 2 times.
MIP Presolve eliminated 6 rows and 8 columns.
MIP Presolve modified 1 coefficients.
Aggregator did 2 substitutions.
All rows and columns eliminated.
Presolve time = 0.00 sec. (0.49 ticks)

Root node processing (before b&c):
  Real time               =    0.16 sec. (176.31 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time               =    0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average)    =    0.00 sec.
  Wait time (average)    =    0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) =    0.16 sec. (176.31 ticks)
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP      0

Root node processing (before b&c):
  Real time               =    0.00 sec. (1.03 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time               =    0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average)    =    0.00 sec.
  Wait time (average)    =    0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) =    0.00 sec. (1.03 ticks)
Solution status = Optimal
Solution value = 80
Xijkn(4,23,5,23)=1
TDijkn(4,23,5,23)=16:00
Xijkn(9,10,2,8)=1
TDijkn(9,10,2,8)=8:10
Xijkn(10,12,2,8)=1
TDijkn(10,12,2,8)=8:20
Xijkn(12,4,2,8)=1
TDijkn(12,4,2,8)=8:40
Xijkn(23,21,5,23)=1
TDijkn(23,21,5,23)=16:20
Press any key to continue . . .

```

Εικόνα 2: Εκτύπωση νέου κώδικα για παράδειγμα 1


```

C:\windows\system32\cmd.exe
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP      0
Tried aggregator 3 times.
MIP Presolve eliminated 269840 rows and 179697 columns.
MIP Presolve modified 403410 coefficients.
Aggregator did 231 substitutions.
Reduced MIP has 53 rows, 72 columns, and 448 nonzeros.
Reduced MIP has 72 binaries, 0 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
Presolve time = 0.76 sec. (914.76 ticks)
Found incumbent of value 100.000000 after 0.80 sec. (945.53 ticks)
Probing fixed 46 vars, tightened 0 bounds.
Probing changed sense of 3 constraints.
Probing time = 0.00 sec. (0.15 ticks)
Cover probing fixed 0 vars, tightened 1 bounds.
Tried aggregator 3 times.
MIP Presolve eliminated 35 rows and 53 columns.
MIP Presolve modified 111 coefficients.
Aggregator did 3 substitutions.
Reduced MIP has 15 rows, 16 columns, and 66 nonzeros.
Reduced MIP has 16 binaries, 0 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
Presolve time = 0.00 sec. (2.61 ticks)
Probing fixed 6 vars, tightened 0 bounds.
Probing time = 0.00 sec. (0.02 ticks)
Tried aggregator 3 times.
MIP Presolve eliminated 11 rows and 12 columns.
MIP Presolve modified 2 coefficients.
Aggregator did 4 substitutions.
All rows and columns eliminated.
Presolve time = 0.00 sec. (2.25 ticks)

Root node processing (before b&c):
  Real time           =    0.84 sec. (960.08 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time           =    0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average) =    0.00 sec.
  Wait time (average) =    0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) =    0.84 sec. (960.08 ticks)
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP      0

Root node processing (before b&c):
  Real time           =    0.00 sec. (2.06 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time           =    0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average) =    0.00 sec.
  Wait time (average) =    0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) =    0.00 sec. (2.06 ticks)
Solution status = Optimal
Solution value = 100
Xijkn(2,4,0,0)=1
TDijkn(2,4,0,0)=8:20
Xijkn(4,15,3,15)=1
TDijkn(4,15,3,15)=16:00
Xijkn(6,2,1,4)=1
TDijkn(6,2,1,4)=7:10
Xijkn(14,19,4,19)=1
TDijkn(14,19,4,19)=17:00
Xijkn(15,14,3,15)=1
TDijkn(15,14,3,15)=16:30
Press any key to continue . . . █

```

Εικόνα 3: Εκτύπωση κώδικα αναφοράς για παράδειγμα 2

```

C:\windows\system32\cmd.exe
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP      0
Tried aggregator 3 times.
MIP Presolve eliminated 74 rows and 89950 columns.
MIP Presolve modified 654 coefficients.
Aggregator did 4 substitutions.
Reduced MIP has 22 rows, 46 columns, and 212 nonzeros.
Reduced MIP has 46 binaries, 0 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
Presolve time = 0.16 sec. (294.56 ticks)
Found incumbent of value 100.000020 after 0.17 sec. (306.95 ticks)
Probing fixed 23 vars, tightened 0 bounds.
Probing changed sense of 1 constraints.
Probing time = 0.00 sec. (0.06 ticks)
Tried aggregator 2 times.
MIP Presolve eliminated 5 rows and 24 columns.
MIP Presolve modified 14 coefficients.
Aggregator did 1 substitutions.
Reduced MIP has 16 rows, 21 columns, and 83 nonzeros.
Reduced MIP has 21 binaries, 0 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
Presolve time = 0.02 sec. (0.60 ticks)
Probing fixed 8 vars, tightened 0 bounds.
Probing time = 0.00 sec. (0.02 ticks)
Tried aggregator 3 times.
MIP Presolve eliminated 12 rows and 17 columns.
MIP Presolve added 1 rows and 1 columns.
MIP Presolve modified 8 coefficients.
Aggregator did 5 substitutions.
All rows and columns eliminated.
Presolve time = 0.00 sec. (0.52 ticks)

