



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΠΜΣ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΕΙΔΙΚΕΥΣΗ: LOGISTICS

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ
ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΧΑΡΤΟΝΙΟΥ: ΜΕΛΕΤΗ
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΝΑΘΕΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ
ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΑ ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΑ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΝΑΚΟΠΟΥΛΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: ΔΡ. ΣΤΥΛΙΑΝΗ ΣΟΦΙΑΝΟΠΟΥΛΟΥ

ΠΕΙΡΑΙΑΣ, 2026

ΔΗΛΩΣΗ

Η εργασία αυτή είναι πρωτότυπη και εκπονήθηκε αποκλειστικά και μόνο για την απόκτηση του συγκεκριμένου μεταπτυχιακού τίτλου.

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

Ο Φοιτητής

Νικόλαος Νακόπουλος

Η Επιβλέπουσα

Δρ. Στυλιανή Σοφianoπούλου

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τη βελτιστοποίηση ενός υφιστάμενου δικτύου παραγωγής και διανομής στη βιομηχανία χαρτονιού, με στόχο τη μείωση του συνολικού λειτουργικού κόστους μέσω της βέλτιστης ανάθεσης παραγωγής στα διαθέσιμα εργοστάσια και της αντίστοιχης εξυπηρέτησης των πελατών. Το πρόβλημα δεν αφορά τη δημιουργία νέων εγκαταστάσεων, αλλά την αποδοτικότερη αξιοποίηση ενός υπάρχοντος δικτύου παραγωγικών μονάδων, λαμβάνοντας υπόψη τη ζήτηση, τη διαθέσιμη δυναμικότητα, το μοναδιαίο κόστος παραγωγής, το μεταφορικό κόστος και τα σταθερά λειτουργικά κόστη. Η μεθοδολογία βασίζεται στην ανάπτυξη μοντέλου βελτιστοποίησης στο Supply Chain Guru, με χρήση πραγματικών επιχειρησιακών δεδομένων που αφορούν παραγωγικές εγκαταστάσεις, κόμβους πελατών και τρεις βασικές οικογένειες προϊόντων. Μέσω της ανάλυσης εναλλακτικών σεναρίων αξιολογούνται διαφορετικές πολιτικές ανάθεσης παραγωγής και διανομής, με έμφαση στη σύγκριση της υφιστάμενης κατάστασης με βελτιστοποιημένες λύσεις που διαφοροποιούνται ως προς τη διαθέσιμη δυναμικότητα και την πολιτική εξυπηρέτησης πελατών. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η βελτιστοποιημένη ανακατανομή παραγωγής και ροών μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση του συνολικού κόστους. Ως τελική προτεινόμενη λύση επιλέγεται το Optimized & Full Capacities & Single Source Σεναριο, το οποίο μειώνει το συνολικό κόστος από €94,82 εκ. σε €86,32 εκ., επιτυγχάνοντας εξοικονόμηση €8,50 εκ., δηλαδή 8,97% σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση. Η επιλογή του συγκεκριμένου σεναρίου βασίζεται στην ισορροπία μεταξύ οικονομικής αποδοτικότητας και λειτουργικής απλότητας, καθώς διατηρεί σημαντικό μέρος του οικονομικού οφέλους, ενώ περιορίζει την πολυπλοκότητα της εξυπηρέτησης μέσω πολιτικής single sourcing. Το κύριο εύρημα της εργασίας είναι ότι η βέλτιστη ανάθεση παραγωγής δεν μπορεί να βασίζεται αποκλειστικά στο χαμηλότερο παραγωγικό κόστος ή στη γεωγραφική εγγύτητα, αλλά απαιτεί συνδυαστική αξιολόγηση παραγωγής, μεταφοράς, δυναμικότητας και επιχειρησιακής απλότητας. Η εργασία αναδεικνύει τη σημασία των ψηφιακών εργαλείων βελτιστοποίησης στη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων στη διοίκηση εφοδιαστικής αλυσίδας.

Λέξεις-κλειδιά: Βελτιστοποίηση εφοδιαστικής αλυσίδας, Σχεδιασμός δικτύου παραγωγής και διανομής, Βιομηχανία χαρτονιού, Supply Chain Guru, Ανάθεση παραγωγής

ABSTRACT

This thesis examines the optimization of an existing production and distribution network in the corrugated board industry, with the main objective of reducing total operating cost through the optimal allocation of production to available plants and the corresponding assignment of customer demand. The problem does not involve the establishment of new facilities, but rather the more efficient utilization of an existing network of production sites, considering demand, available capacity, unit production cost, transportation cost and fixed operating costs.

The methodology is based on the development of an optimization model in Supply Chain Guru, using real operational data related to production facilities, customer nodes and three main product families. Through scenario analysis, different production and distribution assignment policies are evaluated, with emphasis on comparing the current network configuration with optimized solutions that differ in terms of available capacity and customer service policy.

The results indicate that optimized production allocation and distribution flows can lead to a significant reduction in total cost. The final proposed solution is the Optimized & Full Capacities & Single Source Scenario, which reduces total cost from €94.82 million to €86.32 million, achieving annual savings of €8.50 million, corresponding to an 8.97% reduction compared to the current network. This scenario is selected because it provides a balanced solution between cost efficiency and operational simplicity, maintaining a substantial part of the economic benefit while reducing service complexity through a single-sourcing policy.

The main finding of the thesis is that optimal production allocation cannot be based solely on the lowest production cost or geographical proximity. Instead, it requires an integrated evaluation of production cost, transportation cost, available capacity and operational feasibility. The thesis highlights the importance of digital optimization tools in supporting evidence-based decision-making in supply chain management, especially in industrial networks where production and distribution decisions are strongly interdependent.

Keywords: Supply chain optimization, Production and distribution network design, Corrugated board industry, Supply Chain Guru, Production allocation

2. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλαν, με διαφορετικούς τρόπους, στην εκπόνησή της.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου, Δρ. Στυλιανή Σοφianoπούλου, για την καθοδήγηση, την υποστήριξη και τις ουσιαστικές παρατηρήσεις της καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας. Η συμβολή της υπήρξε ιδιαίτερα σημαντική για τη διαμόρφωση της μεθοδολογικής προσέγγισης, την οργάνωση της ανάλυσης και τη συνολική ολοκλήρωση της μελέτης.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω το Τμήμα Βιομηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας του Πανεπιστημίου Πειραιώς και τους διδάσκοντες του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών στη Βιομηχανική Διοίκηση και Τεχνολογία, για τις γνώσεις και τα εφόδια που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στην εταιρεία και στους ανθρώπους που συνέβαλαν στην παροχή των απαραίτητων δεδομένων και πληροφοριών για την εκπόνηση της μελέτης περίπτωσης. Η συμβολή τους ήταν καθοριστική για τη σύνδεση της θεωρητικής προσέγγισης με ένα πραγματικό επιχειρησιακό πρόβλημα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους ανθρώπους του κοντινού μου περιβάλλοντος για την υπομονή, την κατανόηση και τη συνεχή στήριξή τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Η ενθάρρυνσή τους αποτέλεσε σημαντικό παράγοντα για την ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας.

3. ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1. ΠΕΡΙΛΗΨΗ	iii
2. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	vi
4. ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	ix
5. ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ	xi
6. ΛΙΣΤΑ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ, ΣΥΜΒΟΛΩΝ & ΛΕΞΙΛΟΓΙΟ	xiii
1. Εισαγωγή	1
2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	5
2.1 Θεωρητικό πλαίσιο διοίκησης εφοδιαστικής αλυσίδας	6
2.2 Σχεδιασμός δικτύου εφοδιαστικής αλυσίδας	8
2.3 Ολοκληρωμένος σχεδιασμός παραγωγής και διανομής.....	10
2.4 Βιομηχανία χαρτονιού και επιχειρησιακές προκλήσεις	12
2.5 Μοντελοποίηση Κόστους	15
2.6 Ψηφιακά εργαλεία βελτιστοποίησης και Supply Chain Guru	22
2.7 Ερευνητικό κενό και συμβολή της παρούσας εργασίας	26
3. Ανάλυση και Περιγραφή Δεδομένων	27
3.1 Περιγραφή του υφιστάμενου δικτύου παραγωγής και διανομής.....	28
3.2 Δεδομένα πελατών	31
3.2.1 Κριτήρια επιλογής και αναπαράστασης πελατών	31
3.2.2 Γεωγραφική κατανομή ζήτησης.....	32
3.2.3 Ζήτηση ανά οικογένεια προϊόντων	33
3.2.4 Ανάλυση ζήτησης ανά βασικό πελάτη και κόμβο ζήτησης	35
3.3 Δεδομένα προϊόντων και παραγωγικής διαδικασίας.....	37
3.4 Δεδομένα Διανομής και Παραγωγής.....	38
3.4.1 Λειτουργικό Κόστος και Δεδομένα διανομής ανα εγκατάσταση....	38
3.4.2 Δεδομένα Παραγωγής ανά εγκατάσταση	43

3.5 Αρχικές ροές εξυπηρέτησης	49
3.6 Βασικά προβλήματα του υφιστάμενου δικτύου	50
4. Μεθοδολογία	53
4.1 Μεθοδολογική Προσέγγιση	54
4.2 Ορισμός του Προβλήματος Βελτιστοποίησης	56
4.3 Παραδοχές και Περιορισμοί του Μοντέλου	57
4.4 Μαθηματική Διατύπωση του Προβλήματος	58
4.5 Υλοποίηση στο Supply Chain Guru	63
4.6 Μεθοδολογία Ανάπτυξης Σεναρίων	65
4.7 Κριτήρια Αξιολόγησης Αποτελεσμάτων	67
5. Ανάλυση και Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων	69
5.1 Baseline Scenario	69
5.2 Optimized Baseline Scenario	71
5.3 Optimized & Full Capacities Scenario	74
5.4 Optimized & Full Capacities & Single Source Scenario	75
5.5 Συγκριτική αξιολόγηση σεναρίων	77
5.6 Επιλογή τελικού σεναρίου και σύγκριση με το Baseline	80
6. Συμπεράσματα	88
7. Βιβλιογραφία	92

4. ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: Σύνδεση δεδομένων εισόδου και αποφάσεων σε πρόβλημα βελτιστοποίησης δικτύου εφοδιαστικής αλυσίδας.....	16
Σχήμα 2.2: Περιβάλλον Supply Chain Guru -SCG.....	23
Σχήμα 2.3: Δομή δικτύου εφοδιαστικής αλυσίδας και πολιτικές sourcing/transportation στο Supply Chain Guru.....	24
Σχήμα 3.1: <i>Austria</i> , $y = 2,0457x$	42
Σχήμα 3.2: <i>Czech</i> , $y = 1,6385x$	42
Σχήμα 3.3: <i>Croatia</i> , $y = 1,4053x$	42
Σχήμα 3.4: <i>Hungary</i> , $y = 1,5919x$	42
Σχήμα 3.5: <i>Poland</i> , $y = 1,3516x$	42
Σχήμα 3.6: <i>Slovenia</i> , $y = 1,8703x$	42
Σχήμα 3.7: <i>Slovakia</i> , $y = 2,0218x$	42
Σχήμα 5.1: Γεωγραφική απεικόνιση των ροών εξυπηρέτησης στο <i>Baseline Scenario</i>	70
Σχήμα 5.2: Γεωγραφική απεικόνιση των ροών εξυπηρέτησης στο <i>Optimized Baseline Scenario</i>	72
Σχήμα 5.3: Γεωγραφική απεικόνιση των ροών εξυπηρέτησης στο <i>Optimized & Full Capacities Scenario</i>	74
Σχήμα 5.4: Γεωγραφική απεικόνιση των ροών εξυπηρέτησης στο <i>Optimized & Full Capacities & Single Source Scenario</i>	76
Σχήμα 5.5: Διάρθρωση κόστους παραγωγής, μεταφοράς και σταθερού κόστους ανά σενάριο.....	78
Σχήμα 5.6: Εξοικονόμηση κόστους παραγωγής, μεταφοράς και σταθερού κόστους ανά σενάριο έναντι του <i>Baseline</i>	79
Σχήμα 5.7: Παραγωγικό κόστος ανά κατηγορία προϊόντος και σεναρίου.	80
Σχήμα 5.8: Μεταβολές παραγωγικού όγκου ανά εργοστάσιο	85

Σχήμα 5.9: Ανάλυση των πέντε μεγαλύτερων εξοικονομήσεων κόστους ανά πελάτη μεταξύ Baseline και Single Source σεναρίου.....	87
--	----

5. ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Βασικές αποφάσεις σχεδιασμού δικτύου και σύνδεση με την παρούσα εργασία	10
Πίνακας 3.1: Συνοπτική αποτύπωση του υφιστάμενου δικτύου.....	29
Πίνακας 3.2: Ζήτηση ανά χώρα πελάτη και οικογένεια προϊόντων.....	32
Πίνακας 3.3: Παραγωγική διαδικασία ανά οικογένεια προϊόντος	34
Πίνακας 3.4: Συνοπτικά στοιχεία ανά οικογένεια προϊόντων.....	34
Πίνακας 3.5: Top 10 βασικοί πελάτες με βάση τη συνολική ζήτηση	35
Πίνακας 3.6: Δέκα μεγαλύτεροι κόμβοι πελατών βάσει συνολικής ζήτησης ..	37
Πίνακας 3.7: Κατανομή παραγωγικών εγκαταστάσεων ανά χώρα.....	38
Πίνακας 3.8: Βασικά στοιχεία παραγωγικών εγκαταστάσεων	39
Πίνακας 3.9: Αποτελέσματα regression analysis ανά χώρα.....	40
Πίνακας 3.11: Συνολική ζήτηση και διαθέσιμη δυναμικότητα ανά οικογένεια προϊόντων.....	43
Πίνακας 3.12: Παραγωγική δυναμικότητα ανά εργοστάσιο και οικογένεια προϊόντων.....	44
Πίνακας 3.13: Μοναδιαίο κόστος παραγωγής ανά εργοστάσιο και οικογένεια προϊόντων.....	45
Πίνακας 3.14: Κατάταξη χαμηλότερου κόστους παραγωγής για Diecut.....	46
Πίνακας 3.15: Κατάταξη χαμηλότερου κόστους παραγωγής για Inliner.....	47
Πίνακας 3.16: Κατάταξη χαμηλότερου κόστους παραγωγής για Sheet.....	48
Πίνακας 3.17: Συγκεντρωτικά στατιστικά μοναδιαίου κόστους παραγωγής...	48
Πίνακας 3.18: Ενδεικτικές αρχικές αναθέσεις πελατών σε εγκαταστάσεις.....	49
Πίνακας 3.19: Χαρακτηρισμός αρχικής πολιτικής εξυπηρέτησης ανά οικογένεια προϊόντων.....	50
Πίνακας 4.1: Σύνδεση μεταβλητών και παραμέτρων του μοντέλου με τους αντίστοιχους πίνακες του Supply Chain Guru.....	63

Πίνακας 4.2: Περιγραφή και σκοπός των σεναρίων βελτιστοποίησης.....	66
Πίνακας 4.3: Κριτήρια αξιολόγησης των σεναρίων βελτιστοποίησης	68
Πίνακας 5.1: Βασικοί δείκτες του Baseline Scenario.	71
Πίνακας 5.2: Βασικοί δείκτες του Optimized Baseline Scenario.	73
Πίνακας 5.3: Βασικοί δείκτες του Optimized & Full Capacities Scenario.	75
Πίνακας 5.4: Βασικοί δείκτες του Optimized & Full Capacities Scenario.	77
Πίνακας 5.5: Τελική σύγκριση μεταξύ οικονομικά βέλτιστου σεναρίου και επιλεγμένου Single Source σεναρίου.....	81
Πίνακας 5.6: Συγκριτική αξιολόγηση Baseline και Single Source.....	82
Πίνακας 5.7: Κυριότερες μεταβολές παραγωγικού όγκου ανά εργοστάσιο στο Σενάριο 4.....	83
Πίνακας 5.8: Top 10 μεταβολές εξυπηρέτησης πελατών με υψηλή εξοικονόμηση.....	86

6. ΛΙΣΤΑ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ, ΣΥΜΒΟΛΩΝ & ΛΕΞΙΛΟΓΙΟ

Συντομογραφία/ Σύμβολο / Όρος	Πλήρης όρος	Επεξήγηση
SCG	Supply Chain Guru	Λογισμικό μοντελοποίησης, προσομοίωσης και βελτιστοποίησης εφοδιαστικών δικτύων, το οποίο χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία.
MILP	Mixed Integer Linear Programming	Μικτός ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός. Μέθοδος μαθηματικής βελτιστοποίησης που συνδυάζει συνεχείς και ακέραιες ή δυαδικές μεταβλητές.
LP	Linear Programming	Γραμμικός προγραμματισμός. Μέθοδος βελτιστοποίησης στην οποία η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί είναι γραμμικοί.
CO ₂	Carbon Dioxide	Διοξείδιο του άνθρακα. Αναφέρεται κυρίως στο πλαίσιο περιβαλλοντικών επιπτώσεων και εκπομπών.
Baseline Scenario		Σενάριο αναφοράς που αποτυπώνει την υφιστάμενη κατάσταση του δικτύου πριν από τη βελτιστοποίηση.

Optimized Baseline		Σενάριο βελτιστοποίησης με διατήρηση των υφιστάμενων περιορισμών δυναμικότητας και ανακατανομή των ροών παραγωγής και διανομής.
Full Capacities		Σενάριο στο οποίο εξετάζεται η αυξημένη διαθέσιμη παραγωγική δυναμικότητα των εργοστασίων.
Single Source / Single Sourcing		Πολιτική εξυπηρέτησης κατά την οποία κάθε πελάτης εξυπηρετείται από μία μόνο παραγωγική εγκατάσταση.
Multi Source / Multi Sourcing		Πολιτική εξυπηρέτησης κατά την οποία η ζήτηση ενός πελάτη μπορεί να καλυφθεί από περισσότερες από μία παραγωγικές εγκαταστάσεις.
Site		Κόμβος του δικτύου. Στην παρούσα εργασία αναφέρεται κυρίως σε παραγωγική εγκατάσταση ή εργοστάσιο.
Customer Node		Κόμβος πελάτη. Αντιπροσωπεύει γεωγραφικό σημείο ζήτησης στο μοντέλο.
Product Family		Οικογένεια προϊόντων. Στην εργασία περιλαμβάνει τις κατηγορίες Diecut, Inliner και Sheet.
Diecut		Οικογένεια προϊόντων που απαιτεί παραγωγική επεξεργασία με μηχανή diecut.

Inliner		Οικογένεια προϊόντων που απαιτεί παραγωγική επεξεργασία με μηχανή inliner.
Sheet		Οικογένεια προϊόντων που αφορά φύλλα χαρτονιού που παράγονται μέσω corrugator χωρίς πρόσθετη επεξεργασία σε diecut ή inliner μηχανή.
Corrugator		Μηχανή παραγωγής κυματοειδούς χαρτονιού. Αποτελεί βασικό στάδιο παραγωγής.
Work Center		Κέντρο εργασίας ή παραγωγική μονάδα μέσα σε εργοστάσιο, μέσω της οποίας αποτυπώνεται η διαθέσιμη δυναμικότητα παραγωγής.
Production Policy		Πολιτική παραγωγής στο Supply Chain Guru, η οποία καθορίζει ποια προϊόντα μπορούν να παραχθούν σε ποιες εγκαταστάσεις και με ποιο κόστος.
Sourcing Policy		Πολιτική ανάθεσης ή τροφοδοσίας, η οποία καθορίζει ποιες εγκαταστάσεις μπορούν να εξυπηρετήσουν συγκεκριμένους πελάτες ή κόμβους ζήτησης.
Transportation Policy		Πολιτική μεταφοράς, η οποία καθορίζει τις επιτρεπόμενες διαδρομές, τους τρόπους μεταφοράς και τα αντίστοιχα μεταφορικά κόστη.

Mode		Τρόπος μεταφοράς στο Supply Chain Guru. Συνδέεται με μεταφορικό κόστος, απόσταση και μέγεθος φορτίου.
Tariff		Συντελεστής ή τιμολόγιο μεταφοράς, συνήθως εκφρασμένο ως κόστος ανά χιλιόμετρο ή ανά διαδρομή.
Lane		Μεταφορική σύνδεση μεταξύ δύο κόμβων του δικτύου, όπως εργοστάσιο και πελάτης.
Lane Tariff		Τιμολόγιο μεταφοράς για συγκεκριμένη διαδρομή ή σύνδεση.
Cost-to-Serve		Κόστος εξυπηρέτησης πελάτη ή ζήτησης, το οποίο περιλαμβάνει το σχετικό παραγωγικό και μεταφορικό κόστος.
Fixed Operating Cost		Σταθερό λειτουργικό κόστος εγκατάστασης, ανεξάρτητο από την ακριβή παραγόμενη ποσότητα.
Production Cost		Κόστος παραγωγής, το οποίο προκύπτει από την παραγόμενη ποσότητα και το μοναδιαίο κόστος παραγωγής.
Transportation Cost		Κόστος μεταφοράς προϊόντων από τα εργοστάσια προς τους πελάτες.
Total Cost		Συνολικό κόστος δικτύου, το οποίο περιλαμβάνει σταθερά κόστη,

		παραγωγικά κόστη και μεταφορικά κόστη.
Capacity		Παραγωγική δυναμικότητα εγκατάστασης ή κέντρου εργασίας.
Capacity Utilization		Βαθμός αξιοποίησης δυναμικότητας. Εκφράζει το ποσοστό χρήσης της διαθέσιμης παραγωγικής ικανότητας.
Demand		Ζήτηση πελατών για συγκεκριμένη οικογένεια προϊόντων.
Customer Assignment		Ανάθεση πελάτη σε παραγωγική εγκατάσταση ή πηγή εξυπηρέτησης.
Production Allocation		Κατανομή παραγωγής μεταξύ διαθέσιμων εργοστασίων.
Network Optimization		Βελτιστοποίηση δικτύου με στόχο την εύρεση της καλύτερης δυνατής διάρθρωσης ροών, αναθέσεων και χρήσης εγκαταστάσεων.
Regression Analysis		Ανάλυση παλινδρόμησης
Heatmap		Γεωγραφική απεικόνιση της συγκέντρωσης ζήτησης με χρήση χρωματικής έντασης.
FTL	Full Truckload	Πλήρες φορτίο φορτηγού. Τρόπος μεταφοράς όπου το φορτηγό αξιοποιείται για μία κύρια αποστολή.
LTL	Less-than-Truckload	Μερικό φορτίο φορτηγού. Τρόπος μεταφοράς όπου η αποστολή δεν

		καλύπτει ολόκληρη τη χωρητικότητα του φορτηγού.
--	--	---

1. Εισαγωγή

Η αποτελεσματική διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες ανταγωνιστικότητας για τις σύγχρονες βιομηχανικές επιχειρήσεις. Σε ένα επιχειρησιακό περιβάλλον που χαρακτηρίζεται από έντονο ανταγωνισμό, αυξημένες απαιτήσεις πελατών, ανάγκη για μείωση κόστους και συνεχή πίεση για καλύτερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων, οι επιχειρήσεις καλούνται να λαμβάνουν αποφάσεις που δεν περιορίζονται σε μεμονωμένες λειτουργίες, αλλά αφορούν το σύνολο του δικτύου παραγωγής και διανομής. Η εφοδιαστική αλυσίδα δεν αντιμετωπίζεται πλέον ως ένα άθροισμα ανεξάρτητων δραστηριοτήτων, αλλά ως ένα ολοκληρωμένο σύστημα στο οποίο η παραγωγή, η αποθήκευση, η μεταφορά, η εξυπηρέτηση πελατών και η ροή πληροφοριών αλληλοεπιδρούν και επηρεάζουν άμεσα τη συνολική οικονομική απόδοση της επιχείρησης (Tsiakis & Papageorgiou, 2008; Bo et al., 2021).

Στο πλαίσιο αυτό, ο σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση δικτύων εφοδιαστικής αλυσίδας αποτελούν ένα ιδιαίτερα σημαντικό πεδίο εφαρμογής της διοίκησης εφοδιαστικής αλυσίδας και της επιχειρησιακής έρευνας. Ο σχεδιασμός δικτύου εφοδιαστικής αλυσίδας (Supply Chain Network Design) αφορά αποφάσεις που σχετίζονται με τη δομή του δικτύου, τη ροή των προϊόντων, την ανάθεση πελατών σε παραγωγικές ή διανεμητικές εγκαταστάσεις, την επιλογή κατάλληλων παραγωγικών μονάδων και τη διαμόρφωση πολιτικών μεταφοράς. Οι αποφάσεις αυτές μπορεί να έχουν στρατηγικό ή τακτικό χαρακτήρα, καθώς επηρεάζουν τόσο τη μακροπρόθεσμη αποδοτικότητα του δικτύου όσο και τη λειτουργική του επίδοση. Ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου η φυσική δομή του δικτύου είναι ήδη καθορισμένη, η βελτίωση της απόδοσης δεν επιτυγχάνεται απαραίτητα μέσω νέων εγκαταστάσεων, αλλά μέσω καλύτερης αξιοποίησης των υφιστάμενων παραγωγικών και διανεμητικών πόρων (Tonanont et al., 2010; Liu et al., 2020).

Η βιομηχανία χαρτονιού και συσκευασίας παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον από πλευράς εφοδιαστικής αλυσίδας, καθώς συνδυάζει παραγωγικές, τεχνικές και ιδιαιτερότητες στη διανομή. Τα προϊόντα χαρτονιού διαφοροποιούνται ως προς τις διαστάσεις, τις προδιαγραφές, τις απαιτήσεις παραγωγής και τις παραγωγικές μηχανές από τις οποίες μπορούν να παραχθούν. Παράλληλα, η παραγωγική διαδικασία εξαρτάται από τις τεχνικές δυνατότητες κάθε εργοστασίου, τη διαθεσιμότητα των

γραμμών παραγωγής και το αντίστοιχο κόστος παραγωγής ανά προϊόν ή ομάδα προϊόντων. Επιπλέον, λόγω του μεγάλου όγκου των προϊόντων σε σχέση με την αξία τους, το κόστος μεταφοράς μπορεί να αποτελεί σημαντικό μέρος του συνολικού κόστους εξυπηρέτησης. Συνεπώς, η επιλογή του κατάλληλου εργοστασίου παραγωγής για κάθε προϊόν και η αντίστοιχη εξυπηρέτηση των πελατών από τα διαθέσιμα εργοστάσια δεν αποτελεί απλή λειτουργική απόφαση, αλλά κρίσιμο παράγοντα οικονομικής αποδοτικότητας.

Το κεντρικό πρόβλημα της παρούσας διπλωματικής εργασίας αφορά την ανάγκη μείωσης του συνολικού λειτουργικού κόστους ενός υφιστάμενου δικτύου παραγωγής και διανομής στη βιομηχανία χαρτονιού. Η υπό μελέτη εταιρεία διαθέτει ένα σύνολο παραγωγικών εγκαταστάσεων, οι οποίες μπορούν να παράγουν συγκεκριμένες κατηγορίες προϊόντων, με διαφορετικά κόστη παραγωγής και διαφορετική γεωγραφική θέση σε σχέση με τους πελάτες. Ταυτόχρονα, οι πελάτες παρουσιάζουν συγκεκριμένη ζήτηση ανά προϊόν, η οποία πρέπει να καλυφθεί πλήρως. Το πρόβλημα, επομένως, δεν αφορά τη δημιουργία νέων εγκαταστάσεων ή τη μεταβολή της φυσικής δομής του δικτύου, αλλά τον προσδιορισμό της βέλτιστης ανάθεσης παραγωγής στα ήδη διαθέσιμα εργοστάσια και τη διαμόρφωση των αντίστοιχων ροών διανομής προς τους πελάτες.

Στην υφιστάμενη κατάσταση, η ανάθεση της παραγωγής και η εξυπηρέτηση των πελατών μπορεί να βασίζεται σε ιστορικές πρακτικές, εμπορικές επιλογές, γεωγραφικά κριτήρια ή επιμέρους λειτουργικούς περιορισμούς. Ωστόσο, μια τέτοια προσέγγιση δεν διασφαλίζει απαραίτητα τη συνολική ελαχιστοποίηση του κόστους. Ένα εργοστάσιο με χαμηλό κόστος παραγωγής μπορεί να οδηγήσει σε υψηλό κόστος μεταφοράς, εάν βρίσκεται μακριά από τους πελάτες που εξυπηρετεί. Αντίστοιχα, ένα εργοστάσιο με υψηλότερο κόστος παραγωγής μπορεί να αποτελεί οικονομικά πιο συμφέρουσα επιλογή, εφόσον βρίσκεται πιο κοντά σε σημαντικούς πελάτες και μειώνει σημαντικά τις διανεμητικές δαπάνες. Επομένως, η βέλτιστη απόφαση δεν μπορεί να βασιστεί στην απομονωμένη εξέταση του κόστους παραγωγής ή του κόστους μεταφοράς, αλλά απαιτεί ολοκληρωμένη αξιολόγηση του συνολικού κόστους παραγωγής και διανομής.

