



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Ταμείο  
Περιφερειακής Ανάπτυξης

ΕΠΑνεΚ 2014-2020  
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ  
ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ  
ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

# ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ

**ΔΡΑΣΗ ΕΘΝΙΚΗΣ ΕΜΒΕΛΕΙΑΣ:  
«Ερευνώ-Δημιουργώ-Καινοτομώ»**

## ΒΕΛΟΣ

**Βελτιστοποίηση Μεταφορών με Αλγόριθμους Ελέγχου  
Οπισθοπίεσης**

## Π2.1

### Μελέτη Επίδοσης Αλγορίθμου

<b>Ημερομηνία</b>	Μήνας 12, 28/07/2022 Μήνας 15, 28/10/2022
<b>Ενότητα Εργασίας</b>	Ε.Ε.2
<b>Είδος</b>	Αναφορά
<b>Κατάσταση έγκρισης</b>	Υποβληθέν
<b>Έκδοση</b>	5
<b>Αριθμός σελίδων</b>	47
<b>Όνομα αρχείου</b>	VELOS_Paradoteo_2.1_v05_final.docx

#### Σύνοψη

Στο Παραδοτέο «Π2.1 - Μελέτη Επίδοσης Αλγορίθμου» περιλαμβάνονται όλες οι δραστηριότητες που σχετίζεται με τη μελέτη επίδοσης του σχεδιασμένου αλγόριθμου σε εργαστηριακό επίπεδο, με χρήση δεδομένων που θα προσομοιώνουν τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του. Παράλληλα, αξιολογήθηκε η χρηστικότητα του σχεδιασμένου αλγόριθμου και έγιναν διορθωτικές τροποποιήσεις στη σχεδίαση προκειμένου να προκύψει μια έκδοση του αλγόριθμου κατάλληλη για την εταιρεία RMR και τις αντίστοιχες μικρο-μεσαίες επιχειρήσεις μεταφορών-συσσκευασίας. Η τελική αξιολόγηση καθιστά τον αρχικά προτεινόμενο αλγόριθμο καταλληλότερο για εφαρμογή σε ένα ενιαίο περιβάλλον προγραμματισμού μεταφορών (π.χ., από μια ρυθμιστική αρχή), η οποία υπερβαίνει το αρχικό πλάνο λειτουργίας του. Για το λόγο αυτό προτείνεται μια πιο περιορισμένη έκδοσή του για υλοποίηση στο πληροφοριακό σύστημα της RMR, καταλληλότερη και πιο εξατομικευμένη για την καθημερινή λειτουργία μιας τέτοιας εταιρείας.



Αυτή η σελίδα αφέθηκε σκόπιμα κενή

## Ιστορικό εκδόσεων

Έκδοση	Ημερομηνία	Περιγραφή	Αναθεώρηση
1	18/09/2021	Πρότυπο παραδοτέου	
2	28/04/2022	Πίνακας Περιεχομένων και αρχικό/εισαγωγικό περιεχόμενο	
3	04/04/2022	Προσθήκη κεφαλαίου 2 και 3	
4	23/05/2022	Προσθήκη κεφαλαίου 4 και 5	
5	15/06/2022	Προσθήκη κεφαλαίου 5 και 6 και συνολική επιμέλεια κειμένου	



**ΕΠΑνεΚ 2014-2020**  
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ  
ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ  
ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

## Λίστα συγγραφέων

Οργανισμός	Όνοματεπώνυμο	Στοιχεία επικοινωνίας
Τμήμα Πληροφορικής, Ιόνιο Πανεπιστήμιο	Φοίβος Μυλωνάς	Πλατεία Στριγώτη 7, Τ.Κ. 49132 Κέρκυρα, Ελλάδα Τηλ.: 26610 87741
Τμήμα Πληροφορικής, Ιόνιο Πανεπιστήμιο	Βασίλειος Καρυώτης	Πλατεία Στριγώτη 7, Τ.Κ. 49132 Κέρκυρα, Ελλάδα Τηλ.: 26610 87757
Τμήμα Πληροφορικής, Ιόνιο Πανεπιστήμιο	Παναγιώτης Κουρουθανάσης	Πλατεία Στριγώτη 7, Τ.Κ. 49132 Κέρκυρα, Ελλάδα Τηλ.: 26610 87757
Τμήμα Πληροφορικής, Ιόνιο Πανεπιστήμιο	Ευαγγελία Τσιλάκου	Πλατεία Στριγώτη 7, Τ.Κ. 49132 Κέρκυρα, Ελλάδα Τηλ.: 26610 87757
Τμήμα Πληροφορικής, Ιόνιο Πανεπιστήμιο	Κλειώ Στάμου	Πλατεία Στριγώτη 7, Τ.Κ. 49132 Κέρκυρα, Ελλάδα Τηλ.: 26610 87757
Τμήμα Πληροφορικής, Ιόνιο Πανεπιστήμιο	Γεώργιος Βούτος	Πλατεία Στριγώτη 7, Τ.Κ. 49132 Κέρκυρα, Ελλάδα Τηλ.: 26610 87757
Τμήμα Πληροφορικής, Ιόνιο Πανεπιστήμιο	Ιωάννης Καθενιώτης	Πλατεία Στριγώτη 7, Τ.Κ. 49132 Κέρκυρα, Ελλάδα Τηλ.: 26610 87757
Τμήμα Πληροφορικής, Ιόνιο Πανεπιστήμιο	Ειρήνη Μαθέ	Πλατεία Στριγώτη 7, Τ.Κ. 49132 Κέρκυρα, Ελλάδα Τηλ.: 26610 87757
Τμήμα Πληροφορικής, Ιόνιο Πανεπιστήμιο	Άννα Σωτηροπούλου	Πλατεία Στριγώτη 7, Τ.Κ. 49132 Κέρκυρα, Ελλάδα



**ΕΠΑνεΚ 2014-2020**  
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ  
ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ  
ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

		Τηλ.: 26610 87757
Τμήμα Πληροφορικής, Ιόνιο Πανεπιστήμιο	Έλενα Κουμεντάκου	Πλατεία Τσιριγώτη 7, Τ.Κ. 49132 Κέρκυρα, Ελλάδα Τηλ.: 26610 87756
Τμήμα Πληροφορικής, Ιόνιο Πανεπιστήμιο	Ελένη Στάη	Πλατεία Τσιριγώτη 7, Τ.Κ. 49132 Κέρκυρα, Ελλάδα Τηλ.: 26610 87756
Ινστιτούτο Ανάπτυξης Επιχειρηματικότητας	Γεώργιος Γκόγκας	Βαλτετσίου και Τριπόλεως, Τ.Κ. 41336 Λάρισα, Ελλάδα Τηλ.:2410 626943
Ινστιτούτο Ανάπτυξης Επιχειρηματικότητας	Κατερίνα Παρίζα	Βαλτετσίου και Τριπόλεως, Τ.Κ. 41336 Λάρισα, Ελλάδα Τηλ.:2410 626943
RMR I.K.E.	Βασιλική Σουμπενιώτη	Ηρ. Πολυτεχνείου 95, Τ.Κ. 41222 Λάρισα, Ελλάδα Τηλ.:2410 669040
RMR I.K.E.	Απόστολος Παναγόπουλος	Ηρ. Πολυτεχνείου 95, Τ.Κ. 41222 Λάρισα, Ελλάδα Τηλ.:2410 669040
RMR I.K.E.	Άγγελος Παπαγεωργίου	Ηρ. Πολυτεχνείου 95, Τ.Κ. 41222 Λάρισα, Ελλάδα Τηλ.:2410 669040
RMR I.K.E.	Κωνσταντίνος Γρηγορίου	ΤΗρ. Πολυτεχνείου 95, Τ.Κ. 41222 Λάρισα, Ελλάδα Τηλ.:2410 669040



## Περίληψη

Το έργο ΒΕΛΟΣ εστιάζει στις δραστηριότητες των μικρο-μεσαίων μεταφορικών εταιρειών, και ειδικότερα στις ανάγκες της RMR, η οποία είναι μια μικρο-μεσαία επιχείρηση (Small-Medium Enterprise, SME) που δραστηριοποιείται στις μεταφορές αγαθών εξειδικευμένης διαχείρισης. Μεταξύ άλλων, ένα βασικό πρόβλημα της RMR, και αντίστοιχων μικρο-μεσαίων εταιρειών που δραστηριοποιούνται στον κλάδο των μεταφορών, είναι αυτό της βέλτιστης ανάθεσης πόρων (φορτωτικών, οχημάτων, χρονοδιαγραμμάτων, κλπ.) και χρονοπρογραμματισμού των αναγκαίων μεταφορών και/ή συνοδευτικών ενεργειών (π.χ. πακετάρισμα-packaging) σε ημερήσια/εβδομαδιαία/μηνιαία/ετήσια βάση μεταξύ των σημείων ενδιαφέροντος, ώστε να εξασφαλιστεί ότι το ανεκτέλεστο κάθε μέρας (εκκρεμείς παραδόσεις σε αναμονή-αποθήκη) και ο μέσος χρόνος παράδοσης παραμένουν οριοθετημένα (πιθανά και ελεγχόμενα), ενώ ελαχιστοποιούνται άλλα κριτήρια βέλτιστης λειτουργίας, π.χ. κόστος μεταφοράς, αποθήκευσης, συντήρησης στόλου, χρόνος παράδοσης, κλπ.

Τα παραπάνω ζητήματα είναι πολύ σημαντικά για την RMR, όπως και για κάθε αντίστοιχη μικρο-μεσαία επιχείρηση του κλάδου, καθώς μπορεί να αποβούν κρίσιμα για τη λειτουργία της και τις απαραίτητες οικονομίες κλίμακας που πρέπει να γίνουν σε μια παγκοσμιοποιημένη πλέον αγορά. Αυτή η ανάγκη, η οποία σε άλλες χώρες, π.χ. ΗΠΑ, Βρετανία, κλπ., έχει προκύψει εδώ και δεκαετίες, έχει πλέον παγιωθεί και στην Ελλάδα, τόσο λόγω της ανόδου τα τελευταία χρόνια του ηλεκτρονικού λιανεμπορίου, όσο και της αύξησης της ζήτησης που προέκυψε από την πανδημία COVID-19.

Η RMR θα κληθεί να καλύψει αυξημένη ζήτηση αιτούμενων μεταφορών με μεγαλύτερη ποικιλία σε σχέση με το παρελθόν, εν δυνάμει από/σε εγχώριες και διεθνείς τοποθεσίες. Η ανάγκη αναμένεται να αυξηθεί περαιτέρω καθώς η Χώρα μας



έχει επιλέξει στρατηγικά την ενίσχυση του ρόλου της ως διακομιστικό κέντρο-πύλη από αγορές της Ασίας προς την υπόλοιπη Ευρώπη.

Το πρόβλημα που ανακύπτει σε κάθε τέτοια επιχείρηση είναι αυτό ενός δικτύου διανομής με πηγές και προορισμούς, μέσα από το οποίο ζητείται να μεταφερθούν εμπορεύματα διαφορετικού τύπου. Σε κάθε ενδιάμεσο κόμβο υπάρχουν «ουρές» αγαθών, και ο στόχος είναι να ελαχιστοποιηθεί ο συνολικός μέσος χρόνος παράδοσης κάθε αγαθού, ενώ το δίκτυο διατηρείται σε σταθερή κατάσταση, δηλαδή ότι αθροιστικά όλες οι ουρές αναμονής σε όλους τους σταθμούς διατηρούνται πεπερασμένες. Επιπρόσθετοι στόχοι, όπως π.χ. μειωμένη κατανάλωση ενέργειας, λειτουργικού κόστους, κλπ., μπορούν να τεθούν επιπλέον κατ' απαίτηση.

Για την αντιμετώπιση αντίστοιχων προβλημάτων έχουν προταθεί αρκετές προσεγγίσεις. Μερικές από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες είναι ο δυναμικός προγραμματισμός και βέλτιστος στοχαστικός έλεγχος, ο κυρτός και μικτός-διακριτός προγραμματισμός, και η μηχανική μάθηση. Όλες οι παραπάνω τεχνικές εμφανίζουν δύο κοινά σημεία δυσκολίας: α) είναι υπολογιστικά απαιτητικές, και β) βασίζονται σε κεντροποιημένους αλγόριθμους.