Root node processing (before b&c):
  Real time               =    0.20 sec. (311.99 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time               =    0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average)    =    0.00 sec.
  Wait time (average)    =    0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) =    0.20 sec. (311.99 ticks)
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP      0

Root node processing (before b&c):
  Real time               =    0.00 sec. (1.03 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time               =    0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average)    =    0.00 sec.
  Wait time (average)    =    0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) =    0.00 sec. (1.03 ticks)
Solution status = Optimal
Solution value = 100
Xijkn(2,3,0,0)=1
TDijkn(2,3,0,0)=8:20
Xijkn(3,4,0,0)=1
TDijkn(3,4,0,0)=8:30
Xijkn(4,14,3,15)=1
TDijkn(4,14,3,15)=16:00
Xijkn(6,2,1,4)=1
TDijkn(6,2,1,4)=7:10
Xijkn(14,20,4,19)=1
TDijkn(14,20,4,19)=17:00
Xijkn(20,19,4,19)=1
TDijkn(20,19,4,19)=17:10

```

Εικόνα 4: Εκτύπωση νέου κώδικα για παράδειγμα 2


```

C:\windows\system32\cmd.exe
Tried aggregator 2 times.
MIP Presolve eliminated 269821 rows and 179660 columns.
MIP Presolve modified 406149 coefficients.
Aggregator did 232 substitutions.
Reduced MIP has 71 rows, 108 columns, and 730 nonzeros.
Reduced MIP has 108 binaries, 0 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
Presolve time = 0.66 sec. (718.94 ticks)
Found incumbent of value 40.000000 after 0.69 sec. (749.91 ticks)
Probing fixed 76 vars, tightened 0 bounds.
Probing changed sense of 1 constraints.
Probing time = 0.02 sec. (0.27 ticks)
Cover probing fixed 0 vars, tightened 3 bounds.
Tried aggregator 1 time.
MIP Presolve eliminated 42 rows and 77 columns.
MIP Presolve modified 110 coefficients.
Reduced MIP has 28 rows, 31 columns, and 178 nonzeros.
Reduced MIP has 31 binaries, 0 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
Presolve time = 0.02 sec. (2.50 ticks)
Probing time = 0.00 sec. (0.06 ticks)
Tried aggregator 1 time.
Reduced MIP has 28 rows, 31 columns, and 178 nonzeros.
Reduced MIP has 31 binaries, 0 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
Presolve time = 0.00 sec. (2.32 ticks)
Probing time = 0.00 sec. (0.06 ticks)
Clique table members: 109.
MIP emphasis: balance optimality and feasibility.
MIP search method: dynamic search.
Parallel mode: deterministic, using up to 8 threads.
Root relaxation solution time = 0.00 sec. (0.04 ticks)

      Nodes
      Node Left   Objective  IInf  Best Integer    Cuts/
                                     Best Bound  ItCnt   Gap
*    0+   0           cutoff           40.0000    0.0000      100.00%
     0    0           cutoff           40.0000          2    0.00%

Root node processing (before b&c):
  Real time           = 0.78 sec. (772.26 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time           = 0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average) = 0.00 sec.
  Wait time (average) = 0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) = 0.78 sec. (772.26 ticks)
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP      0

Root node processing (before b&c):
  Real time           = 0.00 sec. (2.06 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time           = 0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average) = 0.00 sec.
  Wait time (average) = 0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) = 0.00 sec. (2.06 ticks)
Solution status = Optimal
Solution value = 40
Xijkn(14,13,3,15)=1
TDijkn(14,13,3,15)=16:40
Xijkn(18,14,4,16)=1
TDijkn(18,14,4,16)=7:00
Press any key to continue . . .

```

Εικόνα 5: Εκτύπωση κώδικα αναφοράς για παράδειγμα 3