Η ανάγκη αυτή καθιστά απαραίτητη την ανάπτυξη ενός μοντέλου βελτιστοποίησης, το οποίο να συνδυάζει δεδομένα ζήτησης, παραγωγικά κόστη, μεταφορικά κόστη, διαθέσιμα εργοστάσια, πελάτες, προϊόντα και περιορισμούς

εξυπηρέτησης. Η λογική της εργασίας εντάσσεται στο πεδίο της ολοκληρωμένης βελτιστοποίησης παραγωγής και διανομής, όπου οι αποφάσεις σχετικά με το πού θα παραχθεί κάθε προϊόν και από πού θα εξυπηρετηθεί κάθε πελάτης λαμβάνονται ταυτόχρονα. Με αυτόν τον τρόπο, το πρόβλημα αντιμετωπίζεται συστηματικά και όχι αποσπασματικά, επιτρέποντας την ποσοτική αξιολόγηση διαφορετικών πολιτικών παραγωγής και διανομής. Η σχετική βιβλιογραφία δείχνει ότι τα προβλήματα ολοκληρωμένης βελτιστοποίησης παραγωγής και διανομής μοντελοποιούνται συχνά μέσω Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (Mixed Integer Linear Programming - MILP), καθώς η συγκεκριμένη προσέγγιση επιτρέπει την ταυτόχρονη αποτύπωση αποφάσεων παραγωγής, ροών διανομής, παραμέτρων κόστους και περιορισμών δυναμικότητας (Tsiakis & Papageorgiou, 2008; Bhutta et al., 2024; Bo et al., 2021).

Για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιείται το Supply Chain Guru, ένα εξειδικευμένο εργαλείο μοντελοποίησης, προσομοίωσης και βελτιστοποίησης εφοδιαστικών δικτύων. Η χρήση του εργαλείου επιτρέπει την αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης του δικτύου, την εισαγωγή των απαραίτητων δεδομένων, τη δημιουργία εναλλακτικών σεναρίων και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων τους με βάση το συνολικό κόστος. Το μοντέλο περιλαμβάνει βασικά στοιχεία όπως εργοστάσια, πελάτες, προϊόντα, ζήτηση, παραγωγικές δυνατότητες, κόστη παραγωγής και μεταφοράς, καθώς και πολιτικές τροφοδοσίας/ανάθεσης παραγωγής (sourcing policies) και πολιτικές μεταφοράς (transportation policies) (Coupa, 2026). Με τον τρόπο αυτό, το Supply Chain Guru δεν χρησιμοποιείται ως απλό εργαλείο απεικόνισης, αλλά ως εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων για τη βελτιστοποίηση της ανάθεσης παραγωγής και των ροών διανομής. Η βιβλιογραφία αναφέρει ότι το Supply Chain Guru μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση εφοδιαστικών δικτύων, καθώς επιτρέπει την ενσωμάτωση βασικών στοιχείων μοντελοποίησης, όπως προϊόντα (products), εγκαταστάσεις/κόμβους δικτύου (sites), ζήτηση (demand), πολιτικές τροφοδοσίας και ανάθεσης παραγωγής (sourcing policies), πολιτικές μεταφοράς (transportation policies) και κατηγορίες κόστους, με στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους του δικτύου (Tonanont et al., 2010; Kong et al., 2024).

Ο κεντρικός σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού λειτουργικού κόστους της εφοδιαστικής αλυσίδας στη

βιομηχανία χαρτονιού, μέσω της βέλτιστης ανάθεσης παραγωγής στα διαθέσιμα εργοστάσια και της αντίστοιχης εξυπηρέτησης των πελατών. Βασική επιδίωξη είναι να προσδιοριστεί σε ποιο εργοστάσιο συμφέρει οικονομικά να παραχθεί κάθε προϊόν και από ποιο εργοστάσιο πρέπει να εξυπηρετηθεί η ζήτηση κάθε πελάτη, λαμβάνοντας υπόψη τόσο το κόστος παραγωγής όσο και το κόστος μεταφοράς. Η εργασία αποσκοπεί, επομένως, στη διαμόρφωση μιας τεκμηριωμένης πρότασης βέλτιστης παραγωγικής κατανομής, η οποία θα στηρίζεται σε ποσοτικά αποτελέσματα και θα μπορεί να υποστηρίξει τη λήψη διοικητικών αποφάσεων.

Για την επίτευξη του σκοπού αυτού, η εργασία επιδιώκει αρχικά την αποτύπωση του υφιστάμενου δικτύου παραγωγής και διανομής της εταιρείας, με αναφορά στα εργοστάσια, τους πελάτες, τα προϊόντα και τις βασικές ροές εξυπηρέτησης. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται κατηγοριοποίηση των προϊόντων σε ομάδες, με βάση τις παραγωγικές δυνατότητες και τα κέντρα εργασίας (work centers) από τα οποία μπορούν να παραχθούν. Παράλληλα, επιλέγονται οι σημαντικότεροι πελάτες, ώστε το μοντέλο να επικεντρώνεται στο πιο αντιπροσωπευτικό και επιχειρησιακά κρίσιμο μέρος της ζήτησης. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται επίσης στην καταγραφή και μοντελοποίηση των βασικών κατηγοριών κόστους, όπως τα σταθερά λειτουργικά κόστη (fixed operating costs), τα μοναδιαία κόστη παραγωγής (unit production costs) και τα κόστη μεταφοράς (transportation costs).

Στο πρακτικό μέρος της εργασίας αναπτύσσεται μοντέλο στο Supply Chain Guru, μέσω του οποίου εξετάζονται εναλλακτικά σενάρια παραγωγής και διανομής. Τα σενάρια αυτά περιλαμβάνουν την υφιστάμενη κατάσταση, τη βελτιστοποιημένη ανάθεση παραγωγής στα διαθέσιμα εργοστάσια και πιθανές πολιτικές εξυπηρέτησης πελατών, όπως η εξυπηρέτηση από μία μόνο πηγή/ένα μόνο εργοστάσιο (single sourcing) ή η εξυπηρέτηση από περισσότερες από μία πηγές/περισσότερα από ένα εργοστάσια (multi sourcing). Η σύγκριση των σεναρίων επιτρέπει την αξιολόγηση της επίδρασης κάθε πολιτικής στο συνολικό κόστος του δικτύου, στις ροές προϊόντων και στη χρήση των παραγωγικών εγκαταστάσεων. Με τον τρόπο αυτό, η εργασία συνδέει τη θεωρητική προσέγγιση της βελτιστοποίησης εφοδιαστικών δικτύων με μια πρακτική εφαρμογή σε πραγματικό βιομηχανικό περιβάλλον. Το κεντρικό ερευνητικό ερώτημα που τίθεται προς εξέταση είναι ποια ανάθεση παραγωγής στα διαθέσιμα εργοστάσια οδηγεί στην ελαχιστοποίηση του συνολικού λειτουργικού κόστους παραγωγής και διανομής, διατηρώντας ταυτόχρονα την πλήρη εξυπηρέτηση της ζήτησης των πελατών.

Η απάντηση στο ερώτημα αυτό προϋποθέτει την ανάλυση επιμέρους ζητημάτων, όπως ο τρόπος αποτύπωσης του υφιστάμενου δικτύου στο Supply Chain Guru, ο προσδιορισμός των βασικών οδηγών κόστους, η επίδραση διαφορετικών πολιτικών ανάθεσης παραγωγής στο συνολικό κόστος, η επιλογή των καταλληλότερων εργοστασίων για κάθε προϊόν ή ομάδα προϊόντων και η διαφοροποίηση των ροών διανομής μεταξύ της υφιστάμενης και της βελτιστοποιημένης κατάστασης.

Τα αποτελέσματα της εργασίας δείχνουν ότι η βελτιστοποιημένη ανακατανομή της παραγωγής και των ροών διανομής μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση του συνολικού λειτουργικού κόστους, χωρίς να απαιτείται μεταβολή της φυσικής δομής του δικτύου. Η ανάλυση των εναλλακτικών σεναρίων αναδεικνύει ότι η οικονομικά βέλτιστη λύση δεν ταυτίζεται απαραίτητα με την πιο εφαρμόσιμη διοικητικά επιλογή. Για τον λόγο αυτό, η τελική πρόταση της εργασίας βασίζεται σε ένα σενάριο που συνδυάζει υψηλή εξοικονόμηση κόστους με απλούστερη και πιο ελέγξιμη πολιτική εξυπηρέτησης πελατών. Το βασικό συμπέρασμα είναι ότι η ανάθεση παραγωγής πρέπει να εξετάζεται με βάση το συνολικό κόστος εξυπηρέτησης, δηλαδή τον συνδυασμό παραγωγικού κόστους, μεταφορικού κόστους, διαθέσιμης δυναμικότητας και λειτουργικής πολυπλοκότητας.

Η συμβολή της εργασίας έγκειται στο ότι εξετάζει ένα πρακτικό και εφαρμόσιμο πρόβλημα βελτιστοποίησης, χωρίς να απαιτείται μεταβολή της φυσικής δομής του δικτύου. Αντί να εστιάζει σε επενδύσεις νέων εγκαταστάσεων, η ανάλυση επικεντρώνεται στην καλύτερη αξιοποίηση των υφιστάμενων εργοστασίων και στη βελτίωση των αποφάσεων παραγωγής και διανομής. Με τον τρόπο αυτό, η εργασία αναδεικνύει τη σημασία των ψηφιακών εργαλείων βελτιστοποίησης στη σύγχρονη διοίκηση εφοδιαστικής αλυσίδας και δείχνει πώς η χρήση ποσοτικών μεθόδων μπορεί να συμβάλει στη μείωση κόστους, στη βελτίωση της αποδοτικότητας και στη λήψη τεκμηριωμένων διοικητικών αποφάσεων.

2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Η παρούσα βιβλιογραφική ανασκόπηση εξετάζει το θεωρητικό και μεθοδολογικό υπόβαθρο της διπλωματικής εργασίας, η οποία επικεντρώνεται στη βέλτιστη ανάθεση παραγωγής και διανομής σε υφιστάμενο δίκτυο εργοστασίων και πελατών στη

βιομηχανία χαρτονιού. Η ανάλυση οργανώνεται γύρω από έξι άξονες: τη διοίκηση εφοδιαστικής αλυσίδας, τον σχεδιασμό δικτύου, την ολοκληρωμένη παραγωγή και διανομή, τις ιδιαιτερότητες του κλάδου χαρτονιού, τη μοντελοποίηση κόστους και τη χρήση ψηφιακών εργαλείων βελτιστοποίησης, με έμφαση στο Supply Chain Guru. Στόχος είναι να τεκμηριωθεί ότι το υπό μελέτη πρόβλημα δεν αποτελεί απλή επιλογή εργοστασίου ή απλή μεταφορική απόφαση, αλλά πρόβλημα βελτιστοποίησης δικτύου στο οποίο παραγωγικές δυνατότητες, ζήτηση, κόστη, ροές και επιχειρησιακοί περιορισμοί πρέπει να αξιολογούνται ταυτόχρονα.

2.1 Θεωρητικό πλαίσιο διοίκησης εφοδιαστικής αλυσίδας

Η εφοδιαστική αλυσίδα αποτελεί ένα σύστημα οργανισμών, δραστηριοτήτων, πόρων, εγκαταστάσεων και ροών που συνδέονται με την ικανοποίηση της ζήτησης του τελικού πελάτη. Περιλαμβάνει όλα τα μέρη που εμπλέκονται άμεσα ή έμμεσα στην εκπλήρωση ενός αιτήματος πελάτη, όπως προμηθευτές, παραγωγούς, μεταφορείς, αποθήκες, διανομείς, λιανοπωλητές και πελάτες (Chopra et al., 2016). Η θεώρηση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, διότι μετατοπίζει την ανάλυση από την απομονωμένη λειτουργία μιας επιχείρησης στη συνολική απόδοση του δικτύου μέσα στο οποίο αυτή λειτουργεί.

Η διοίκηση εφοδιαστικής αλυσίδας δεν περιορίζεται στη φυσική μεταφορά προϊόντων. Περιλαμβάνει τον συντονισμό ροών προϊόντων, πληροφοριών και χρηματοοικονομικών πόρων από τα πρώτα στάδια προμήθειας έως την τελική παράδοση. Η βασική επιδίωξη είναι η μεγιστοποίηση της αξίας που δημιουργεί η αλυσίδα, δηλαδή η διαφορά μεταξύ της αξίας που αντιλαμβάνεται ο πελάτης και του συνολικού κόστους που απαιτείται για την ικανοποίηση της ζήτησης. Υπό αυτή την οπτική, η επιτυχία μιας εφοδιαστικής αλυσίδας πρέπει να αξιολογείται με βάση τη συνολική αποδοτικότητα του δικτύου και όχι μόνο με βάση την επίδοση ενός επιμέρους κόμβου ή τμήματος (Chopra et al., 2016).

Η διοίκηση εφοδιαστικής αλυσίδας είναι ευρύτερη έννοια από τα logistics. Τα logistics αφορούν κυρίως τον σχεδιασμό, την εκτέλεση και τον έλεγχο της ροής και αποθήκευσης υλικών και προϊόντων, ενώ η διοίκηση εφοδιαστικής αλυσίδας δίνει έμφαση στη διαχείριση σχέσεων και διεργασιών μεταξύ προμηθευτών, παραγωγών, διανομέων και πελατών (Christopher, 2011). Με άλλα λόγια, η εφοδιαστική αλυσίδα λειτουργεί ως δίκτυο συνεργαζόμενων οργανισμών, στο οποίο η αξία για τον πελάτη

και το συνολικό κόστος εξαρτώνται από τον βαθμό συντονισμού μεταξύ των μελών του δικτύου.

Στο σύγχρονο ανταγωνιστικό περιβάλλον, οι επιχειρήσεις δεν ανταγωνίζονται πλέον μόνο ως μεμονωμένες αυτόνομες οντότητες, αλλά ως εφοδιαστικές αλυσίδες (Lambert & Cooper, 2000). Η θέση αυτή είναι κρίσιμη για τη λογική της παρούσας εργασίας, καθώς δείχνει ότι η παραγωγή, η διανομή, η εξυπηρέτηση πελατών και η κοστολόγηση δεν πρέπει να αντιμετωπίζονται ως ανεξάρτητες λειτουργίες. Η αποσπασματική βελτιστοποίηση ενός τμήματος, όπως η επιλογή του φθηνότερου εργοστασίου παραγωγής χωρίς συνεκτίμηση μεταφορικών αποστάσεων, μπορεί να οδηγήσει σε μη βέλτιστη λύση για το συνολικό δίκτυο.

Η βιβλιογραφία διακρίνει τις αποφάσεις της εφοδιαστικής αλυσίδας σε στρατηγικό, τακτικό και λειτουργικό επίπεδο. Οι στρατηγικές αποφάσεις αφορούν τη μακροπρόθεσμη διαμόρφωση του δικτύου, όπως η θέση εγκαταστάσεων, η δυναμικότητα και η βασική αρχιτεκτονική της αλυσίδας. Οι τακτικές αποφάσεις αφορούν τη μεσοπρόθεσμη αξιοποίηση του υπάρχοντος δικτύου, όπως η κατανομή παραγωγής, οι ροές προϊόντων, η ανάθεση πελατών και οι πολιτικές μεταφοράς. Οι λειτουργικές αποφάσεις αφορούν την καθημερινή εκτέλεση, όπως η δρομολόγηση, η διαχείριση παραγγελιών και ο λεπτομερής προγραμματισμός παραγωγής (Chopra et al., 2016; Bo et al., 2021).

Η παρούσα εργασία εντάσσεται κυρίως στο τακτικό επίπεδο λήψης αποφάσεων. Δεν εξετάζει την ίδρυση νέων εργοστασίων ούτε τον ημερήσιο προγραμματισμό φορτηγών, αλλά τη βέλτιστη αξιοποίηση υφιστάμενων εργοστασίων για την παραγωγή ομάδων προϊόντων και την εξυπηρέτηση πελατών. Συνεπώς, το θεωρητικό πλαίσιο της διοίκησης εφοδιαστικής αλυσίδας λειτουργεί ως βάση για τη μετατροπή ενός πραγματικού επιχειρησιακού προβλήματος σε πρόβλημα ποσοτικής βελτιστοποίησης.

Η εφοδιαστική αλυσίδα μπορεί να αναλυθεί μέσα από τις βασικές λειτουργίες plan, source, make, deliver και return (Scott et al., 2011). Η ταξινόμηση αυτή βοηθά στην κατανόηση της θέσης της παρούσας εργασίας: το πρόβλημα αφορά κυρίως τη σύνδεση των λειτουργιών make και deliver, δηλαδή της παραγωγής και της παράδοσης προϊόντων στους πελάτες. Η αποτελεσματική σύνδεση αυτών των λειτουργιών απαιτεί δεδομένα κόστους, ζήτησης, δυναμικότητας και επιτρεπόμενων ροών.

2.2 Σχεδιασμός δικτύου εφοδιαστικής αλυσίδας

Ο σχεδιασμός δικτύου εφοδιαστικής αλυσίδας (Supply Chain Network Design) αποτελεί βασικό πεδίο στρατηγικής και τακτικής ανάλυσης. Αναφέρεται στον καθορισμό της δομής, των κόμβων, των συνδέσεων και των ροών ενός δικτύου με σκοπό την ικανοποίηση της ζήτησης με το χαμηλότερο δυνατό συνολικό κόστος και με αποδεκτό επίπεδο εξυπηρέτησης. Ένα τέτοιο δίκτυο μπορεί να περιλαμβάνει προμηθευτές, εργοστάσια, αποθήκες, κέντρα διανομής, πελάτες και ενδιάμεσους κόμβους. Οι αποφάσεις σχεδιασμού δεν αφορούν μόνο το πού βρίσκονται οι εγκαταστάσεις, αλλά και το ποιος είναι ο ρόλος τους, ποια προϊόντα διακινούνται μέσω αυτών και ποιες αγορές εξυπηρετούν.

Οι αποφάσεις σχεδιασμού δικτύου επηρεάζουν άμεσα την απόδοση της εφοδιαστικής αλυσίδας, καθώς καθορίζουν τους περιορισμούς μέσα στους οποίους λαμβάνονται οι τακτικές και λειτουργικές αποφάσεις. Βασικοί οδηγοί απόδοσης είναι οι εγκαταστάσεις, τα αποθέματα, οι μεταφορές, η πληροφορία, το sourcing και η τιμολόγηση (Chopra et al., 2016). Στην παρούσα εργασία οι πιο κρίσιμοι οδηγοί είναι οι εγκαταστάσεις, οι μεταφορές, η παραγωγική δυναμικότητα και οι πολιτικές ανάθεσης παραγωγής.

Τα μοντέλα σχεδιασμού δικτύων χρησιμοποιούνται συχνά για να απαντήσουν σε ερωτήματα όπως: ποια εργοστάσια πρέπει να χρησιμοποιηθούν, ποια προϊόντα πρέπει να παραχθούν σε κάθε εργοστάσιο, ποιοι πελάτες πρέπει να εξυπηρετηθούν από κάθε εγκατάσταση και ποιες ροές προϊόντων πρέπει να διαμορφωθούν. Στη σχετική βιβλιογραφία, η βέλτιστη παραγωγική κατανομή και διανομή σε πολυεπίπεδο δίκτυο αντιμετωπίζεται με συνεκτίμηση παραγωγικών, μεταφορικών και χρηματοοικονομικών στοιχείων (Tsiakis & Papageorgiou, 2008). Η προσέγγιση αυτή είναι άμεσα συνδεδεμένη με το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής, καθώς εξετάζει την από κοινού λήψη αποφάσεων παραγωγής και διανομής.

Σημαντική διάσταση του σχεδιασμού δικτύου είναι η ανάθεση πελατών σε εγκαταστάσεις. Η ανάθεση πελατών (customer allocation ή customer assignment) προσδιορίζει από ποια μονάδα παραγωγής ή κέντρο διανομής θα εξυπηρετείται κάθε πελάτης. Η απόφαση αυτή επηρεάζει το κόστος μεταφοράς, τον χρόνο παράδοσης, την αξιοπιστία εξυπηρέτησης και τον βαθμό αξιοποίησης των εγκαταστάσεων. Σε

περιβάλλοντα με πολλούς πελάτες και γεωγραφικά διασκορπισμένη ζήτηση, η ανάθεση πελατών αποτελεί κρίσιμο στοιχείο του συνολικού κόστους.

Στη βιβλιογραφία διακρίνονται πολιτικές single sourcing και multi sourcing. Στο single sourcing, κάθε πελάτης ή κάθε ζήτηση πελάτη-προϊόντος εξυπηρετείται από μία μόνο εγκατάσταση. Η πολιτική αυτή μειώνει την πολυπλοκότητα εκτέλεσης και διευκολύνει τη διαχείριση παραγγελιών, αλλά μπορεί να περιορίσει την ευελιξία του δικτύου. Στο multi sourcing, η ζήτηση μπορεί να καλυφθεί από περισσότερες εγκαταστάσεις, αυξάνοντας τη δυνατότητα αξιοποίησης διαφορών στο κόστος παραγωγής, στο κόστος μεταφοράς και στη διαθέσιμη δυναμικότητα. Ωστόσο, η αυξημένη ευελιξία συνοδεύεται από μεγαλύτερη επιχειρησιακή πολυπλοκότητα.

Τα προβλήματα σχεδιασμού δικτύων μπορούν να συνδέουν στρατηγικές και τακτικές αποφάσεις, όπως τοποθεσίες εγκαταστάσεων, δυναμικότητες, παραγωγικές ποσότητες, ροές προϊόντων και αποθέματα. Σε τέτοια πλαίσια, η βελτιστοποίηση μπορεί να αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση του συνολικού μοναδιαίου κόστους, λαμβάνοντας υπόψη πρώτες ύλες, συσκευασία, μετατροπή, αποθέματα, μεταφορά και απόσβεση (Liu et al., 2020). Αν και η παρούσα εργασία δεν εξετάζει νέες εγκαταστάσεις ή νέες συνθέσεις προϊόντων, αξιοποιεί την ίδια λογική βελτιστοποίησης δικτύου: η απόφαση δεν βασίζεται σε έναν παράγοντα, αλλά στη συνδυαστική αξιολόγηση κόστους, δυναμικότητας και ροών.

Ένα δίκτυο εφοδιαστικής αλυσίδας πρέπει επίσης να αξιολογείται ως προς το trade-off κόστους και επιπέδου εξυπηρέτησης. Ένα δίκτυο με χαμηλό κόστος μπορεί να μην είναι αποδεκτό αν οδηγεί σε καθυστερήσεις, υπερβολική εξάρτηση από λίγες εγκαταστάσεις ή μη ρεαλιστικές ροές. Αντίστοιχα, ένα δίκτυο με υψηλό επίπεδο εξυπηρέτησης μπορεί να απαιτεί μεγαλύτερη πλεονάζουσα δυναμικότητα και αυξημένο λειτουργικό κόστος. Στην παρούσα εργασία, το επίπεδο εξυπηρέτησης εκφράζεται κυρίως μέσω της πλήρους κάλυψης της ζήτησης, ενώ η αξιολόγηση των εναλλακτικών σεναρίων γίνεται με βάση το συνολικό κόστος παραγωγής και διανομής.

Πίνακας 2.1: Βασικές αποφάσεις σχεδιασμού δικτύου και σύνδεση με την παρούσα εργασία

Κατηγορία απόφασης	Περιεχόμενο στη βιβλιογραφία	Εφαρμογή στην παρούσα εργασία
Εγκαταστάσεις	Θέση, δυναμικότητα και ρόλος κόμβων	Τα εργοστάσια θεωρούνται υφιστάμενα και αξιοποιούνται βέλτιστα
Παραγωγή	Προϊόντα, ποσότητες, δυναμικότητα, παραγωγικοί περιορισμοί	Ανάθεση ομάδων προϊόντων σε εργοστάσια με βάση κόστος και δυνατότητες
Διανομή	Ροές προϊόντων, μεταφορικές συνδέσεις, κόστος διαδρομών	Ανάθεση πελατών σε εργοστάσια και υπολογισμός κόστους μεταφοράς
Εξυπηρέτηση ζήτησης	Κάλυψη ζήτησης, χρόνοι παράδοσης, service level	Πλήρης κάλυψη ζήτησης ως βασικός περιορισμός του μοντέλου
Σενάρια	Σύγκριση εναλλακτικών πολιτικών λειτουργίας	Σύγκριση baseline, single sourcing και optimized/multi sourcing σεναρίων

2.3 Ολοκληρωμένος σχεδιασμός παραγωγής και διανομής

Η παραγωγή και η διανομή αποτελούν δύο αλληλοεξαρτώμενες λειτουργίες της εφοδιαστικής αλυσίδας. Η παραγωγή καθορίζει πού, πότε και σε ποιες ποσότητες θα παραχθούν τα προϊόντα, ενώ η διανομή καθορίζει πώς τα προϊόντα θα φτάσουν στους πελάτες. Παραδοσιακά, οι δύο λειτουργίες αντιμετωπίζονταν συχνά ξεχωριστά: η παραγωγή προσπαθούσε να μειώσει το κόστος κατασκευής και η διανομή

προσπαθούσε να μειώσει το κόστος μεταφοράς. Ωστόσο, η τοπική βελτιστοποίηση μιας λειτουργίας μπορεί να επιβαρύνει την άλλη και να αυξήσει το συνολικό κόστος του δικτύου.

Ο ολοκληρωμένος σχεδιασμός παραγωγής και διανομής απαντά στο ερώτημα «τι πρέπει να παραχθεί και να παραδοθεί, πότε και πώς» (Bo et al., 2021). Η διατύπωση αυτή δείχνει ότι η παραγωγή και η διανομή πρέπει να εξετάζονται ως ενιαίο πρόβλημα λήψης αποφάσεων. Στα πραγματικά βιομηχανικά περιβάλλοντα, οι αποφάσεις αυτές περιλαμβάνουν δυναμικότητες εργοστασίων, διαθέσιμες μηχανές, ελάχιστες παρτίδες, χρόνους αλλαγής παραγωγής, αποθέματα, εξωτερικές αποθήκες, μεταφορικά κόστη και απαιτήσεις εξυπηρέτησης πελατών.

Η ολοκλήρωση παραγωγής και διανομής είναι ιδιαίτερα σημαντική όταν υπάρχουν πολλαπλά εργοστάσια. Ένα εργοστάσιο μπορεί να έχει χαμηλό παραγωγικό κόστος για συγκεκριμένη ομάδα προϊόντων, αλλά να βρίσκεται μακριά από σημαντικούς πελάτες. Αντίστροφα, ένα εργοστάσιο με υψηλότερο παραγωγικό κόστος μπορεί να οδηγήσει σε μικρότερο συνολικό κόστος αν βρίσκεται κοντά στη ζήτηση και μειώνει τις μεταφορικές δαπάνες. Συνεπώς, η βέλτιστη απόφαση δεν προκύπτει από την ελαχιστοποίηση του παραγωγικού κόστους ή του μεταφορικού κόστους μεμονωμένα, αλλά από τη συνολική αξιολόγηση του κόστους εξυπηρέτησης.

Στην κατεύθυνση αυτή, μοντέλα Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (Mixed Integer Linear Programming - MILP) έχουν χρησιμοποιηθεί για τον βέλτιστο σχεδιασμό και τη λειτουργία δικτύων παραγωγής και διανομής, περιλαμβάνοντας αποφάσεις για παραγωγική κατανομή, ροές προϊόντων, αξιοποίηση εργοστασίων, μεταφορές και χρηματοοικονομικούς παράγοντες (Tsiakis & Papageorgiou, 2008). Η σχετική βιβλιογραφία δείχνει ότι τα MILP μοντέλα είναι κατάλληλα για προβλήματα όπου συνυπάρχουν συνεχείς μεταβλητές, όπως ποσότητες παραγωγής και αποστολής, και δυαδικές μεταβλητές, όπως επιλογή εγκατάστασης ή ενεργοποίηση σύνδεσης.