Το έργο ΒΕΛΟΣ φιλοδοξεί να αντιμετωπίσει το παραπάνω πρόβλημα στο πλαίσιο της εφαρμογής εταιρειών μεταφορών με μια πρωτοποριακή προσέγγιση, βασισμένη στον αλγόριθμο δρομολόγησης-χρονοπρογραμματισμού οπισθοπίεσης (backpressure). Ο αλγόριθμος έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε δίκτυα επικοινωνιών και οδικά δίκτυα για τη μείωση της συμφόρησης κίνησης δεδομένων ή αυτοκινήτων αντίστοιχα. Στο έργο ΒΕΛΟΣ, ο αλγόριθμος backpressure θα χρησιμοποιηθεί για την επίλυση του προβλήματος κατανομής πόρων και διατήρησης σταθερής κατάστασης του συνολικού συστήματος, καθώς και επιπρόσθετων στόχων βελτιστοποίησης κριτηρίων λειτουργίας/επίδοσης για μικρομεσαίες εταιρείες μεταφορών.



Το παρόν παραδοτέο Π1.2 παρουσιάζει όλες οι δραστηριότητες που έλαβαν χώρα για τη σχεδίαση και τη μελέτη επίδοσης ενός αλγόριθμου δρομολόγησης και χρονοπρογραμματισμού, ο οποίος προορίζεται να χρησιμοποιηθεί ως η καρδιά του πληροφοριακού συστήματος για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τον προγραμματισμό χρόνου και προορισμού παράδοσης φορτωτικών σε σχέση με διάφορα κριτήρια που μπορούν να καθορίσουν την ποιότητα υπηρεσίας.

Με βάση την εργασία που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του Παραδοτέου 1.2 (σχετική βιβλιογραφική ανασκόπηση, πρώτη σχεδίαση αλγόριθμου) στο παρόν παραδοτέο ολοκληρώνεται η σχεδίαση του θεωρητικού μέρους του αλγόριθμου, συνοδευόμενη από τη μελέτη επίδοσής του σε θεωρητικό επίπεδο. Η σχεδίαση που προέκυψε αποδεικνύεται αρκετά πιο γενική από αυτή που απαιτείται για τις ιδιαίτερες ανάγκες της RMR, οδηγώντας έτσι στην ανάγκη προσαρμογής του αρχικά προτεινόμενου αλγόριθμου σε μια έκδοση κατάλληλη προς καθημερινή χρήση από την RMR. Παρουσιάζονται και οι δύο προσεγγίσεις, και η τελική ενσωμάτωσή τους στο συνολικό πληροφοριακό σύστημα, μαζί με τον απαιτούμενο έλεγχο ορθής λειτουργίας και διαλειτουργικότητας με τα υπόλοιπα συστήματα του πληροφοριακού συστήματος θα γίνει σε επόμενα παραδοτέα.





## Συντομογραφίες και ακρωνύμια

Συντομογραφία	Επεξήγηση
<b>BP</b>	Back-pressure (Οπισθοπίεση)
<b>IoT</b>	Internet of Things (Διαδίκτυο των Πραγμάτων)
<b>MWM</b>	Maximum Weight Matching (Ταίριασμα Μέγιστου Βάρους)
<b>QoS</b>	Quality-of-Service (Ποιότητα Υπηρεσίας)
<b>SCM</b>	Supply Chain Management (Διαχείριση Εφοδιαστικής Αλυσίδας)
<b>SME</b>	Small-Medium Enterprise (Μικρο-μεσαία Επιχείρηση)
<b>SOTA</b>	State-of-the-Art (Τεχνολογία Αιχμής)

## Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή .....	13
2. Αλγόριθμος Backpressure για Ενοποιημένα Συστήματα Μεταφορών .....	17
2.1 Μοντέλο Συστήματος & Συμβολισμός.....	17
2.2 Υποθέσεις .....	21
2.3 Χρονική κλίμακα .....	21
2.4 Βασική ιδέα σχεδίασης .....	24
2.5 Περιγραφή της από κοινού διαδικασίας προγραμματισμού-δρομολόγησης.....	26
2.6 Συναρτήσεις Πίεσης .....	31
3. Πλαίσιο Μελέτης Επίδοσης Αλγόριθμου .....	32
3.1 Αρχιτεκτονική Προσομοίωσης.....	32
3.2 Υλοποίηση Προσομοίωσης.....	34
4. Ανάλυση Επίδοσης Αλγορίθμου.....	37
4.1 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων .....	37
4.2 Παρατηρήσεις και Ανατροφοδότηση Σχεδίασης.....	43
5. Τελικός Σχεδιασμός Αλγόριθμου Χρονοπρογραμματισμού .....	44
6. Επόμενα βήματα.....	45
Αναφορές .....	46

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 - Παράδειγμα κατευθυνόμενου δικτύου μεταφοράς εμπορευμάτων της εφοδιαστικής αλυσίδας.....	17
Εικόνα 2 – Ψευδοκώδικας υλοποίησης αλγόριθμου backpressure με queue difference scaling, [8]. .....	35
Εικόνα 3 – Ψευδοκώδικας υλοποίησης αλγόριθμου backpressure με άπληστη λογική, [26]. .....	36
Εικόνα 4 – Μέση ρυθμαπόδοση ανά ροή πακέτων (average.....	37
Εικόνα 5 – Μέσο μήκος μονοπατιού σε hops (average path in hops) για όλα τα επιτυχώς μεταδιδόμενα πακέτα, [8] .....	38
Εικόνα 6 – Σχέση μέσης ρυθμαπόδοσης με μέση καθυστέρηση και ρυθμό εισόδου για κάθε ροή, [26].....	38
Εικόνα 7 - Περίπτωση στατικών δικτύων: Αξιολόγηση της επίδοσης Throughput-Delay (σταθμισμένα ανά ροή), [26].....	39
Εικόνα 8 – Περίπτωση δυναμικών δικτύων: Αξιολόγηση της επίδοσης Throughput-Delay (σταθμισμένα ανά ροή), [26].....	39
Εικόνα 9 – Σύγκριση της μέσης καθυστέρησης ανά ροή για διαφορετικές προτεραιότητες, [26].....	40
Εικόνα 10 – Έλεγχος συμφόρησης και δρομολόγηση: βέλτιστοι ρυθμοί πηγής, σύγκλιση μεγέθους ουρών (ως Lagrange multipliers) και μελέτη της παραμέτρου T στη σύγκλιση, [27].....	40
Εικόνα 11 – Δρομολόγηση, χρονοπρογραμματισμός έλεγχος συμφόρησης και έλεγχος ισχύος, [27] .....	41
Εικόνα 12 - Μέγεθος ουράς και καθυστέρηση σε σχέση με το ρυθμό μετάδοσης, [28] .....	41
Εικόνα 13 – Όλο οι ρυθμοί πηγής και όλα τα μήκη ουρών αντίστοιχα, [29] .....	42



## Κατάλογος Πινάκων

No table of figures entries found.

## 1. Εισαγωγή

Το έργο ΒΕΛΟΣ εστιάζει στις δραστηριότητες των μικρο-μεσαίων μεταφορικών εταιρειών, και ειδικότερα στις ανάγκες της RMR, η οποία είναι μια μικρο-μεσαία επιχείρηση (Small-Medium Enterprise, SME) που δραστηριοποιείται στις μεταφορές αγαθών εξειδικευμένης διαχείρισης. Μεταξύ άλλων, ένα βασικό πρόβλημα της RMR, και αντίστοιχων μικρο-μεσαίων εταιρειών που δραστηριοποιούνται στον κλάδο των μεταφορών, είναι αυτό της βέλτιστης ανάθεσης πόρων (φορτωτικών, οχημάτων, χρονοδιαγραμμάτων, κλπ.) και χρονοπρογραμματισμού των αναγκών μεταφορών και/ή συνοδευτικών ενεργειών (π.χ. πακετάρισμα-packaging) σε ημερήσια/εβδομαδιαία/μηνιαία/ετήσια βάση μεταξύ των σημείων ενδιαφέροντος, ώστε να εξασφαλιστεί ότι το ανεκτέλεστο κάθε μέρας (εκκρεμείς παραδόσεις σε αναμονή-αποθήκη) και ο μέσος χρόνος παράδοσης παραμένουν οριοθετημένα (πιθανά και ελεγχόμενα), ενώ ελαχιστοποιούνται άλλα κριτήρια βέλτιστης λειτουργίας, π.χ. κόστος μεταφοράς, αποθήκευσης, συντήρησης στόλου, χρόνος παράδοσης, κλπ.

Τα παραπάνω ζητήματα είναι πολύ σημαντικά για την RMR, όπως και για κάθε αντίστοιχη μικρο-μεσαία επιχείρηση του κλάδου, καθώς μπορεί να αποβούν κρίσιμα για τη λειτουργία της και τις απαραίτητες οικονομίες κλίμακας που πρέπει να γίνουν σε μια παγκοσμιοποιημένη πλέον αγορά. Αυτή η ανάγκη, η οποία σε άλλες χώρες, π.χ. ΗΠΑ, Βρετανία, κλπ., έχει προκύψει εδώ και δεκαετίες, έχει πλέον παγιωθεί και στην Ελλάδα, τόσο λόγω της ανόδου τα τελευταία χρόνια του ηλεκτρονικού λιανεμπορίου, όσο και της αύξησης της ζήτησης που προέκυψε από την πανδημία COVID-19.

Η RMR θα κληθεί να καλύψει αυξημένη ζήτηση αιτούμενων μεταφορών με μεγαλύτερη ποικιλία σε σχέση με το παρελθόν, εν δυνάμει από/σε εγχώριες και διεθνείς τοποθεσίες. Η ανάγκη αναμένεται να αυξηθεί περαιτέρω καθώς η χώρα μας έχει αποφασίσει στρατηγικά να γίνει διακομιστικό κέντρο προς την υπόλοιπη Ευρώπη.



Το πρόβλημα που ανακύπτει είναι αυτό ενός δικτύου διανομής με πηγές και προορισμούς, μέσα από το οποίο ζητείται να μεταφερθούν εμπορεύματα διαφορετικού τύπου. Σε κάθε ενδιάμεσο κόμβο υπάρχουν ουρές αγαθών, και ο στόχος είναι να ελαχιστοποιηθεί ο συνολικός μέσος χρόνος παράδοσης κάθε αγαθού, ενώ το δίκτυο διατηρείται σε σταθερή κατάσταση, δηλαδή ότι αθροιστικά όλες οι ουρές αναμονής σε όλους τους σταθμούς διατηρούνται πεπερασμένες. Επιπρόσθετοι στόχοι, όπως π.χ. μειωμένη κατανάλωσης ενέργειας, λειτουργικού κόστους, κλπ., μπορούν να τεθούν κατ' απαίτηση.

Για την αντιμετώπιση αντίστοιχων προβλημάτων έχουν προταθεί αρκετές προσεγγίσεις. Μερικές από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες είναι ο δυναμικός χρονοπρογραμματισμός, βέλτιστος στοχαστικός έλεγχος, ο κυρτός και μικτός-διακριτός προγραμματισμός, και η μηχανική μάθηση. Όλες οι παραπάνω προσεγγίσεις εμφανίζουν δύο κοινές προκλήσεις: α) είναι υπολογιστικά απαιτητικές, και β) βασίζονται κατά βάση σε κεντροποιημένους αλγορίθμους.

Το έργο ΒΕΛΟΣ φιλοδοξεί να αντιμετωπίσει το παραπάνω πρόβλημα στο πλαίσιο της εφαρμογής εταιρειών μεταφορών με μια πρωτοποριακή προσέγγιση, βασισμένη στον αλγόριθμο δρομολόγησης-χρονοπρογραμματισμού οπισθοπίεσης (backpressure). Ο αλγόριθμος έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε δίκτυα επικοινωνιών και οδικά δίκτυα για τη μείωση της συμφόρησης κίνησης δεδομένων ή αυτοκινήτων. Στο ΒΕΛΟΣ, ο αλγόριθμος backpressure θα χρησιμοποιηθεί για την επίλυση του προβλήματος κατανομής πόρων και διατήρησης σταθερής κατάστασης, καθώς και επιπρόσθετων στόχων βελτιστοποίησης κριτηρίων λειτουργίας/επίδοσης για μικρομεσαίες εταιρείες μεταφορών.

Το παρόν παραδοτέο Π1.2 παρουσιάζει όλες οι δραστηριότητες που έλαβαν χώρα για τη σχεδίαση και τη μελέτη επίδοσης ενός αλγόριθμου δρομολόγησης και



χρονοπρογραμματισμού, ο οποίος προορίζεται να χρησιμοποιηθεί ως η καρδιά του πληροφοριακού συστήματος για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τον προγραμματισμό χρόνου και προορισμού παράδοσης φορτωτικών σε σχέση με διάφορα κριτήρια που μπορούν να καθορίσουν την ποιότητα υπηρεσίας.