```

C:\windows\system32\cmd.exe
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP      0
Tried aggregator 1 time.
MIP Presolve eliminated 55 rows and 89919 columns.
MIP Presolve modified 1053 coefficients.
Reduced MIP has 45 rows, 81 columns, and 422 nonzeros.
Reduced MIP has 81 binaries, 0 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
Presolve time = 0.09 sec. (149.87 ticks)
Found incumbent of value 100.000019 after 0.11 sec. (162.69 ticks)
Probing fixed 45 vars, tightened 0 bounds.
Probing changed sense of 1 constraints.
Probing time = 0.02 sec. (0.17 ticks)
Tried aggregator 1 time.
MIP Presolve eliminated 23 rows and 45 columns.
MIP Presolve modified 32 coefficients.
Reduced MIP has 22 rows, 36 columns, and 151 nonzeros.
Reduced MIP has 36 binaries, 0 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
Presolve time = 0.00 sec. (0.66 ticks)
Probing fixed 2 vars, tightened 0 bounds.
Probing time = 0.00 sec. (0.06 ticks)
Tried aggregator 1 time.
MIP Presolve eliminated 0 rows and 2 columns.
Reduced MIP has 22 rows, 34 columns, and 142 nonzeros.
Reduced MIP has 34 binaries, 0 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
Presolve time = 0.00 sec. (0.56 ticks)
Probing time = 0.00 sec. (0.06 ticks)
Clique table members: 134.
MIP emphasis: balance optimality and feasibility.
MIP search method: dynamic search.
Parallel mode: deterministic, using up to 8 threads.
Root relaxation solution time = 0.00 sec. (0.04 ticks)

      Nodes
      Node  Left      Objective  IInf  Best Integer      Cuts/
                                         Best Bound  ItCnt  Gap
*      0+      0              100.0000      0.0000      100.00%
*      0+      0              40.0000      0.0000      100.00%
      0      0      cutoff        40.0000      40.0000      4      0.00%
      0      0      cutoff        40.0000      40.0000      4      0.00%
Elapsed time = 0.17 sec. (170.73 ticks, tree = 0.01 MB, solutions = 2)

Root node processing (before b&c):
  Real time           = 0.19 sec. (173.82 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time           = 0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average) = 0.00 sec.
  Wait time (average) = 0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) = 0.19 sec. (173.82 ticks)
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP      0

Root node processing (before b&c):
  Real time           = 0.00 sec. (1.03 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time           = 0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average) = 0.00 sec.
  Wait time (average) = 0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) = 0.00 sec. (1.03 ticks)
Solution status = Optimal
Solution value = 40
Kijkn(14,13,3,14)=1
TDijkn(14,13,3,14)=8:40
Kijkn(18,14,4,16)=1
TDijkn(18,14,4,16)=7:00
Press any key to continue . . .

```

Εικόνα 6: Εκτύπωση νέου κώδικα για παράδειγμα 3


```

C:\windows\system32\cmd.exe
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP      0
Tried aggregator 2 times.
MIP Presolve eliminated 269840 rows and 179683 columns.
MIP Presolve modified 403487 coefficients.
Aggregator did 226 substitutions.
Reduced MIP has 58 rows, 91 columns, and 610 nonzeros.
Reduced MIP has 91 binaries, 0 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
Presolve time = 0.64 sec. (758.15 ticks)
Found incumbent of value 40.000000 after 0.67 sec. (789.32 ticks)
Probing fixed 55 vars, tightened 0 bounds.
Probing changed sense of 1 constraints.
Probing time = 0.00 sec. (0.24 ticks)
Cover probing fixed 0 vars, tightened 3 bounds.
Tried aggregator 1 time.
MIP Presolve eliminated 29 rows and 56 columns.
MIP Presolve modified 142 coefficients.
Reduced MIP has 28 rows, 35 columns, and 188 nonzeros.
Reduced MIP has 35 binaries, 0 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
Presolve time = 0.02 sec. (2.46 ticks)
Probing fixed 4 vars, tightened 0 bounds.
Probing time = 0.00 sec. (0.08 ticks)
Tried aggregator 1 time.
MIP Presolve eliminated 0 rows and 4 columns.
MIP Presolve modified 36 coefficients.
Reduced MIP has 28 rows, 31 columns, and 166 nonzeros.
Reduced MIP has 31 binaries, 0 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
Presolve time = 0.01 sec. (2.39 ticks)
Probing time = 0.00 sec. (0.05 ticks)
Clique table members: 102.
MIP emphasis: balance optimality and feasibility.
MIP search method: dynamic search.
Parallel mode: deterministic, using up to 8 threads.
Root relaxation solution time = 0.00 sec. (0.04 ticks)

      Nodes
      Node Left   Objective IInf Best Integer    Cuts/
                                     Best Bound   ItCnt   Gap
*    0+   0           cutoff           40.0000    0.0000
    0    0           cutoff           40.0000    0          2   0.00%

Root node processing (before b&c):
  Real time               = 0.76 sec. (811.67 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time               = 0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average)    = 0.00 sec.
  Wait time (average)    = 0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) = 0.76 sec. (811.67 ticks)
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP      0

Root node processing (before b&c):
  Real time               = 0.00 sec. (2.06 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time               = 0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average)    = 0.00 sec.
  Wait time (average)    = 0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) = 0.00 sec. (2.06 ticks)
Solution status = Optimal
Solution value = 40
Xijkn(13,14,3,12)=1
TDijkn(13,14,3,12)=8:00
Xijkn(14,18,4,19)=1
TDijkn(14,18,4,19)=17:00
Press any key to continue . . .

```

Εικόνα 7: Εκτύπωση κώδικα αναφοράς για παράδειγμα 4