Τα μοντέλα MILP χρησιμοποιούνται εκτενώς επειδή μπορούν να αποτυπώσουν ταυτόχρονα κόστη, περιορισμούς και αποφάσεις επιλογής. Για παράδειγμα, ένα μοντέλο μπορεί να αποφασίζει την ποσότητα που θα παραχθεί σε κάθε εργοστάσιο, την ποσότητα που θα σταλεί σε κάθε πελάτη, το αν μια σύνδεση εργοστασίου-πελάτη θα χρησιμοποιηθεί, καθώς και το αν μια μονάδα θα ενεργοποιηθεί ή όχι. Η δυνατότητα

αυτή είναι απαραίτητη σε προβλήματα παραγωγής και διανομής, όπου η λύση πρέπει να είναι όχι μόνο οικονομικά βέλτιστη αλλά και επιχειρησιακά εφαρμόσιμη.

Η ταυτόχρονη εξέταση παραγωγής και διανομής είναι ιδιαίτερα σημαντική και σε πολυεθνικά παραγωγικά δίκτυα. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η ανάλυση μπορεί να περιλαμβάνει επιπλέον διεθνείς παράγοντες, όπως συναλλαγματικές ισοτιμίες και δασμούς, χωρίς να αλλάζει η βασική μεθοδολογική αρχή: η παραγωγική και διανεμητική απόφαση πρέπει να λαμβάνονται ταυτόχρονα, διότι οι αλλαγές στη ζήτηση, στη δυναμικότητα ή στο κόστος μπορούν να μεταβάλουν το βέλτιστο μίγμα παραγωγής και διανομής (Bhutta et al., 2024).

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής, ο ολοκληρωμένος σχεδιασμός παραγωγής και διανομής αφορά την επιλογή του κατάλληλου εργοστασίου για την παραγωγή κάθε ομάδας προϊόντων και την επιλογή του εργοστασίου από το οποίο θα εξυπηρετείται κάθε πελάτης. Το πρόβλημα είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για βελτιστοποίηση, διότι ο αριθμός πιθανών συνδυασμών αυξάνεται σημαντικά όταν συνυπάρχουν πολλά εργοστάσια, πολλοί πελάτες και διαφορετικές ομάδες προϊόντων. Η εμπειρική λήψη αποφάσεων μπορεί να οδηγήσει σε λύσεις που φαίνονται λογικές τοπικά αλλά δεν είναι βέλτιστες για το συνολικό δίκτυο.

2.4 Βιομηχανία χαρτονιού και επιχειρησιακές προκλήσεις

Η βιομηχανία χαρτιού και χαρτονιού αποτελεί έναν από τους βασικούς κλάδους των δασικών βιομηχανιών και υποστηρίζει μεγάλο εύρος οικονομικών δραστηριοτήτων, από την παραγωγή έντυπου και ειδικού χαρτιού έως τη συσκευασία τροφίμων, φαρμακευτικών προϊόντων, καταναλωτικών αγαθών και προϊόντων ηλεκτρονικού εμπορίου. Ειδικά το κυματοειδές χαρτόνι έχει έντονο ρόλο στη μεταφορά και προστασία προϊόντων, καθώς στην Ευρώπη παράγονται περίπου 49 δισ. m² κυματοειδούς χαρτονιού ετησίως, πάνω από το 40% της κυματοειδούς συσκευασίας χρησιμοποιείται για τρόφιμα και το υλικό προστατεύει περισσότερο από το 75% των ευρωπαϊκών αγαθών (FEFCO, 2024).

Παρά τη σημασία του, ο κλάδος χαρακτηρίζεται από έντονη εξάρτηση από πρώτες ύλες, ενέργεια και κεφαλαιουχικό εξοπλισμό. Η παραγωγή χαρτιού και χαρτονιού είναι ενεργοβόρα και απαιτεί σημαντικές ποσότητες ινών, νερού, χημικών, ατμού και ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ οι επενδύσεις σε νέες γραμμές παραγωγής, μηχανές χαρτιού ή μονάδες επεξεργασίας έχουν υψηλό κόστος και μεγάλο χρονικό

ορίζοντα απόσβεσης (European Commission, n.d.). Το χαρακτηριστικό αυτό περιορίζει την ευελιξία των επιχειρήσεων, καθώς η δυναμικότητα και οι τεχνικές δυνατότητες κάθε εργοστασίου δεν μπορούν να μεταβληθούν άμεσα όταν αλλάζουν οι συνθήκες της αγοράς.

Μία από τις σημαντικότερες σύγχρονες προκλήσεις είναι η μεταβλητότητα της ζήτησης. Η ζήτηση για χαρτί επηρεάζεται αρνητικά από την ψηφιοποίηση και τη μείωση των έντυπων εφαρμογών, ενώ η ζήτηση για συσκευασία επηρεάζεται από την κατανάλωση, το ηλεκτρονικό εμπόριο και τη βιομηχανική δραστηριότητα. Στην Ευρώπη, η παραγωγή χαρτιού και χαρτονιού μειώθηκε κατά 12,8% το 2023, γεγονός που αποδόθηκε στο δυσμενές μακροοικονομικό περιβάλλον, στο destocking κατά μήκος της εφοδιαστικής αλυσίδας και στο υψηλό κόστος ενέργειας και μεταποίησης. Παράλληλα, η ζήτηση για χαρτιά και χαρτόνια συσκευασίας μειώθηκε κατά 12,2%, ενώ η παραγωγή containerboard, το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως σε κυματοειδή κιβώτια, μειώθηκε κατά 4,7% (Cepi, 2024a).

Η αστάθεια αυτή δημιουργεί ιδιαίτερη δυσκολία στον προγραμματισμό παραγωγής. Οι επιχειρήσεις πρέπει να αποφασίζουν ποιες μονάδες θα εξυπηρετούν ποιες αγορές, πώς θα κατανέμεται η παραγωγή μεταξύ εργοστασίων και πώς θα αξιοποιείται η διαθέσιμη δυναμικότητα χωρίς να δημιουργούνται υπερβολικά αποθέματα ή υψηλό κόστος μεταφοράς. Το πρόβλημα γίνεται πιο σύνθετο όταν υπάρχουν διαφορετικοί τύποι χαρτιού ή χαρτονιού, διαφορετικές τεχνικές προδιαγραφές προϊόντων, περιορισμοί μηχανών, ελάχιστες παρτίδες παραγωγής και χρόνοι αλλαγής παραγωγής. Επομένως, η βελτιστοποίηση δεν αφορά μόνο την ελαχιστοποίηση του κόστους, αλλά και την παραγωγική εφικτότητα της λύσης.

Η ενέργεια αποτελεί επίσης κρίσιμο παράγοντα ανταγωνιστικότητας και βιωσιμότητας. Η παραγωγή χαρτοπολτού και χαρτιού απαιτεί θερμική ενέργεια για διεργασίες όπως η πολτοποίηση, η ξήρανση και η ανάκτηση χημικών. Στις μονάδες χημικής πολτοποίησης, σημαντικό μέρος της θερμογόνου αξίας της κυτταρινικής πρώτης ύλης χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού και ηλεκτρικής ενέργειας, όμως συχνά απαιτείται και πρόσθετη ενέργεια από εξωτερικές πηγές (Hubbe, 2021). Σε επίπεδο κλιματικής πολιτικής, ο κλάδος ευθύνεται για λίγο λιγότερο από το 2% των βιομηχανικών εκπομπών CO₂ παγκοσμίως και απαιτούνται προσπάθειες μείωσης της έντασης εκπομπών μέσω ενεργειακής αποδοτικότητας, ηλεκτροποίησης θερμότητας και σταδιακής υποκατάστασης ορυκτών καυσίμων (IEA, 2023).

Η περιβαλλοντική διάσταση δεν περιορίζεται στις εκπομπές. Η παραγωγή χαρτιού συνδέεται με την κατανάλωση νερού και τη δημιουργία υγρών αποβλήτων, γεγονός που καθιστά την ολοκληρωμένη διαχείριση νερού και αποβλήτων σημαντικό μέρος της βιώσιμης λειτουργίας των μονάδων. Η μείωση της κατανάλωσης φρέσκου νερού, η επαναχρησιμοποίηση νερού και η κατάλληλη επεξεργασία των αποβλήτων μπορούν να βελτιώσουν τόσο την περιβαλλοντική επίδοση όσο και την επιχειρησιακή αποδοτικότητα, αλλά απαιτούν αξιολόγηση σε επίπεδο ολόκληρου του συστήματος και όχι μεμονωμένων διεργασιών (Boguniewicz-Zabłocka & Kłosok-Bazan, 2020).

Ταυτόχρονα, η βιομηχανία χαρτονιού βρίσκεται στο επίκεντρο της κυκλικής οικονομίας. Η υψηλή ανακυκλωσιμότητα του χαρτονιού αποτελεί πλεονέκτημα, αλλά δημιουργεί και νέες απαιτήσεις στη διαχείριση πρώτων υλών, καθώς η ποιότητα, η διαθεσιμότητα και το κόστος του ανακυκλωμένου χαρτιού μπορούν να μεταβληθούν σημαντικά. Στην ευρωπαϊκή αγορά, το 88% της κυματοειδούς συσκευασίας προέρχεται από ανακυκλωμένο περιεχόμενο, γεγονός που ενισχύει τη σημασία των ροών ανακυκλωμένης ίνας και της σταθερότητας στην προμήθεια υλικών (FEFCO, 2024). Η εξάρτηση από ανακυκλωμένες ίνες σημαίνει ότι οι διακυμάνσεις στη συλλογή, στην ποιότητα και στις τιμές των εισροών μπορούν να επηρεάσουν άμεσα το κόστος παραγωγής και τον προγραμματισμό των εργοστασίων.

Από πλευράς logistics, τα προϊόντα χαρτονιού εμφανίζουν συχνά μεγάλο όγκο σε σχέση με την αξία τους, κάτι που αυξάνει τη σημασία του μεταφορικού κόστους. Η μεταφορά άδειου όγκου, οι αποστάσεις μεταξύ εργοστασίων και πελατών, η αξιοποίηση φορτηγών και οι απαιτήσεις χρόνου παράδοσης επηρεάζουν άμεσα τη συνολική οικονομικότητα του δικτύου. Έτσι, ένα εργοστάσιο με χαμηλότερο μοναδιαίο κόστος παραγωγής δεν είναι απαραίτητα η βέλτιστη επιλογή αν βρίσκεται μακριά από τη ζήτηση ή αν δημιουργεί υψηλές μεταφορικές δαπάνες. Η σχέση παραγωγικού κόστους, μεταφορικού κόστους, τεχνικής συμβατότητας και επιπέδου εξυπηρέτησης αποτελεί βασικό trade-off για τις επιχειρήσεις του κλάδου.

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής, οι παραπάνω προκλήσεις καθιστούν αναγκαία την ανάλυση του δικτύου ως ολοκληρωμένου συστήματος παραγωγής και διανομής. Η εργασία δεν εξετάζει την κατασκευή νέων εργοστασίων, αλλά την καλύτερη αξιοποίηση ενός υφιστάμενου δικτύου με δεδομένες εγκαταστάσεις, διαφορετικές παραγωγικές δυνατότητες και μεταβλητές ροές προς πελάτες. Συνεπώς, η βελτιστοποίηση πρέπει να λαμβάνει υπόψη τη ζήτηση, την παραγωγική

συμβατότητα, τη δυναμικότητα, το μεταφορικό κόστος, την πλήρη κάλυψη των πελατών και την επιχειρησιακή εφαρμοσιμότητα των προτεινόμενων αναθέσεων.

2.5 Μοντελοποίηση Κόστους

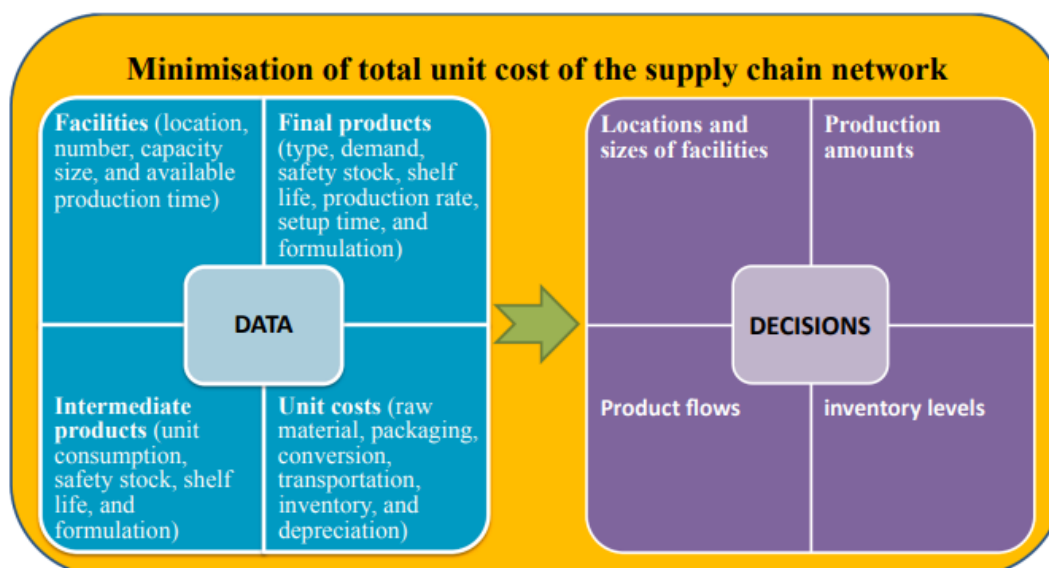
Η ακριβής μοντελοποίηση του κόστους αποτελεί κρίσιμο στάδιο στη βελτιστοποίηση δικτύων παραγωγής και διανομής, καθώς μετατρέπει τα λογιστικά και επιχειρησιακά δεδομένα σε ποσοτικές παραμέτρους απόφασης. Σε ένα μοντέλο βελτιστοποίησης εφοδιαστικής αλυσίδας, το κόστος δεν αντιμετωπίζεται απλώς ως λογιστικό αποτέλεσμα, αλλά ως βασικός μηχανισμός καθοδήγησης της βέλτιστης λύσης. Μέσω της κοστολόγησης, το μοντέλο μπορεί να συγκρίνει εναλλακτικές επιλογές παραγωγής και διανομής και να προσδιορίσει τη λύση που ελαχιστοποιεί το συνολικό λειτουργικό κόστος, υπό τους περιορισμούς ζήτησης, δυναμικότητας και παραγωγικής καταλληλότητας.

Στη βιβλιογραφία του σχεδιασμού δικτύων εφοδιαστικής αλυσίδας (Supply Chain Network Design), η αντικειμενική συνάρτηση των μοντέλων βελτιστοποίησης εκφράζεται συχνά ως ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους του δικτύου. Το κόστος αυτό μπορεί να περιλαμβάνει κόστη εγκαταστάσεων, κόστη παραγωγής, κόστη μεταφοράς, κόστη αποθεμάτων, κόστη τροφοδοσίας/ανάθεσης και λοιπά λειτουργικά κόστη. Σε εργαλεία όπως το Supply Chain Guru, οι βασικές κατηγορίες κόστους μπορούν να περιλαμβάνουν κόστη εγκαταστάσεων (site costs), κόστη παραγωγής (production costs), κόστη αποθεμάτων (inventory costs), κόστη μεταφοράς (transportation costs) και κόστη ανάθεσης (sourcing costs). Επομένως, στα μοντέλα παραγωγής και διανομής η βελτιστοποίηση βασίζεται στη συνολική αποτίμηση του κόστους του δικτύου και όχι στην απομονωμένη ελαχιστοποίηση μίας μόνο κατηγορίας κόστους (Tonanont et al., 2010; Tsiakis & Papageorgiou, 2008).

Η παραγωγή και η διανομή πρέπει να εξετάζονται συνδυαστικά, καθώς η οικονομικά βέλτιστη λύση δεν προκύπτει απαραίτητα από την επιλογή του εργοστασίου με το χαμηλότερο μοναδιαίο κόστος παραγωγής. Η τελική απόφαση εξαρτάται από το άθροισμα του παραγωγικού και του μεταφορικού κόστους, καθώς και από τους περιορισμούς του δικτύου. Επομένως, η μοντελοποίηση κόστους επιτρέπει τη συνολική αξιολόγηση κάθε πιθανής ανάθεσης παραγωγής και εξυπηρέτησης πελατών.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, το συνολικό κόστος διαμορφώνεται από τρεις βασικές κατηγορίες: το κόστος παραγωγής, το κόστος μεταφοράς και τα σταθερά κόστη λειτουργίας των εγκαταστάσεων. Η βασική λογική της αντικειμενικής συνάρτησης μπορεί να αποτυπωθεί ως εξής:

$$\text{Συνολικό Κόστος} = \text{Κόστος Παραγωγής} + \text{Κόστος Μεταφοράς} + \text{Σταθερά Κόστη}$$



Σχήμα 2.1: Σύνδεση δεδομένων εισόδου και αποφάσεων σε πρόβλημα βελτιστοποίησης δικτύου εφοδιαστικής αλυσίδας

Πηγή: Liu et al. (2020)

Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1, η βελτιστοποίηση ενός δικτύου εφοδιαστικής αλυσίδας βασίζεται στη σύνδεση δεδομένων εισόδου, όπως εγκαταστάσεις, προϊόντα, ζήτηση, διαθέσιμος παραγωγικός χρόνος και μοναδιαία κόστη, με αποφάσεις που αφορούν τις τοποθεσίες και τα μεγέθη εγκαταστάσεων, τις ποσότητες παραγωγής, τις ροές προϊόντων και τα επίπεδα αποθεμάτων. Η λογική αυτή είναι άμεσα σχετική με την παρούσα εργασία, καθώς το μοντέλο χρησιμοποιεί δεδομένα κόστους, ζήτησης και παραγωγικής δυναμικότητας για να προσδιορίσει τη βέλτιστη ανάθεση παραγωγής και διανομής στα διαθέσιμα εργοστάσια (Liu et al., 2020).

Η παραπάνω λογική προσαρμόζεται στην παρούσα εργασία, καθώς το πρόβλημα δεν αφορά τη δημιουργία νέων εγκαταστάσεων, αλλά τη βέλτιστη αξιοποίηση των υφιστάμενων εργοστασίων. Επομένως, η ανάλυση εστιάζει στη σύγκριση εναλλακτικών αναθέσεων παραγωγής και διανομής, με στόχο τη μείωση του συνολικού κόστους και την πλήρη κάλυψη της ζήτησης.

Το κόστος παραγωγής αποτελεί μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους του μοντέλου, καθώς καθορίζει το οικονομικό πλεονέκτημα ή μειονέκτημα κάθε εργοστασίου για την παραγωγή συγκεκριμένων προϊόντων ή ομάδων προϊόντων. Σε ένα δίκτυο με πολλαπλά εργοστάσια, το κόστος παραγωγής μπορεί να διαφέρει σημαντικά από εγκατάσταση σε εγκατάσταση, λόγω διαφορών στον μηχανολογικό εξοπλισμό, στην παραγωγική αποδοτικότητα, στο εργατικό κόστος, στην κατανάλωση ενέργειας, στη συντήρηση και στον βαθμό αξιοποίησης της δυναμικότητας. Για τον λόγο αυτό, η ένταξη του κόστους παραγωγής στο μοντέλο πρέπει να γίνεται με τρόπο που να επιτρέπει τη σύγκριση μεταξύ εργοστασίων και ομάδων προϊόντων.

Στην παρούσα εργασία, το κόστος παραγωγής προσεγγίζεται του μοναδιαίου κόστους παραγωγής μηχανής (Machine Unit Rate). Η λογική του μοναδιαίου κόστους μηχανής βασίζεται στον υπολογισμό του κόστους λειτουργίας μιας μηχανής ή γραμμής παραγωγής για τη παραγωγή μιας μονάδας προϊόντος. Στο κόστος αυτό μπορούν να ενσωματωθούν εργοστασιακές δαπάνες, όπως η ηλεκτρική ενέργεια, το εργατικό κόστος, οι αποσβέσεις, η συντήρηση, τα αναλώσιμα, τα βοηθητικά υλικά και άλλα γενικά βιομηχανικά έξοδα. Με τον τρόπο αυτό, κάθε προϊόν κοστολογείται με βάση τον χρόνο που απαιτείται για την παραγωγή του σε συγκεκριμένη μηχανή ή γραμμή παραγωγής.

Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στη βιομηχανία χαρτονιού, επειδή τα προϊόντα μπορεί να απαιτούν διαφορετικό χρόνο επεξεργασίας, διαφορετικές μηχανές και διαφορετική παραγωγική διαδρομή. Εάν δύο ή περισσότερα εργοστάσια μπορούν να παράγουν την ίδια ομάδα προϊόντων, η σύγκριση πρέπει να γίνεται με βάση το πραγματικό κόστος ανά μονάδα προϊόντος ή ανά ώρα παραγωγικής λειτουργίας. Έτσι, τα προϊόντα καθίστανται συγκρίσιμα ως προς τον παραγωγικό χρόνο και το αντίστοιχο κόστος που δημιουργούν σε κάθε εργοστάσιο.

Η γενική μορφή υπολογισμού του κόστους παραγωγής μπορεί να αποτυπωθεί ως εξής:

$$\text{Κόστος Παραγωγής} = \text{Παραγόμενη Ποσότητα} \times \text{Μοναδιαίο Κόστος Παραγωγής}$$

Στο πλαίσιο της μοντελοποίησης, το κόστος παραγωγής εισάγεται ως παράμετρος ανά εργοστάσιο και ανά ομάδα προϊόντων. Αυτό επιτρέπει στο μοντέλο να αξιολογήσει ποιο εργοστάσιο είναι οικονομικά πιο αποδοτικό για την παραγωγή κάθε προϊόντος, λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη τους περιορισμούς δυναμικότητας και παραγωγικής καταλληλότητας. Τα μοντέλα παραγωγής και διανομής χρησιμοποιούν συχνά μοναδιαία κόστη παραγωγής ανά προϊόν και εγκατάσταση ως βασικές παραμέτρους της αντικειμενικής συνάρτησης (Tsiakis & Papageorgiou, 2008; Bhutta et al., 2024).

Το κόστος μεταφοράς και διανομής αποτελεί τη δεύτερη βασική κατηγορία κόστους στο μοντέλο. Περιλαμβάνει τις δαπάνες που σχετίζονται με τη μετακίνηση των προϊόντων από τα εργοστάσια προς τους πελάτες. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, το μεταφορικό κόστος έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς τα προϊόντα χαρτονιού χαρακτηρίζονται συχνά από μεγάλο όγκο σε σχέση με την αξία τους. Αυτό σημαίνει ότι η απόσταση και η γεωγραφική θέση των εργοστασίων επηρεάζουν σημαντικά το συνολικό κόστος εξυπηρέτησης.

Στη βιβλιογραφία, το κόστος μεταφοράς συνδέεται συνήθως με τις ροές προϊόντων μεταξύ των κόμβων του δικτύου. Το μεταφορικό κόστος μπορεί να μοντελοποιηθεί ως συνάρτηση της ποσότητας προϊόντος που μεταφέρεται από ένα σημείο προέλευσης προς έναν προορισμό. Στο Supply Chain Guru, τα κόστη μεταφοράς (transportation costs) μπορούν να αποτυπωθούν μέσω πολιτικών μεταφοράς (transportation policies) και να υπολογιστούν με βάση παραμέτρους όπως η απόσταση, η ποσότητα, ο όγκος, το βάρος και ο τύπος μεταφοράς, για παράδειγμα πλήρες φορτίο (full truckload - FTL) ή λιγότερο από πλήρες φορτίο (less-than-truckload - LTL). Η λογική αυτή είναι άμεσα σχετική με την παρούσα εργασία, καθώς το μοντέλο πρέπει να εκτιμήσει το κόστος μεταφοράς από κάθε εργοστάσιο προς κάθε πελάτη (Tsiakis & Papageorgiou, 2008; Tonanont et al., 2010).

Για τον υπολογισμό του κόστους διανομής, η παρούσα εργασία μπορεί να αξιοποιήσει Ανάλυση Παλινδρόμησης, δηλαδή Regression Analysis, σε ιστορικά δεδομένα δρομολογίων. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει τη στατιστική εκτίμηση του κόστους μεταφοράς με βάση μεταβλητές που επηρεάζουν το μεταφορικό κόστος, όπως η γεωγραφική απόσταση, ο όγκος ή το βάρος του φορτίου, ο αριθμός παλετών, η συχνότητα αποστολής και η περιοχή εξυπηρέτησης. Με αυτόν τον τρόπο, τα ιστορικά δεδομένα μετατρέπονται σε προβλεπτικά τιμολόγια ανά διαδρομή.

Τα αποτελέσματα της παλινδρόμησης μπορούν να αξιοποιηθούν για τη δημιουργία εξειδικευμένων τιμολογίων ανά διαδρομή (lane tariffs), τα οποία εκφράζουν το αναμενόμενο κόστος μεταφοράς από κάθε εργοστάσιο προς κάθε πελάτη ή γεωγραφική ζώνη. Η χρήση τους επιτρέπει στο μοντέλο να συγκρίνει τις εναλλακτικές συνδέσεις εργοστασίου-πελάτη με ενιαίο και τεκμηριωμένο τρόπο. Αντί να χρησιμοποιείται ένα γενικό μέσο κόστος μεταφοράς για όλες τις διαδρομές, κάθε πιθανή σύνδεση λαμβάνει το δικό της εκτιμώμενο κόστος, γεγονός που ενισχύει την ακρίβεια της ανάλυσης και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης.

Η γενική μορφή υπολογισμού του κόστους μεταφοράς μπορεί να αποτυπωθεί ως εξής:

$$\text{Κόστος Μεταφοράς} = \text{Αποστελλόμενη Ποσότητα} \times \text{Μεταφορικό Κόστος ανά Διαδρομή}$$

ή, όταν το κόστος εκτιμάται κυρίως βάσει απόστασης:

$$\text{Κόστος Μεταφοράς} = \text{Αποστελλόμενη Ποσότητα} \times \text{Απόσταση} \times \text{Κόστος ανά μονάδα απόστασης}$$

Στην πράξη, το μεταφορικό κόστος μπορεί να μην είναι πλήρως γραμμικό, καθώς μπορεί να επηρεάζεται από ελάχιστες χρεώσεις, ζώνες τιμολόγησης, πληρότητα φορτηγού, διαθέσιμη χωρητικότητα, τύπο οχήματος και συμφωνίες με μεταφορείς. Ωστόσο, για τις ανάγκες ενός μοντέλου βελτιστοποίησης δικτύου, η χρήση Lane Tariffs παρέχει μια ρεαλιστική και εφαρμόσιμη προσέγγιση, καθώς συμπυκνώνει την πολυπλοκότητα της μεταφορικής αγοράς σε μια παράμετρο κόστους ανά σύνδεση.

Τα σταθερά κόστη αποτελούν την τρίτη βασική κατηγορία κόστους στην παρούσα εργασία. Αφορούν δαπάνες που απαιτούνται για τη διατήρηση της λειτουργίας των υφιστάμενων εργοστασίων, ανεξάρτητα από τον ακριβή όγκο παραγωγής που ανατίθεται σε κάθε εργοστάσιο. Σε αντίθεση με το μεταβλητό κόστος παραγωγής και το κόστος μεταφοράς, τα σταθερά κόστη δεν αυξομειώνονται αναλογικά με τις παραγόμενες ή αποστελλόμενες ποσότητες. Τέτοια κόστη μπορεί να περιλαμβάνουν διοικητικά έξοδα, ασφάλειες, ενοίκια, αποσβέσεις εξοπλισμού, βασική συντήρηση εγκαταστάσεων, μόνιμο προσωπικό υποστήριξης και γενικά έξοδα λειτουργίας.

Στα μοντέλα σχεδιασμού δικτύου, τα σταθερά κόστη χρησιμοποιούνται συχνά για να αποτυπώσουν το κόστος διατήρησης ή ενεργοποίησης μιας εγκατάστασης. Τα κόστη εγκαταστάσεων (site costs) μπορούν να περιλαμβάνουν κόστη ανοίγματος ή

κλεισίματος εγκατάστασης, σταθερά λειτουργικά κόστη και κόστη χειρισμού. Αντίστοιχα, τα σταθερά κόστη υποδομής και εγκαταστάσεων μπορούν να ενσωματωθούν στη συνολική αντικειμενική συνάρτηση του δικτύου, ώστε η βελτιστοποίηση να λαμβάνει υπόψη όχι μόνο το μεταβλητό κόστος, αλλά και το κόστος διατήρησης των εγκαταστάσεων (Tonanont et al., 2010; Tsiakis & Papageorgiou, 2008).