Με βάση την εργασία που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του Παραδοτέου 1.2 (σχετική βιβλιογραφική ανασκόπηση, πρώτη σχεδίαση αλγόριθμου) στο παρόν παραδοτέο ολοκληρώνεται η σχεδίαση του θεωρητικού μέρους του αλγόριθμου, συνοδευόμενη από τη μελέτη επίδοσής του σε θεωρητικό επίπεδο. Η σχεδίαση που προέκυψε αποδεικνύεται αρκετά πιο γενική από αυτή που απαιτείται για τις ιδιαίτερες ανάγκες της RMR, οδηγώντας έτσι στην ανάγκη προσαρμογής του αρχικά προτεινόμενου αλγόριθμου σε μια έκδοση κατάλληλη προς καθημερινή χρήση από την RMR. Παρουσιάζονται και οι δύο προσεγγίσεις, και η τελική ενσωμάτωσή τους στο συνολικό πληροφοριακό σύστημα, μαζί με τον απαιτούμενο έλεγχο ορθής λειτουργίας και διαλειτουργικότητας με τα υπόλοιπα συστήματα του πληροφοριακού συστήματος θα γίνει σε επόμενα παραδοτέα.

Το υπόλοιπο του παραδοτέου δομείται ως εξής: Το **Κεφάλαιο 2** (Αλγόριθμος Backpressure για Ενοποιημένα Συστήματα Μεταφορών) παρουσιάζει τη σχεδίαση του ευρύτερου αλγόριθμου που δύναται να καλύψει ένα ενιαίο πλαίσιο εμπορευματικών μεταφορών. Το **Κεφάλαιο 3** (Πλαίσιο Μελέτης Επίδοσης Αλγόριθμου) παρουσιάζει το πλαίσιο μελέτης της επίδοσης του αλγόριθμου, ενώ το **Κεφάλαιο 4** (Ανάλυση Επίδοσης Αλγόριθμου) συγκεντρώνει και αναλύει τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μελέτη του αλγόριθμου στο πλαίσιο που περιγράφεται στο κεφάλαιο 3. Το **Κεφάλαιο 5** (Τελικός Σχεδιασμός Αλγόριθμου Χρονοπρογραμματισμού) παρέχει μια πιο εξατομικευμένη περιγραφή για το πλαίσιο λειτουργίας του αλγόριθμου στην καθημερινότητα της RMR, και τέλος το **Κεφάλαιο 6** (Επόμενα Βήματα) παραθέτει το



βήματα και το χρονοδιάγραμμα που θα ακολουθηθεί για την ολοκλήρωση της έρευνας και την ενσωμάτωση του αλγόριθμου στο τελικό Πληροφοριακό Σύστημα.

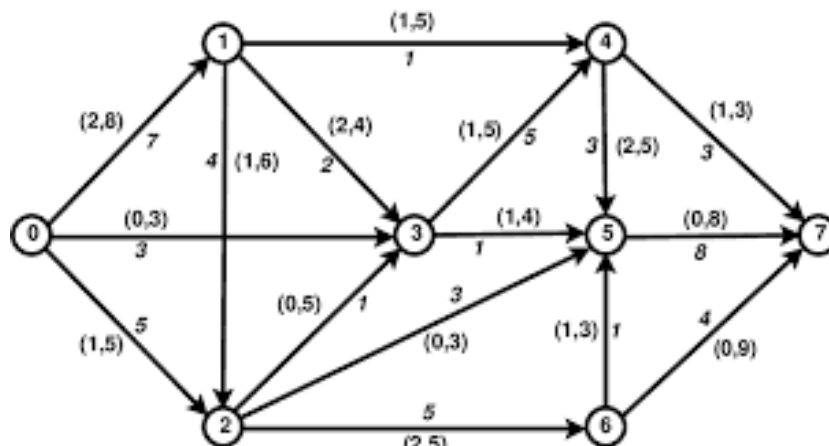


## 2. Αλγόριθμος Backpressure για Ενοποιημένα Συστήματα Μεταφορών

Στο κεφάλαιο αυτό υπενθυμίζεται και επεκτείνεται η σχεδίαση του προτεινόμενου αλγόριθμου backpressure που παρουσιάστηκε στο Παραδοτέο 1.2.

### 2.1 Μοντέλο Συστήματος & Συμβολισμός

Θεωρούμε δίκτυα μεταφοράς πακέτων, όπου οι κόμβοι του δικτύου αντιστοιχούν σε αποθήκες και κάθε σύνδεση μεταξύ δύο κόμβων συνδέει δύο αποθήκες, αν ένα μέσο μεταφοράς (π.χ., φορτηγό, τρένο, κλπ.) μπορεί να προγραμματιστεί να πάει από την αποθήκη-κόμβο  $i$  στην αποθήκη-κόμβο  $j$ . Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται μια φυσική αναλογία μεταξύ δικτύων μεταφοράς ροής και εμπορευματικών δικτύων εφοδιαστικής αλυσίδας. Αυτό το δίκτυο μπορεί να αναπαρασταθεί μαθηματικά ως  $G = (N, L)$  με  $N$  να αντιπροσωπεύει το σύνολο των κόμβων-αποθηκών και  $L$  το σύνολο των κατευθυνόμενων συνδέσεων μεταξύ των κόμβων-αποθηκών. Ένα τέτοιο παράδειγμα φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα:



Εικόνα 1 - Παράδειγμα κατευθυνόμενου δικτύου μεταφοράς εμπορευμάτων της εφοδιαστικής αλυσίδας

Μια **σύνδεση** μεταξύ κόμβων  $i$  και  $j$  εκφράζεται ως  $(i, j)$  και ανήκει στο σύνολο  $L$ . Αναθέτουμε ένα **βάρος** σε κάθε σύνδεση, συμβολίζεται με  $w(i, j, t)$ , το οποίο εκφράζει μια μέση καθυστέρηση (μέσο χρόνο) που απαιτείται για να οδηγήσει το φορτίο από την αποθήκη  $i$  στην αποθήκη  $j$  σε χρόνο  $t$ . Επιπλέον η κάθε σύνδεση έχει **χωρητικότητα** σε χρόνο  $t$  (εκφρασμένη σε  $m^3$ )<sup>1</sup>, η οποία συμβολίζεται με  $c(i, j, t)$ . Η χωρητικότητα αλλάζει με το χρόνο ανάλογα με τη διαθεσιμότητα και το διατιθέμενο χώρο σε κάθε μέσο μεταφοράς.

Σε κάθε περίπτωση, χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο συντομότερου μονοπατιού, π.χ. Dijkstra, μπορούμε να υπολογίσουμε την απόσταση σε βήματα (hops) μεταξύ οποιωνδήποτε κόμβων-αποθηκών  $i$  και  $j$ , η οποία σημειώνεται ως  $hops(i, j)$ . Ο υπολογισμός αυτός παραμένει σταθερός σε σχέση με το θεωρούμενο χρόνο. Για παράδειγμα, δεν αλλάζει σε χρονική κλίμακα μιας εβδομάδας ή και περισσότερο, λόγω των σχετικών συμφωνιών που συνάπτονται μεταξύ υπερβολικών μεταφορών, μελλοντικών συμβολαίων φορτωτικών, κλπ. Επομένως, για την καθημερινή κλίμακα λειτουργίας, πρακτικά θεωρούνται σταθερά, ενώ ακόμα και στην περίπτωση που αλλάξουν, αυτό αφορά καλά προκαθορισμένες μελλοντικές στιγμές, για τις οποίες υπάρχει το περιθώριο πρόβλεψης και συμπερίληψης ορθά των νέων διαδρομών.

Ένα **πακέτο**<sup>2</sup> (δικτύου ή φορτωτική)  $p$  πρέπει να αποσταλεί από τον κόμβο/αποθήκη πηγή  $s(p)$  στον κόμβο/στην αποθήκη προορισμό  $d(p)$ . Όταν το  $p$  φτάσει στον προορισμό του, θεωρείται ότι η σχετική εργασία/ανάθεση έχει ολοκληρωθεί. Επιπλέον, σε κάθε πακέτο  $p$ , ορίζεται μια τιμή προτεραιότητας  $V(p)$ , η οποία μπορεί

<sup>1</sup> Εδώ η μονάδα μέτρησης έχει επιλεγεί το κυβικό μέτρο. Ωστόσο, εναλλακτικά θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί το βάρος της φορτωτικής μετρημένο σε κιλά (kg). Χάριν απλότητας στη συνέχεια χρησιμοποιείται ο όγκος, αλλά σημειώνεται ότι ο αλγόριθμος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως έχει με αλλαγή του μεγέθους μέτρησης ποσότητας της φορτωτικής σε βάρος, αντί όγκου.

<sup>2</sup> Στο εξής το «πακέτο» μπορεί να αναφέρεται σε ένα πακέτο δικτύου τηλεπικοινωνιών, ή σε μια φορτωτική στα πλαίσια της σχεδίασης του αλγόριθμου του έργου. Οποιοδήποτε η αναφορά είναι σε δίκτυα μεταφορών, ο όρος «πακέτο» αναφέρεται στην εκάστοτε φορτωτική ανεξαρτήτου μεγέθους, τρόπου διαχείρισης, κλπ., τα οποία μπορεί να έχει η φορτωτική.

να αναπαραστήσει οποιαδήποτε μορφή σχετικής προτεραιότητας με το πακέτο, π.χ. χρονική, σημαντικότητα, ευαισθησία, κλπ.

Έστω  $r(i, j, t) \leq c(i, j, t)$  η ποσότητα σε αντίστοιχες μονάδες ( $m^3$ ) που πρέπει να μεταδοθεί στη σύνδεση  $(i, j)$  σε χρόνο  $t$ . Αυτή η ποσότητα είναι φραγμένη από τη χρονικά μεταβαλλόμενη χωρητικότητα ζεύξης,  $c(i, j, t)$ .

Κάθε κόμβος-αποθήκη διατηρεί δύο τύπους ουρών, δηλαδή κανονικές ουρές και επείγουσες ουρές. Ειδικότερα, κάθε κόμβος διατηρεί  $H$  επείγουσες ουρές και  $H$  κανονικές ουρές, όπου η ουρά με δείκτη  $h$ , αντιστοιχεί σε απόσταση βημάτων  $h$  και αποθηκεύει πακέτα τα οποία πρέπει να μεταφερθούν στον προορισμό τους το πολύ σε  $h$  βήματα. Διατηρώντας διαχωρισμό των ουρών βασισμένο στην απομένουσα απόσταση στον προορισμό (μετρημένη σε hops) θα επιτρέψει την αποφυγή παγίδευσης πακέτων σε κυκλικές διαδρομές μεταξύ αποθηκών και την επίτευξη χαμηλών τιμών καθυστέρησης, όπως και στην προσέγγιση 2 (shortest-path-aided BP algorithm) που αναλύθηκε στο Παραδοτέο 1.2.

Η επείγουσα ουρά του κόμβου  $i$  για απόσταση βημάτων  $h$  σε χρόνο  $t$  θα αναφέρεται ως  $Q_i^{emg,h}(t)$ . Παρόμοια, η κανονική ουρά του κόμβου  $i$  για απόσταση βημάτων  $h$  σε χρόνο  $t$  σημειώνεται ως  $Q_i^h(t)$ .

Κάθε κόμβος-αποθήκη μπορεί να δημιουργήσει καινούρια κίνηση (νέες φορτωτικές), π.χ. όταν έρχονται καινούρια εμπορεύματα από ιδιώτες ή άλλες υπηρεσίες. Έστω  $a_i^{emg,h}(t)$  το ποσό της επείγουσας κίνησης που παράγεται στον κόμβο  $i$  στο χρόνο  $t$  με δείκτη απόστασης βημάτων  $h$ . Παρόμοια, έστω  $a_i^h(t)$  η ποσότητα κανονικής κίνησης που παράγεται από τον κόμβο  $i$  στο χρόνο  $t$  με δείκτη μέτρησης βημάτων  $h$ .



Κάθε αποθήκη  $i$  έχει χωρητικότητα για κάθε ουρά η οποία συμβολίζεται με  $C_i$ . Για απλότητα υποθέτουμε ότι εξαρτάται μόνο από τον κόμβο  $i$  και όχι από την εκάστοτε ουρά.

Τέλος, έστω  $N_i$  το σύνολο των γειτόνων ενός βήματος (one-hop neighbors) του κόμβου  $i$ , δηλαδή για κάθε  $j \in N_i$ , ισχύει ότι  $(i, j) \in L$ .



## 2.2 Υποθέσεις

Για τη σχεδίαση του αλγόριθμου γίνονται κάποιες βασικές υποθέσεις σχετικά με το θεωρούμενο σύστημα.