```

C:\windows\system32\cmd.exe
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP      0
Tried aggregator 1 time.
MIP Presolve eliminated 55 rows and 89931 columns.
MIP Presolve modified 1076 coefficients.
Reduced MIP has 45 rows, 69 columns, and 352 nonzeros.
Reduced MIP has 69 binaries, 0 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
Presolve time = 0.09 sec. (145.16 ticks)
Found incumbent of value 40.000020 after 0.11 sec. (157.71 ticks)
Probing fixed 28 vars, tightened 0 bounds.
Probing time = 0.00 sec. (0.12 ticks)
Tried aggregator 1 time.
MIP Presolve eliminated 23 rows and 28 columns.
MIP Presolve modified 29 coefficients.
Reduced MIP has 22 rows, 41 columns, and 176 nonzeros.
Reduced MIP has 41 binaries, 0 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
Presolve time = 0.02 sec. (0.66 ticks)
Probing fixed 3 vars, tightened 0 bounds.
Probing time = 0.00 sec. (0.08 ticks)
Tried aggregator 1 time.
MIP Presolve eliminated 0 rows and 3 columns.
MIP Presolve modified 26 coefficients.
Reduced MIP has 22 rows, 38 columns, and 158 nonzeros.
Reduced MIP has 38 binaries, 0 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
Presolve time = 0.01 sec. (0.63 ticks)
Probing fixed 1 vars, tightened 0 bounds.
Probing changed sense of 1 constraints.
Probing time = 0.00 sec. (0.07 ticks)
Clique table members: 161.
MIP emphasis: balance optimality and feasibility.
MIP search method: dynamic search.
Parallel mode: deterministic, using up to 8 threads.
Root relaxation solution time = 0.00 sec. (0.05 ticks)

      Nodes
      Node Left   Objective  IInf Best Integer   Cuts/
                                         Best Bound   ItCnt   Gap
*    0+    0          integral    0         40.0000      0.0000      100.00%
*    0    0          integral    0         40.0000     40.0000      3      0.00%
Elapsed time = 0.17 sec. (165.78 ticks, tree = 0.00 MB, solutions = 2)

Root node processing (before b&c):
  Real time           = 0.19 sec. (168.87 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time           = 0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average) = 0.00 sec.
  Wait time (average) = 0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) = 0.19 sec. (168.87 ticks)
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP      0

Root node processing (before b&c):
  Real time           = 0.00 sec. (1.03 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time           = 0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average) = 0.00 sec.
  Wait time (average) = 0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) = 0.00 sec. (1.03 ticks)
Solution status = Optimal
Solution value = 40
Xijkn(13,14,3,12)=1
TDijkn(13,14,3,12)=8:00
Xijkn(14,20,4,18)=1
TDijkn(14,20,4,18)=9:00
Xijkn(20,18,4,18)=1
TDijkn(20,18,4,18)=9:10
Press any key to continue . . .

```

Εικόνα 8: Εκτύπωση νέου κώδικα για παράδειγμα 4


```

C:\windows\system32\cmd.exe
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP      0
Tried aggregator 2 times.
MIP Presolve eliminated 269851 rows and 179707 columns.
MIP Presolve modified 404724 coefficients.
Aggregator did 224 substitutions.
Reduced MIP has 49 rows, 69 columns, and 403 nonzeros.
Reduced MIP has 69 binaries, 0 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
Presolve time = 0.61 sec. (684.45 ticks)
Found incumbent of value 60.000000 after 0.63 sec. (715.03 ticks)
Probing fixed 47 vars, tightened 0 bounds.
Probing changed sense of 1 constraints.
Probing time = 0.01 sec. (0.14 ticks)
Tried aggregator 4 times.
MIP Presolve eliminated 44 rows and 65 columns.
MIP Presolve added 1 rows and 1 columns.
MIP Presolve modified 152 coefficients.
Aggregator did 5 substitutions.
All rows and columns eliminated.
Presolve time = 0.00 sec. (2.49 ticks)

Root node processing (before b&c):
  Real time               =    0.66 sec. (725.58 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time               =    0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average)    =    0.00 sec.
  Wait time (average)    =    0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) =    0.66 sec. (725.58 ticks)
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP      0

Root node processing (before b&c):
  Real time               =    0.02 sec. (2.06 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time               =    0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average)    =    0.00 sec.
  Wait time (average)    =    0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) =    0.02 sec. (2.06 ticks)
Solution status = Optimal
Solution value = 60
Xijkn(4,23,5,23)=1
TDijkn(4,23,5,23)=16:00
Xijkn(14,17,3,12)=1
TDijkn(14,17,3,12)=8:10
Xijkn(17,4,3,12)=1
TDijkn(17,4,3,12)=8:40

```

Εικόνα 9: Εκτύπωση κώδικα αναφοράς για παράδειγμα 5