Η γενική μορφή των σταθερών κοστών μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\text{Σταθερό Κόστος} = \text{Κόστος Λειτουργίας Εγκατάστασης} \times \text{Μεταβλητή Χρήσης Εγκατάστασης}$$

Όταν ένα εργοστάσιο θεωρείται υποχρεωτικά ενεργό, το σταθερό κόστος μπορεί να εισάγεται στο μοντέλο ως δεδομένο κόστος λειτουργίας. Όταν όμως εξετάζεται η πιθανότητα απενεργοποίησης ή μη χρήσης μιας εγκατάστασης, το σταθερό κόστος μπορεί να συνδεθεί με δυαδική μεταβλητή, η οποία λαμβάνει τιμή 1 εάν το εργοστάσιο χρησιμοποιείται και 0 εάν δεν χρησιμοποιείται. Με αυτόν τον τρόπο, το μοντέλο μπορεί να αξιολογήσει εάν η εξοικονόμηση σταθερού κόστους από τη μη χρήση μιας εγκατάστασης αντισταθμίζει την πιθανή αύξηση του κόστους παραγωγής και μεταφοράς που θα προκύψει από την εξυπηρέτηση της ζήτησης μέσω άλλων εργοστασίων.

Στην περίπτωση της παρούσας εργασίας, όπου το δίκτυο αποτελείται από υφιστάμενα εργοστάσια, τα σταθερά κόστη δεν συνδέονται με επενδύσεις νέων εγκαταστάσεων, αλλά με τη διατήρηση της λειτουργίας των υπαρχόντων παραγωγικών μονάδων. Επομένως, η ένταξή τους στο μοντέλο επιτρέπει μια πιο ρεαλιστική αξιολόγηση του συνολικού κόστους λειτουργίας του δικτύου.

Η ουσία της μοντελοποίησης κόστους στην παρούσα εργασία βρίσκεται στη συνδυαστική αξιολόγηση του κόστους παραγωγής και του κόστους μεταφοράς. Η βέλτιστη ανάθεση παραγωγής δεν μπορεί να βασιστεί μόνο στο ποιο εργοστάσιο παράγει φθηνότερα, αλλά πρέπει να λαμβάνει υπόψη και το πόσο κοστίζει η διανομή του προϊόντος από το συγκεκριμένο εργοστάσιο προς τους πελάτες. Για κάθε πιθανό συνδυασμό εργοστασίου, πελάτη και ομάδας προϊόντων, το μοντέλο πρέπει να αξιολογεί το συνολικό κόστος εξυπηρέτησης:

$$\text{Κόστος Εξυπηρέτησης} = \text{Κόστος Παραγωγής στο Εργοστάσιο} + \text{Κόστος Μεταφοράς προς τον Πελάτη}$$

Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει στο μοντέλο να εντοπίζει περιπτώσεις όπου ένα εργοστάσιο με υψηλότερο παραγωγικό κόστος είναι τελικά πιο αποδοτικό λόγω χαμηλότερου μεταφορικού κόστους. Αντίστοιχα, επιτρέπει τον εντοπισμό περιπτώσεων όπου ένα εργοστάσιο με χαμηλό παραγωγικό κόστος δεν είναι συνολικά συμφέρον, επειδή δημιουργεί υψηλές μεταφορικές δαπάνες. Η συνδυαστική αυτή λογική συμφωνεί με τη βιβλιογραφία των ολοκληρωμένων μοντέλων παραγωγής και διανομής (integrated production–distribution models), όπου οι αποφάσεις που πρέπει να προσδιοριστούν περιλαμβάνουν το μίγμα προϊόντων ανά παραγωγική μονάδα, τις ποσότητες παραγωγής, τον βαθμό αξιοποίησης των εργοστασίων, τις μεταφορικές συνδέσεις και τις ροές προϊόντων μεταξύ των κόμβων του δικτύου (Tsiakis & Papageorgiou, 2008; Bhutta et al., 2024).

Η μοντελοποίηση κόστους αποτελεί επίσης απαραίτητη προϋπόθεση για τη χρήση του Supply Chain Guru ως εργαλείου βελτιστοποίησης. Το Supply Chain Guru δεν λειτουργεί μόνο ως εργαλείο απεικόνισης του δικτύου, αλλά ως περιβάλλον στο οποίο οι κόμβοι, οι ροές, οι περιορισμοί και τα κόστη μετατρέπονται σε μαθηματικό πρόβλημα βελτιστοποίησης. Τα δεδομένα κόστους συνδέονται με βασικά στοιχεία του μοντέλου, όπως οι εγκαταστάσεις/κόμβοι δικτύου (sites), τα προϊόντα (products), τα σημεία ζήτησης (demand points), οι πολιτικές τροφοδοσίας και ανάθεσης παραγωγής (sourcing policies) και οι πολιτικές μεταφοράς (transportation policies). Τα παραγωγικά κόστη συνδέονται με τα εργοστάσια και τις ομάδες προϊόντων, ενώ τα μεταφορικά κόστη συνδέονται με τις επιτρεπόμενες διαδρομές μεταξύ εργοστασίων και πελατών. Τα σταθερά λειτουργικά κόστη συνδέονται με τη λειτουργία των υφιστάμενων εγκαταστάσεων. Με αυτόν τον τρόπο, το εργαλείο μπορεί να αξιολογήσει διαφορετικές πολιτικές ανάθεσης παραγωγής και διανομής με βάση το συνολικό κόστος.

Η ακρίβεια της μοντελοποίησης κόστους επηρεάζει άμεσα την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Εάν το κόστος παραγωγής υποεκτιμηθεί ή το κόστος μεταφοράς δεν αποτυπωθεί σωστά, το μοντέλο μπορεί να προτείνει λύσεις που είναι μαθηματικά βέλτιστες, αλλά επιχειρησιακά μη ρεαλιστικές. Αντίθετα, όταν τα κόστη υπολογίζονται με συνέπεια και βασίζονται σε πραγματικά δεδομένα, το Supply Chain Guru μπορεί να υποστηρίξει τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων σχετικά με την ανάθεση παραγωγής, την εξυπηρέτηση πελατών και την αξιοποίηση των εργοστασίων.

Συνολικά, η μοντελοποίηση κόστους έχει άμεση σχέση με το κεντρικό ερευνητικό ερώτημα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, δηλαδή ποια ανάθεση παραγωγής στα διαθέσιμα εργοστάσια οδηγεί στην ελαχιστοποίηση του συνολικού λειτουργικού κόστους παραγωγής και διανομής, διατηρώντας παράλληλα την πλήρη εξυπηρέτηση της ζήτησης των πελατών. Το κόστος παραγωγής επιτρέπει τη σύγκριση των εργοστασίων ως προς την αποδοτικότητα παραγωγής κάθε ομάδας προϊόντων. Το κόστος μεταφοράς επιτρέπει την αξιολόγηση της οικονομικότητας κάθε διαδρομής από εργοστάσιο προς πελάτη. Τα σταθερά λειτουργικά κόστη επιτρέπουν την αποτύπωση του κόστους λειτουργίας των εγκαταστάσεων στο δίκτυο, χωρίς η εργασία να εξετάζει αποφάσεις ανοίγματος ή κλεισίματος εργοστασίων. Ο συνδυασμός αυτών των κατηγοριών οδηγεί σε μια ολοκληρωμένη αποτύπωση του κόστους εξυπηρέτησης.

Επομένως, η μοντελοποίηση κόστους δεν αποτελεί απλώς προπαρασκευαστικό στάδιο της ανάλυσης, αλλά τον πυρήνα της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Μέσω αυτής, η εργασία μετατρέπει τα επιχειρησιακά δεδομένα της εταιρείας σε δομημένο μοντέλο απόφασης, ικανό να συγκρίνει εναλλακτικά σενάρια και να προτείνει τη βέλτιστη κατανομή παραγωγής και διανομής. Με αυτόν τον τρόπο, το κόστος λειτουργεί ως το βασικό κριτήριο αξιολόγησης των σεναρίων και ως το μέσο σύνδεσης της θεωρητικής μοντελοποίησης με την πρακτική επιχειρησιακή απόφαση.

2.6 Ψηφιακά εργαλεία βελτιστοποίησης και Supply Chain Guru

Η αυξανόμενη πολυπλοκότητα των εφοδιαστικών αλυσίδων έχει ενισχύσει τη χρήση ψηφιακών εργαλείων μοντελοποίησης, προσομοίωσης και βελτιστοποίησης. Σε δίκτυα με πολλά εργοστάσια, πελάτες, προϊόντα, περιορισμούς δυναμικότητας και εναλλακτικές διαδρομές, η χειροκίνητη αξιολόγηση σεναρίων είναι περιορισμένη. Τα ψηφιακά εργαλεία επιτρέπουν την αναπαράσταση του πραγματικού δικτύου, την εισαγωγή δεδομένων κόστους και ζήτησης, τη σύγκριση εναλλακτικών σεναρίων και την εξαγωγή ποσοτικών αποτελεσμάτων για τη λήψη αποφάσεων.

Το Supply Chain Guru αποτελεί εξειδικευμένο εργαλείο σχεδιασμού και βελτιστοποίησης εφοδιαστικών δικτύων. Η δομή ενός μοντέλου στο Supply Chain Guru περιλαμβάνει βασικά στοιχεία όπως προϊόντα, κόμβους ή εγκαταστάσεις, ζήτηση, sourcing policies, transportation policies και inventory policies (Tonanont et al., 2010). Τα προϊόντα αντιπροσωπεύουν τις κατηγορίες που παράγονται και διακινούνται, οι εγκαταστάσεις αποτυπώνουν τους κόμβους του δικτύου, η ζήτηση εκφράζει τις

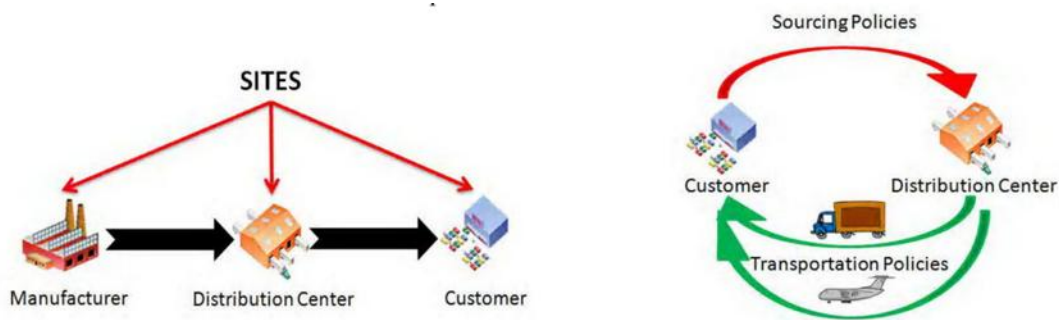
απαιτήσεις των πελατών και οι πολιτικές τροφοδοσίας και μεταφοράς καθορίζουν τις επιτρεπόμενες ροές.

PERIOD	CUSTOMER	PRODUCT	MODE	QUANTITY	MINIMUM QUANTITY	UNIT PENALTY COST	SERIES OFFSET T
(Horizon)	Cust185_89_PL	Diccut	null	4755820 (EA)	null	null	0 (DAY)
(Horizon)	Cust185_89_PL	Inliner	null	3829247 (EA)	null	null	0 (DAY)
(Horizon)	Cust185_89_PL	Sheet	null	2543910 (EA)	null	null	0 (DAY)
(Horizon)	Cust301_7_PL	Diccut	null	6332544 (EA)	null	null	0 (DAY)
(Horizon)	Cust301_7_PL	Inliner	null	3739908 (EA)	null	null	0 (DAY)
(Horizon)	Cust301_7_PL	Inliner	null	985722 (EA)	null	null	0 (DAY)
(Horizon)	Cust301_88_PL	Diccut	null	4367540 (EA)	null	null	0 (DAY)
(Horizon)	Cust301_88_PL	Inliner	null	1573520 (EA)	null	null	0 (DAY)
(Horizon)	Cust301_88_PL	Inliner	null	736588 (EA)	null	null	0 (DAY)
(Horizon)	Cust129_76_PL	Diccut	null	3009555 (EA)	null	null	0 (DAY)
(Horizon)	Cust129_76_PL	Inliner	null	123316 (EA)	null	null	0 (DAY)
(Horizon)	Cust185_171_PL	Sheet	null	1781115 (EA)	null	null	0 (DAY)
(Horizon)	Cust185_171_PL	Diccut	null	2018727 (EA)	null	null	0 (DAY)
(Horizon)	Cust185_171_PL	Inliner	null	1567789 (EA)	null	null	0 (DAY)
(Horizon)	Cust127_32_PL	Inliner	null	967564 (EA)	null	null	0 (DAY)
(Horizon)	Cust31_140_PL	Diccut	null	949621 (EA)	null	null	0 (DAY)
(Horizon)	Cust31_140_PL	Inliner	null	888090 (EA)	null	null	0 (DAY)
(Horizon)	Cust254_101_PL	Diccut	null	1754468 (EA)	null	null	0 (DAY)
(Horizon)	Cust254_101_PL	Inliner	null	978745 (EA)	null	null	0 (DAY)
(Horizon)	Cust254_101_PL	Sheet	null	439376 (EA)	null	null	0 (DAY)
(Horizon)	Cust301_40_PL	Diccut	null	222104 (EA)	null	null	0 (DAY)
(Horizon)	Cust301_40_PL	Inliner	null	1049886 (EA)	null	null	0 (DAY)
(Horizon)	Cust301_40_PL	Inliner	null	931050 (EA)	null	null	0 (DAY)

Σχήμα 2.2: Περιβάλλον Supply Chain Guru -SCG

Η αξία του Supply Chain Guru δεν περιορίζεται στην οπτική απεικόνιση του δικτύου. Το εργαλείο μπορεί να χρησιμοποιήσει τεχνικές βελτιστοποίησης, όπως MILP, με στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους υπό περιορισμούς sourcing, μεταφοράς, αποθεμάτων και δυναμικότητας. Η δυνατότητα αυτή το καθιστά κατάλληλο για προβλήματα όπως το εξεταζόμενο, όπου το ζητούμενο είναι η βέλτιστη ανάθεση παραγωγής και διανομής με βάση το συνολικό κόστος του δικτύου.

Η πρακτική σύνδεση της θεωρίας με το πρόγραμμα πραγματοποιείται μέσω της μετατροπής των επιχειρησιακών στοιχείων του δικτύου σε μαθηματικό μοντέλο γραμμικού ή μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού. Σε ένα τέτοιο μοντέλο, τα sites, οι πελάτες, τα προϊόντα, η ζήτηση, οι πολιτικές αποθεμάτων, οι πολιτικές παραγωγής, οι site sourcing policies, οι customer sourcing policies και οι transportation policies αποτελούν τα βασικά δεδομένα πάνω στα οποία στηρίζεται ο υπολογισμός της βέλτιστης διάταξης και λειτουργίας του δικτύου (Coupa, 2026).



Σχήμα 2.3: Δομή δικτύου εφοδιαστικής αλυσίδας και πολιτικές sourcing/transportation στο Supply Chain Guru

Πηγή: Tonanont et al. (2010)

Το σχήμα αποτυπώνει τον τρόπο με τον οποίο το Supply Chain Guru αντιμετωπίζει το δίκτυο ως σύνολο κόμβων και πολιτικών σύνδεσης. Οι κόμβοι αντιστοιχούν σε εργοστάσια, κέντρα διανομής και πελάτες, ενώ οι sourcing policies καθορίζουν ποια εγκατάσταση μπορεί να εξυπηρετήσει κάθε κόμβο ζήτησης και οι transportation policies προσδιορίζουν τις επιτρεπτές μεταφορικές συνδέσεις και το αντίστοιχο κόστος. Με αυτόν τον τρόπο, οι επιχειρησιακοί κανόνες μετατρέπονται σε περιορισμούς και επιτρεπτές ροές μέσα στο μαθηματικό μοντέλο.

Τα δεδομένα αυτά μεταφράζονται από το εργαλείο σε τρία βασικά στοιχεία μαθηματικής βελτιστοποίησης: μεταβλητές απόφασης, αντικειμενική συνάρτηση και περιορισμούς. Οι μεταβλητές απόφασης εκφράζουν τις ποσότητες που πρέπει να προσδιοριστούν από το μοντέλο, όπως πόσες μονάδες ενός προϊόντος θα παραχθούν σε κάθε εγκατάσταση ή πόσες μονάδες θα αποσταλούν από έναν κόμβο σε έναν άλλο. Η αντικειμενική συνάρτηση αποτυπώνει τον στόχο του μοντέλου, όπως την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους ή τη μεγιστοποίηση του κέρδους, ενώ οι περιορισμοί διασφαλίζουν ότι η λύση είναι εφικτή, λαμβάνοντας υπόψη όρια παραγωγής, λογικούς περιορισμούς, περιορισμούς μεταφοράς, περιορισμούς αποθεμάτων και επιχειρησιακές πολιτικές (Coupa, 2026).

Σε υπολογιστικό επίπεδο, η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί οργανώνονται σε μορφή πίνακα, όπου κάθε μεταβλητή απόφασης αντιστοιχεί σε μία στήλη και κάθε περιορισμός σε μία γραμμή. Όσο αυξάνεται ο αριθμός των μεταβλητών, των περιορισμών και ιδιαίτερα των ακέραιων ή δυαδικών μεταβλητών, τόσο αυξάνεται και ο χρόνος επίλυσης του μοντέλου. Οι δυαδικές αποφάσεις, όπως η επιλογή ή μη

επιλογή μιας εγκατάστασης, η εφαρμογή single-sourcing πολιτικής ή η επιλογή συγκεκριμένων συνδέσεων στο δίκτυο, απαιτούν μικτό ακέραιο γραμμικό προγραμματισμό και δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν με απλή συνεχή γραμμική προσέγγιση χωρίς απώλεια ακρίβειας (Coupa, 2026).

Για την επίλυση τέτοιων μοντέλων, το περιβάλλον network optimization μπορεί να αξιοποιήσει διαφορετικές μεθόδους, όπως branch and bound, linear programming approximation και multi-phase site selection. Η μέθοδος branch and bound αποτελεί την κλασική προσέγγιση για προβλήματα με ακέραιες ή δυαδικές αποφάσεις, καθώς εξετάζει εναλλακτικούς κλάδους λύσεων και συγκρίνει το χάσμα μεταξύ της καλύτερης ακέραιας λύσης και του καλύτερου ορίου. Αντίθετα, οι προσεγγίσεις γραμμικής χαλάρωσης είναι ταχύτερες, αλλά μπορεί να μην αποτυπώνουν πλήρως αποφάσεις τύπου open/close ή άλλους ακέραιους περιορισμούς. Έτσι, η επιλογή μεθόδου επίλυσης επηρεάζεται από το μέγεθος του μοντέλου, τον αριθμό των περιορισμών και τη σημασία των δυαδικών αποφάσεων στο εκάστοτε πρόβλημα (Coupa, 2026).

Η ανάλυση σεναρίων αποτελεί ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα τέτοιων εργαλείων. Η επιχείρηση μπορεί να συγκρίνει την υφιστάμενη κατάσταση (baseline scenario) με εναλλακτικές πολιτικές λειτουργίας, όπως single sourcing, multi sourcing ή διαφορετικές αναθέσεις παραγωγής. Με αυτόν τον τρόπο, οι αποφάσεις μπορούν να ελεγχθούν ψηφιακά πριν εφαρμοστούν στο πραγματικό δίκτυο, μειώνοντας τον επιχειρησιακό κίνδυνο. Η σύγκριση δεν περιορίζεται στο συνολικό κόστος, αλλά μπορεί να περιλαμβάνει αλλαγές στις ροές, στη χρήση εργοστασίων, στην απόσταση μεταφοράς και στην πολυπλοκότητα εκτέλεσης.

Το Supply Chain Guru μπορεί να ενταχθεί σε συστήματα υποστήριξης αποφάσεων για τον σχεδιασμό βιώσιμων δικτύων, όπου αξιολογούνται οικονομικά και περιβαλλοντικά κριτήρια και εξετάζονται trade-offs μεταξύ διαφορετικών στόχων (Halim et al., 2019). Παρότι ο κλάδος της σχετικής εφαρμογής είναι διαφορετικός, η χρήση αυτή τεκμηριώνει τη χρησιμότητα του Supply Chain Guru ως εργαλείου δικτυακής βελτιστοποίησης και όχι απλής απεικόνισης.

Τα σύγχρονα εργαλεία βελτιστοποίησης μπορούν επίσης να υποστηρίξουν πολυκριτηριακή αξιολόγηση δικτύων, λαμβάνοντας υπόψη συνολικό κόστος, επίπεδο εξυπηρέτησης, εκπομπές άνθρακα και κινδύνους εφοδιαστικής αλυσίδας (Kong et al., 2024). Η προσέγγιση αυτή είναι χρήσιμη για την παρούσα εργασία, επειδή δείχνει ότι

η σύγκριση εναλλακτικών σεναρίων μπορεί να πραγματοποιηθεί σε πραγματικό επιχειρησιακό περιβάλλον με βάση περισσότερα από ένα κριτήρια απόδοσης.

Το Coupa Supply Chain Guru X έχει επίσης αξιοποιηθεί σε πρόβλημα δρομολόγησης με backhauls στον κλάδο λιανικής. Η εφαρμογή αυτή είναι περισσότερο λειτουργική σε σχέση με την παρούσα εργασία, καθώς επικεντρώνεται στη δρομολόγηση οχημάτων. Παρόλα αυτά, ενισχύει τη βιβλιογραφική τεκμηρίωση ότι το εργαλείο μπορεί να αξιοποιηθεί σε πραγματικά δεδομένα για την αξιολόγηση κόστους μεταφοράς, χρήσης οχημάτων και περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Fugihara et al., 2026).

Στην παρούσα διπλωματική, το Supply Chain Guru χρησιμοποιείται ως βασικό περιβάλλον μοντελοποίησης και βελτιστοποίησης του δικτύου παραγωγής και διανομής. Τα εργοστάσια αποτυπώνονται ως παραγωγικοί κόμβοι, οι πελάτες ως σημεία ζήτησης, οι ομάδες προϊόντων ως προϊόντα του μοντέλου και οι επιτρεπόμενες ροές ως πολιτικές sourcing και transportation. Τα κόστη παραγωγής συνδέονται με εργοστάσια και ομάδες προϊόντων, ενώ τα μεταφορικά κόστη συνδέονται με διαδρομές εργοστασίου-πελάτη. Με βάση αυτά τα δεδομένα, το εργαλείο μπορεί να υπολογίσει τη βέλτιστη ανάθεση παραγωγής και διανομής που ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος, υπό τους περιορισμούς πλήρους κάλυψης ζήτησης και παραγωγικής καταλληλότητας.

2.7 Ερευνητικό κενό και συμβολή της παρούσας εργασίας

Η βιβλιογραφία παρέχει εκτενή τεκμηρίωση για τη διοίκηση εφοδιαστικής αλυσίδας, τον σχεδιασμό δικτύων, την ολοκληρωμένη παραγωγή και διανομή και τη χρήση μοντέλων MILP. Παράλληλα, υπάρχουν μελέτες που εφαρμόζουν εργαλεία όπως το Supply Chain Guru σε προβλήματα δικτυακής βελτιστοποίησης, βιωσιμότητας και ανάλυσης σεναρίων. Ωστόσο, μεγάλο μέρος της βιβλιογραφίας εστιάζει είτε σε γενικά μοντέλα σχεδιασμού δικτύου είτε σε προβλήματα που περιλαμβάνουν αποφάσεις χωροθέτησης νέων εγκαταστάσεων, αποθεμάτων ή δρομολόγησης οχημάτων.

Το ερευνητικό κενό της παρούσας εργασίας εντοπίζεται στην εφαρμογή ολοκληρωμένης βελτιστοποίησης παραγωγής και διανομής σε υφιστάμενο δίκτυο της βιομηχανίας χαρτονιού. Η εργασία δεν επιχειρεί να σχεδιάσει από την αρχή ένα νέο δίκτυο, αλλά να αναδιαμορφώσει τις αναθέσεις παραγωγής και εξυπηρέτησης ζήτησης σε υπάρχοντα εργοστάσια. Αυτή η διάσταση είναι ιδιαίτερα πρακτική για επιχειρήσεις

που διαθέτουν ήδη παραγωγικές εγκαταστάσεις και επιδιώκουν να μειώσουν το λειτουργικό κόστος χωρίς μεγάλες επενδύσεις σε νέες μονάδες.

Η συμβολή της εργασίας έγκειται στη σύνδεση πραγματικών επιχειρησιακών δεδομένων με μοντέλο βελτιστοποίησης που αξιολογεί ταυτόχρονα κόστος παραγωγής, κόστος μεταφοράς, παραγωγικές δυνατότητες, ζήτηση και πολιτικές ανάθεσης. Η εργασία επιδιώκει να δείξει ότι η βέλτιστη λύση δεν προκύπτει απαραίτητα από το φθηνότερο εργοστάσιο παραγωγής ούτε από το γεωγραφικά κοντινότερο εργοστάσιο προς τον πελάτη. Αντίθετα, προκύπτει από τη συνδυαστική αξιολόγηση του συνολικού κόστους εξυπηρέτησης.

Επιπλέον, η εργασία συμβάλλει πρακτικά με τη δημιουργία εναλλακτικών σεναρίων, όπως η υφιστάμενη κατάσταση, το single sourcing και πιο ευέλικτες βελτιστοποιημένες αναθέσεις. Η σύγκριση των σεναρίων επιτρέπει την εκτίμηση πιθανής εξοικονόμησης κόστους, την κατανόηση των αλλαγών στις ροές και την αξιολόγηση της επιχειρησιακής εφαρμοσιμότητας. Με αυτόν τον τρόπο, το μοντέλο δεν λειτουργεί μόνο ως μαθηματική άσκηση αλλά ως εργαλείο υποστήριξης διοικητικών αποφάσεων.

Συνολικά, η βιβλιογραφική ανασκόπηση τεκμηριώνει ότι η παρούσα εργασία τοποθετείται στη διασταύρωση τριών επιστημονικών πεδίων: του σχεδιασμού δικτύων εφοδιαστικής αλυσίδας, του ολοκληρωμένου προγραμματισμού παραγωγής και διανομής, καθώς και της ψηφιακής βελτιστοποίησης μέσω του λογισμικού Supply Chain Guru. Η εφαρμογή στη βιομηχανία χαρτονιού προσδίδει πρακτική αξία, καθώς ο κλάδος χαρακτηρίζεται από σημαντικό μεταφορικό κόστος, παραγωγικούς περιορισμούς και ανάγκη πλήρους και αξιόπιστης εξυπηρέτησης πελατών.

3. Ανάλυση και Περιγραφή Δεδομένων

Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει και αναλύει τα βασικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την αποτύπωση του υφιστάμενου δικτύου παραγωγής και διανομής της υπό μελέτη εταιρείας. Η ανάλυση προηγείται της μεθοδολογικής διατύπωσης και της υλοποίησης του μοντέλου βελτιστοποίησης, καθώς αποσαφηνίζει τη δομή του δικτύου, τις πηγές ζήτησης, τις οικογένειες προϊόντων, τις παραγωγικές δυνατότητες των εργοστασίων, καθώς και τα βασικά στοιχεία κόστους.

Σκοπός του κεφαλαίου δεν είναι η παρουσίαση αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης, αλλά η τεκμηριωμένη περιγραφή των δεδομένων εισόδου που διαμορφώνουν το πρόβλημα. Τα δεδομένα αυτά αποτελούν τη βάση για τη μετέπειτα ανάπτυξη του μοντέλου στο Supply Chain Guru και για τη σύγκριση εναλλακτικών σεναρίων ανάθεσης παραγωγής και εξυπηρέτησης πελατών.

3.1 Περιγραφή του υφιστάμενου δικτύου παραγωγής και διανομής

Το υπό μελέτη δίκτυο παραγωγής και διανομής περιλαμβάνει ένα σύνολο υφιστάμενων παραγωγικών εγκαταστάσεων, οι οποίες εξυπηρετούν πελάτες σε διαφορετικές γεωγραφικές αγορές της Κεντρικής και Ανατολικής Ευρώπης. Κάθε παραγωγική εγκατάσταση διαθέτει συγκεκριμένες παραγωγικές δυνατότητες και διαφορετικό κόστος παραγωγής ανά οικογένεια προϊόντων. Η ζήτηση των πελατών κατανέμεται σε τρεις βασικές οικογένειες προϊόντων, ενώ η εξυπηρέτηση πραγματοποιείται μέσω ροών από τα εργοστάσια προς τους αντίστοιχους κόμβους ζήτησης.