- Η πρώτη βασική υπόθεση είναι ότι **το σύστημα βρίσκεται στη σταθερή, μόνιμη κατάσταση του**. Επομένως υποτίθεται ότι όποιες μεταβατικές καταστάσεις έχουν παρέλθει και το σύστημα λειτουργεί ομαλά, χωρίς δηλαδή να σταματάει πλήρως, να εκκινεί από την αρχή, να μην υπάρχει ζήτηση/μεταφορές, κλπ.
- Η δεύτερη βασική υπόθεση είναι ότι **τα εργοδικά όρια των στοχαστικών διαδικασιών άφιξης κίνησης  $a_i^{emg,h}(t)$ ,  $a_i^h(t)$  βρίσκονται στην περιοχή χωρητικότητας (capacity region) του δικτύου**.

## 2.3 Χρονική κλίμακα

Ο χρόνος του συστήματος θεωρείται διακριτός σε χρονικές σχισμές (time slots), και όλες οι ενέργειες του αλγόριθμου λαμβάνουν χώρα σε μια χρονική σχισμή. Ακριβέστερα, σε κάθε χρονική σχισμή, λειτουργεί ο αλγόριθμος και λαμβάνει αποφάσεις που εφαρμόζονται στην αρχή της επόμενης χρονικής σχισμής. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται σε κάθε χρονική σχισμή.

Η χρονική κλίμακα λειτουργίας του αλγόριθμου καθορίζεται από τη διάρκεια της θεωρούμενης χρονικής σχισμής. Με τη σειρά της η διάρκεια της θεωρούμενης χρονικής στιγμής καθορίζεται με βάση τον απαιτούμενο χρόνο υπολογισμού του αλγόριθμου και χρόνο υλοποίησης των αποφάσεων, πλέον του απαιτούμενου χρόνου σηματοδότησης (δηλαδή του χρόνου που απαιτείται για να συγκεντρωθεί η αναγκαία πληροφορία για τον αλγόριθμο πριν τον εκτελούμενο υπολογισμό). Επομένως, η



καθοριζόμενη διάρκεια χρονικής σχισμής θα πρέπει να είναι αρκετή ώστε να υπάρχει χρόνος να ολοκληρωθεί η συγκέντρωση απαιτούμενης πληροφορίας, να πραγματοποιηθούν οι υπολογισμοί του αλγόριθμου και να υλοποιηθούν οι αποφάσεις που προέκυψαν.

Βασική υπόθεση στα παραπάνω, είναι ότι οι αποφάσεις που λαμβάνονται είναι τέτοιες ώστε να ολοκληρώνονται εντός της διάρκειας της θεωρούμενης χρονικής σχισμής. Αυτό είναι αναγκαίο, μιας και στην επόμενη χρονική σχισμή θα πρέπει να υλοποιηθούν οι επόμενες αποφάσεις, κλπ. Για παράδειγμα, σε ένα δίκτυο υπολογιστών, η διάρκεια της χρονικής στιγμής μπορεί να οριστεί στην περιοχή των msec, με μόνο περιοριστικό παράγοντα το χρόνο υπολογισμού του αλγόριθμου, μιας και όλα τα υπόλοιπα είναι εύκολο να ολοκληρωθούν σε αντίστοιχες χρονικές κλίμακες.

Στην περίπτωση των δικτύων εμπορευματικών μεταφορών, η διάρκεια της χρονικής σχισμής αναμένεται να καθορίζεται περισσότερο από το χρόνο υλοποίησης των αποφάσεων, μιας και η «στοιχειώδης» μεταφορά από κόμβο σε κόμβο του θεωρούμενου δικτύου τυπικά αφορά μια μεταφορά μεταξύ απομακρυσμένων σημείων με συγκεκριμένο μεταφορικό μέσο, π.χ., μια αεροπορική μεταφορά που διαρκεί ώρες ή μια μεταφορά πλοίου που διαρκεί ημέρες. Με άλλα λόγια, η μεταφορά είναι που οριοθετεί τη διάρκεια της χρονικής σχισμής, με τους χρόνους υπολογισμού και συλλογής πληροφορίας κατάστασης να είναι κατά πολύ μικρότεροι.

Το πλεονέκτημα της παραπάνω προσέγγισης είναι ότι η μελέτη μπορεί να γίνει με μια αυθαίρετη θεώρηση χρονικής σχισμής και ο τελικός καθορισμός μιας συγκεκριμένης διάρκειας χρονικής σχισμής να βασιστεί σε μετρήσεις πεδίου και δοκιμές βέλτιστης εφαρμογής.

Με βάση τα παραπάνω, προς το παρόν δεν έχει προσδιοριστεί συγκεκριμένη χρονική κλίμακα λειτουργίας για τον αλγόριθμο. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη τις λειτουργίες



του ζητούμενου Πληροφοριακού Συστήματος, όπως προέκυψαν από το Παραδοτέο 1.1 και τις συζητήσεις με την RMR, αναμένεται ότι η επιλογή μιας χρονικής σχισμής ίσης με μια ημέρα μπορεί να εξυπηρετήσει σημαντικά, σε επίπεδο λειτουργίας αλγόριθμου και καθημερινής λειτουργίας της μεταφορικής εταιρείας.

Ο τελικός καθορισμός της χρονικής κλίμακας λειτουργίας (διάρκεια χρονικής σχισμής) θα γίνει σε μεταγενέστερο στάδιο, κατά τη φάση της ολοκλήρωσης του συστήματος, οπότε εκτός από την πλήρη οριοθέτηση των απαιτήσεων λειτουργίας του συστήματος, θα έχει μελετηθεί και η υπολογιστική πολυπλοκότητα της τελικής σχεδίασης και θα υπάρχουν ενδείξεις των υπολογιστικών απαιτήσεων του αλγόριθμου και του υπόλοιπου συστήματος.

## 2.4 Βασική ιδέα σχεδίασης

Οι μεταφορικές εταιρείες στοχεύουν στη μεταφορά πακέτων (φορτωτικών) με γρήγορο, αξιόπιστο, οργανωμένο και βέλτιστο τρόπο αναφορικά με την αναγκαία ισοστάθμιση (tradeoff) μεταξύ χρόνου παράδοσης (χρόνος καθυστέρησης για την παράδοση) και του σχετικού κόστους. Παράλληλα χρειάζεται να διαχειριστούν επείγοντα πακέτα τα οποία πρέπει να παραδοθούν στους προορισμούς τους μέσα σε αυστηρά χρονικά όρια<sup>3</sup>. Πρέπει να ληφθεί υπόψη, ότι οι αποθήκες (ουρές κόμβων) έχουν περιορισμένο χώρο (δυνατότητα διαχείρισης βάρους αντίστοιχα αν η μέτρηση γίνεται σε μονάδες βάρους). Με βάση τα παραπάνω, στη συνέχεια προτείνουμε μια καινοτόμα προσέγγιση για τη μεταφορά φορτωτικών (πακέτων) από τις μεταφορικές εταιρείες, η οποία βασίζεται στον αλγόριθμο backpressure και χρησιμοποιεί διάφορες ιδέες και χαρακτηριστικά από αυτές που παρουσιάστηκαν στην περίπτωση της εφαρμογής του backpressure σε δίκτυα επικοινωνιών και έλεγχο σηματοδοτών, όπως περιεγράφηκαν στο κεφάλαιο 4.2. Να επισημανθεί, ότι αυτή είναι η πρώτη φορά στη βιβλιογραφία που προτείνεται μια backpressure τεχνική για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τη μεταφορά φορτωτικών από μεταφορικές εταιρείες.

Για να αντιμετωπίσει στις σχετικές απαιτήσεις, η προσέγγισή μας βασίζεται στις ακόλουθες ιδέες:

1. Οργανώνει τις φορτωτικές-πακέτα σε ένα πρότυπο σύστημα ουρών στις αποθήκες.
2. Ακολουθώντας την ιδέα της Προσέγγισης 5 του κεφαλαίου 4.2 του παρόντος παραδοτέου, χρησιμοποιεί ξεχωριστές ουρές για επείγουσες φορτωτικές και

---

<sup>3</sup> Εκτός από αυστηρά χρονικά όρια, οι προτεραιότητες μπορούν να καλύψουν και άλλα κριτήρια ποιότητας υπηρεσίας, π.χ. ευαισθησία, επικινδυνότητα, κλπ. Στη συνέχεια αναφερόμαστε σε προτεραιότητα χρόνου, με το σκεπτικό ότι η τροποποίηση για άλλες προτεραιότητες είναι αρκετά εύκολη.



κανονικά πακέτα. Τα επείγοντα πακέτα έχουν απόλυτη προτεραιότητα στη διαχείρισή τους.

3. Χρησιμοποιεί και τροποποιεί ιδέες από την Προσέγγιση 2 του κεφαλαίου 4.2 για την αποφυγή κύκλων δρομολόγησης πακέτων στις αποθήκες. Ειδικότερα, οι ουρές διαφοροποιούνται σε σχέση με τις τιμές αποστάσεων (μετρημένες σε βήματα) των αποθηκών προς τους τελικούς προορισμούς των φορτωτικών που διαχειρίζονται.
4. Αξιοποιεί την τεχνική του drift-plus-penalty technique (παρόμοια με την Προσέγγιση 1) για να θεωρήσει τις προτεραιότητες των διαφορετικών φορτωτικών που αποθηκεύονται στις κανονικές ουρές και τις χρονομεταβλητές καθυστερήσεις των συνδέσεων μεταξύ ενδιάμεσων προορισμών.
5. Χρησιμοποιεί κανονικοποιημένες συναρτήσεις πίεσης (pressure functions), έτσι ώστε να λάβει υπόψη την περιορισμένη χωρητικότητα των αποθηκών, παρόμοια με την Προσέγγιση 2 του κεφαλαίου 4.3.
6. Λαμβάνει υπόψη τις χρονομεταβλητές χωρητικότητες ζεύξεων παρόμοια με τον αρχικό backpressure αλγόριθμο όταν αποφασίζει τις διαδρομές και το πρόγραμμα μεταφορών των πακέτων.

## 2.5 Περιγραφή της από κοινού διαδικασίας προγραμματισμού-δρομολόγησης

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται οι από κοινού διαδικασίες δρομολόγησης και προγραμματισμού του αλγόριθμου ενδιαφέροντος.

Η δρομολόγηση στην περίπτωση μας αναφέρεται στην επιλογή του μονοπατιού (δρομολογίου) που θα ακολουθήσει το πακέτο-φορτωτική  $p$  ξεκινώντας από τον κόμβο πηγή  $s(p)$  μέχρι τον προορισμό  $d(p)$ . Το μονοπάτι-δρομολόγιο είναι μια διατεταγμένη ακολουθία από αποθήκες (κόμβους) με πρώτη αυτή της πηγής  $s(p)$  και τελευταία αυτή του προορισμού  $d(p)$ . Ο αλγόριθμος, σε κάθε βήμα επανάληψης, δεν αποφασίζει όλο το μονοπάτι από την αρχή μέχρι το τέλος, αλλά σε κάθε χρόνο  $t$ , αποφασίζει την επόμενη αποθήκη (κόμβο) όπου πρέπει να αποσταλεί το πακέτο (φορτωτική) αν επιλεγεί από τον προγραμματισμό για αποστολή. Ο προγραμματισμός (scheduling) είναι η απόφαση για το εάν το πακέτο θα μεταφερθεί σε επόμενη αποθήκη κατά μήκος του μονοπατιού δρομολόγησης στο χρόνο  $t$  ή όχι. Οι διαδικασίες του προγραμματισμού και της δρομολόγησης είναι συνυφασμένες. Αυτό συμβαίνει γιατί αν ένα πακέτο δεν προγραμματιστεί για μεταφορά, τότε στην επόμενη χρονική σχισμή απόφασης (έχει επισημανθεί ότι ο χρόνος θεωρείται διακριτός) μπορεί να επιλεγεί ένα διαφορετικό επόμενο βήμα για αποθήκη προς ένα εντελώς διαφορετικό μονοπάτι.

Πριν προχωρήσουμε στην περιγραφή της από κοινού δρομολόγησης-προγραμματισμού, θα εισάγουμε ένα ακόμα σύνολο. Έστω  $Y(t)$  ένα σύνολο από σύνολα ζεύξεων (συνδέσεων). Ένα σύνολο από ζεύξεις  $I \in Y(t)$  είναι ένα υποσύνολο του  $L$  και περιλαμβάνει ζεύξεις που μπορούν να μεταφέρουν πακέτα ταυτόχρονα, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα πληρωμάτων και φορτηγών στην εκάστοτε τοποθεσία στο χρόνο  $t$ . Η  $Y(t)$  είναι χρονικά μεταβαλλόμενη, καθώς σε κάθε χρονική στιγμή μπορούμε να έχουμε διαφορετικούς συνδυασμούς ζεύξεων οι οποίες μπορούν να



μεταφέρουν ταυτόχρονα πακέτα ανάλογα με τη διαθεσιμότητα πληρωμάτων και φορτηγών στην εκάστοτε τοποθεσία στο χρόνο  $t$ .