```

C:\windows\system32\cmd.exe
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP      0
Tried aggregator 4 times.
MIP Presolve eliminated 86 rows and 89985 columns.
MIP Presolve modified 540 coefficients.
Aggregator did 5 substitutions.
Reduced MIP has 9 rows, 10 columns, and 40 nonzeros.
Reduced MIP has 10 binaries, 0 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
Presolve time = 0.14 sec. (177.45 ticks)
Found incumbent of value 60.000019 after 0.14 sec. (189.64 ticks)
Probing fixed 8 vars, tightened 0 bounds.
Probing time = 0.00 sec. (0.01 ticks)
Tried aggregator 1 time.
MIP Presolve eliminated 9 rows and 10 columns.
All rows and columns eliminated.
Presolve time = 0.00 sec. (0.48 ticks)

Root node processing (before b&c):
  Real time                =    0.16 sec. (193.99 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time                =    0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average)     =    0.00 sec.
  Wait time (average)     =    0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) =    0.16 sec. (193.99 ticks)
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP      0

Root node processing (before b&c):
  Real time                =    0.01 sec. (1.03 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time                =    0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average)     =    0.00 sec.
  Wait time (average)     =    0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) =    0.01 sec. (1.03 ticks)
Solution status = Optimal
Solution value = 60
Xijkn(4,24,5,23)=1
TDijkn(4,24,5,23)=16:00
Xijkn(14,17,3,12)=1
TDijkn(14,17,3,12)=8:10
Xijkn(17,4,3,12)=1
TDijkn(17,4,3,12)=8:40
Xijkn(24,23,5,23)=1
TDijkn(24,23,5,23)=16:10
Press any key to continue . . . █

```

Εικόνα 10: Εκτύπωση νέου κώδικα για παράδειγμα 5


```

C:\windows\system32\cmd.exe
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP          0
Implied bounds make row '|||||'
Presolve time = 0.53 sec. (584.66 ticks)

Root node processing (before b&c):
  Real time               =    0.55 sec. (613.27 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time               =    0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average)    =    0.00 sec.
  Wait time (average)    =    0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) =    0.55 sec. (613.27 ticks)
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP          0

Root node processing (before b&c):
  Real time               =    0.00 sec. (0.00 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time               =    0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average)    =    0.00 sec.
  Wait time (average)    =    0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) =    0.00 sec. (0.00 ticks)
Failed to optimize LP.
Unknown exception caught
Press any key to continue . . .

```

Εικόνα 11: Εκτύπωση κώδικα αναφοράς για παράδειγμα 6

```

C:\windows\system32\cmd.exe
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP          0
Infeasible column 'Xijkl(i21,,j22,k3,n21)'.
Presolve time = 0.05 sec. (49.41 ticks)

Root node processing (before b&c):
  Real time               =    0.06 sec. (60.90 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time               =    0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average)    =    0.00 sec.
  Wait time (average)    =    0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) =    0.06 sec. (60.90 ticks)
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP          0

Root node processing (before b&c):
  Real time               =    0.00 sec. (0.00 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time               =    0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average)    =    0.00 sec.
  Wait time (average)    =    0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) =    0.00 sec. (0.00 ticks)
Failed to optimize LP.
Unknown exception caught
Press any key to continue . . .

```

Εικόνα 12: Εκτύπωση νέου κώδικα για παράδειγμα 6

```

C:\windows\system32\cmd.exe
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP      0
Tried aggregator 4 times.
MIP Presolve eliminated 269840 rows and 179705 columns.
MIP Presolve modified 403354 coefficients.
Aggregator did 233 substitutions.
Reduced MIP has 51 rows, 62 columns, and 377 nonzeros.
Reduced MIP has 62 binaries, 0 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
Presolve time = 0.77 sec. (893.91 ticks)
Found incumbent of value 110.000000 after 0.80 sec. (924.37 ticks)
Probing fixed 38 vars, tightened 0 bounds.
Probing changed sense of 2 constraints.
Probing time = 0.00 sec. (0.11 ticks)
Cover probing fixed 2 vars, tightened 1 bounds.
Tried aggregator 2 times.
MIP Presolve eliminated 44 rows and 57 columns.
MIP Presolve modified 102 coefficients.
Aggregator did 5 substitutions.
All rows and columns eliminated.
Presolve time = 0.00 sec. (2.38 ticks)

Root node processing (before b&c):
  Real time                =    0.83 sec. (934.78 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time                =    0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average)     =    0.00 sec.
  Wait time (average)    =    0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) =    0.83 sec. (934.78 ticks)
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP      0