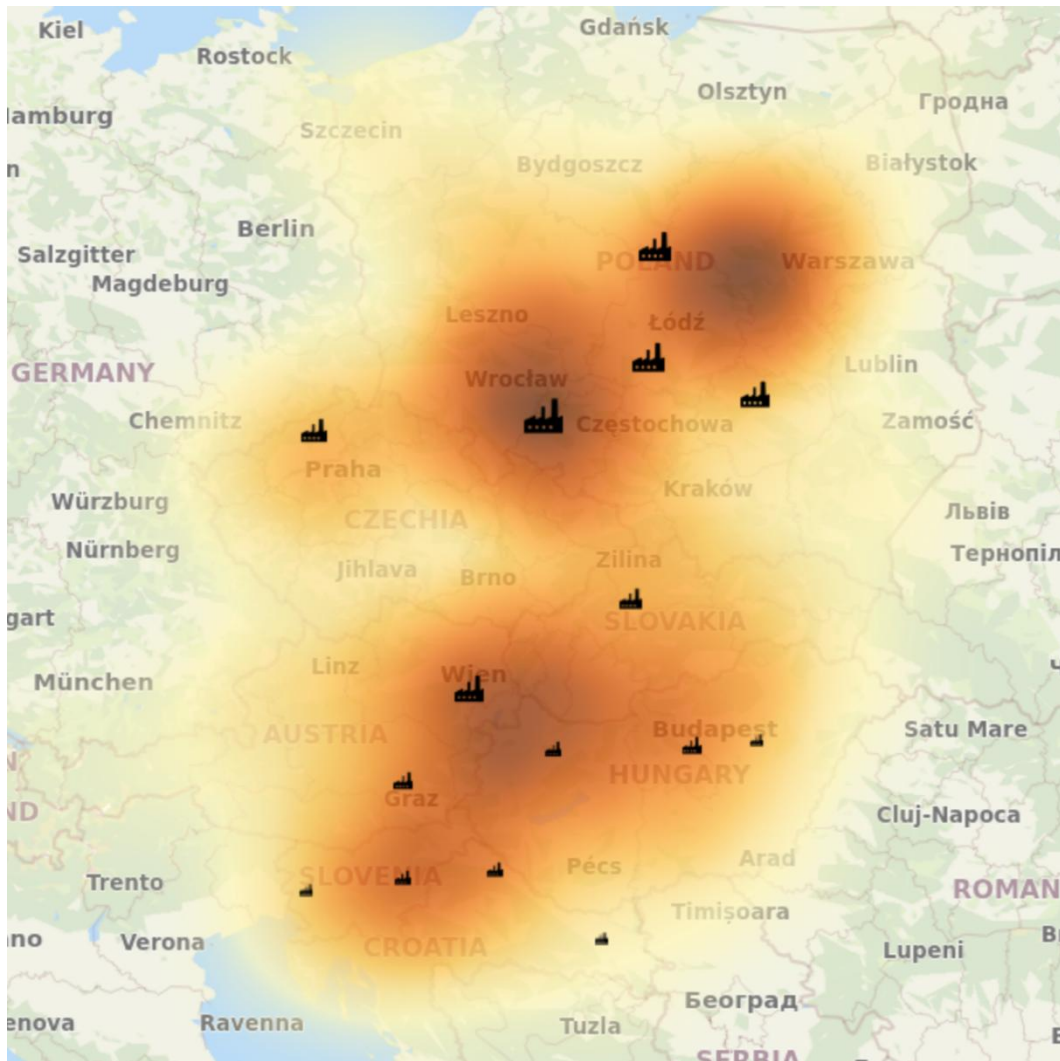
Η ανάλυση περιορίζεται αποκλειστικά σε υφιστάμενα εργοστάσια. Επομένως, το πρόβλημα δεν αφορά τη δημιουργία νέων εγκαταστάσεων ή την αλλαγή της φυσικής δομής του δικτύου, αλλά τη βέλτιστη αξιοποίηση του υπάρχοντος παραγωγικού συστήματος και του υφιστάμενου δικτύου διανομής. Η βασική επιχειρησιακή απόφαση αφορά το ποιο εργοστάσιο είναι καταλληλότερο να αναλάβει την παραγωγή κάθε οικογένειας προϊόντων και από ποιο εργοστάσιο θα εξυπηρετείται η ζήτηση κάθε πελάτη.

Η οικονομική αποδοτικότητα του δικτύου επηρεάζεται από τον συνδυασμό τριών βασικών παραμέτρων: του κόστους παραγωγής, του κόστους μεταφοράς και των σταθερών λειτουργικών εξόδων των εγκαταστάσεων. Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση της υφιστάμενης κατάστασης δεν μπορεί να βασιστεί μόνο στη γεωγραφική εγγύτητα ή μόνο στο παραγωγικό κόστος. Αντίθετα, απαιτείται συνδυαστική θεώρηση του συνολικού κόστους εξυπηρέτησης, ώστε να αποτυπωθούν οι πραγματικές επιπτώσεις κάθε ανάθεσης παραγωγής και διανομής.

Πίνακας 3.1: Συνοπτική αποτύπωση του υφιστάμενου δικτύου

Στοιχείο δικτύου	Περιγραφή
Παραγωγικές εγκαταστάσεις	15 υφιστάμενα εργοστάσια
Χώρες εγκαταστάσεων	• Αυστρία, • Τσεχία, • Πολωνία, • Ουγγαρία, • Κροατία, • Σλοβακία, • Σλοβενία
Οικογένειες προϊόντων	Diecut, Inliner, Sheet
Κόμβοι πελατών	595 κόμβοι πελατών
Κύριες κατηγορίες κόστους	Σταθερό κόστος, μοναδιαίο κόστος παραγωγής, κόστος μεταφοράς ανά km

Η γεωγραφική διάσταση του δικτύου είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς οι αποστάσεις μεταξύ εργοστασίων και πελατών επηρεάζουν άμεσα το κόστος μεταφοράς. Στην Εικόνα 3.1 παρουσιάζεται ενδεικτικά η γεωγραφική κατανομή της ζήτησης μέσω heatmap, σε συνδυασμό με τις τοποθεσίες των εργοστασίων.



Εικόνα 3.1: Heatmap ζήτησης και γεωγραφική θέση των παραγωγικών εγκαταστάσεων

Η Εικόνα 3.1 δείχνει ότι η ζήτηση συγκεντρώνεται κυρίως στην Κεντρική Ευρώπη, με έντονη συγκέντρωση γύρω από τις περιοχές του Λοτζ, της Βαρσοβίας, του Βρότσλαβ, της Βιέννης και της Λιουμπλιάνας. Οι πιο έντονες αποχρώσεις του heatmap υποδηλώνουν μεγαλύτερη συγκέντρωση ζήτησης, ενώ οι πιο ανοιχτές περιοχές αντιστοιχούν σε χαμηλότερη ζήτηση. Τα εργοστάσια απεικονίζονται με εικονίδια διαφορετικού μεγέθους, όπου τα μεγαλύτερα εικονίδια αντιστοιχούν σε εγκαταστάσεις μεγαλύτερης παραγωγικής δυναμικότητας. Η γεωγραφική συνύπαρξη περιοχών υψηλής ζήτησης και εργοστασίων διαφορετικής δυναμικότητας αναδεικνύει τη σημασία της βέλτιστης ανάθεσης παραγωγής, καθώς η οικονομικά αποδοτικότερη επιλογή δεν εξαρτάται μόνο από την απόσταση, αλλά και από το κόστος παραγωγής και τη διαθέσιμη δυναμικότητα κάθε εγκατάστασης.

Συνεπώς, η περιγραφή του υφιστάμενου δικτύου αποτελεί το πρώτο βήμα για τη διαμόρφωση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Τα δεδομένα των εγκαταστάσεων, των πελατών, των οικογενειών προϊόντων και των υφιστάμενων ροών θα χρησιμοποιηθούν στα επόμενα στάδια της εργασίας για την ανάπτυξη του μοντέλου στο Supply Chain Guru και την αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων ανάθεσης παραγωγής και εξυπηρέτησης πελατών.

3.2 Δεδομένα πελατών

Τα δεδομένα πελατών καθορίζουν τη γεωγραφική και ποσοτική διάσταση της ζήτησης. Κάθε κόμβος πελάτη περιγράφεται από έναν μοναδικό κωδικό, χώρα, γεωγραφικές συντεταγμένες και ποσότητες ζήτησης ανά οικογένεια προϊόντων. Η συγκεκριμένη δομή επιτρέπει την αποτύπωση της ζήτησης τόσο σε συγκεντρωτικό επίπεδο χώρας όσο και σε αναλυτικό επίπεδο πελάτη.

3.2.1 Κριτήρια επιλογής και αναπαράστασης πελατών

Η επιλογή των πελατών που συμπεριλήφθηκαν στο μοντέλο βασίστηκε στην ανάγκη δημιουργίας ενός αντιπροσωπευτικού και ταυτόχρονα υπολογιστικά διαχειρίσιμου δικτύου. Δεδομένου ότι το πλήθος των πελατών της εταιρείας είναι ιδιαίτερα μεγάλο, η ενσωμάτωση όλων των πελατών στο μοντέλο θα αύξανε σημαντικά την πολυπλοκότητα της ανάλυσης, χωρίς απαραίτητα να προσέθετε ανάλογη ερμηνευτική αξία στα αποτελέσματα.

Για τον λόγο αυτό, εφαρμόστηκε διαδικασία επιλογής των σημαντικότερων πελατών ανά χώρα, με βασικό κριτήριο τη συμμετοχή τους στη συνολική ζήτηση. Συγκεκριμένα, για κάθε χώρα οι πελάτες ταξινομήθηκαν κατά φθίνουσα σειρά βάσει του συνολικού όγκου ζήτησης και επιλέχθηκαν εκείνοι που αθροιστικά αντιπροσωπεύουν περίπου το 80% της συνολικής ζήτησης της χώρας. Με τον τρόπο αυτό, το μοντέλο επικεντρώνεται στους πελάτες με τη μεγαλύτερη επίδραση στις ροές παραγωγής και διανομής, διατηρώντας παράλληλα την αντιπροσωπευτικότητα του δικτύου.

Η προσέγγιση αυτή ακολουθεί τη λογική της ανάλυσης Pareto, σύμφωνα με την οποία ένα σχετικά μικρό ποσοστό πελατών μπορεί να αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής ζήτησης. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η επιλογή των πελατών που καλύπτουν το 80% της ζήτησης ανά χώρα επιτρέπει την εστίαση στις

σημαντικότερες εμπορικές και γεωγραφικές ροές, μειώνοντας ταυτόχρονα τον αριθμό των κόμβων που πρέπει να εισαχθούν στο μοντέλο βελτιστοποίησης.

Η ζήτηση των επιλεγμένων πελατών αναπαρίσταται σε επίπεδο κόμβων πελατών, ώστε να διατηρείται η βασική γεωγραφική και ποσοτική πληροφορία που απαιτείται για τον υπολογισμό των αποστάσεων, των μεταφορικών ροών και του κόστους εξυπηρέτησης. Η συγκεκριμένη αναπαράσταση είναι κατάλληλη για προβλήματα σχεδιασμού δικτύου, καθώς το ζητούμενο δεν είναι η προσομοίωση κάθε επιμέρους παραγγελίας, αλλά η ανάλυση των κύριων ροών ζήτησης και η αξιολόγηση εναλλακτικών αναθέσεων παραγωγής και διανομής.

3.2.2 Γεωγραφική κατανομή ζήτησης

Η ζήτηση των επιλεγμένων πελατών συγκεντρώνεται ανά χώρα και παρουσιάζει έντονη γεωγραφική διαφοροποίηση. Η ανάλυση βασίζεται στους πελάτες που επιλέχθηκαν σύμφωνα με το κριτήριο κάλυψης περίπου του 80% της συνολικής ζήτησης ανά χώρα. Με τον τρόπο αυτό, το δείγμα επικεντρώνεται στους σημαντικότερους κόμβους ζήτησης, διατηρώντας παράλληλα την αντιπροσωπευτικότητα της γεωγραφικής κατανομής του δικτύου.

Η μεγαλύτερη αγορά του δικτύου είναι η Πολωνία, η οποία συγκεντρώνει το υψηλότερο ποσοστό της συνολικής ζήτησης. Το γεγονός αυτό καθιστά ιδιαίτερα κρίσιμη την επιλογή των εργοστασίων που θα εξυπηρετούν τους πελάτες της πολωνικής αγοράς, καθώς ακόμη και μικρές μεταβολές στις παραγωγικές αναθέσεις ή στις ροές διανομής προς την Πολωνία μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά το συνολικό κόστος του δικτύου.

Πίνακας 3.2: Ζήτηση ανά χώρα πελάτη και οικογένεια προϊόντων

Χώρα	Diecut	Inliner	Sheet	Συνολική ζήτηση	Ποσοστό	Κόμβοι
ΠΟΛΩΝΙΑ (PL)	135.043.850	135.512.428	44.406.700	314.962.978	41,5%	144
ΟΥΓΓΑΡΙΑ (HU)	45.222.689	49.574.568	17.048.994	111.846.251	14,7%	84
ΑΥΣΤΡΙΑ (AT)	41.850.358	40.377.525	10.652.612	92.880.495	12,2%	105
ΤΣΕΧΙΑ (CZ)	31.729.562	32.865.386	16.417.805	81.012.753	10,7%	64
ΣΛΟΒΑΚΙΑ (SK)	22.996.168	23.483.765	10.137.127	56.617.060	7,5%	48

Χώρα	Diecut	Inliner	Sheet	Συνολική ζήτηση	Ποσοστό	Κόμβοι
ΣΛΟΒΕΝΙΑ (SI)	21.166.236	21.607.351	8.190.556	50.964.143	6,7%	81
ΚΡΟΑΤΙΑ (HR)	18.433.673	22.610.430	7.820.707	48.864.810	6,4%	69
Σύνολο	316.455.535	327.196.003	114.674.501	758.326.039	100,0%	595

Η Πολωνία αντιπροσωπεύει περίπου το 41,5% της συνολικής ζήτησης του δείγματος, ενώ ακολουθούν η Ουγγαρία, η Αυστρία και η Τσεχία. Η συγκέντρωση αυτή υποδηλώνει ότι οι αποφάσεις παραγωγικής ανάθεσης που αφορούν τις χώρες με τον μεγαλύτερο όγκο ζήτησης είναι πιθανό να έχουν δυσανάλογα μεγάλη επίδραση στο συνολικό κόστος του δικτύου. Επομένως, η γεωγραφική κατανομή της ζήτησης αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για τη μετέπειτα βελτιστοποίηση των ροών παραγωγής και διανομής.

3.2.3 Ζήτηση ανά οικογένεια προϊόντων

Η ζήτηση των πελατών κατανέμεται σε τρεις βασικές οικογένειες προϊόντων: Diecut, Inliner και Sheet. Η ομαδοποίηση αυτή δεν βασίζεται αποκλειστικά σε εμπορικά χαρακτηριστικά των προϊόντων, αλλά κυρίως στην παραγωγική διαδικασία που απαιτείται για την κατασκευή τους. Συγκεκριμένα, τα προϊόντα ταξινομήθηκαν σε ομάδες ανάλογα με τις μηχανές από τις οποίες πρέπει να περάσουν κατά την παραγωγή τους.

Η προσέγγιση αυτή κρίθηκε απαραίτητη για τη μοντελοποίηση του δικτύου, καθώς κάθε οικογένεια προϊόντων συνδέεται με διαφορετικές παραγωγικές απαιτήσεις, διαφορετικό κόστος παραγωγής και διαφορετικούς περιορισμούς δυναμικότητας ανά εργοστάσιο. Με αυτόν τον τρόπο, η ανάλυση δεν πραγματοποιείται σε επίπεδο μεμονωμένου κωδικού προϊόντος, αλλά σε επίπεδο ομάδας προϊόντων με κοινή παραγωγική λογική. Η επιλογή αυτή μειώνει την πολυπλοκότητα του μοντέλου και επιτρέπει την αποτελεσματικότερη αποτύπωση των παραγωγικών δυνατοτήτων στο Supply Chain Guru.

Συγκεκριμένα, η οικογένεια Diecut περιλαμβάνει προϊόντα που απαιτούν τη χρήση μηχανής diecut κατά την παραγωγική διαδικασία. Η οικογένεια Inliner περιλαμβάνει προϊόντα που παράγονται μέσω μηχανής Inliner, ενώ η οικογένεια Sheet αφορά προϊόντα που απαιτούν μόνο τη χρήση corrugator, χωρίς πρόσθετη επεξεργασία

σε μηχανές Diecut ή Inliner. Επομένως, κάθε οικογένεια προϊόντων αντιστοιχεί σε διαφορετική παραγωγική διαδρομή και, κατά συνέπεια, σε διαφορετικό κόστος και χρόνο παραγωγής.

Πίνακας 3.3: Παραγωγική διαδικασία ανά οικογένεια προϊόντος

Οικογένεια	Διαδικασία Παραγωγής	Δυναμικότητα
Diecut	Corrugator και μηχανή Diecut	Προϊόντα που απαιτούν πρόσθετη κατεργασία σε μηχανή diecut
Inliner	Corrugator και μηχανή Inliner	Προϊόντα που απαιτούν επεξεργασία σε μηχανή inliner
Sheet	Corrugator	Φύλλα χαρτονιού που παράγονται μόνο μέσω corrugator

Η διάκριση αυτή είναι ουσιώδης, διότι κάθε οικογένεια προϊόντων συνδέεται με διαφορετικό μοναδιαίο κόστος παραγωγής και με διαφορετικές απαιτήσεις δυναμικότητας ανά εργοστάσιο. Για παράδειγμα, ένα εργοστάσιο μπορεί να διαθέτει επαρκή δυναμικότητα ή χαμηλό κόστος για την παραγωγή προϊόντων Sheet, αλλά να μην είναι εξίσου αποδοτικό για προϊόντα Diecut ή Inliner, τα οποία απαιτούν πρόσθετη επεξεργασία από εξειδικευμένες μηχανές.

Πίνακας 3.4: Συνοπτικά στοιχεία ανά οικογένεια προϊόντων

Οικογένεια	Ζήτηση	Δυναμικότητα	Ελάχ. Κόστος ανά μονάδα	Μέσο κόστος ανα μονάδα	Μέγ. Κόστος ανα μονάδα	Εγκατ.
Diecut	316.455.53 5	335.083.03 3	0,1001	0,1138	0,1422	15
Inliner	327.196.00 3	348.270.77 6	0,0711	0,0925	0,1230	15
Sheet	114.674.50 1	121.008.08 2	0,0208	0,0243	0,0278	15

Οι οικογένειες Inliner και Diecut συγκεντρώνουν το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής ζήτησης. Συνεπώς, η βελτιστοποίηση της παραγωγής και της διανομής για τις δύο αυτές οικογένειες αναμένεται να επηρεάσει περισσότερο το συνολικό λειτουργικό κόστος σε σχέση με την οικογένεια Sheet, η οποία παρουσιάζει μικρότερο μερίδιο ζήτησης.

Παράλληλα, η διαφοροποίηση στο εύρος του μοναδιαίου κόστους μεταξύ των οικογενειών προϊόντων υποδηλώνει ότι η παραγωγική διαδικασία αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την τελική ανάθεση παραγωγής στα εργοστάσια. Επομένως, η ομαδοποίηση των προϊόντων σε Diecut, Inliner και Sheet αποτελεί βασικό βήμα για την αξιόπιστη αναπαράσταση του δικτύου παραγωγής και για τη μετέπειτα βελτιστοποίηση στο Supply Chain Guru.

3.2.4 Ανάλυση ζήτησης ανά βασικό πελάτη και κόμβο ζήτησης

Πριν από την αναλυτική εξέταση των επιμέρους κόμβων ζήτησης, κρίνεται σκόπιμη η παρουσίαση της ζήτησης σε επίπεδο βασικού πελάτη. Η διάκριση αυτή είναι σημαντική, καθώς ένας βασικός πελάτης μπορεί να αντιστοιχεί σε περισσότερους από έναν γεωγραφικούς κόμβους ζήτησης. Επομένως, η ανάλυση αποκλειστικά σε επίπεδο κόμβου δεν αποτυπώνει πάντα τη συνολική σημασία κάθε πελάτη για το δίκτυο.

Για τον λόγο αυτό, οι κόμβοι ζήτησης ομαδοποιήθηκαν με βάση τον βασικό πελάτη και υπολογίστηκε η συνολική ζήτηση ανά οικογένεια προϊόντων. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την αναγνώριση των πελατών με τη μεγαλύτερη συνολική συνεισφορά στη ζήτηση και παρέχει μία πιο ολοκληρωμένη εικόνα των εμπορικά σημαντικών ροών του δικτύου.

Πίνακας 3.5: Top 10 βασικοί πελάτες με βάση τη συνολική ζήτηση

	Βασικός πελάτης	Χώρες παρουσίας	Κόμβοι ζήτησης	Diecut	Inliner	Sheet	Συνολική ζήτηση	Ποσοστό
1	Cust185	CZ, HU, PL, SK	27	35.307.590	42.279.229	11.905.583	89.492.402	11,8%
2	Cust192	CZ, HU, PL	18	16.550.034	10.998.771	2.832.999	30.381.804	4,0%
3	Cust301	CZ, HU, PL	10	17.950.394	9.468.658	1.731.080	29.150.132	3,8%
4	Cust80	AT, HU, PL, SK	6	9.274.249	15.404.377	3.333.402	28.012.028	3,7%
5	Cust51	PL	9	8.390.163	6.497.535	4.883.101	19.770.799	2,6%
6	Cust303	PL, SK	4	9.696.954	4.578.011	1.625.200	15.900.165	2,1%

	Βασικός πελάτης	Χώρες παρουσίας	Κόμβοι ζήτησης	Diecut	Inliner	Sheet	Συνολική ζήτηση	Ποσοστό
7	Cust226	CZ, PL	3	4.261.557	8.929.400	2.072.357	15.263.314	2,0%
8	Cust239	HU, SK	8	5.193.015	8.357.932	367.377	13.918.324	1,8%
9	Cust168	HU, PL	6	6.065.310	3.064.381	3.477.671	12.607.362	1,7%
10	Cust130	AT, HU	4	2.819.052	5.597.770	2.735.054	11.151.876	1,5%

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι οι δέκα μεγαλύτεροι βασικοί πελάτες αντιπροσωπεύουν συνολική ζήτηση 265.648.206 τεμαχίων, δηλαδή περίπου 35,1% της συνολικής ζήτησης του δείγματος. Η συγκέντρωση αυτή δείχνει ότι ένα σχετικά περιορισμένο πλήθος πελατών επηρεάζει σημαντικά τις συνολικές ροές παραγωγής και διανομής του δικτύου.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η περίπτωση του Cust185, ο οποίος εμφανίζει τη μεγαλύτερη συνολική ζήτηση, με 89.492.402 τεμάχια, και παρουσία σε τέσσερις χώρες. Το γεγονός ότι ο συγκεκριμένος πελάτης αντιστοιχεί σε 27 κόμβους ζήτησης υποδηλώνει ότι η εξυπηρέτησή του δεν αποτελεί μεμονωμένη ροή, αλλά ένα εκτεταμένο σύνολο γεωγραφικά διασπαρμένων ροών. Συνεπώς, η ανάθεση παραγωγής για τον συγκεκριμένο πελάτη μπορεί να έχει σημαντική επίδραση τόσο στο παραγωγικό όσο και στο μεταφορικό κόστος.

Η ανάλυση σε επίπεδο βασικού πελάτη λειτουργεί συμπληρωματικά προς την ανάλυση ανά κόμβο ζήτησης. Ενώ η πρώτη αναδεικνύει τους εμπορικά σημαντικότερους πελάτες, η δεύτερη επιτρέπει την ακριβέστερη αποτύπωση της γεωγραφικής θέσης της ζήτησης. Για τη μοντελοποίηση στο Supply Chain Guru, η ανάλυση σε επίπεδο κόμβου παραμένει απαραίτητη, καθώς οι αποστάσεις, τα κόστη μεταφοράς και οι ροές εξυπηρέτησης υπολογίζονται σε γεωγραφικά συγκεκριμένα σημεία ζήτησης.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι μεγαλύτεροι επιμέρους κόμβοι ζήτησης, ώστε να αποτυπωθούν οι γεωγραφικές μονάδες με τη μεγαλύτερη επίδραση στο δίκτυο διανομής.

Πίνακας 3.6: Δέκα μεγαλύτεροι κόμβοι πελατών βάσει συνολικής ζήτησης

Κόμβος πελάτη	Χώρα	Diecut	Inliner	Sheet	Συνολική ζήτηση
Cust80_110_PL	PL	5.831.977	8.913.067	2.373.448	17.118.492
Cust226_46_PL	PL	4.147.762	8.072.442	2.072.357	14.292.561
Cust185_181_CZ	CZ	6.011.510	3.874.132	3.644.506	13.530.148
Cust303_107_PL	PL	6.956.481	3.101.713	1.625.200	11.683.394
Cust185_89_PL	PL	4.796.044	4.019.931	2.543.910	11.359.885
Cust301_7_PL	PL	6.332.544	4.725.630	0	11.058.174
Cust301_88_PL	PL	7.449.393	2.618.905	798.341	10.866.639
Cust185_114_PL	PL	2.426.177	6.933.053	40.639	9.399.869
Cust227_78_PL	PL	2.984.401	5.647.543	0	8.631.944
Cust185_321_SK	SK	2.911.765	4.979.548	595.812	8.487.125

Η παρουσία πολλών μεγάλων κόμβων στην Πολωνία επιβεβαιώνει τη σημασία της γεωγραφικής συγκέντρωσης της ζήτησης. Σε ένα τέτοιο περιβάλλον, η επιλογή εργοστασίου εξυπηρέτησης δεν μπορεί να βασίζεται μόνο στο χαμηλότερο παραγωγικό κόστος, αλλά πρέπει να λαμβάνει υπόψη τη συνολική επιβάρυνση που προκύπτει από τη μεταφορά.

3.3 Δεδομένα προϊόντων και παραγωγικής διαδικασίας

Τα προϊόντα της εταιρείας ομαδοποιούνται σε τρεις οικογένειες: Diecut, Inliner και Sheet. Η ομαδοποίηση αυτή επιτρέπει την απλούστερη και πιο λειτουργική αναπαράσταση του παραγωγικού συστήματος στο μοντέλο, καθώς η ανάλυση δεν πραγματοποιείται σε επίπεδο μεμονωμένου κωδικού προϊόντος, αλλά σε επίπεδο ομάδων με κοινά τεχνικά και παραγωγικά χαρακτηριστικά.

Στη βιομηχανία χαρτονιού, η παραγωγική διαδικασία περιλαμβάνει διαδοχικά στάδια επεξεργασίας, όπως παραγωγή ή διαμόρφωση κυματοειδούς χαρτονιού, κοπή, εκτύπωση, διαμόρφωση και τελική προετοιμασία του προϊόντος. Ανάλογα με τον τύπο του προϊόντος, απαιτούνται διαφορετικές μηχανές, διαφορετικοί χρόνοι παραγωγής και διαφορετική παραγωγική δυναμικότητα. Για τον λόγο αυτό, η αντιστοίχιση κάθε οικογένειας προϊόντων με τις δυνατότητες των εργοστασίων αποτελεί κρίσιμο δεδομένο για τη βελτιστοποίηση.

Η χρήση οικογενειών προϊόντων επιτρέπει τη σύγκριση εναλλακτικών παραγωγικών αναθέσεων με βάση το μοναδιαίο κόστος και την παραγωγική δυναμικότητα. Παράλληλα, μειώνει την πολυπλοκότητα του προβλήματος χωρίς να χάνεται η βασική επιχειρησιακή πληροφορία που απαιτείται για τη λήψη αποφάσεων.

3.4 Δεδομένα Διανομής και Παραγωγής

Το παραγωγικό δίκτυο περιλαμβάνει 15 εγκαταστάσεις σε επτά χώρες. Οι εγκαταστάσεις διαφέρουν ως προς τη γεωγραφική τους θέση, το ετήσιο σταθερό κόστος, το κόστος μεταφοράς ανά χιλιόμετρο, το μοναδιαίο κόστος παραγωγής και τη διαθέσιμη δυναμικότητα ανά οικογένεια προϊόντων. Οι διαφοροποιήσεις αυτές δημιουργούν το βασικό πεδίο λήψης αποφάσεων για το πρόβλημα ανάθεσης παραγωγής.

Πίνακας 3.7: Κατανομή παραγωγικών εγκαταστάσεων ανά χώρα

Χώρα	Αριθμός εγκαταστάσεων
Αυστρία (AT)	2
Τσεχία (CZ)	1
Κροατία (HR)	2
Ουγγαρία (HU)	3
Πολωνία (PL)	4
Σλοβενία (SI)	2
Σλοβακία (SK)	1
Σύνολο	15

Η Πολωνία διαθέτει τον μεγαλύτερο αριθμό εργοστασίων, γεγονός που είναι ιδιαίτερα σημαντικό λόγω της υψηλής ζήτησης που εμφανίζει η συγκεκριμένη αγορά. Αντίστοιχα, η Ουγγαρία διαθέτει τρεις εγκαταστάσεις, ενώ η Αυστρία, η Κροατία και η Σλοβενία διαθέτουν από δύο. Η Τσεχία και η Σλοβακία εκπροσωπούνται από μία εγκατάσταση.