Για κάθε ζεύξη στο  $L$  υπολογίζουμε τη  $\Delta Q^*(i, j, t)$  ως εξής:

1. Αν οι επείγουσες ουρές του κόμβου  $i$  δεν είναι άδειες, θα εξυπηρετήσουμε πακέτα μόνο από τις επείγουσες ουρές και μόνο αν υπάρχει επιπλέον διαθέσιμος χώρος στο/στα φορτηγό/φορτηγά θα συμπεριλάβουμε και πακέτα κανονικής προτεραιότητας.

Σε αυτή την περίπτωση ορίζουμε:

$$\Delta Q^*(i, j, t) = \max_{h=1 \dots H} \{ \max \{ P_i^{emg,h} (Q_i^{emg,h}(t)) - P_i^{emg,h} (Q_j^{emg,h-1}(t)), 0 \} \},$$

με  $P_i^{emg,h}(\cdot; C_i)$  τη συνάρτηση πίεσης, ορισμένη κατά παρόμοιο τρόπο με την Προσέγγιση 2 στο κεφάλαιο 4.3 στο Παραδοτέο 1.2.

2. Διαφορετικά, αν οι επείγουσες ουρές του  $i$  είναι άδειες, τότε θα εξυπηρετήσουμε πακέτα από τις κανονικές ουρές. Ορίζουμε:

$$\Delta Q^*(i, j, t) = \max_{h=1 \dots H} \{ \max \{ P_i^h (Q_i^h(t)) - P_i^h (Q_j^{h-1}(t)) + V(i, j, t), 0 \} \},$$

όπου  $P_i^h(\cdot; C_i)$  η συνάρτηση πίεσης, ορισμένη κατά παρόμοιο τρόπο με την Προσέγγιση 2 στο κεφάλαιο 4.3 και  $V(i, j, t)$  είναι μια ποινή (penalty) και ορίζεται ως:

$$V(i, j, t) = \frac{1}{w(i, j, t)} + \frac{\sum_{p \in Q_i^h(t)} V(p)}{Q_i^h(t)},$$

Όπου παραβιάζοντας λίγο το συμβολισμό, χρησιμοποιούμε το  $Q_i^h(t)$  για να συμβολίσουμε τόσο το μήκος της ουράς, όσο και τα πακέτα στην ουρά.

Αφού υπολογιστεί το  $\Delta Q^*(i, j, t)$  για όλες τις ζεύξεις, λύνεται ένα πρόβλημα εύρεσης ταιριάσματος μεγίστου βάρους (max weight matching problem) για να αποφασίσει το σύνολο των ζεύξεων  $I^*$  που θα μεταφέρουν πακέτα σε χρόνο  $t$ .

Το πρόβλημα max weight matching μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\max_{\forall I \in \mathcal{Y}(t)} \sum_{(i,j) \in I} c(i, j, t) \Delta Q^*(i, j, t).$$

Θέτοντας  $V(i, j, t)$  όπως περιεγράφηκε παραπάνω, οι ζεύξεις που εξασφαλίζουν χαμηλότερες καθυστερήσεις (συντομότερους χρόνους παράδοσης) λαμβάνουν προτεραιότητα στη λύση του προβλήματος maximum weight matching. Επιπλέον, οι ουρές που περιλαμβάνουν πακέτα με υψηλότερες προτεραιότητες λαμβάνουν επίσης προτεραιότητα.

Υποθέτουμε ότι η λύση του προβλήματος maximum weight matching είναι το σύνολο των ζεύξεων  $I^*$ .

Ας δούμε τώρα πως επιλέγονται τα πακέτα που θα εξυπηρετήσει μια ζεύξη αν επιλεγεί για μεταφορά πακέτων, δηλαδή αν ανήκει στο  $I^*$ , και πως ανανεώνονται τα μήκη των ουρών σε αυτή την περίπτωση.

Αν μια ζεύξη  $(i, j)$  ανήκει στο  $I^*$ , τότε:

1. Αν οι επείγουσες ουρές του κόμβου  $i$  δεν είναι άδειες, τότε η  $(i, j)$  θα εξυπηρετήσει πρώτα πακέτα από την ουρά  $Q_i^{emg, h^*}(t)$ , η οποία είναι αυτή που επιτυγχάνει το μέγιστο  $\Delta Q^*(i, j, t)$ . Αν  $c(i, j, t) > Q_i^{emg, h^*}(t)$ , τότε η ζεύξη μπορεί κατά βάση να εξυπηρετήσει περισσότερα πακέτα, έτσι ώστε ο χώρος του φορτηγού να μην μείνει ανεκμετάλλετος (έστω εν μέρη). Για να γίνει αυτό, η ζεύξη πρώτα θέτει σε σειρά τις εναπομένουσες επείγουσες ουρές

(εκτός της  $h^*$ ) με βάση τις διαφορές  $P_i^{emg,h}(Q_i^{emg,h}(t)) - P_j^{emg,h}(Q_j^{emg,h-1}(t))$ .

Υποθέτουμε ότι η κατάταξη από την πρώτη μέχρι την τελευταία είναι  $h_1, h_2, \dots, h_{H_{emg}-1}$ , όπου  $H_{emg}$  είναι ο αριθμός των επείγουσών ουρών (όπου λαμβάνεται υπόψη ότι μία επείγουσα ουρά έχει ήδη εξυπηρετηθεί) και αν  $h_k$  κατατάσσεται υψηλότερα από το  $h_l$ , αυτό σημαίνει ότι  $P_i^{emg,h_k}(Q_i^{emg,h_k}(t)) - P_j^{emg,h_k}(Q_j^{emg,h_k-1}(t)) > P_i^{emg,h_l}(Q_i^{emg,h_l}(t)) - P_j^{emg,h_l}(Q_j^{emg,h_l-1}(t))$ . Τότε, η  $(i, j)$  ξεκινά να εξυπηρετεί πακέτα από τις ουρές που έχουν καταταγεί υψηλότερα (δηλαδή πρώτη την  $h_1$ , δεύτερη την  $h_2$ , κλπ.) μέχρι η χωρητικότητα της ζεύξης να εξαντληθεί ή να μην υπάρχει κάποιο εναπομένον πακέτο που να χωράει στη δεδομένη χωρητικότητα. Αν ο κόμβος  $i$  έχει εξυπηρετήσει όλα τα πακέτα στις επείγουσες ουρές αλλά υπάρχει ακόμα διαθέσιμη χωρητικότητα στα φορτηγά και το αναγκαίο πλήρωμα, τότε θα εξυπηρετήσει και πακέτα από τις κανονικές ουρές. Σε αυτή την περίπτωση ακολουθώντας παρόμοια διαδικασία, οι κανονικές ουρές κατατάσσονται με βάση την ποσότητα  $P_i^h(Q_i^h(t)) - P_i^h(Q_j^{h-1}(t)) + V(i, j, t)$  με υψηλότερη προτεραιότητα να αντιστοιχεί σε υψηλότερη κατάταξη. Η ζεύξη εξυπηρετεί πακέτα από τις κανονικές ουρές ξεκινώντας με εκείνα που είναι πιο υψηλά καταταγμένα και εφόσον υπάρχει διαθέσιμη χωρητικότητα.

2. Αν οι επείγουσες ουρές του κόμβου  $i$  είναι άδειες, τότε η ζεύξη  $(i, j)$  πρώτα θα εξυπηρετήσει πακέτα από τις κανονικές ουρές και συγκεκριμένα από την ουρά  $Q_i^{h^*}(t)$  που επιτυγχάνει το μέγιστο  $\Delta Q^*(i, j, t)$ . Αν  $c(i, j, t) > Q_i^{h^*}(t)$  τότε η ζεύξη μπορεί να εξυπηρετήσει περισσότερα πακέτα έτσι ώστε ο χώρος του φορτηγού να μην παραμένει ανεκμετάλλετος. Για να γίνει αυτό, με παρόμοιο τρόπο όπως προηγουμένως, η ζεύξη πρώτα κατατάσσει τις εναπομένουσες κανονικές ουρές με βάση την ποσότητα  $P_i^h(Q_i^h(t)) - P_i^h(Q_j^{h-1}(t)) + V(i, j, t)$  με

τις υψηλότερες τιμές να υποδεικνύουν μεγαλύτερη προτεραιότητα. Η ζεύξη εξυπηρετεί πακέτα από τις κανονικές ουρές ξεκινώντας με εκείνα που είναι πιο υψηλά καταταγμένα και εφόσον υπάρχει διαθέσιμη χωρητικότητα.

Τότε η ποσότητα των πακέτων σε  $m^3$  που θα μεταφερθεί στη ζεύξη  $(i, j)$ , για μια επείγουσα ουρά με δείκτη βημάτων  $h$  συμβολίζεται ως  $r^{emg,h}(i, j, t)$  και δίνεται από:

$$r^{emg,h}(i, j, t) = \sum_{p \text{ served from } Q_i^{emg,h}(t)} l(p),$$

όπου  $l(p)$  είναι ο χώρος που καταλαμβάνει το πακέτο  $p$ .

Παρόμοια, η ποσότητα πακέτων σε  $m^3$  που θα μεταφερθεί μέσω της ζεύξης  $(i, j)$ , για μια κανονική ουρά με δείκτη βημάτων  $h$  συμβολίζεται ως  $r^h(i, j, t)$  και δίνεται από:

$$r^h(i, j, t) = \sum_{p \text{ served from } Q_i^h(t)} l(p)$$

Τώρα η ανανέωση του μήκους της ουράς γίνεται ως εξής:

Για τις επείγουσα ουρά:

$$Q_i^{emg,h}(t+1) = \max\{Q_i^{emg,h}(t) - \sum_{j \in N_i} r^{emg,h}(i, j, t), 0\} + \sum_{j:i \in N_j} r^{emg,h+1}(j, i, t) + a_i^{emg,h}(t),$$

όπου  $N_i$  είναι το σύνολο των γειτόνων ενός-βήματος (one-hop neighbors) του κόμβου  $i$ , δηλαδή για κάθε  $j \in N_i$ , ισχύει ότι  $(i, j) \in L$ .

Με παρόμοιο τρόπο η ανανέωση για τις κανονικές ουρές είναι:

$$Q_i^h(t+1) = \max\{Q_i^h(t) - \sum_{j \in N_i} r^h(i, j, t), 0\} + \sum_{j:i \in N_j} r^{h+1}(j, i, t) + a_i^h(t)$$

## 2.6 Συναρτήσεις Πίεσης

Οι συναρτήσεις πίεσης (pressure functions) είναι βασικές για να ληφθεί υπόψη η περιορισμένη χωρητικότητα των αποθηκών στην από κοινού διαδικασία δρομολόγησης-προγραμματισμού. Οι συναρτήσεις πίεσης θα επιλεγούν με βάση και τις πειραματικές μελέτες σε επόμενο στάδιο του έργου, ωστόσο πρέπει πάντοτε να ικανοποιούν τις δύο συνθήκες που αναφέρονται στο κεφάλαιο 2.2 για να εξασφαλιστεί ισοτιμία σε περιπτώσεις χαμηλής κίνησης και σταθερότητα. Μια πιθανή επιλογή για τις συναρτήσεις πίεσης την οποία θα διερευνήσουμε είναι και προτείνεται επίσης στην αναφορά [16] είναι η ακόλουθη:

$$P_i^h(Q_i^h; C_i) = \min \left\{ 1, \frac{\frac{Q_i^h}{C_\infty} + (2 - \frac{C_i}{C_\infty}) \left(\frac{Q_i^h}{C_i}\right)^m}{1 + \left(\frac{Q_i^h}{C_i}\right)^{m-1}} \right\}$$

Με παραμέτρους  $m, C_\infty$  να καθορίζουν τη μορφή της συνάρτησης πίεσης. Το  $m$  οριοθετεί τη μετάβαση από το γραμμικό καθεστώς, ενώ το  $C_\infty$  καθορίζει την κλίση της πίεσης σε χαμηλή κατάληψη, και είναι τέτοια ώστε ένας κόμβος του οποίου η χωρητικότητα είναι  $C_\infty$  να έχει γραμμική πίεση. Υποθέτουμε ότι όλες οι χωρητικότητες είναι χαμηλότερες από  $C_\infty$  και  $m > 1$ .

Στη συνέχεια περιγράφουμε το πλαίσιο αξιολόγησης και προσομοίωσης της λειτουργίας του αλγόριθμου υπό μη-πραγματικές συνθήκες. Επισημαίνεται ωστόσο, ότι η αξιολόγηση της κλιμακωσιμότητας του αλγόριθμου είναι αρκετά πιο απαιτητική από αυτή που θα αντιμετωπίσει μια μικρο-μεσαία επιχείρηση μεταφορών. Ουσιαστικά καλύπτει ένα πλήρες οικοσύστημα μεταφορών με πολλές εταιρείες και υπεργολάβους μεταφορών.