Root node processing (before b&c):
  Real time                =    0.00 sec. (2.06 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time                =    0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average)     =    0.00 sec.
  Wait time (average)    =    0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) =    0.00 sec. (2.06 ticks)
Solution status = Optimal
Solution value = 110
Xijkn(2,7,1,7)=1
TDijkn(2,7,1,7)=17:00
Xijkn(4,2,0,3)=1
TDijkn(4,2,0,3)=16:00
Xijkn(7,5,1,7)=1
TDijkn(7,5,1,7)=17:10
Xijkn(14,4,3,12)=1
TDijkn(14,4,3,12)=8:10
Xijkn(19,14,4,16)=1
TDijkn(19,14,4,16)=7:10
Press any key to continue . . . █

```

Εικόνα 13: Εκτύπωση κώδικα αναφοράς για παράδειγμα 7


```

C:\windows\system32\cmd.exe
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP      0
Tried aggregator 3 times.
MIP Presolve eliminated 59 rows and 89932 columns.
MIP Presolve modified 708 coefficients.
Aggregator did 3 substitutions.
Reduced MIP has 38 rows, 65 columns, and 291 nonzeros.
Reduced MIP has 65 binaries, 0 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
Presolve time = 0.19 sec. (321.12 ticks)
Found incumbent of value 110.000020 after 0.20 sec. (333.64 ticks)
Probing fixed 40 vars, tightened 0 bounds.
Probing changed sense of 2 constraints.
Probing time = 0.00 sec. (0.09 ticks)
Cover probing fixed 2 vars, tightened 0 bounds.
Tried aggregator 3 times.
MIP Presolve eliminated 33 rows and 60 columns.
MIP Presolve modified 30 coefficients.
Aggregator did 5 substitutions.
All rows and columns eliminated.
Presolve time = 0.02 sec. (0.58 ticks)

Root node processing (before b&c):
  Real time                =    0.22 sec. (338.02 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time                =    0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average)     =    0.00 sec.
  Wait time (average)     =    0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) =    0.22 sec. (338.02 ticks)
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP      0

Root node processing (before b&c):
  Real time                =    0.00 sec. (1.03 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time                =    0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average)     =    0.00 sec.
  Wait time (average)     =    0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) =    0.00 sec. (1.03 ticks)
Solution status = Optimal
Solution value = 110
Xijkn(2,5,1,7)=1
TDijkn(2,5,1,7)=17:00
Xijkn(4,2,0,3)=1
TDijkn(4,2,0,3)=16:00
Xijkn(14,16,3,12)=1
TDijkn(14,16,3,12)=8:10
Xijkn(16,4,3,12)=1
TDijkn(16,4,3,12)=8:30
Xijkn(19,14,4,16)=1
TDijkn(19,14,4,16)=7:10
Press any key to continue . . . █

```

Εικόνα 14: Εκτύπωση νέου κώδικα για παράδειγμα 7

```

C:\windows\system32\cmd.exe
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP      0
Tried aggregator 3 times.
MIP Presolve eliminated 269792 rows and 179591 columns.
MIP Presolve modified 405843 coefficients.
Aggregator did 233 substitutions.
Reduced MIP has 99 rows, 176 columns, and 1218 nonzeros.
Reduced MIP has 176 binaries, 0 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
Presolve time = 0.67 sec. (742.99 ticks)
Found incumbent of value 60.000000 after 0.70 sec. (775.23 ticks)
Probing fixed 149 vars, tightened 0 bounds.
Probing changed sense of 1 constraints.
Probing time = 0.00 sec. (0.87 ticks)
Cover probing fixed 1 vars, tightened 2 bounds.
Tried aggregator 1 time.
MIP Presolve eliminated 68 rows and 150 columns.
MIP Presolve modified 218 coefficients.
Reduced MIP has 29 rows, 26 columns, and 139 nonzeros.
Reduced MIP has 26 binaries, 0 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
Presolve time = 0.00 sec. (2.57 ticks)
Probing time = 0.00 sec. (0.07 ticks)
Tried aggregator 1 time.
Reduced MIP has 29 rows, 26 columns, and 139 nonzeros.
Reduced MIP has 26 binaries, 0 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
Presolve time = 0.00 sec. (2.30 ticks)
Probing time = 0.00 sec. (0.07 ticks)
Clique table members: 137.
MIP emphasis: balance optimality and feasibility.
MIP search method: dynamic search.
Parallel mode: deterministic, using up to 8 threads.
Root relaxation solution time = 0.00 sec. (0.04 ticks)

      Nodes
      Node  Left      Objective  IInf  Best Integer      Cuts/
                                         Best Bound      ItCnt      Gap
*      0+      0              60.0000      0.0000              100.00%
*      0+      0              40.0000      0.0000              100.00%
      0      0      cutoff          40.0000      40.0000           3      0.00%
      0      0      cutoff          40.0000      40.0000           3      0.00%
Elapsed time = 0.78 sec. (796.10 ticks, tree = 0.01 MB, solutions = 2)