3.4.1 Λειτουργικό Κόστος και Δεδομένα διανομής ανα εγκατάσταση

Κάθε εγκατάσταση επιβαρύνεται με ετήσιο σταθερό κόστος λειτουργίας, το οποίο δεν μεταβάλλεται άμεσα με τον παραγόμενο όγκο. Το κόστος αυτό συνδέεται με τη διατήρηση της εγκατάστασης σε λειτουργία και μπορεί να περιλαμβάνει διοικητικές

δαπάνες, συντήρηση, ασφάλειες και λοιπά λειτουργικά έξοδα. Επιπλέον, κάθε εγκατάσταση χαρακτηρίζεται από κόστος μεταφοράς ανά χιλιόμετρο, το οποίο χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του κόστους διανομής προς τους πελάτες.

Πίνακας 3.8: Βασικά στοιχεία παραγωγικών εγκαταστάσεων

Χώρα	Εγκατάσταση	Σταθερό κόστος	Κόστος/km
Αυστρία (AT)	AT1	599.760	2,05
	AT2	673.200	2,05
Τσεχία (CZ)	CZ1	612.000	1,64
Κροατία (HR)	HR1	360.400	1,41
	HR2	550.800	1,41
Ουγγαρία (HU)	HU1	387.600	1,59
	HU2	431.800	1,59
	HU3	550.800	1,59
Πολωνία (PL)	PL1	1.071.000	1,35
	PL2	673.200	1,35
	PL3	979.200	1,35
	PL4	795.600	1,35
Σλοβενία (SI)	SI1	476.000	1,87
	SI2	457.200	1,87
Σλοβακία (SK)	SK1	657.600	2,02
Σύνολο/Εύρος		9.276.160	1,35–2,05

Το συνολικό ετήσιο σταθερό κόστος των εγκαταστάσεων ανέρχεται σε 9.276.160. Το κόστος μεταφοράς ανά χιλιόμετρο κυμαίνεται από 1,35 έως 2,05, γεγονός που καταδεικνύει ότι η γεωγραφική θέση και η χώρα λειτουργίας του εργοστασίου επηρεάζουν τη συνολική οικονομική απόδοση του δικτύου.

Το κόστος μεταφοράς αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για τη μοντελοποίηση του δικτύου παραγωγής και διανομής, καθώς επηρεάζει άμεσα το συνολικό κόστος εξυπηρέτησης κάθε πελάτη. Για τον προσδιορισμό του μεταφορικού κόστους χρησιμοποιήθηκαν ιστορικά δεδομένα μεταφορών ανά χώρα, τα οποία περιλαμβάνουν την απόσταση κάθε αποστολής και το αντίστοιχο πραγματικό κόστος μεταφοράς.

Στόχος της ανάλυσης ήταν η εκτίμηση ενός αντιπροσωπευτικού συντελεστή κόστους ανά χιλιόμετρο για κάθε χώρα λειτουργίας εργοστασίου. Ο συντελεστής αυτός χρησιμοποιείται στη συνέχεια ως tariff στο Supply Chain Guru, ώστε το κόστος

μεταφοράς από κάθε εργοστάσιο προς κάθε πελάτη να υπολογίζεται με συνεπή και τεκμηριωμένο τρόπο.

Η εκτίμηση πραγματοποιήθηκε με γραμμική παλινδρόμηση της μορφής « $y = a x$ », χωρίς σταθερό όρο. Στην περίπτωση αυτή, η μεταβλητή y αντιστοιχεί στο κόστος μεταφοράς, η μεταβλητή x στην απόσταση σε χιλιόμετρα και ο συντελεστής a εκφράζει το κόστος μεταφοράς ανά χιλιόμετρο. Η επιλογή μοντέλου χωρίς σταθερό όρο έγινε επειδή το ζητούμενο της παρούσας ανάλυσης είναι η παραγωγή ενός μοναδιαίου συντελεστή κόστους/km, ο οποίος μπορεί να εφαρμοστεί απευθείας στους υπολογισμούς του SCG. Ο συντελεστής a προκύπτει από τα ιστορικά ζεύγη παρατηρήσεων απόστασης και κόστους και χρησιμοποιείται ως τελικό κόστος ανά χιλιόμετρο για τη χώρα του εργοστασίου. Με αυτόν τον τρόπο, η ανάλυση μετατρέπει τα δεδομένα πραγματικών δρομολογίων σε παράμετρο εισόδου του μοντέλου βελτιστοποίησης.

Πίνακας 3.9: Αποτελέσματα regression analysis ανά χώρα

Χώρα	Παρατηρήσεις	Εξίσωση $y = a x$	Κόστος / km	Μέγιστη απόσταση (km)
Αυστρία (AT)	5.606	$y = 2,0457x$	2,0457	1.617
Τσεχία (CZ)	5.755	$y = 1,6385x$	1,6385	699
Κροατία (HR)	3.322	$y = 1,4053x$	1,4053	443
Ουγγαρία (HU)	7.649	$y = 1,5919x$	1,5919	1.570
Πολωνία (PL)	27.148	$y = 1,3516x$	1,3516	1.520
Σλοβενία (SI)	951	$y = 1,8703x$	1,8703	1.165
Σλοβακία (SK)	1.154	$y = 2,0218x$	2,0218	321

Τα αποτελέσματα δείχνουν διαφοροποίηση του κόστους μεταφοράς ανά χώρα. Η Πολωνία εμφανίζει το χαμηλότερο κόστος ανά χιλιόμετρο, ενώ η Αυστρία και η

Σλοβακία εμφανίζουν υψηλότερες τιμές. Η διαφοροποίηση αυτή αποτυπώνει τις διαφορετικές συνθήκες της αγοράς μεταφορών, τις εμπορικές συμφωνίες και τα χαρακτηριστικά των δρομολογίων κάθε χώρας.

Στο μοντέλο, όλα τα εργοστάσια που βρίσκονται στην ίδια χώρα χρησιμοποιούν τον ίδιο συντελεστή μεταφορικού κόστους ανά χιλιόμετρο. Η παραδοχή αυτή είναι κατάλληλη για το επίπεδο ανάλυσης της παρούσας εργασίας, καθώς το ζητούμενο είναι η αξιολόγηση στρατηγικών και τακτικών αποφάσεων ανάθεσης παραγωγής και όχι η μικροπροσομοίωση κάθε μεμονωμένου δρομολογίου.

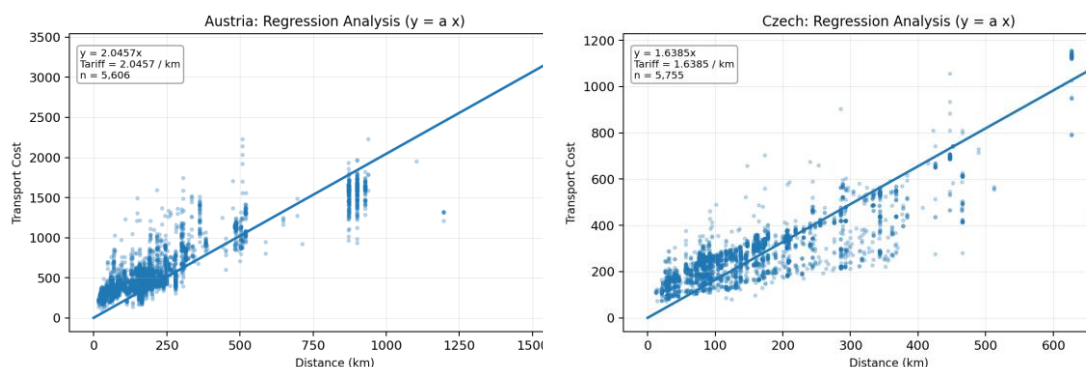
$$\text{Transportation Cost}(p,j) = \text{Distance}(p,j) \times \text{Tariff}(p)$$

όπου $\text{Distance}(p,j)$ είναι η απόσταση μεταξύ εργοστασίου p και πελάτη j , ενώ $\text{Tariff}(p)$ είναι ο συντελεστής κόστους ανά χιλιόμετρο της χώρας στην οποία ανήκει το εργοστάσιο p .

Με βάση την παραπάνω λογική, η τελική επιλογή εργοστασίου δεν καθορίζεται αποκλειστικά από το παραγωγικό κόστος, αλλά από το συνδυαστικό κόστος παραγωγής και μεταφοράς. Ένα εργοστάσιο με χαμηλό κόστος παραγωγής μπορεί να μην αποτελεί τη βέλτιστη επιλογή όταν βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από τον πελάτη ή όταν το μεταφορικό του κόστος ανά χιλιόμετρο είναι υψηλό. Αντίστοιχα, ένα εργοστάσιο με υψηλότερο κόστος παραγωγής μπορεί να είναι συνολικά ανταγωνιστικό όταν βρίσκεται γεωγραφικά κοντά στη ζήτηση.

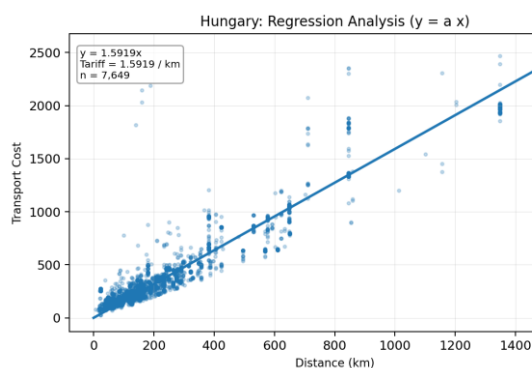
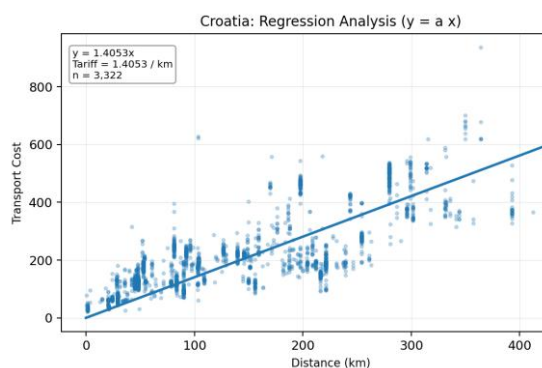
Διαγράμματα regression analysis ανά χώρα

Τα ακόλουθα διαγράμματα παρουσιάζουν τα ιστορικά δεδομένα μεταφοράς και την αντίστοιχη γραμμή παλινδρόμησης της μορφής « $y = a x$ ». Η κλίση της γραμμής αποτελεί το τελικό κόστος ανά χιλιόμετρο που χρησιμοποιείται στο μοντέλο.



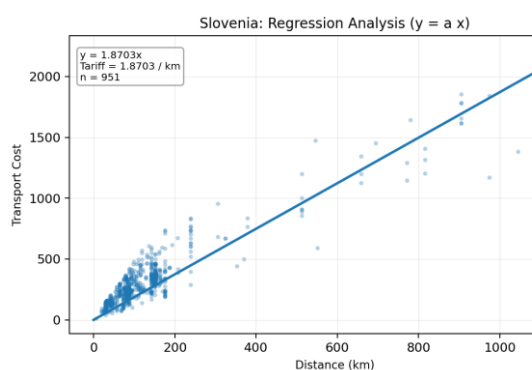
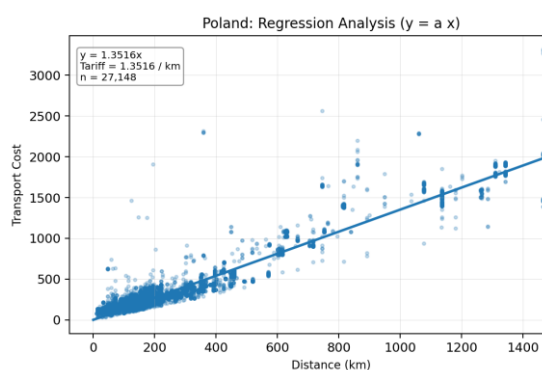
Σχήμα 3.1: Austria, $y = 2,0457x$

Σχήμα 3.2: Czech, $y = 1,6385x$



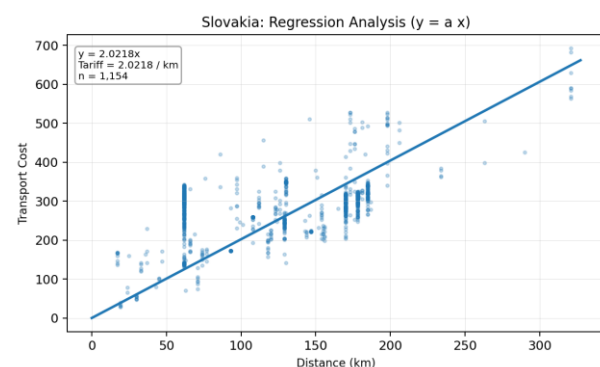
Σχήμα 3.3: Croatia, $y = 1,4053x$

Σχήμα 3.4: Hungary, $y = 1,5919x$



Σχήμα 3.5: Poland, $y = 1,3516x$

Σχήμα 3.6: Slovenia, $y = 1,8703x$



Σχήμα 3.7: Slovakia, $y = 2,0218x$

Συνολικά, η regression analysis τεκμηριώνει τους συντελεστές κόστους μεταφοράς που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο. Η χρήση της απλής σχέσης « $y = a x$ » επιτρέπει την άμεση ενσωμάτωση των tariffs στο Supply Chain Guru και τη συνεπή εκτίμηση του κόστους μεταφοράς για κάθε πιθανή ροή εργοστασίου–πελάτη.

3.4.2 Δεδομένα Παραγωγής ανά εγκατάσταση

Η παραγωγική δυναμικότητα και το μοναδιαίο κόστος παραγωγής αποτελούν δύο από τις σημαντικότερες παραμέτρους εισόδου του μοντέλου βελτιστοποίησης. Η παραγωγική δυναμικότητα καθορίζει τον μέγιστο όγκο παραγωγής που μπορεί να αναλάβει κάθε εγκατάσταση ανά οικογένεια προϊόντων, ενώ το μοναδιαίο κόστος παραγωγής επηρεάζει άμεσα την οικονομική ελκυστικότητα κάθε πιθανής ανάθεσης παραγωγής.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, τα δεδομένα παραγωγής οργανώνονται ανά εργοστάσιο και ανά οικογένεια προϊόντων, δηλαδή για τις κατηγορίες Diecut, Inliner και Sheet. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη σύγκριση των εγκαταστάσεων όχι μόνο σε συνολικό επίπεδο, αλλά και ως προς την αποδοτικότητά τους για κάθε επιμέρους παραγωγική διαδικασία. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς ένα εργοστάσιο μπορεί να εμφανίζει ανταγωνιστικό κόστος για μία οικογένεια προϊόντων, αλλά να είναι λιγότερο αποδοτικό για κάποια άλλη.

Το μοναδιαίο κόστος παραγωγής εκφράζεται ως κόστος ανά τεμάχιο και διαφοροποιείται μεταξύ των εργοστασίων λόγω διαφορών στον μηχανολογικό εξοπλισμό, στην παραγωγική αποδοτικότητα, στην κατανάλωση ενέργειας, στο εργατικό κόστος και στη γενικότερη λειτουργική δομή κάθε εγκατάστασης. Αντίστοιχα, η δυναμικότητα αποτυπώνει τους παραγωγικούς περιορισμούς που πρέπει να τηρούνται, ώστε οι λύσεις που προκύπτουν από το μοντέλο να είναι παραγωγικά εφικτές.

Πίνακας 3.10: Συνολική ζήτηση και διαθέσιμη δυναμικότητα ανά οικογένεια προϊόντων

Οικογένεια προϊόντων	Συνολική ζήτηση	Συνολική δυναμικότητα	Δυναμικότητα / Ζήτηση
Diecut	316.455.535	335.083.033	1,059
Inliner	327.196.003	348.270.776	1,064
Sheet	114.674.501	121.008.082	1,055

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.11, η συνολική διαθέσιμη δυναμικότητα υπερβαίνει τη συνολική ζήτηση και για τις τρεις οικογένειες προϊόντων. Ωστόσο, ο

δείκτης δυναμικότητας προς ζήτηση κυμαίνεται λίγο πάνω από τη μονάδα, γεγονός που υποδηλώνει ότι το δίκτυο διαθέτει περιορισμένο περιθώριο πλεονάζουσας δυναμικότητας. Επομένως, η κατανομή της παραγωγής πρέπει να λαμβάνει υπόψη τόσο το κόστος όσο και τους περιορισμούς δυναμικότητας κάθε εγκατάστασης.

Πίνακας 3.11: Παραγωγική δυναμικότητα ανά εργοστάσιο και οικογένεια προϊόντων

Χώρα	Εργοστάσιο	Βασική δυναμ. Diecut	Πλήρης δυναμ. Diecut	Βασική δυναμ. Inliner	Πλήρης δυναμ. Inliner	Βασική δυναμ. Sheet	Πλήρης δυναμ. Sheet
Αυστρία	AT1	23.663.91 7	23.663.91 7	20.349.85 2	20.349.85 2	6.128.436	6.128.436
	AT2	29.432.58 5	29.432.58 5	31.270.76 7	31.270.76 7	6.999.208	6.999.208
Τσεχία	CZ1	23.483.52 7	23.483.52 7	27.916.18 5	27.916.18 5	12.514.26 3	12.514.26 3
Κροατία	HR1	8.420.309	8.420.309	9.829.332	9.829.332	5.538.664	5.538.664
	HR2	15.803.58 8	18.964.30 5	16.789.73 4	20.147.68 1	5.207.348	6.248.817
Ουγγαρία	HU1	11.933.07 1	14.319.68 5	8.619.559	10.343.47 1	5.005.553	6.006.663
	HU2	17.055.82 1	30.700.47 9	21.370.90 6	38.467.63 0	3.904.637	7.028.347
	HU3	18.537.97 9	33.368.36 2	28.146.68 5	50.664.03 3	8.125.645	14.626.16 1
Πολωνία	PL1	31.875.77 2	38.250.92 7	32.026.56 9	38.431.88 3	17.297.53 4	20.757.04 1
	PL2	28.031.58 0	28.031.58 0	33.818.44 6	33.818.44 6	13.876.61 8	13.876.61 8

Χώρα	Εργοστάσιο	Βασική δυναμ. Diecut	Πλήρης δυναμ. Diecut	Βασική δυναμ. Inliner	Πλήρης δυναμ. Inliner	Βασική δυναμ. Sheet	Πλήρης δυναμ. Sheet
	PL3	45.060.74 8	45.060.74 8	43.173.11 2	43.173.11 2	11.342.65 0	11.342.65 0
	PL4	41.443.47 4	74.598.25 3	33.731.42 2	60.716.56 0	8.469.025	15.244.24 5
Σλοβενία	SI1	13.323.61 4	23.982.50 5	12.321.64 8	22.178.96 6	4.554.464	8.198.035
	SI2	8.138.645	14.649.56 1	9.736.446	17.525.60 3	3.747.000	6.744.600
Σλοβακία	SK1	18.878.40 3	22.654.08 4	19.170.11 3	23.004.13 6	8.297.037	9.956.444

Ο Πίνακας 3.12 παρουσιάζει τη διαθέσιμη παραγωγική δυναμικότητα κάθε εργοστασίου ανά οικογένεια προϊόντων, διακρίνοντας μεταξύ βασικής και πλήρους δυναμικότητας. Η βασική δυναμικότητα αντιστοιχεί στον υφιστάμενο τρόπο λειτουργίας του εργοστασίου, με βάση τις σημερινές βάρδιες και ημέρες εργασίας. Αντίθετα, η πλήρης δυναμικότητα εκφράζει τη μέγιστη παραγωγική ικανότητα που θα μπορούσε να επιτευχθεί σε περίπτωση λειτουργίας με τρεις βάρδιες και έξι ημέρες εργασίας την εβδομάδα. Η διάκριση αυτή επιτρέπει την αξιολόγηση τόσο της τρέχουσας παραγωγικής αξιοποίησης όσο και της δυνητικής δυνατότητας αύξησης της παραγωγής ανά εγκατάσταση.

Πίνακας 3.12: Μοναδιαίο κόστος παραγωγής ανά εργοστάσιο και οικογένεια προϊόντων

Χώρα	Εργοστάσιο	Diecut	Inliner	Sheet
Αυστρία	AT1	0,1104	0,0987	0,0239
	AT2	0,1190	0,0789	0,0250
Τσεχία	CZ1	0,1194	0,0908	0,0214
Κροατία	HR1	0,1059	0,0910	0,0235

Χώρα	Εργοστάσιο	Diecut	Inliner	Sheet
	HR2	0,1069	0,0943	0,0244
Ουγγαρία	HU1	0,1048	0,0755	0,0208
	HU2	0,1001	0,0763	0,0229
	HU3	0,1023	0,0711	0,0214
Πολωνία	PL1	0,1111	0,1203	0,0252
	PL2	0,1117	0,0838	0,0272
	PL3	0,1157	0,0996	0,0264
	PL4	0,1033	0,0808	0,0224
Σλοβενία	SI1	0,1167	0,0936	0,0263
	SI2	0,1422	0,1091	0,0259
Σλοβακία	SK1	0,1371	0,1230	0,0278

Ο Πίνακας 3.13 δείχνει ότι τα μοναδιαία κόστη παραγωγής δεν είναι ομοιόμορφα μεταξύ των εργοστασίων. Οι διαφοροποιήσεις αυτές δημιουργούν δυνατότητες ανακατανομής της παραγωγής, καθώς το μοντέλο μπορεί να εξετάσει ποιο εργοστάσιο είναι οικονομικότερο για κάθε οικογένεια προϊόντων, υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει διαθέσιμη δυναμικότητα και ότι το μεταφορικό κόστος δεν αναιρεί το παραγωγικό πλεονέκτημα.

Ανάλυση κόστους παραγωγής για την οικογένεια Diecut

Για την οικογένεια Diecut, το χαμηλότερο μοναδιαίο κόστος παραγωγής εμφανίζεται στο εργοστάσιο HU2, με κόστος 0,1001 ανά τεμάχιο. Το υψηλότερο κόστος εμφανίζεται στο εργοστάσιο SI2, με τιμή 0,1422 ανά τεμάχιο. Η διαφορά αυτή είναι σημαντική, καθώς το ακριβότερο εργοστάσιο είναι περίπου 42,1% υψηλότερο από το οικονομικότερο.

Πίνακας 3.13: Κατάταξη χαμηλότερου κόστους παραγωγής για Diecut

Κατάταξη	Εργοστάσιο	Χώρα	Κόστος Diecut	Διαφορά από ελάχιστο
1	HU2	HU	0,1001	0,0%
2	HU3	HU	0,1023	2,2%
3	PL4	PL	0,1033	3,2%
4	HU1	HU	0,1048	4,7%
5	HR1	HR	0,1059	5,8%

Ανάλυση κόστους παραγωγής για την οικογένεια Inliner

Για την οικογένεια Inliner, το χαμηλότερο μοναδιαίο κόστος παραγωγής εμφανίζεται στο εργοστάσιο HU3, με κόστος 0,0711 ανά τεμάχιο. Η οικογένεια αυτή παρουσιάζει τη μεγαλύτερη σχετική διαφοροποίηση κόστους μεταξύ των εργοστασίων, καθώς το υψηλότερο κόστος είναι περίπου 73,0% μεγαλύτερο από το χαμηλότερο.

Πίνακας 3.14: Κατάταξη χαμηλότερου κόστους παραγωγής για Inliner

Κατάταξη	Εργοστάσιο	Χώρα	Κόστος Inliner	Διαφορά από ελάχιστο
1	HU3	HU	0,0711	0,0%
2	HU1	HU	0,0755	6,2%
3	HU2	HU	0,0763	7,3%
4	AT2	AT	0,0789	11,0%
5	PL4	PL	0,0808	13,6%

Ανάλυση κόστους παραγωγής για την οικογένεια Sheet

Για την οικογένεια Sheet, το χαμηλότερο μοναδιαίο κόστος παραγωγής εμφανίζεται στο εργοστάσιο HU1, με κόστος 0,0208 ανά τεμάχιο. Παρότι το απόλυτο κόστος της οικογένειας Sheet είναι χαμηλότερο σε σχέση με τις άλλες οικογένειες προϊόντων, η

επιλογή εργοστασίου εξακολουθεί να επηρεάζει το συνολικό κόστος όταν οι ποσότητες είναι μεγάλες.

Πίνακας 3.15: Κατάταξη χαμηλότερου κόστους παραγωγής για Sheet

Κατάταξη	Εργοστάσιο	Χώρα	Κόστος Sheet	Διαφορά από ελάχιστο
1	HU1	HU	0,0208	0,0%
2	CZ1	CZ	0,0214	2,9%
3	HU3	HU	0,0214	2,9%
4	PL4	PL	0,0224	7,7%
5	HU2	HU	0,0229	10,1%

Πίνακας 3.16: Συγκεντρωτικά στατιστικά μοναδιαίου κόστους παραγωγής

Οικογένεια προϊόντων	Ελάχιστο κόστος	Μέσο κόστος	Μέγιστο κόστος	Εύρος κόστους	Μέγιστη σχετική διαφορά
Diecut	0,1001	0,1138	0,1422	0,0421	42,1%
Inliner	0,0711	0,0925	0,1230	0,0519	73,0%
Sheet	0,0208	0,0243	0,0278	0,0070	33,7%

Από τη συγκεντρωτική ανάλυση προκύπτει ότι η οικογένεια Inliner παρουσιάζει τη μεγαλύτερη σχετική διαφοροποίηση κόστους μεταξύ των εργοστασίων. Αυτό σημαίνει ότι η επιλογή λανθασμένου εργοστασίου για προϊόντα Inliner μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση του παραγωγικού κόστους. Αντίστοιχα, η οικογένεια Diecut παρουσιάζει επίσης ουσιαστική διαφοροποίηση, ενώ η οικογένεια Sheet έχει μικρότερο απόλυτο κόστος αλλά εξακολουθεί να επηρεάζεται από την επιλογή παραγωγικής εγκατάστασης.

Σε επίπεδο χωρών, οι εγκαταστάσεις της Ουγγαρίας εμφανίζουν συστηματικά χαμηλές τιμές παραγωγικού κόστους και στις τρεις οικογένειες προϊόντων. Συγκεκριμένα, οι εγκαταστάσεις HU1, HU2 και HU3 βρίσκονται μεταξύ των οικονομικότερων επιλογών σε όλες τις οικογένειες. Ωστόσο, η τελική ανάθεση παραγωγής δεν μπορεί να βασιστεί αποκλειστικά σε αυτή την παρατήρηση, καθώς πρέπει να ληφθούν υπόψη οι περιορισμοί δυναμικότητας και το κόστος μεταφοράς προς τους πελάτες.

Η ύπαρξη χαμηλού μοναδιαίου κόστους παραγωγής σε ένα εργοστάσιο δεν σημαίνει απαραίτητα ότι το εργοστάσιο αυτό θα πρέπει να αναλάβει το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής. Η τελική επιλογή εξαρτάται από τρεις βασικούς παράγοντες: τη διαθέσιμη παραγωγική δυναμικότητα, το μοναδιαίο κόστος παραγωγής για την αντίστοιχη οικογένεια προϊόντων και το κόστος μεταφοράς από το εργοστάσιο προς τους πελάτες.

Επομένως, το παραγωγικό κόστος πρέπει να αξιολογείται συνδυαστικά με τη γεωγραφική θέση των πελατών, τα κόστη μεταφοράς και τους περιορισμούς δυναμικότητας. Η προσέγγιση αυτή διασφαλίζει ότι η βελτιστοποίηση δεν οδηγεί απλώς στην επιλογή του φθηνότερου εργοστασίου παραγωγής, αλλά στην επιλογή της οικονομικότερης συνολικής λύσης για το δίκτυο παραγωγής και διανομής.