### 3. Πλαίσιο Μελέτης Επίδοσης Αλγόριθμου

Στο παρόν κεφάλαιο αρχικά παρουσιάζουμε την φιλοσοφία προσομοίωσης που ακολουθήσαμε για τη μελέτη της επίδοσης του αλγόριθμου και στη συνέχεια δίνουμε στοιχεία από την υλοποίηση. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων ακολουθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

#### 3.1 Αρχιτεκτονική Προσομοίωσης

Στην περίπτωση μας ακολουθήσαμε την προσέγγιση προσομοίωσης διακριτών-γεγονότων (discrete event simulation – DES). Η προσομοίωση διακριτών-γεγονότων αναπαριστά τη λειτουργία ενός συστήματος ως μια ακολουθία (διακριτών) γεγονότων στο χρόνο. Καθένα από αυτά τα γεγονότα συμβαίνει σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή (στο θεωρούμενο χρόνο συστήματος) και σηματοδοτεί μια αλλαγή κατάστασης στο σύστημα [25]. Μεταξύ διαδοχικών γεγονότων δεν συμβαίνει καμία αλλαγή συστήματος. Ως επακόλουθο, ο χρόνος προσομοίωσης μπορείς να μεταπηδήσει κατευθείαν στο χρόνο πραγματοποίησης του επόμενου γεγονότος, το οποίο αναφέρεται ως *προώθηση χρόνου επόμενου γεγονότος* (next-event time progression).

Επιπρόσθετα της προώθηση χρόνου επόμενου γεγονότος υπάρχει μια εναλλακτική προσέγγιση, η οποία αναφέρεται ως *σταδιακή προώθηση χρόνου* (incremental time progression), κατά την οποία ο χρόνος διαιρείται σε μικρές θυρίδες και η κατάσταση του συστήματος ανανεώνεται με βάση το σύνολο των γεγονότων που συμβαίνουν σε κάθε χρονική θυρίδα. Επειδή δεν είναι αναγκαίο να προσομοιώνεται κάθε χρονική θυρίδα, οι προσομοιώσεις σταδιακής προώθησης χρόνου τυπικά εκτελούνται γρηγορότερα έναντι των προώθησης χρόνου επόμενου γεγονότος.

Και οι δύο μορφές προσομοίωσης διακριτού χρόνου πρέπει να αντιπαρατεθούν με την προσομοίωση συνεχούς χρόνου, όπου η κατάσταση του συστήματος αλλάζει σε



κάθε χρονική στιγμή στη βάση διαφορετικών εξισώσεων, οι οποίες καθορίζουν τους ρυθμούς μεταβολής των μεταβλητών κατάστασης του συστήματος.

Στη δική μας περίπτωση, ακολουθούμε προσομοίωση διακριτών γεγονότων τύπου σταδιακής προώθησης χρόνου. Η χρονική σχισμή που αναφέρθηκε παραπάνω και εντός της οποίας ολοκληρώνεται η ανταλλαγή πληροφοριών, υπολογισμός αλγόριθμου και υλοποίηση αποφάσεων, αντιστοιχεί στη χρονική σχισμή που αναφέρθηκε παραπάνω και θεωρείται ότι το σύστημα δεν αλλάζει κατάσταση ενδιάμεσα.

### 3.2 Υλοποίηση Προσομοίωσης

Για την υλοποίηση των αλγορίθμων backpressure που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη της επίδοσης, υλοποιήθηκαν αλγόριθμοι, οι οποίοι βασίστηκαν σε ψευδοκώδικα που δίνεται στις επόμενες εικόνες. Κάθε υλοποίηση πραγματοποιήθηκε σε Matlab, μιας και για τη μελέτη της επίδοσης σε θεωρητικό επίπεδο, μπορεί να γίνει προσομοίωση του συστήματος με αυθαίρετο αριθμό κόμβων, συνδέσεων και στοχαστικών διαδικασιών γέννησης φορτίου.

Σε αυτό το σημείο παρατίθενται δύο διαφορετικές προσεγγίσεις (Εικόνα 2 και Εικόνα 3) και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ακολουθούν στο επόμενο κεφάλαιο.

---

**Algorithm 1:** Constrained Backpressure with Queue Difference Scaling (CBP\_QDS) at time slot  $t$

---

```

1 for each directed link  $(i, j)$  do
2   for each destination  $d$  do
3     if  $j \in \mathcal{R}(i, d)$  then
4       %Queue Difference Scaling
5        $P_{ij}^d(t) = f(i, j, d)(q_i^d(t) - q_j^d(t));$ 
6     else
7        $P_{ij}^d(t) = -\infty;$ 
8     Define the weight  $P_{ij}(t)$  as follows :
9      $P_{ij}(t) = \max_d P_{ij}^d(t);$ 
10     $d^*(i, j) = \arg \max_d P_{ij}^d(t);$ 
11  Choose the traffic matrix through the maximization :
12   $[\mu_{ij}(t)] = \arg_{\mu' \in \mathbf{IS}} \max \sum_{(i,j)} \mu'_{ij} P_{ij}(t);$ 
13  for each directed link  $(i, j)$  do
14    if  $\mu_{ij}(t) > 0$  then
15      the link  $(i, j)$  serves  $d^*(i, j)$  with  $\mu_{ij}^{d^*}(t) = \mu_{ij}(t);$ 
16      For  $d \neq d^*(i, j)$  we set  $\mu_{ij}^d(t) = 0;$ 
17  %Congestion Control
18  for each node  $i$  do
19    for each destination  $d$  do
20      if  $i$  is a source node for  $d$  then
21        %Renewal of the arrival data rates
22         $\lambda_i^d(t+1) = \left\{ \lambda_i^d(t) + a[KU_i^{d^*}(\lambda_i^d(t)) - 2f_{\max} q_i^d(t)] \right\}_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}};$ 

```

---

**Εικόνα 2 – Ψευδοκώδικας υλοποίησης αλγόριθμου backpressure με queue difference scaling, [8].**

**Algorithm 1:** Greedy (Greediest) backpressure algorithm for static networks, performed every time  $t$

```

1 for each directed link  $(i, j)$  do
2   for each destination  $d$  do
3     %Greedy backpressure%
4     if  $dist_H(i, d) > dist_H(j, d)$  then
5        $P_{ij}^d(t) = q_i^d(t) - q_j^d(t);$ 
6     (%OR Greediest backpressure%
7     if  $dist_H(i, d) > dist_H(j, d)$  and  $dist_H(j, d) =$ 
8      $\min_{l \in \mathcal{N}(i)} dist_H(l, d)$  then
9        $P_{ij}^d(t) = q_i^d(t) - q_j^d(t);$ )
10    else
11       $P_{ij}^d(t) = -\infty;$ 
12    %Define the weight  $P_{ij}(t)$  as follows :
13     $P_{ij}(t) = \max(\max_d P_{ij}^d(t), 0);$ 
14     $d^*(i, j) = \arg \max_d P_{ij}^d(t);$ 
15  Choose the rate matrix through the maximization :
16   $[\mu_{ij}(t)] = \arg \max_{\mu \in \mathbf{I}_{S(t)}} \sum_{(i,j)} \mu_{ij} P_{ij}(t)$ 
17  for each directed link  $(i, j)$  do
18    if  $\mu_{ij}(t) > 0$  then
19      the link  $(i, j)$  serves  $d^*(i, j)$  with  $\mu_{ij}^{d^*}(t) = \mu_{ij}(t);$ 
20    For  $d \neq d^*$  we set  $\mu_{ij}^d(t) = 0$ 

```

**Εικόνα 3 – Ψευδοκώδικας υλοποίησης αλγόριθμου backpressure με άπληστη λογική, [26].**

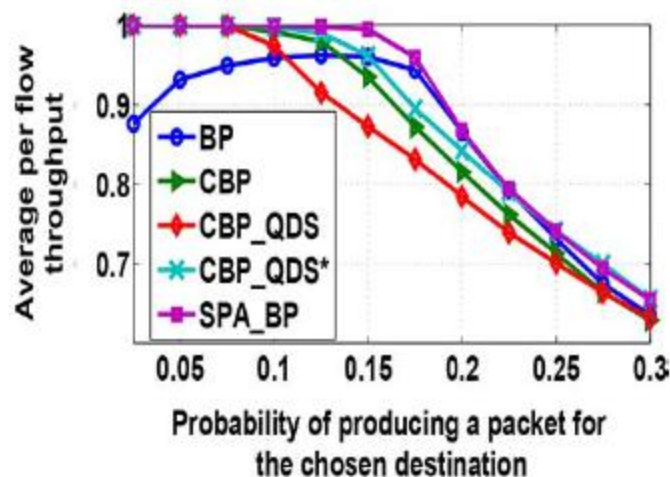
## 4. Ανάλυση Επίδοσης Αλγορίθμου

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζονται κάποια σχετικά αποτελέσματα μελέτης επίδοσης αλγορίθμων backpressure, τα οποία θα αποτελέσουν τη βάση της ανατροφοδότησης για την τελική υλοποίηση στο Πληροφοριακό Σύστημα στόχο. Τελικές ρυθμίσεις παραμέτρων και τελική ανατροφοδότηση θα υπάρξει και κατά τη φάση της υλοποίησης και ενσωμάτωσης του αλγόριθμου στο παραγωγικό Πληροφοριακό Σύστημα.

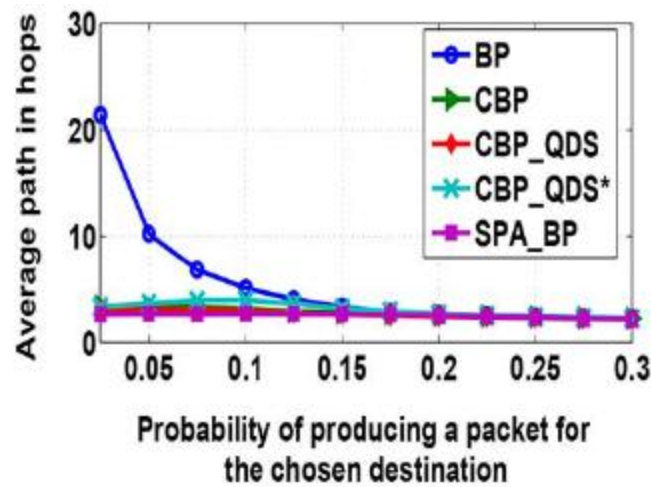
### 4.1 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

Στη συνέχεια παραθέτουμε αποτελέσματα προσομοιώσεων λειτουργίας αλγορίθμων backpressure σχετικά με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά τους, τα οποία χαρακτηρίζουν την αναμενόμενη επίδοσή τους.

Αρχικά παρατίθεται κάποια αποτελέσματα (Εικόνα 4 και Εικόνα 5) σχετικά με τη μέση ρυθμαπόδοση ανά ροή και το μέσο μήκος μονοπατιού που ακολουθούν οι φορτωτικές με βάση τον αλγόριθμο που παρουσιάστηκε στην Εικόνα 2.

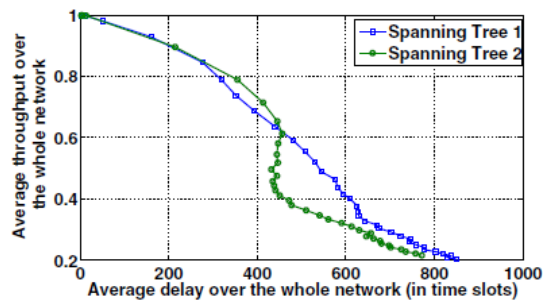


Εικόνα 4 – Μέση ρυθμαπόδοση ανά ροή πακέτων (average per-flow throughput), [8]

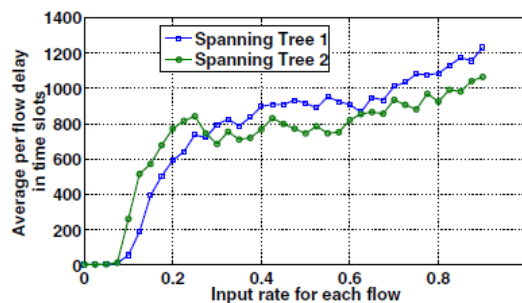


**Εικόνα 5 – Μέσο μήκος μονοπατιού σε hops (average path in hops) για όλα τα επιτυχώς μεταδιδόμενα πακέτα, [8]**

Στη συνέχεια και με βάση τον αλγόριθμο που παρουσιάστηκε στην Εικόνα 3, παρατίθενται αποτελέσματα (Εικόνα 6 έως Εικόνα 9) για την ρυθμαπόδοση και καθυστέρηση που βιώνουν τα φορτία.