Root node processing (before b&c):
  Real time           = 0.81 sec. (802.28 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time           = 0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average) = 0.00 sec.
  Wait time (average) = 0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) = 0.81 sec. (802.28 ticks)
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP      0

Root node processing (before b&c):
  Real time           = 0.02 sec. (2.06 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time           = 0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average) = 0.00 sec.
  Wait time (average) = 0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) = 0.02 sec. (2.06 ticks)
Solution status = Optimal
Solution value = 40
Xijkn(14,17,3,13)=1
TDijkn(14,17,3,13)=16:10
Xijkn(20,14,4,16)=1
TDijkn(20,14,4,16)=7:20
Press any key to continue . . .

```

Εικόνα 15: Εκτύπωση κώδικα αναφοράς για παράδειγμα 8


```

C:\windows\system32\cmd.exe
MIP Presolve eliminated 51 rows and 89923 columns.
MIP Presolve modified 708 coefficients.
Reduced MIP has 49 rows, 77 columns, and 409 nonzeros.
Reduced MIP has 77 binaries, 0 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
Presolve time = 0.13 sec. (194.14 ticks)
Found incumbent of value 60.000018 after 0.14 sec. (206.84 ticks)
Probing fixed 47 vars, tightened 0 bounds.
Probing changed sense of 1 constraints.
Probing time = 0.00 sec. (0.18 ticks)
Cover probing fixed 1 vars, tightened 0 bounds.
Tried aggregator 1 time.
MIP Presolve eliminated 26 rows and 48 columns.
MIP Presolve modified 51 coefficients.
Reduced MIP has 23 rows, 29 columns, and 120 nonzeros.
Reduced MIP has 29 binaries, 0 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
Presolve time = 0.01 sec. (0.63 ticks)
Probing time = 0.00 sec. (0.07 ticks)
Tried aggregator 1 time.
Reduced MIP has 23 rows, 29 columns, and 120 nonzeros.
Reduced MIP has 29 binaries, 0 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
Presolve time = 0.00 sec. (0.55 ticks)
Probing time = 0.00 sec. (0.07 ticks)
Clique table members: 133.
MIP emphasis: balance optimality and feasibility.
MIP search method: dynamic search.
Parallel mode: deterministic, using up to 8 threads.
Root relaxation solution time = 0.00 sec. (0.04 ticks)

      Nodes
      Node Left      Objective  IInf  Best Integer  Cuts/
                                         Best Bound  ItCnt  Gap
*      0+      0              60.0000      0.0000              100.00%
*      0+      0              40.0000      0.0000              100.00%
      0      0      cutoff      40.0000      40.0000      4      0.00%
      0      0      cutoff      40.0000      40.0000      4      0.00%
Elapsed time = 0.19 sec. (215.40 ticks, tree = 0.01 MB, solutions = 2)

Root node processing (before b&c):
  Real time           = 0.20 sec. (218.49 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time           = 0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average) = 0.00 sec.
  Wait time (average) = 0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) = 0.20 sec. (218.49 ticks)
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP      0

Root node processing (before b&c):
  Real time           = 0.00 sec. (1.03 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time           = 0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average) = 0.00 sec.
  Wait time (average) = 0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) = 0.00 sec. (1.03 ticks)
Solution status = Optimal
Solution value = 40
Xijkn(14,17,3,12)=1
TDijkn(14,17,3,12)=8:10
Xijkn(20,14,4,16)=1
TDijkn(20,14,4,16)=7:20

```

Εικόνα 16: Εκτύπωση νέου κώδικα για παράδειγμα 8

```

C:\windows\system32\cmd.exe
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP          0
Infeasibility row '|||||
Presolve time = 0.27 sec. (316.41 ticks)

Root node processing (before b&c):
  Real time           = 0.30 sec. (345.02 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time           = 0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average) = 0.00 sec.
  Wait time (average) = 0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) = 0.30 sec. (345.02 ticks)
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP          0

Root node processing (before b&c):
  Real time           = 0.00 sec. (0.00 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time           = 0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average) = 0.00 sec.
  Wait time (average) = 0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) = 0.00 sec. (0.00 ticks)
Failed to optimize LP.
Unknown exception caught
Press any key to continue . . .
    
```

Εικόνα 17: Εκτύπωση κώδικα αναφοράς για παράδειγμα 9

```

C:\windows\system32\cmd.exe
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP          0
Infeasibility row '|||||
Presolve time = 0.06 sec. (64.92 ticks)

Root node processing (before b&c):
  Real time           = 0.06 sec. (76.40 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time           = 0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average) = 0.00 sec.
  Wait time (average) = 0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) = 0.06 sec. (76.40 ticks)
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP          0

Root node processing (before b&c):
  Real time           = 0.00 sec. (0.00 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time           = 0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average) = 0.00 sec.
  Wait time (average) = 0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) = 0.00 sec. (0.00 ticks)
Failed to optimize LP.
Unknown exception caught
Press any key to continue . . .
    