3.5 Αρχικές ροές εξυπηρέτησης

Τα δεδομένα διανομής αποτυπώνουν την αρχική πολιτική εξυπηρέτησης των πελατών από τις παραγωγικές εγκαταστάσεις. Για κάθε κόμβο πελάτη καταγράφεται η αρχική πηγή παραγωγής ανά οικογένεια προϊόντων. Η πληροφορία αυτή είναι κρίσιμη, καθώς συνιστά τη βάση για τη διαμόρφωση του baseline σεναρίου, το οποίο αναπαριστά την υφιστάμενη κατάσταση του δικτύου.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, ένας πελάτης εξυπηρετείται από μία εγκατάσταση για μία οικογένεια προϊόντων και από διαφορετική εγκατάσταση για άλλη οικογένεια. Επιπλέον, στον πίνακα αρχικής ανάθεσης εμφανίζονται περιπτώσεις πολλαπλής προέλευσης, στις οποίες η ζήτηση μιας οικογένειας προϊόντων κατανέμεται ποσοστιαία σε περισσότερες από μία εγκαταστάσεις. Αυτό δείχνει ότι το δίκτυο διαθέτει ήδη στοιχεία multi-sourcing, τα οποία πρέπει να ληφθούν υπόψη στη μετέπειτα ανάλυση σεναρίων.

Πίνακας 3.17: Ενδεικτικές αρχικές αναθέσεις πελατών σε εγκαταστάσεις

Κόμβος πελάτη	Χώρα	Πηγή Diecut	Πηγή Inliner	Πηγή Sheet
Cust100_331_A T	AT	—	AT1	AT1
Cust185_405_H U	HU	HU1 (58%); HU3 (42%)	HU3 (87%); HU1 (13%)	HU3 (93%); HU1 (7%)
Cust103_311_A T	AT	AT1	—	—
Cust185_178_C Z	CZ	PL3 (94%); PL1 (6%)	PL3 (99%); PL1 (1%)	PL1
Cust185_109_P L	PL	PL3 (54%); PL2 (45%); PL1 (1%)	PL3 (98%); PL1 (2%)	PL1

Κόμβος πελάτη	Χώρα	Πηγή Diecut	Πηγή Inliner	Πηγή Sheet
Cust185_114_PL	PL	PL1 (51%); PL3 (49%)	PL3 (99%); PL1 (1%)	PL1
Cust249_529_SI	SI	SI1	SI2 (67%); SI1 (33%)	SI1 (88%); SI2 (12%)
Cust185_359_HU	HU	HU3 (87%); HU1 (13%)	HU3 (60%); HU1 (40%)	—
Cust185_357_HU	HU	HU1	HU1	—
Cust185_359_HU	HU	HU3 (87%); HU1 (13%)	HU3 (60%); HU1 (40%)	—
Cust185_31_PL	PL	PL2 (74%); PL4 (26%)	PL4	PL4
Cust185_37_PL	PL	PL2	PL4 (68%); PL2 (32%)	PL4
Cust176_585_HR	HR	HR1	—	HR1
Cust192_198_CZ	CZ	HU2	HU2	—
Cust193_133_CZ	CZ	CZ1	CZ1	CZ1
Cust206_135_CZ	CZ	CZ1	CZ1	CZ1
Cust129_76_PL	PL	PL4	PL4	PL4
Cust137_115_PL	PL	PL3	PL3	—
Cust150_38_PL	PL	PL2	PL2	PL2
Cust61_269_SK	SK	SK1	—	SK1
Cust80_232_SK	SK	—	HU3	—

Πίνακας 3.18: Χαρακτηρισμός αρχικής πολιτικής εξυπηρέτησης ανά οικογένεια προϊόντων

Οικογένεια προϊόντων	Single-source εγγραφές	Multi-source εγγραφές
Diecut	425	46
Inliner	433	49
Sheet	353	34

Η ύπαρξη multi-source εγγραφών στην αρχική πολιτική δείχνει ότι η πραγματική λειτουργία του δικτύου δεν είναι πλήρως μονοσήμαντη. Ωστόσο, η επιλογή μεταξύ single sourcing και multi sourcing δεν είναι μόνο μαθηματικό ζήτημα κόστους, αλλά και επιχειρησιακή απόφαση, καθώς συνδέεται με την πολυπλοκότητα παραγγελιών, αποστολών και συντονισμού.

3.6 Βασικά προβλήματα του υφιστάμενου δικτύου

Η περιγραφική ανάλυση των δεδομένων του υφιστάμενου δικτύου παραγωγής και διανομής αναδεικνύει ορισμένα δομικά ζητήματα, τα οποία επηρεάζουν τη συνολική

αποδοτικότητα της εφοδιαστικής αλυσίδας. Τα ζητήματα αυτά δεν αποτελούν ακόμη αποτελέσματα βελτιστοποίησης, αλλά προκύπτουν από την ανάλυση των διαθέσιμων δεδομένων σχετικά με τη ζήτηση, τις παραγωγικές εγκαταστάσεις, το κόστος παραγωγής, το κόστος μεταφοράς και τη γεωγραφική κατανομή των πελατών. Συνεπώς, λειτουργούν ως σημεία προβληματισμού και τεκμηριώνουν την ανάγκη ανάπτυξης ενός μαθηματικού και υπολογιστικού μοντέλου στο επόμενο κεφάλαιο.

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα του υφιστάμενου δικτύου είναι το υψηλό και διαφοροποιημένο κόστος μεταφοράς. Επομένως, η επιλογή εργοστασίου δεν μπορεί να βασίζεται αποκλειστικά στο παραγωγικό κόστος, αλλά πρέπει να λαμβάνει υπόψη και την απόσταση από τον πελάτη, καθώς και το αντίστοιχο κόστος μεταφοράς ανά χιλιόμετρο. Ένα εργοστάσιο με χαμηλό μοναδιαίο κόστος παραγωγής ενδέχεται να μην αποτελεί τη συνολικά οικονομικότερη επιλογή, εάν βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από τον πελάτη και δημιουργεί υψηλό μεταφορικό κόστος. Αντίθετα, ένα εργοστάσιο με ελαφρώς υψηλότερο παραγωγικό κόστος μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλότερο συνολικό κόστος, εφόσον βρίσκεται γεωγραφικά πιο κοντά στη ζήτηση.

Παράλληλα, η ανάλυση του κόστους μεταφοράς δείχνει ότι το κόστος ανά χιλιόμετρο διαφοροποιείται μεταξύ των χωρών και, κατά συνέπεια, μεταξύ των εργοστασίων. Η διαφοροποίηση αυτή δημιουργεί πρόσθετη πολυπλοκότητα στη λήψη αποφάσεων, καθώς η απόσταση από μόνη της δεν αρκεί για την εκτίμηση του μεταφορικού κόστους. Δύο διαδρομές ίδιας απόστασης μπορεί να έχουν διαφορετικό κόστος, εάν ξεκινούν από εργοστάσια που βρίσκονται σε διαφορετικές χώρες ή υπόκεινται σε διαφορετικά μεταφορικά τιμολόγια. Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση των ροών διανομής πρέπει να πραγματοποιείται με βάση το πλήρες κόστος μεταφοράς και όχι μόνο με βάση τη γεωγραφική εγγύτητα.

Ένα δεύτερο βασικό πρόβλημα αφορά την πιθανή μη βέλτιστη ανάθεση παραγωγής. Η υφιστάμενη ανάθεση προϊόντων σε εργοστάσια μπορεί να έχει διαμορφωθεί μέσα από ιστορικές πρακτικές, εμπορικές σχέσεις, συνήθειες εξυπηρέτησης, περιορισμούς δυναμικότητας ή καθημερινούς λειτουργικούς περιορισμούς. Ωστόσο, οι παράγοντες αυτοί δεν διασφαλίζουν απαραίτητα ότι κάθε προϊόν παράγεται στο εργοστάσιο που ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος. Από τα δεδομένα προκύπτει ότι το μοναδιαίο κόστος παραγωγής διαφοροποιείται ανά εργοστάσιο και ανά οικογένεια προϊόντων. Συνεπώς, υπάρχει δυνητικό περιθώριο ανακατανομής της παραγωγής, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις όπου ένα προϊόν παράγεται

σε εγκατάσταση με υψηλότερο κόστος, ενώ υπάρχουν διαθέσιμες εναλλακτικές με χαμηλότερο παραγωγικό κόστος.

Ωστόσο, η ανακατανομή της παραγωγής δεν μπορεί να εξεταστεί απομονωμένα από το δίκτυο διανομής. Η επιλογή του οικονομικότερου εργοστασίου από πλευράς παραγωγής δεν οδηγεί απαραίτητα στη βέλτιστη συνολική λύση, καθώς το μεταφορικό κόστος μπορεί να αντισταθμίσει ή και να υπερβεί το παραγωγικό όφελος. Το πρόβλημα επομένως δεν είναι απλώς να εντοπιστεί το εργοστάσιο με το χαμηλότερο κόστος παραγωγής για κάθε οικογένεια προϊόντων, αλλά να προσδιοριστεί ο κατάλληλος συνδυασμός παραγωγικής ανάθεσης και εξυπηρέτησης πελατών. Η συνολική οικονομική αποδοτικότητα εξαρτάται από το άθροισμα του κόστους παραγωγής και του κόστους διανομής, υπό τους περιορισμούς της ζήτησης και της διαθέσιμης παραγωγικής δυναμικότητας.

Ένα ακόμη κρίσιμο ζήτημα είναι η γεωγραφική απόσταση μεταξύ εργοστασίων και πελατών. Η ζήτηση δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη στον γεωγραφικό χώρο. Αντίθετα, εμφανίζει σημαντική συγκέντρωση σε συγκεκριμένες αγορές, με την Πολωνία να αποτελεί τη μεγαλύτερη αγορά του δικτύου, ενώ σημαντικές ποσότητες εμφανίζονται επίσης στην Ουγγαρία, την Αυστρία, την Τσεχία και τη Σλοβακία. Η γεωγραφική αυτή συγκέντρωση επηρεάζει άμεσα τη σημασία των αποφάσεων ανάθεσης παραγωγής, καθώς οι χώρες και οι περιοχές με υψηλή ζήτηση δημιουργούν μεγαλύτερο μεταφορικό έργο και έχουν μεγαλύτερη επίδραση στο συνολικό κόστος.

Η ύπαρξη μεγάλων πελατών ή κόμβων ζήτησης σε συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές καθιστά αναγκαία την προσεκτική επιλογή των εργοστασίων που θα τους εξυπηρετούν. Εάν ένας πελάτης υψηλής ζήτησης εξυπηρετείται από απομακρυσμένο εργοστάσιο, το συνολικό κόστος διανομής μπορεί να αυξηθεί σημαντικά. Αντίθετα, η εξυπηρέτηση τέτοιων πελατών από γεωγραφικά κοντινότερες και παραγωγικά αποδοτικές εγκαταστάσεις μπορεί να δημιουργήσει σημαντική εξοικονόμηση. Επομένως, η γεωγραφική θέση των πελατών και των εργοστασίων αποτελεί βασική παράμετρο του προβλήματος και πρέπει να συνυπολογίζεται στη διαδικασία βελτιστοποίησης.

Τέλος, σημαντικό περιορισμό αποτελεί η σχετικά περιορισμένη πλεονάζουσα παραγωγική δυναμικότητα. Παρότι η συνολική δυναμικότητα του δικτύου είναι επαρκής για την κάλυψη της συνολικής ζήτησης, ο δείκτης δυναμικότητας προς ζήτηση

βρίσκεται σχετικά κοντά στη μονάδα για όλες τις οικογένειες προϊόντων. Αυτό σημαίνει ότι το δίκτυο δεν διαθέτει απεριόριστο περιθώριο μεταφοράς παραγωγής προς τα εργοστάσια με το χαμηλότερο κόστος. Ακόμη και αν ένα εργοστάσιο εμφανίζει ιδιαίτερα ανταγωνιστικό μοναδιαίο κόστος παραγωγής, δεν είναι βέβαιο ότι μπορεί να αναλάβει μεγάλες πρόσθετες ποσότητες χωρίς να παραβιάσει τους περιορισμούς δυναμικότητας.

Η ύπαρξη περιορισμένης πλεονάζουσας δυναμικότητας καθιστά το πρόβλημα πιο σύνθετο, καθώς η βέλτιστη λύση πρέπει να κατανέμει την παραγωγή με τρόπο που να αξιοποιεί τα οικονομικότερα εργοστάσια, χωρίς όμως να υπερβαίνει τις παραγωγικές τους δυνατότητες. Επιπλέον, η δυναμικότητα πρέπει να εξετάζεται ανά οικογένεια προϊόντων, καθώς ένα εργοστάσιο μπορεί να έχει επαρκή δυνατότητα παραγωγής για μία κατηγορία προϊόντων αλλά περιορισμένη δυνατότητα για κάποια άλλη. Συνεπώς, η βελτιστοποίηση πρέπει να λαμβάνει υπόψη τόσο το συνολικό διαθέσιμο παραγωγικό δυναμικό όσο και την κατανομή του ανά προϊόν και εγκατάσταση.

Συνολικά, τα βασικά προβλήματα του υφιστάμενου δικτύου σχετίζονται με την αλληλεπίδραση τεσσάρων παραγόντων: του κόστους παραγωγής, του κόστους μεταφοράς, της γεωγραφικής κατανομής της ζήτησης και των περιορισμών δυναμικότητας. Η ύπαρξη διαφοροποιημένων κοστών και γεωγραφικά κατανεμημένων πελατών καθιστά δύσκολη τη λήψη αποφάσεων με εμπειρικά ή αποσπασματικά κριτήρια. Για τον λόγο αυτό, απαιτείται η ανάπτυξη ενός συστηματικού μοντέλου βελτιστοποίησης, το οποίο θα αξιολογεί ταυτόχρονα όλες τις πιθανές αναθέσεις παραγωγής και διανομής, με στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού λειτουργικού κόστους και την πλήρη κάλυψη της ζήτησης.

4. Μεθοδολογία

Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει τη μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθείται για τη μοντελοποίηση και βελτιστοποίηση του δικτύου παραγωγής και διανομής της υπό μελέτη εταιρείας. Σε συνέχεια της περιγραφής των δεδομένων στο Κεφάλαιο 3, η ανάλυση μεταβαίνει από την επιχειρησιακή αποτύπωση του υφιστάμενου δικτύου στη μαθηματική και υπολογιστική του αναπαράσταση. Με άλλα λόγια, το κεφάλαιο εξηγεί πώς τα στοιχεία της πραγματικής λειτουργίας - Εγκαταστάσεις, Πελάτες, προϊόντα

δυναμικές παραγωγής, ζήτηση, κόστη και περιορισμοί - μετατρέπονται σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης που μπορεί να επιλυθεί στο Supply Chain Guru.

Η προσέγγιση της εργασίας εδράζεται στη λογική του integrated production-distribution planning. Η παραγωγή και η διανομή δεν εξετάζονται ως ανεξάρτητες λειτουργίες, αλλά ως αλληλεξαρτώμενες αποφάσεις του ίδιου δικτύου. Η επιλογή μιας εγκατάστασης με χαμηλό μοναδιαίο κόστος παραγωγής μπορεί να είναι μη βέλτιστη εάν οδηγήσει σε υψηλές δαπάνες μεταφοράς, ενώ μια εγκατάσταση με υψηλότερο παραγωγικό κόστος μπορεί να είναι συνολικά προτιμότερο όταν βρίσκεται πλησιέστερα στους πελάτες. Η μεθοδολογία, επομένως, επιδιώκει την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους παραγωγής και διανομής.

Η βιβλιογραφία για τα προβλήματα ολοκληρωμένης παραγωγής και διανομής χρησιμοποιεί συχνά μοντέλα Mixed Integer Linear Programming (MILP), καθώς αυτά επιτρέπουν τη συνδυασμένη αποτύπωση συνεχών μεταβλητών ροής, δυαδικών αποφάσεων ενεργοποίησης εγκαταστάσεων και ακέραιων μεταβλητών που σχετίζονται με μεταφορικές μονάδες ή φορτία (Bo et al., 2021; Bhutta et al., 2024). Παράλληλα, εφαρμογές του Supply Chain Guru στη βιβλιογραφία δείχνουν ότι το εργαλείο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναπαράσταση δικτύων, τη δημιουργία σεναρίων και τη σύγκριση εναλλακτικών λύσεων ως προς το κόστος, το επίπεδο εξυπηρέτησης και τις επιχειρησιακές επιπτώσεις (Tonanont et al., 2010).

4.1 Μεθοδολογική Προσέγγιση

Η εργασία ακολουθεί ποσοτική προσέγγιση, προσανατολισμένη στη βελτιστοποίηση ενός υφιστάμενου δικτύου παραγωγής και διανομής. Το πρόβλημα δεν αφορά τη δημιουργία νέων εγκαταστάσεων ούτε τη ριζική αλλαγή της φυσικής δομής του δικτύου. Αντίθετα, εστιάζει στη βέλτιστη αξιοποίηση των διαθέσιμων παραγωγικών μονάδων, λαμβάνοντας υπόψη τη ζήτηση των πελατών, τις παραγωγικές δυνατότητες ανά προϊόν, το μεταβλητό κόστος παραγωγής, το κόστος μεταφοράς και τα σταθερά λειτουργικά κόστη.

Σε επίπεδο λήψης αποφάσεων, η μεθοδολογία τοποθετείται κυρίως στο στρατηγικό και τακτικό επίπεδο του supply chain planning. Στο στρατηγικό επίπεδο εξετάζεται ο ρόλος και η οικονομική αναγκαιότητα κάθε παραγωγικής μονάδας μέσα στο δίκτυο. Στο τακτικό επίπεδο εξετάζεται η ανάθεση προϊόντων και πελατών στα διαθέσιμες εγκαταστάσεις, η κατανομή των ποσοτήτων και η αξιοποίηση της

παραγωγικής δυναμικότητας. Η διάκριση αυτή είναι συνεπής με τη βιβλιογραφία του supply chain network design, όπου ο σχεδιασμός δικτύου συνδέεται με μακροπρόθεσμες αποφάσεις δομής, ενώ η κατανομή παραγωγής και οι πολιτικές μεταφοράς συνδέονται με μεσοπρόθεσμες αποφάσεις λειτουργίας.

Η μεθοδολογική διαδικασία ξεκινά από την αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης του δικτύου, όπως αυτή αναλύεται στο Κεφάλαιο 3. Οι παραγωγικές μονάδες λειτουργούν ως κόμβοι προσφοράς και παραγωγής, οι πελάτες ως κόμβοι ζήτησης, ενώ τα προϊόντα ομαδοποιούνται σε τρεις κύριες κατηγορίες: Diecut, Inliner και Sheet. Η επιλογή αυτών των product groups επιτρέπει την πρακτική αποτύπωση της παραγωγικής πραγματικότητας, καθώς κάθε κατηγορία συνδέεται με συγκεκριμένες γραμμές παραγωγής και τεχνικές δυνατότητες.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται η μοντελοποίηση κόστους του δικτύου. Το συνολικό κόστος αναλύεται σε Σταθερά κόστη, μοναδιαία κόστη παραγωγής και κόστη μεταφοράς. Η επιλογή αυτής της δομής κόστους συνδέεται άμεσα με τη βιβλιογραφία των production-distribution models, όπου τα μοντέλα βελτιστοποίησης ενσωματώνουν συνήθως κόστος εγκαταστάσεων, κόστος παραγωγής, κόστος μεταφοράς και περιορισμούς δυναμικότητας. Στην παρούσα εργασία δεν επιδιώκεται η μεγιστοποίηση κέρδους, αλλά η ελαχιστοποίηση του συνολικού λειτουργικού κόστους, επειδή η τιμή πώλησης και τα έσοδα δεν αποτελούν αντικείμενο της ανάλυσης.

Μετά τον ορισμό του προβλήματος, διατυπώνεται ένα μαθηματικό μοντέλο τύπου MILP. Το μοντέλο χρησιμοποιεί συνεχείς μεταβλητές για τις ποσότητες προϊόντων που παράγονται και αποστέλλονται, δυαδικές μεταβλητές για την ενεργοποίηση των sites και ακέραιες μεταβλητές για τον αριθμό των φορτίων. Η μαθηματική διατύπωση λειτουργεί ως αναπαράσταση της λογικής του προβλήματος. Δεν επιχειρεί να αναπαράγει τον εσωτερικό αλγόριθμο του Supply Chain Guru, αλλά παρέχει το αναλυτικό υπόβαθρο που εξηγεί ποιες αποφάσεις επιλύονται και με ποιους περιορισμούς.

Το τελευταίο στάδιο είναι η υλοποίηση στο Supply Chain Guru. Στο SCG το δίκτυο αναπαρίσταται μέσω των βασικών αντικειμένων του λογισμικού, όπως Sites, Customers, Products, Customer Demand, Production Policies, Transportation Policies και Modes. Η βιβλιογραφία για το SCG αναφέρει ως βασικά στοιχεία ενός μοντέλου τα products, sites, demand, sourcing policies, transportation policies και inventory

policies ((Tonanont et al., 2010). Η παρούσα εργασία αξιοποιεί κυρίως τα στοιχεία που σχετίζονται με προϊόντα, sites, ζήτηση, παραγωγικές πολιτικές και μεταφορικές πολιτικές, καθώς το αντικείμενο εστιάζει στην ανάθεση παραγωγής και διανομής και όχι στη βελτιστοποίηση αποθεμάτων.

4.2 Ορισμός του Προβλήματος Βελτιστοποίησης

Το πρόβλημα που εξετάζεται αφορά τη βέλτιστη ανάθεση παραγωγής και διανομής σε ένα υφιστάμενο δίκτυο της βιομηχανίας χαρτονιού. Δεδομένων των παραγωγικών μονάδων, των πελατών, των προϊόντων, της ζήτησης ανά πελάτη και προϊόν, των production policies, των transportation rates και των περιορισμών δυναμικότητας, ζητείται να προσδιοριστεί ποια ποσότητα κάθε προϊόντος πρέπει να παραχθεί σε κάθε εγκατάσταση και να αποσταλεί σε κάθε πελάτη, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το συνολικό κόστος.

Το πρόβλημα είναι πρόβλημα production site allocation και customer-product assignment. Η βασική απόφαση δεν είναι μόνο “πού παράγεται ένα προϊόν”, αλλά και “ποιο site εξυπηρετεί ποια ζήτηση”. Για κάθε συνδυασμό πελάτη και ομάδα προϊόντος, το μοντέλο επιλέγει μία ή περισσότερες παραγωγικές τοποθεσίες, ανάλογα με τους περιορισμούς του σεναρίου. Στο multi-sourcing σενάριο, η ζήτηση ενός πελάτη για ένα προϊόν μπορεί να κατανεμηθεί σε περισσότερα από ένα sites, εφόσον αυτό μειώνει το συνολικό κόστος. Στο single-sourcing σενάριο, η εξυπηρέτηση περιορίζεται σε ένα site, ώστε να εξεταστεί μια λειτουργικά απλούστερη πολιτική.

Η αντικειμενική συνάρτηση περιλαμβάνει τρεις συνιστώσες κόστους. Η πρώτη είναι το Σταθερό κόστος, το οποίο αποδίδεται στις εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούνται ή παραμένουν ενεργές. Η δεύτερη είναι το Παραγωγικό κόστος, το οποίο προκύπτει από το μοναδιαίο κόστος παραγωγής κάθε προϊόντος σε κάθε εργοστάσιο και την αντίστοιχη παραγόμενη ποσότητα. Η τρίτη είναι το Μεταφορικό κόστος, το οποίο υπολογίζεται με βάση την απόσταση εργοστασίου - πελάτη, το ναύλο μεταφοράς και τον αριθμό των αποστολών. Με τον τρόπο αυτό, η λύση που προκύπτει δεν επιλέγει απλώς το φθηνότερο εργοστάσιο παραγωγής, αλλά το οικονομικά βέλτιστο σημείο ισορροπίας μεταξύ παραγωγής και μεταφοράς.

Η πλήρης εξυπηρέτηση της ζήτησης αποτελεί σκληρό περιορισμό του μοντέλου. Δεν επιτρέπεται ανεκπλήρωτη ζήτηση, καθώς η εργασία εξετάζει σενάρια που πρέπει να είναι επιχειρησιακά αποδεκτά για την εταιρεία. Επομένως, κάθε λύση

πρέπει να καλύπτει το σύνολο της ζήτησης όλων των πελατών για τα προϊόντα Diecut, Inliner και Sheet. Η επιλογή αυτή διαφοροποιεί το μοντέλο από περιπτώσεις όπου επιτρέπεται χαμένη ζήτηση με ποινή κόστους. Στην παρούσα εργασία, η εξυπηρέτηση πελατών θεωρείται υποχρεωτική απαίτηση και όχι μεταβλητή απόφασης.

Το μοντέλο ενσωματώνει επίσης περιορισμούς παραγωγικής συμβατότητας. Δεν είναι όλα τα sites ικανά να παράγουν όλα τα προϊόντα. Η παράμετρος *feasibility a_ip* καθορίζει αν ένα site μπορεί να παράγει ένα συγκεκριμένο προϊόν. Έτσι, το μοντέλο αποκλείει μη εφαρμόσιμες λύσεις, ακόμη και αν αυτές φαίνονται οικονομικά ελκυστικές από άποψη κόστους. Η παραγωγική πραγματικότητα της βιομηχανίας χαρτονιού, όπου οι γραμμές παραγωγής έχουν συγκεκριμένες δυνατότητες, ενσωματώνεται με αυτόν τον τρόπο στη μαθηματική διατύπωση.

4.3 Παραδοχές και Περιορισμοί του Μοντέλου

Η ανάπτυξη ενός μοντέλου βελτιστοποίησης απαιτεί τη διατύπωση σαφών παραδοχών. Οι παραδοχές δεν αποτελούν αδυναμία της ανάλυσης, αλλά αναγκαίο βήμα για τη μετατροπή ενός σύνθετου επιχειρησιακού προβλήματος σε υπολογιστικά επιλύσιμο μοντέλο. Η βιβλιογραφία των *supply chain optimization studies* συχνά ξεκινά από την αποτύπωση της πραγματικής κατάστασης και στη συνέχεια ορίζει παραδοχές που καθορίζουν το εύρος του μοντέλου, τα επιτρεπτά decisions και τα κριτήρια αξιολόγησης (Kong et al., 2024).

Στην παρούσα εργασία οι βασικές παραδοχές είναι οι εξής:

- Η ζήτηση ανά πελάτη και ομάδα προϊόντος θεωρείται γνωστή και σταθερή για την περίοδο ανάλυσης.
- Οι ομάδες προϊόντων του μοντέλου είναι οι Diecut, Inliner και Sheet.
- Οι πελάτες αντιμετωπίζονται ως διακριτά σημεία ζήτησης, με βάση την ακριβή γεωγραφική τους τοποθεσία.
- Οι παραγωγικές εγκαταστάσεις είναι υφιστάμενες. Δεν εξετάζεται δημιουργία νέων εγκαταστάσεων.
- Η παραγωγή επιτρέπεται μόνο όταν υπάρχει συμβατότητα μεταξύ παραγωγικής εγκατάστασης και ομάδας προϊόντος. Στην υφιστάμενη κατάσταση όλα τα προϊόντα μπορούν να παραχθούν σε όλες τις εγκαταστάσεις.

- Η διαθέσιμη παραγωγική δυναμικότητα ορίζεται ανά εγκατάσταση και ομάδα προϊόντος.
- Το κόστος παραγωγής ανά ομάδα προϊόντος μπορεί να διαφέρει.
- Το μέσο μέγεθος αποστολής θεωρείται ίσο με 10.000 μονάδες, σύμφωνα με τα διαθέσιμα δεδομένα μεταφοράς.
- Το μεταφορικό κόστος υπολογίζεται με βάση ναύλο ανά χιλιόμετρο, απόσταση Εγκατάσταση – Πελάτη και αριθμό αποστολών.
- Όλη η ζήτηση πρέπει να καλύπτεται πλήρως.
- Δεν εξετάζονται κόστη διατήρησης αποθεμάτων, χρόνοι παράδοσης, εκπομπές CO₂ ή δυναμικές μεταβολές ζήτησης σε βάθος χρόνου, εκτός εάν αυτά εισαχθούν σε μελλοντική επέκταση του μοντέλου.

Οι παραπάνω παραδοχές οριοθετούν με σαφήνεια το αντικείμενο της εργασίας. Το μοντέλο δεν επιχειρεί να λύσει το σύνολο των πιθανών προβλημάτων της εφοδιαστικής αλυσίδας, αλλά εστιάζει στο συγκεκριμένο ερευνητικό ερώτημα: ποια ανάθεση παραγωγής στα διαθέσιμα εργοστάσια ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος παραγωγής και διανομής, με πλήρη εξυπηρέτηση της ζήτησης. Με αυτόν τον τρόπο, η ανάλυση παραμένει στοχευμένη και άμεσα συνδεδεμένη με τη διοικητική απόφαση που καλείται να λάβει η εταιρεία.