(a) Delay-Throughput Trade-off.



(b) Delay vs. Input Rate.

**Εικόνα 6 – Σχέση μέσης ρυθμαπόδοσης με μέση καθυστέρηση και ρυθμό εισόδου για κάθε ροή, [26]**

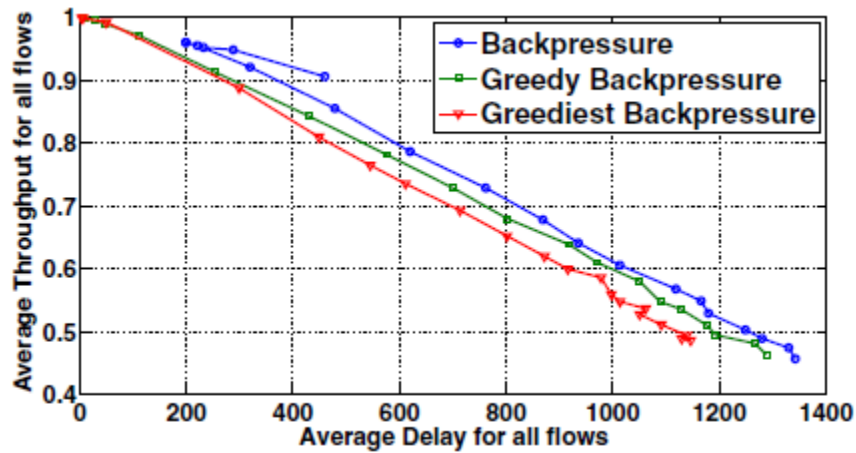


Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Ταμείο  
Περιφερειακής Ανάπτυξης

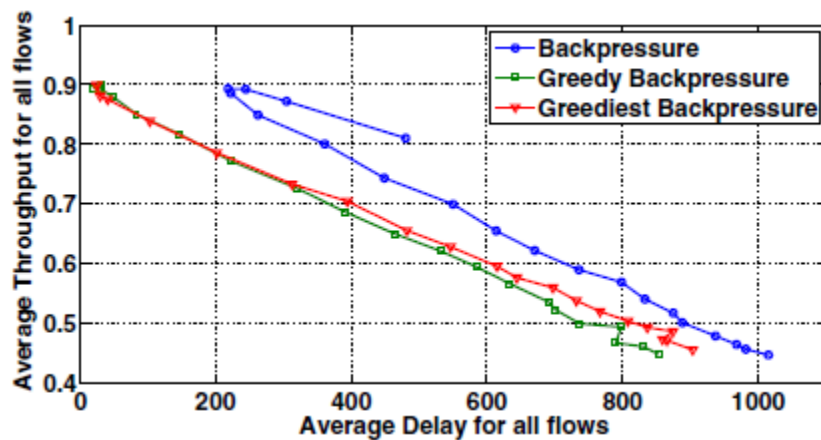
ΕΠΑνεΚ 2014-2020  
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ  
ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ  
ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ

ΕΣΠΑ  
2014-2020  
ανάπτυξη - εργασία - αλληλεγγύη

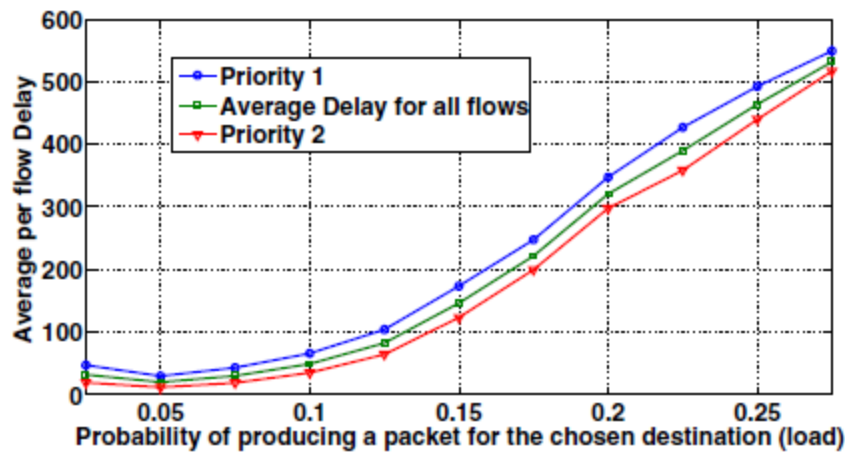
Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Εικόνα 7 - Περίπτωση στατικών δικτύων: Αξιολόγηση της επίδοσης Throughput-Delay (σταθμισμένα ανά ροή), [26]

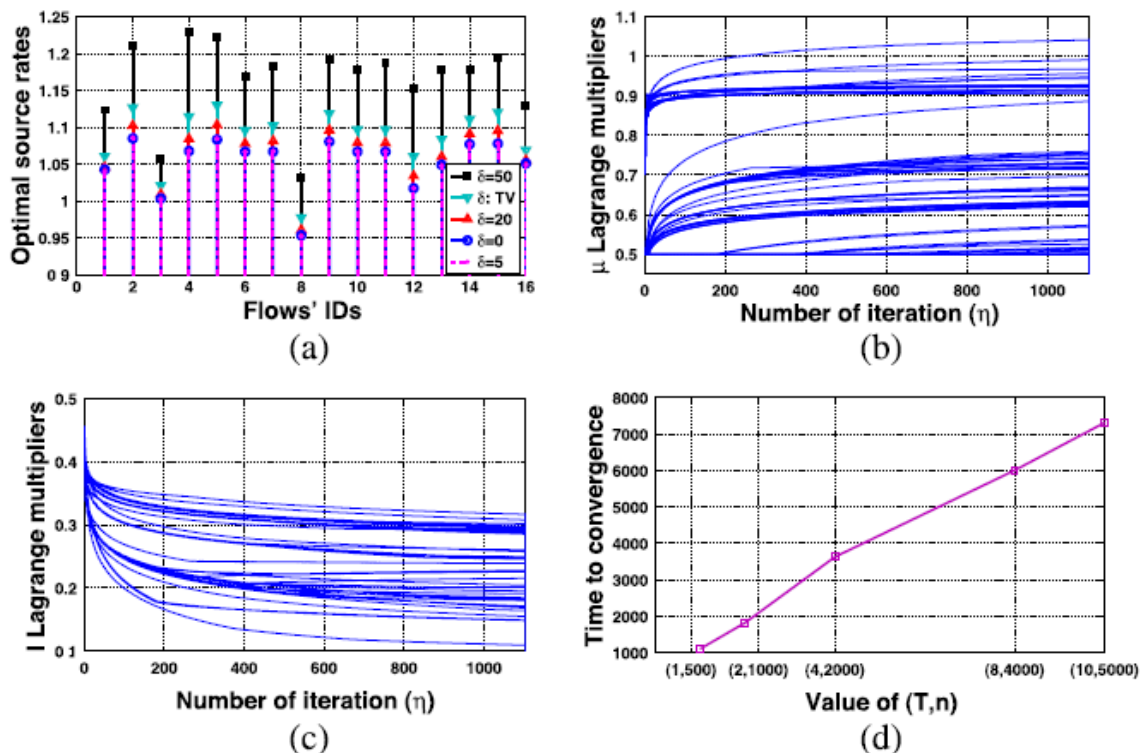


Εικόνα 8 – Περίπτωση δυναμικών δικτύων: Αξιολόγηση της επίδοσης Throughput-Delay (σταθμισμένα ανά ροή), [26]



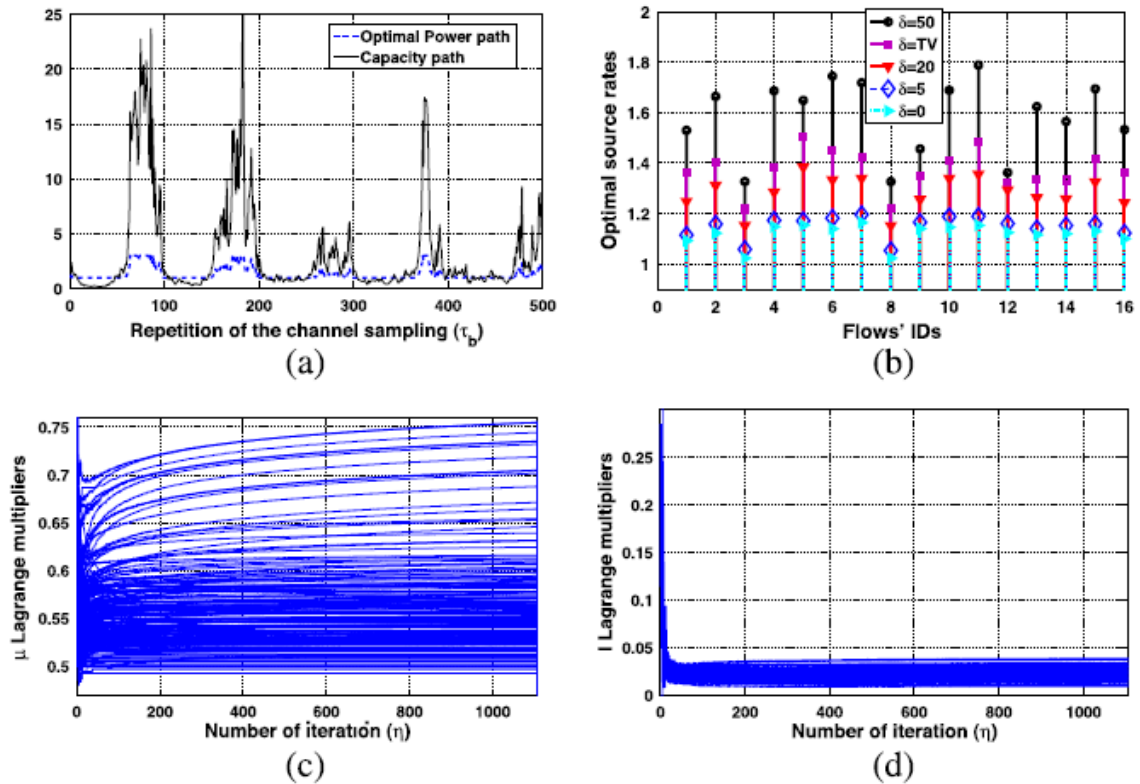
Εικόνα 9 – Σύγκριση της μέσης καθυστέρησης ανά ροή για διαφορετικές προτεραιότητες, [26]

Στη συνέχεια, παρατίθενται ενδεικτικά αποτελέσματα (Εικόνα 10, Εικόνα 11) επίδοσης αλγόριθμων backpressure για τη σύγκλιση, τα μήκη των ουρών και τον έλεγχο συμφόρησης.



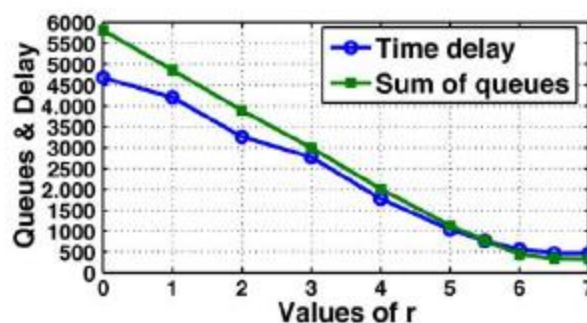
Εικόνα 10 – Έλεγχος συμφόρησης και δρομολόγηση: βέλτιστοι ρυθμοί πηγής, σύγκλιση μεγέθους ουρών (ως Lagrange multipliers) και μελέτη της παραμέτρου  $T$  στη σύγκλιση, [27]





Εικόνα 11 – Δρομολόγηση, χρονοπρογραμματισμός έλεγχος συμφόρησης και έλεγχος ισχύος, [27]

Το ακόλουθο διάγραμμα (Εικόνα 12) παρουσιάζει το μέγεθος της ουράς και την καθυστέρηση σε σχέση με το ρυθμό μετάδοσης:



Εικόνα 12 - Μέγεθος ουράς και καθυστέρηση σε σχέση με το ρυθμό μετάδοσης, [28]



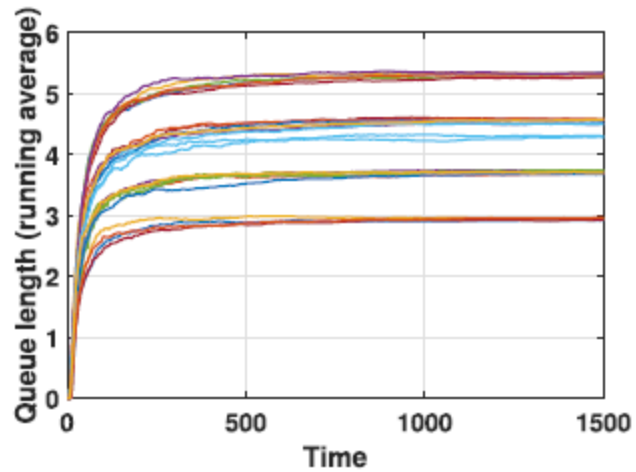
Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Ταμείο  
Περιφερειακής Ανάπτυξης

ΕΠΑνεΚ 2014-2020  
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ  
ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ  
ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ

ΕΣΠΑ  
2014-2020  
ανάπτυξη - εργασία - αλληλεγγύη

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

Τέλος παρατίθεται στοιχεία από όλα τα μήκη ουρών και τους ρυθμούς πηγής για αλγόριθμους backpressure ως συνάρτηση του χρόνου (Εικόνα 13).