```

Εικόνα 18: Εκτύπωση νέου κώδικα για παράδειγμα 9


```

C:\windows\system32\cmd.exe
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP      0
Tried aggregator 2 times.
MIP Presolve eliminated 269844 rows and 179690 columns.
MIP Presolve modified 405992 coefficients.
Aggregator did 230 substitutions.
Reduced MIP has 50 rows, 80 columns, and 487 nonzeros.
Reduced MIP has 80 binaries, 0 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
Presolve time = 0.63 sec. (723.60 ticks)
Found incumbent of value 70.000000 after 0.67 sec. (754.45 ticks)
Probing fixed 50 vars, tightened 0 bounds.
Probing changed sense of 1 constraints.
Probing time = 0.00 sec. (0.19 ticks)
Tried aggregator 3 times.
MIP Presolve eliminated 29 rows and 56 columns.
MIP Presolve modified 108 coefficients.
Aggregator did 3 substitutions.
Reduced MIP has 17 rows, 21 columns, and 119 nonzeros.
Reduced MIP has 21 binaries, 0 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
Presolve time = 0.02 sec. (2.55 ticks)
Probing fixed 11 vars, tightened 0 bounds.
Probing time = 0.00 sec. (0.04 ticks)
Tried aggregator 3 times.
MIP Presolve eliminated 14 rows and 18 columns.
MIP Presolve modified 20 coefficients.
Aggregator did 3 substitutions.
All rows and columns eliminated.
Presolve time = 0.01 sec. (2.29 ticks)

Root node processing (before b&c):
  Real time               =    0.72 sec. (769.07 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time               =    0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average)    =    0.00 sec.
  Wait time (average)    =    0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) =    0.72 sec. (769.07 ticks)
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP      0

Root node processing (before b&c):
  Real time               =    0.02 sec. (2.06 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time               =    0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average)    =    0.00 sec.
  Wait time (average)    =    0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) =    0.02 sec. (2.06 ticks)
Solution status = Optimal
Solution value = 70
Xijkn(1,4,0,0)=1
TDijkn(1,4,0,0)=8:10
Xijkn(4,9,2,11)=1
TDijkn(4,9,2,11)=16:00
Press any key to continue . . .

```

Εικόνα 19: Εκτύπωση κώδικα αναφοράς για παράδειγμα 10

```

C:\windows\system32\cmd.exe
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP      0
Tried aggregator 3 times.
MIP Presolve eliminated 83 rows and 89970 columns.
MIP Presolve modified 598 coefficients.
Aggregator did 3 substitutions.
Reduced MIP has 14 rows, 27 columns, and 115 nonzeros.
Reduced MIP has 27 binaries, 0 generals, 0 SOSs, and 0 indicators.
Presolve time = 0.11 sec. (171.93 ticks)
Found incumbent of value 70.000019 after 0.13 sec. (184.22 ticks)
Probing fixed 16 vars, tightened 0 bounds.
Probing changed sense of 1 constraints.
Probing time = 0.00 sec. (0.03 ticks)
Tried aggregator 3 times.
MIP Presolve eliminated 10 rows and 23 columns.
MIP Presolve modified 12 coefficients.
Aggregator did 4 substitutions.
All rows and columns eliminated.
Presolve time = 0.00 sec. (0.52 ticks)

Root node processing (before b&c):
  Real time                =    0.16 sec. (188.64 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time                =    0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average)     =    0.00 sec.
  Wait time (average)    =    0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) =    0.16 sec. (188.64 ticks)
CPXPARAM_MIP_Strategy_CallbackReducedLP      0

Root node processing (before b&c):
  Real time                =    0.00 sec. (1.03 ticks)
Parallel b&c, 8 threads:
  Real time                =    0.00 sec. (0.00 ticks)
  Sync time (average)     =    0.00 sec.
  Wait time (average)    =    0.00 sec.
-----
Total (root+branch&cut) =    0.00 sec. (1.03 ticks)
Solution status = Optimal
Solution value = 70
Xijkn(1,4,0,0)=1
TDijkn(1,4,0,0)=8:10
Xijkn(4,10,2,11)=1
TDijkn(4,10,2,11)=16:00
Xijkn(10,9,2,11)=1
TDijkn(10,9,2,11)=16:30
Press any key to continue . . .

```

Εικόνα 20: Εκτύπωση νέου κώδικα για παράδειγμα 10

ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

G.T.F.S. - General Transit Feed Specification

A.E. – Ανώνυμη Εταιρεία

C.P.U. - Central Processing Unit

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Μάνου, Ι., 2017. Synchronization of Timetables in Czech Republic.

Taha, H., 2011. *Introduction to Operations Research*.