Εικόνα 13 – Όλο οι ρυθμοί πηγής και όλα τα μήκη ουρών αντίστοιχα, [29]

## 4.2 Παρατηρήσεις και Ανατροφοδότηση Σχεδίασης

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, καταλήγουμε στις ακόλουθες παρατηρήσεις για τη σχεδίαση του αλγόριθμου, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν κατά τη φάση υλοποίησης και βέλτιστης παραμετροποίησης του συστήματος:

1. Ο αλγόριθμος, στις διάφορες εκδόσεις του καταφέρνει να επιτύχει σύγκλιση σε όλες τις συνθήκες που δοκιμάστηκε.
2. Ο αλγόριθμος μπορεί να κλιμακωθεί ικανοποιητικά, ανεξαρτήτου φορτίου που χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις.
3. Η γενική περίπτωση του αλγόριθμου απαιτεί αρκετή πληροφορία κατάστασης δικτύου, ιδανικά σε κεντροποιημένη βάση, η οποία δεν είναι εφικτό να συγκεντρωθεί στην παρούσα φάση, και ίσως και μελλοντικά στην RMR, με αποτέλεσμα να απαιτείται μια τροποποίηση του σκοπού εφαρμογής και της έκδοσης που θα υλοποιηθεί και ενσωματωθεί στο πληροφοριακό σύστημα στόχος.

## 5. Τελικός Σχεδιασμός Αλγόριθμου Χρονοπρογραμματισμού

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα και γίνεται φανερό από τα αποτελέσματα που παρατίθενται στο Κεφάλαιο 4, ο προτεινόμενος αλγόριθμος είναι αρκετά γενικός και βασίζεται στην υπόθεση ότι όλο το δίκτυο μεταφορών είναι ενιαίο. Υποθέτει δηλαδή ότι όλη η πληροφορία είναι διαθέσιμη στον προτεινόμενο αλγόριθμο, από όλους τους εμπλεκόμενους φορείς. Κάτι τέτοιο βέβαια δεν ισχύει στην πραγματικότητα, όπου κάθε εμπλεκόμενος οργανισμός/εταιρεία έχει μόνο μερική γνώση, αυτή με την οποία σχετίζεται άμεσα. Επομένως, δεν είναι ρεαλιστικό να υποθεθεί ότι ο αλγόριθμος μπορεί να συγκεντρώσει τελικά όλη την απαιτούμενη πληροφορία τοπολογίας και κατάστασης στους κόμβους του σχηματιζόμενου δικτύου. Κάτι τέτοιο θα ήταν εφικτό μόνο σε ένα ενοποιημένο πλαίσιο, όπου μια κοινά αποδεκτή πλατφόρμα, πιθανά διαχειριζόμενη από μια ρυθμιστική αρχή ή μια ιδιωτική πρωτοβουλία, θα μπορούσε να συλλέγει την πληροφορία και να επιτρέπει στα επιμέρους μέρη να έχουν πρόσβαση σε πληροφορίες βέλτιστης λειτουργίας όσον αφορά μόνο τη δική τους λειτουργία.

Για το λόγο αυτό, κρίνεται απαραίτητο η υλοποίηση μιας επιμέρους έκδοσης του προτεινόμενου αλγόριθμου για την RMR ειδικά, η οποία δεν θα απαιτεί τη γνώση πλήρους λειτουργίας από τη μεριά της. Αν βέβαια τέτοια πληροφορία γίνει διαθέσιμη, τότε η υλοποίηση θα δίνει τη δυνατότητα για ακόμα περισσότερη συμπερίληψη πληροφορίας κατάστασης συστήματος κατά τη φάση των αποφάσεων. Η συγκεκριμενοποίηση της εν λόγω έκδοσης του αλγόριθμου θα γίνει σε μεταγενέστερο στάδιο κατά τη φάση της υλοποίησης, οπότε και θα έχουν προκύψει τα πρώτα στοιχεία εκτέλεσης και επίδοσης του λογισμικού.

## 6. Επόμενα βήματα

Τα επόμενα βήματα της σχετικής εργασίας περιλαμβάνουν τα εξής:

1. **Συνέχιση της μελέτη επίδοσης με χρήση προσομοιώσεων:** με τη βοήθεια κατάλληλων προσομοιώσεων θα εξεταστεί συγκριτικά η λειτουργία των δύο εκδόσεων του αλγορίθμου, με σκοπό την αναγνώριση αποκλίσεων της περιορισμένης έκδοσης σε σχέση με τη συνολική. Κάτι τέτοιο θα δώσει μια πρώτη εικόνα για την αναμενόμενη επίδοση στο πεδίο εφαρμογής.
2. **Ερευνητική επέκταση αλγόριθμου:** συνέχιση της ερευνητικής δραστηριότητας σε σχέση με την προτεινόμενη προσέγγιση, ώστε να προκύψει μεγαλύτερο αποτύπωμα του έργου στη σχετική κοινότητα – Τα αποτελέσματα θα αποτυπωθούν σε σχετικές δημοσιεύσεις.
3. **Υλοποίηση αλγόριθμου για την πλατφόρμα-στόχο:** θα ξεκινήσει η υλοποίηση του αλγόριθμου που θα ενσωματωθεί στην πλατφόρμα στόχο, αλλά και η έκδοση που θα χρησιμοποιείται από την RMR – Παραδοτέο 3.1.
4. **Ενοποίηση υποσυστημάτων:** Τέλος, παράλληλα με το βήμα 3, θα ξεκινήσει η μελέτη του τρόπου που θα γίνει η ενοποίηση του υποσυστήματος χρονοπρογραμματισμού με το υπόλοιπο σύστημα (πλατφόρμα), κυρίως καθορίζοντας, υλοποιώντας και δοκιμάζοντας τις αντίστοιχες διεπαφές, με τη βάση δεδομένων, με τις διεπαφές χρήστη, κλπ. – Παραδοτέο 3.2.

## Αναφορές

- [1] <https://velos.di.ionio.gr/>, τελευταία ανάκτηση: 28/10/2022, 11:20
- [2] A. Kabou, N. Nouali-Taboudjemmat, S. Djahel, S. Yahiaoui and O. Nouali, "Lifetime-Aware Backpressure—A New Delay-Enhanced Backpressure-Based Routing Protocol," in *IEEE Systems Journal*, vol. 13, no. 1, pp. 42-52, March 2019.
- [3] L. P. Ma, S. Zabele, C. J. Merlin, G. Lauer and S. Dabideen, "QFloor: Queue Delay Reduction in Dynamic Backpressure Networks," *MILCOM 2019 - 2019 IEEE Military Communications Conference (MILCOM)*, 2019, pp. 496-501.
- [4] L. Huang, S. Moeller, M. J. Neely and B. Krishnamachari, "LIFO-Backpressure Achieves Near-Optimal Utility-Delay Tradeoff," in *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 21, no. 3, pp. 831-844, June 2013, doi: 10.1109/TNET.2012.2226215.
- [5] L. T. Leonidas Georgiadis, M. J. Neely and L. Tassiulas, *Resource Allocation and Cross-Layer Control in Wireless Networks (Foundations and Trends in Networking)*, vol. 1, no. 1, Breda, The Netherlands: Now Publishers, 2006.
- [6] L. Ying, S. Shakkottai and A. Reddy, "On Combining Shortest-Path and Back-Pressure Routing Over Multihop Wireless Networks," *IEEE INFOCOM*, 2009, pp. 1674-1682.
- [7] L. Tassiulas and A. Ephremides, "Stability properties of constrained queueing systems and scheduling policies for maximum throughput in multihop radio networks," in *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 37, no. 12, pp. 1936-1948, Dec. 1992.
- [8] E. Stai, S. Papavassiliou and J. S. Baras, "Performance-Aware Cross-Layer Design in Wireless Multihop Networks Via a Weighted Backpressure Approach," in *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 24, no. 1, pp. 245-258, Feb. 2016.
- [9] T. Qiu, R. Qiao and D. O. Wu, "EABS: An Event-Aware Backpressure Scheduling Scheme for Emergency Internet of Things," in *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 17, no. 1, pp. 72-84, 1 Jan. 2018.
- [10] L. Huang, S. Moeller, M. J. Neely and B. Krishnamachari, "LIFO-Backpressure Achieves Near-Optimal Utility-Delay Tradeoff," in *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 21, no. 3, pp. 831-844, June 2013.
- [11] H. Yu and M. J. Neely, "A New Backpressure Algorithm for Joint Rate Control and Routing With Vanishing Utility Optimality Gaps and Finite Queue Lengths," in *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 26, no. 4, pp. 1605-1618, Aug. 2018.
- [12] N. Parikh and S. Boyd, "Proximal algorithms," *Found. Trends Optim.*, vol. 1, no. 3, pp. 123-231, 2013.
- [13] X. Lin and N. B. Shroff, "Utility maximization for communication networks with multipath routing," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 51, no. 5, pp. 766-781, May 2006.
- [14] A. Rai, C. -p. Li, G. Paschos and E. Modiano, "Loop-Free Backpressure Routing Using Link-Reversal Algorithms," in *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 25, no. 5, pp. 2988-3002, Oct. 2017.
- [15] E. Gafni and D. Bertsekas, "Distributed Algorithms for Generating Loop-Free Routes in Networks with Frequently Changing Topology," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 29, no. 1, pp. 11-18, January 1981.

- [16] J. Gregoire, X. Qian, E. Frazzoli, A. de La Fortelle and T. Wongpiromsarn, "Capacity-Aware Backpressure Traffic Signal Control," in *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, vol. 2, no. 2, pp. 164-173, June 2015.
- [17] P. Brucker, and S. Knust, "Complex Scheduling", 2<sup>nd</sup> edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012.
- [18] J. Y-T. Leung, "Handbook of Scheduling: Algorithms, Models, and Performance Analysis", Chapman and Hall/CRC, 2004.
- [19] M. Pinedo, "Scheduling: Theory, Algorithms and Systems", 4<sup>th</sup> edition, Springer, 2012.
- [20] X. Wang and T.C.E. Cheng, "Logistics scheduling to minimize inventory and transport costs", Elsevier Int. J. Production Economics, 121, pp. 266-273, 2009.
- [21] Y.C. Chang, and C.Y. Lee, "Logistics scheduling: Analysis of two-stage problems", J. Syst. Sci. Syst. Eng. 12, 385-407 (2003). <https://doi.org/10.1007/s11518-006-0143-5>.
- [22] S. Carrera, W. Ramdane Cherif, M.-C. Portmann, "Scheduling problems for logistic platforms with fixed staircase component arrivals and various deliveries hypotheses", 2nd International Conference, ICAOR 2010.
- [23] D. Bachtenkirch, and S. Bock, "Finding efficient make-to-order production and batch delivery schedules", European Journal of Operational Research, Vol. 297, No. 1, pp. 133-152, 2022.
- [24] L. Jiang and J. Walrand, "Scheduling and Congestion Control for Wireless and Processing Networks", Morgan & Claypool, 2010.
- [25] S. Robinson, "Simulation – The practice of model development and use", Wiley, 2004.
- [26] E. Stai, J. S. Baras, and S. Papavassiliou, "J. S. Baras", 51st IEEE Conference on Decision and Control, pp. 2696 - 2703, Dec. 2012.
- [27] E. Stai, M. Loulakis, and S. Papavassiliou, "Cross-Layer Design of Wireless Multihop Networks Over Stochastic Channels With Time-Varying Statistics", IEEE Trans on Wireless Communications, vol. 14, no. 12, pp. 6967-6980, Dec. 2015.
- [28] E. Stai, and S. Papavassiliou, "User Optimal Throughput-Delay Trade-off in Multihop Networks Under NUM Framework", vol. 18, no. 11, pp. 1999-2002, Nov. 2014.
- [29] E. Stai and V. Karyotis, "Optimal Resource Allocation in Multihop Wireless Networks Relying on Energy Harvesting", IEEE Communication Letters, vol. 25, no. 1, pp. 224-228, Jan. 2021.