Ένας επιπλέον περιορισμός αφορά τον τρόπο ερμηνείας των αποτελεσμάτων. Η βέλτιστη λύση του μοντέλου είναι βέλτιστη ως προς τα δεδομένα, τις παραδοχές και τους περιορισμούς που έχουν εισαχθεί. Εάν μεταβληθούν η ζήτηση, τα ναύλα, τα κόστη παραγωγής ή οι διαθέσιμες δυναμικότητες, η βέλτιστη ανάθεση μπορεί να αλλάξει. Για τον λόγο αυτό, τα αποτελέσματα πρέπει να αξιολογούνται ως υποστήριξη λήψης αποφάσεων και όχι ως δεσμευτική ή αμετάβλητη πρόταση λειτουργίας του δικτύου.

4.4 Μαθηματική Διατύπωση του Προβλήματος

Η μαθηματική διατύπωση που ακολουθεί περιγράφει το πρόβλημα ως μικτό ακέραιο γραμμικό πρόγραμμα. Η δομή του μοντέλου συνδυάζει συνεχείς μεταβλητές ροής, δυαδικές μεταβλητές ενεργοποίησης sites και ακέραιες μεταβλητές αριθμού shipments. Η χρήση MILP είναι κατάλληλη για το συγκεκριμένο πρόβλημα, επειδή επιτρέπει την ταυτόχρονη αποτύπωση οικονομικών αποφάσεων, περιορισμών δυναμικότητας, λογικών περιορισμών ενεργοποίησης και περιορισμών παραγωγικής συμβατότητας.

Σύνολα

$i \in I$: παραγωγικές τοποθεσίες / sites

$c \in C$: πελάτες / customers

$p \in P$: προϊόντα, δηλαδή Diecut, Inliner, Sheet

Παράμετροι

D_{cp} : ζήτηση πελάτη c για προϊόν p

F_i : Σταθερό Λειτουργικό κόστος εγκατάστασης/site i

u_{ip} : Μοναδιαίο κόστος παραγωγής προϊόντος p στην εγκατάσταση i

Cap_{ip} : Δυναμικότητα παραγωγής προϊόντος p στην εγκατάσταση i

r_i : ναύλος ανά χιλιόμετρο από εγκατάσταση i

S_i : μέσο μέγεθος φορτίου από εγκατάσταση i

d_{ic} : απόσταση από εγκατάσταση i στον πελάτη c

Μεταβλητές Απόφασης

$x_{icp} \geq 0$: ποσότητα προϊόντος p που παράγεται στο site i και αποστέλλεται στον πελάτη c

$y_i \in \{0,1\}$: 1 αν το site i χρησιμοποιείται / παραμένει ενεργό

$a_{ip} \in \{0,1\}$: 1 αν η εγκατάσταση i μπορεί να παράγει το προϊόν p

$n_{ic} \in \mathbb{Z}_+$: αριθμός μεταφορών από εγκατάσταση i προς πελάτη c

Αντικειμενική Συνάρτηση

Στόχος του μοντέλου είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους του δικτύου. Το συνολικό κόστος περιλαμβάνει το σταθερό κόστος των ενεργών sites, το μεταβλητό κόστος παραγωγής των παραγόμενων ποσοτήτων και το κόστος μεταφοράς των απαιτούμενων ποσοτήτων.

$$\min TC = \sum_{i \in I} F_i y_i + \sum_{i \in I} \sum_{c \in C} \sum_{p \in P} u_{ip} x_{icp} + \sum_{i \in I} \sum_{c \in C} r_i d_{ic} n_{ic}$$

Δηλαδή:

$$\min TC = \text{Fixed Cost} + \text{Production Cost} + \text{Transportation Cost}$$

Η πρώτη συνιστώσα της αντικειμενικής συνάρτησης αποδίδει το σταθερό λειτουργικό κόστος στα sites που χρησιμοποιούνται. Η δεύτερη συνιστώσα υπολογίζει το συνολικό κόστος παραγωγής, πολλαπλασιάζοντας τις παραγόμενες και

αποστελλόμενες ποσότητες με το αντίστοιχο μοναδιαίο κόστος παραγωγής. Η τρίτη συνιστώσα αποτυπώνει το κόστος μεταφοράς, το οποίο εξαρτάται από το ναύλο ανά χιλιόμετρο, την απόσταση μεταξύ παραγωγικής μονάδας και πελάτη και τον αριθμό των μεταφορών.

Περιορισμοί

- Πλήρης εξυπηρέτηση ζήτησης

$$\sum_{i \in I} x_{icp} = D_{cp}, \quad \forall c \in C, p \in P \quad (1)$$

Ο περιορισμός αυτός εξασφαλίζει ότι η ζήτηση κάθε πελάτη για κάθε προϊόν καλύπτεται πλήρως από τα διαθέσιμα εργοστάσια. Η ισότητα, και όχι ανισότητα, είναι σημαντική διότι το μοντέλο δεν επιτρέπει ούτε έλλειμμα ζήτησης ούτε υπερκάλυψη που θα δημιουργούσε μη αναγκαίες ποσότητες.

- Δυναμικότητα παραγωγής ανά εγκατάσταση και προϊόν

$$\sum_{c \in C} x_{icp} \leq Cap_{ip} y_i, \quad \forall i \in I, p \in P \quad (2)$$

Ο περιορισμός αυτός διασφαλίζει ότι η συνολική ποσότητα προϊόντος p που παράγεται στο εργοστάσιο i δεν υπερβαίνει τη διαθέσιμη παραγωγική δυναμικότητα του συγκεκριμένου εργοστασίου για το συγκεκριμένο προϊόν. Η μεταβλητή y_i συνδέει τη δυναμικότητα με την ενεργοποίηση της εγκατάστασης. Εάν $y_i = 0$, τότε η διαθέσιμη δυναμικότητα μηδενίζεται και το site δεν μπορεί να παράγει.

- Συμβατότητα παραγωγής εγκατάστασης - προϊόντος

$$x_{icp} \leq D_{cp} a_{ip} y_i, \quad \forall i \in I, c \in C, p \in P \quad (3)$$

Ο περιορισμός αυτός ενσωματώνει τη συμβατότητα μεταξύ παραγωγικών sites και product groups. Αν $a_{ip} = 0$, τότε το site i δεν μπορεί να παράγει το προϊόν p και η αντίστοιχη ποσότητα x_{ip} αναγκαστικά μηδενίζεται. Αν $a_{ip} = 1$, τότε η παραγωγή είναι εφικτή, υπό την προϋπόθεση ότι το site είναι ενεργό και τηρούνται οι περιορισμοί δυναμικότητας.

- Χωρητικότητα αποστολών

$$\sum_{p \in P} x_{icp} \leq S_i n_{ic}, \quad \forall i \in I, c \in C \quad (4)$$

Ο περιορισμός αυτός συνδέει τη συνολική ποσότητα που αποστέλλεται από κάθε εγκατάσταση προς κάθε πελάτη με το μέγεθος μεταφοράς. Η μεταβλητή n_{ic} υπολογίζει τον απαιτούμενο αριθμό δρομολογίων για τη μεταφορά των ποσοτήτων. Με τον τρόπο αυτό, το μεταφορικό κόστος ενσωματώνει την επιχειρησιακή λογική των φορτίων και όχι μόνο τη συνολική ποσότητα.

- Ενεργοποίηση εγκατάστασης

$$x_{icp} \leq D_{cp} y_i, \quad \forall i \in I, c \in C, p \in P \quad (5)$$

Ο περιορισμός ενεργοποίησης παραγωγικής εγκατάστασης διασφαλίζει ότι ροές προϊόντων μπορούν να πραγματοποιηθούν μόνο από sites που είναι ενεργά στο βελτιστοποιημένο δίκτυο. Αν ένα site δεν είναι ενεργό, δηλαδή $y_i = 0$ τότε δεν μπορεί να παράγει ή να αποστείλει προϊόντα. Όταν $y_i = 1$, το site μπορεί να χρησιμοποιηθεί, εφόσον ικανοποιούνται οι υπόλοιποι περιορισμοί παραγωγικής συμβατότητας, δυναμικότητας και ζήτησης.

- Περιορισμοί πεδίου τιμών

$$\begin{aligned} x_{icp} &\geq 0 \\ y_i &\in \{0,1\} \\ n_{ic} &\in \mathbb{Z}_+ \end{aligned}$$

Η μεταβλητή x_{icp} είναι συνεχής και μη αρνητική, καθώς εκφράζει ποσότητα προϊόντος. Η μεταβλητή y_i είναι δυαδική, καθώς εκφράζει απόφαση ενεργοποίησης ή μη χρήσης site. Η μεταβλητή n_{ic} είναι μη αρνητική ακέραια, επειδή ο αριθμός μεταφορών δεν μπορεί να λάβει δεκαδικές τιμές.

- Περιορισμός αποκλειστικής εξυπηρέτησης πελάτη — Single Source

Στο εναλλακτικό σενάριο single source, επιβάλλεται κάθε πελάτης να εξυπηρετείται αποκλειστικά από μία παραγωγική εγκατάσταση. Για τον σκοπό αυτό εισάγεται η δυαδική μεταβλητή z_{ic} , η οποία λαμβάνει την τιμή 1 όταν το μοντέλο επιλέγει την εγκατάσταση i για την εξυπηρέτηση του πελάτη c , και 0 διαφορετικά.

$$\sum_{i \in I} z_{ic} = 1, \quad \forall c \in C \quad (6)$$

Ο περιορισμός (6) διασφαλίζει ότι κάθε πελάτης ανατίθεται σε μία και μόνο μία παραγωγική εγκατάσταση. Η επιλογή της εγκατάστασης δεν προκαθορίζεται

εξωγενώς, αλλά αποτελεί απόφαση του μοντέλου βελτιστοποίησης, με βάση την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους.

Για να διασφαλιστεί ότι οι ροές προϊόντων προς έναν πελάτη πραγματοποιούνται μόνο από την εγκατάσταση στην οποία έχει ανατεθεί, εισάγεται ο ακόλουθος περιορισμός σύνδεσης:

$$x_{icp} \leq D_{cp}z_{ic}, \forall i \in I, c \in C, p \in P \quad (7)$$

Ο περιορισμός (7) επιβάλλει ότι, αν $z_{ic} = 0$, τότε η ποσότητα x_{icp} μηδενίζεται για όλα τα προϊόντα p . Αντίθετα, όταν $z_{ic} = 1$, η εγκατάσταση i μπορεί να εξυπηρετήσει τη ζήτηση του πελάτη c , υπό την προϋπόθεση ότι τηρούνται οι περιορισμοί συμβατότητας, δυναμικότητας και πλήρους κάλυψης ζήτησης.

Επιπλέον, η ανάθεση πελάτη σε εγκατάσταση επιτρέπεται μόνο εφόσον η συγκεκριμένη εγκατάσταση είναι ενεργή:

$$z_{ic} \leq y_i, \forall i \in I, c \in C \quad (8)$$

Ο περιορισμός (8) συνδέει την απόφαση ανάθεσης πελάτη με την απόφαση ενεργοποίησης της εγκατάστασης. Εάν $y_i = 0$, τότε κανένας πελάτης δεν μπορεί να ανατεθεί στο site i .

Η μεταβλητή z_{ic} ορίζεται ως δυαδική:

$$z_{ic} \in \{0,1\}, \forall i \in I, c \in C \quad (9)$$

Οι παραπάνω περιορισμοί εφαρμόζονται μόνο στο single-source σενάριο. Στο βασικό σενάριο του μοντέλου, οι πελάτες μπορούν να εξυπηρετούνται από περισσότερες από μία εγκαταστάσεις, εφόσον αυτό οδηγεί σε χαμηλότερο συνολικό κόστος και ικανοποιούνται οι περιορισμοί του μοντέλου.

Ερμηνεία της Μαθηματικής Διατύπωσης

Η παραπάνω διατύπωση αποτυπώνει τον πυρήνα του προβλήματος της εργασίας. Το μοντέλο αποφασίζει ταυτόχρονα τις ροές προϊόντων, την αξιοποίηση των εγκαταστάσεων και τον αριθμό των φορτίων. Η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους πραγματοποιείται υπό αυστηρούς περιορισμούς πλήρους κάλυψης ζήτησης,

παραγωγικής δυναμικότητας και παραγωγικής συμβατότητας. Επομένως, η βέλτιστη λύση δεν αποτελεί απλή κατάταξη εργοστασίων με βάση το χαμηλότερο παραγωγικό κόστος, αλλά ολοκληρωμένη λύση δικτύου.

Η μαθηματική μορφή είναι επίσης χρήσιμη για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων του SCG. Εφόσον το SCG παράγει τις βελτιστοποιημένες ροές, συνολικό κόστος και αναθέσεις παραγωγής, η μαθηματική διατύπωση εξηγεί ποια οικονομική και επιχειρησιακή λογική βρίσκεται πίσω από αυτά τα αποτελέσματα. Με αυτόν τον τρόπο, τα αποτελέσματα του λογισμικού μπορούν να παρουσιαστούν όχι ως «μαύρο κουτί», αλλά ως αποτέλεσμα ενός σαφώς ορισμένου προβλήματος βελτιστοποίησης.

4.5 Υλοποίηση στο Supply Chain Guru

Η υλοποίηση του μοντέλου στο Supply Chain Guru αποτελεί το πρακτικό στάδιο της μεθοδολογίας. Το SCG χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση του φυσικού δικτύου, την εισαγωγή των σχετικών παραμέτρων, τον ορισμό των επιτρεπόμενων ροών και την επίλυση του προβλήματος με βάση την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους. Η χρήση του εργαλείου είναι συμβατή με εφαρμογές της βιβλιογραφίας, όπου το Supply Chain Guru αξιοποιείται για σχεδιασμό δικτύου, ανάλυση σεναρίων και αξιολόγηση κόστους σε υφιστάμενα ή εναλλακτικά δίκτυα (Kong et al., 2024).

Στο SCG, κάθε παραγωγική μονάδα εισάγεται ως κόμβος του δικτύου. Οι πελάτες εισάγονται ως σημεία ζήτησης. Τα προϊόντα Diecut, Inliner και Sheet εισάγονται ως προϊόντα και συνδέονται με τη ζήτηση των πελατών. Τα work centers χρησιμοποιούνται για να αποτυπωθούν οι διαθέσιμες παραγωγικές δυνατότητες και η δυναμικότητα ανά εγκατάσταση και προϊόν. Τα production policies ορίζουν ποια προϊόντα μπορούν να παραχθούν σε ποιες εγκαταστάσεις και με ποιο μοναδιαίο παραγωγικό κόστος. Τα transportation policies και τα modes ορίζουν τις επιτρεπόμενες μεταφορικές ροές, τα ναύλα και το μέγεθος των φορτίων.

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζεται η αντιστοίχιση των βασικών στοιχείων της μαθηματικής διατύπωσης με τα αντίστοιχα σημεία ορισμού τους στο Supply Chain Guru, καθώς και ο ρόλος τους στην υλοποίηση του μοντέλου.

Πίνακας 4.1: Σύνδεση μεταβλητών και παραμέτρων του μοντέλου με τους αντίστοιχους πίνακες του Supply Chain Guru

Στοιχείο μαθηματικού μοντέλου	Αντιστοίχιση στο Supply Chain Guru	Ρόλος στην υλοποίηση
i	Sites	παραγωγικές τοποθεσίες / κόμβοι παραγωγής
c	Customers	Πελάτες του δικτύου
p	Products	Προϊόντα - Diecut, Inliner, Sheet
D_cp	Customer Demand	Ζήτηση ανά πελάτη και προϊόν
F_i	Sites	Σταθερό κόστος ανά εργοστάσιο
u_ip	Production Policies	Κόστος παραγωγής
Cap_ip	WorkCenters	Δυναμικότητα
r_i	Modes	Ναύλος ανά χιλιόμετρο
S_i	Modes	Μέγεθος φορτίου
d_ic	Sites and Customers	υπολογισμός απόστασης site-customer από συντεταγμένες των σημείων
a_ip	Production Policies	επιτρεπόμενη ή μη παραγωγή προϊόντος σε εργοστάσιο

Τα δεδομένα που έχουν προετοιμαστεί στο Excel μεταφέρονται στα αντίστοιχα SCG tables. Η σωστή αντιστοίχιση των στοιχείων του μαθηματικού μοντέλου με τα αντίστοιχα πεδία του Supply Chain Guru είναι ιδιαίτερα σημαντική για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Ακόμη και ένα σφάλμα στη μονάδα μέτρησης, στη δυνατότητα παραγωγής ενός προϊόντος από ένα συγκεκριμένο site ή στον μεταφορικό ναύλο μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη λύση που θα προκύψει από το μοντέλο. Για τον λόγο αυτό, πριν από την εκτέλεση των σεναρίων πραγματοποιείται έλεγχος συνέπειας των δεδομένων, με έμφαση στις μονάδες μέτρησης των ποσοτήτων, στις συντεταγμένες των σημείων, στις διαθέσιμες δυναμικότητες και στις επιμέρους κατηγορίες κόστους.

Το SCG παρέχει τα αποτελέσματα σε μορφή συνολικού κόστους, επιμέρους κατηγοριών κόστους και των βέλτιστων ροών. Τα αποτελέσματα αυτά επιτρέπουν τη σύγκριση διαφορετικών σεναρίων με κοινή μεθοδολογική βάση. Ιδιαίτερη σημασία έχει ότι το εργαλείο δεν χρησιμοποιείται απλώς για τη γραφική αναπαράσταση του δικτύου, αλλά για την υπολογιστική αναζήτηση της λύσης που ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος υπό τους περιορισμούς που έχουν οριστεί.

Παράλληλα, η χρήση του SCG διευκολύνει τη διοικητική ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Οι αποφάσεις παραγωγικής ανάθεσης μπορούν να παρουσιαστούν ως ροές πάνω στο δίκτυο, τα κόστη μπορούν να αναλυθούν σε επιμέρους συνιστώσες και τα σενάρια μπορούν να συγκριθούν με βάση οικονομικούς και λειτουργικούς δείκτες. Αυτό καθιστά το μοντέλο χρήσιμο όχι μόνο ως μαθηματική άσκηση, αλλά και ως εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων για τη διοίκηση της εφοδιαστικής αλυσίδας.

4.6 Μεθοδολογία Ανάπτυξης Σεναρίων

Η ανάπτυξη σεναρίων αποτελεί κεντρικό στοιχείο της μεθοδολογίας, επειδή επιτρέπει τη σύγκριση της υφιστάμενης λειτουργίας με εναλλακτικές πολιτικές παραγωγής και διανομής. Στη βιβλιογραφία των εφαρμογών SCG, τα σενάρια χρησιμοποιούνται συχνά για να αξιολογηθεί η επίδραση διαφορετικών network configurations, απενεργοποίησης εγκαταστάσεων, αλλαγών στη ζήτηση ή διαφοροποιημένων πολιτικών μεταφοράς. Στην παρούσα εργασία, τα σενάρια σχεδιάζονται ώστε να απαντούν άμεσα στο ερευνητικό ερώτημα και να αναδείξουν το trade-off μεταξύ κόστους και λειτουργικής απλότητας.

Το πρώτο σενάριο είναι το Baseline Network. Σκοπός του είναι να αναπαραστήσει την υφιστάμενη κατάσταση του δικτύου, δηλαδή τις σημερινές αναθέσεις παραγωγής, τις υφιστάμενες ροές προϊόντων από τα εργοστάσια προς τους πελάτες και το αντίστοιχο συνολικό κόστος. Το baseline δεν αξιολογείται ως προτεινόμενη λύση, αλλά χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς για τη σύγκριση των υπόλοιπων σεναρίων. Μέσω αυτού μπορεί να αποτυπωθεί το κόστος της σημερινής λειτουργίας και να προσδιοριστεί σε ποιο βαθμό τα βελτιστοποιημένα σενάρια οδηγούν σε εξοικονόμηση κόστους ή σε αλλαγές στη δομή των ροών.

Το δεύτερο σενάριο είναι το Optimized Baseline. Σε αυτό το σενάριο διατηρούνται οι υφιστάμενοι περιορισμοί του δικτύου, όπως οι διαθέσιμες παραγωγικές δυναμικότητες, τα υφιστάμενα εργοστάσια, τα προϊόντα και η ζήτηση,

αλλά ανοίγουν τα sourcing policies, ώστε το μοντέλο να μπορεί να αναζητήσει τη βέλτιστη ανάθεση παραγωγής και διανομής. Με άλλα λόγια, το Supply Chain Guru δεν περιορίζεται στις σημερινές αναθέσεις, αλλά μπορεί να επιλέξει από ποιο εργοστάσιο θα παραχθεί κάθε προϊόν και από ποιο εργοστάσιο θα εξυπηρετηθεί κάθε πελάτης, υπό τους υφιστάμενους παραγωγικούς και λειτουργικούς περιορισμούς. Σκοπός του σεναρίου είναι να εξεταστεί ποια βελτίωση μπορεί να επιτευχθεί μόνο μέσω ανακατανομής των ροών, χωρίς αλλαγή της διαθέσιμης δυναμικότητας των εργοστασίων.

Το τρίτο σενάριο είναι το Optimized & Full Capacities. Στο σενάριο αυτό το μοντέλο εξακολουθεί να αναζητά τη βέλτιστη ανάθεση παραγωγής και διανομής, αλλά διαφοροποιείται η διαθέσιμη παραγωγική δυναμικότητα των εργοστασίων. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η δυνατότητα αύξησης της δυναμικότητας μέσω εντατικοποίησης της λειτουργίας, με παραδοχή λειτουργίας έξι ημερών την εβδομάδα και τριών βαρδιών για όλα τα εργοστάσια. Με τον τρόπο αυτό, το σενάριο αξιολογεί κατά πόσο η αύξηση της διαθέσιμης παραγωγικής ικανότητας μπορεί να επιτρέψει οικονομικότερη κατανομή παραγωγής, καλύτερη αξιοποίηση των εργοστασίων και περαιτέρω μείωση του συνολικού κόστους. Η σύγκριση με το Optimized Baseline δείχνει αν οι υφιστάμενοι περιορισμοί δυναμικότητας αποτελούν εμπόδιο για την επίτευξη χαμηλότερου κόστους.

Το τέταρτο σενάριο είναι το Optimized & Full Capacities & Single Source. Το σενάριο αυτό βασίζεται στις ίδιες αυξημένες παραγωγικές δυναμικότητες με το τρίτο σενάριο, δηλαδή στη λειτουργία έξι ημερών και τριών βαρδιών για όλα τα εργοστάσια, αλλά προσθέτει τον περιορισμό του single sourcing. Συγκεκριμένα, κάθε πελάτης εξυπηρετείται από ένα μόνο εργοστάσιο. Η πολιτική αυτή μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερο συνολικό κόστος σε σχέση με μια πιο ευέλικτη λύση, επειδή περιορίζει τη δυνατότητα κατανομής της ζήτησης σε περισσότερα sites. Ωστόσο, μειώνει την επιχειρησιακή πολυπλοκότητα, καθώς περιορίζει τον αριθμό των ροών, απλοποιεί τον συντονισμό παραγγελιών και διευκολύνει την εφαρμογή της λύσης στην πράξη. Για τον λόγο αυτό, το σενάριο χρησιμοποιείται για να αξιολογηθεί το trade-off μεταξύ οικονομικής αποδοτικότητας και λειτουργικής απλότητας.

Πίνακας 4.2: Περιγραφή και σκοπός των σεναρίων βελτιστοποίησης

Σενάριο	Περιγραφή	Σκοπός
Baseline	Υφιστάμενες αναθέσεις παραγωγής, υφιστάμενες ροές και σημερινό κόστος.	Σημείο αναφοράς για τη σύγκριση των βελτιστοποιημένων λύσεων.
Optimized Baseline	Ενεργοποίηση εναλλακτικών πολιτικών παραγωγής και μεταφοράς, με διατήρηση των υφιστάμενων περιορισμών δυναμικότητας.	Εύρεση του βέλτιστου δικτύου χωρίς αλλαγή της διαθέσιμης παραγωγικής δυναμικότητας.
Optimized & Full Capacities	Βελτιστοποίηση με αυξημένη δυναμικότητα, βάσει λειτουργίας 6 ημερών και 3 βαρδιών σε όλα τα εργοστάσια.	Αξιολόγηση της επίδρασης της αύξησης παραγωγικής δυναμικότητας στο συνολικό κόστος.
Optimized & Full Capacities & Single Source	Ίδιο με το προηγούμενο, αλλά κάθε πελάτης εξυπηρετείται από ένα μόνο εργοστάσιο.	Μείωση επιχειρησιακής πολυπλοκότητας και αξιολόγηση του trade-off κόστους-απλότητας.

4.7 Κριτήρια Αξιολόγησης Αποτελεσμάτων

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων βασίζεται σε κοινά κριτήρια για όλα τα σενάρια. Η χρήση κοινών δεικτών είναι απαραίτητη, ώστε οι λύσεις να συγκρίνονται με συνεπή τρόπο και να αναδεικνύονται οι πραγματικές οικονομικές και λειτουργικές διαφορές.

Το βασικό κριτήριο είναι το συνολικό κόστος του δικτύου. Το total cost συγκρίνεται μεταξύ baseline και βελτιστοποιημένων σεναρίων, ώστε να εκτιμηθεί η οικονομική επίδραση της ανακατανομής παραγωγής και διανομής. Η ανάλυση πραγματοποιείται επίσης ανά κατηγορία κόστους: fixed operating cost, production cost και transportation cost. Η διάκριση αυτή είναι σημαντική διότι μια λύση μπορεί να μειώνει το παραγωγικό κόστος αλλά να αυξάνει το μεταφορικό κόστος ή το αντίστροφο.

Η ποσοστιαία εξοικονόμηση κόστους υπολογίζεται σε σχέση με το baseline scenario ως εξής:

$$\text{Cost Saving \%} = [(TC_{\text{Baseline}} - TC_{\text{Scenario}}) / TC_{\text{Baseline}}] \times 100$$

Ο δείκτης αυτός παρέχει έναν άμεσο τρόπο σύγκρισης των σεναρίων και διευκολύνει τη διοικητική ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Θετική τιμή σημαίνει ότι το σενάριο μειώνει το κόστος σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση, ενώ μηδενική ή αρνητική τιμή δείχνει ότι η αλλαγή δεν δημιουργεί οικονομικό όφελος.

Πέρα από το κόστος, αξιολογούνται οι ροές προϊόντων. Για κάθε σενάριο εξετάζεται από ποιο εργοστάσιο εξυπηρετείται κάθε πελάτη και ποια προϊόντα παράγονται σε κάθε εργοστάσιο. Η ανάλυση αυτή είναι απαραίτητη για να κατανοηθεί εάν η μείωση του κόστους προκύπτει από αλλαγή παραγωγικής ανάθεσης, από μείωση μεταφορικών αποστάσεων, από καλύτερη αξιοποίηση δυναμικότητας ή από συνδυασμό αυτών των παραγόντων.

Ιδιαίτερη σημασία έχει επίσης η παραγωγή ανά site και ο βαθμός αξιοποίησης της δυναμικότητας. Ένα site μπορεί να εμφανίζεται οικονομικά συμφέρον, αλλά να μην έχει επαρκή χωρητικότητα για να αναλάβει μεγαλύτερο όγκο παραγωγής. Αντίστροφα, ένα site με υψηλό σταθερό κόστος και χαμηλή αξιοποίηση μπορεί να επιβαρύνει δυσανάλογα το δίκτυο. Για τον λόγο αυτό, η ανάλυση ανά εγκατάσταση αποτελεί βασικό εργαλείο ερμηνείας των αποτελεσμάτων.

Τέλος, αξιολογείται η πολυπλοκότητα της λύσης. Το multi-sourcing μπορεί να μειώνει το κόστος, αλλά αυξάνει τον αριθμό των ροών και την ανάγκη συντονισμού. Το single-sourcing μπορεί να έχει υψηλότερο κόστος, αλλά είναι πιο απλό στην εφαρμογή. Η τελική διοικητική πρόταση πρέπει να λάβει υπόψη όχι μόνο το αριθμητικά ελάχιστο κόστος, αλλά και την επιχειρησιακή εφαρμόσιμότητα της λύσης.

Πίνακας 4.3: Κριτήρια αξιολόγησης των σεναρίων βελτιστοποίησης

Κριτήριο αξιολόγησης	Ερμηνεία
Total Cost	Συνολικό κόστος δικτύου
Fixed Operating Cost	Κόστος λειτουργίας ενεργών sites
Production Cost	Κόστος παραγωγής ανά site και product group
Transportation Cost	Κόστος μεταφοράς ανά site-customer ροή
Cost Saving %	Ποσοστιαία εξοικονόμηση έναντι baseline
Product Flows	Ποσότητες ανά site-customer-product
Production per Site	Όγκος παραγωγής και ρόλος κάθε site
Operational Complexity	Απλότητα ή πολυπλοκότητα εφαρμογής σεναρίου

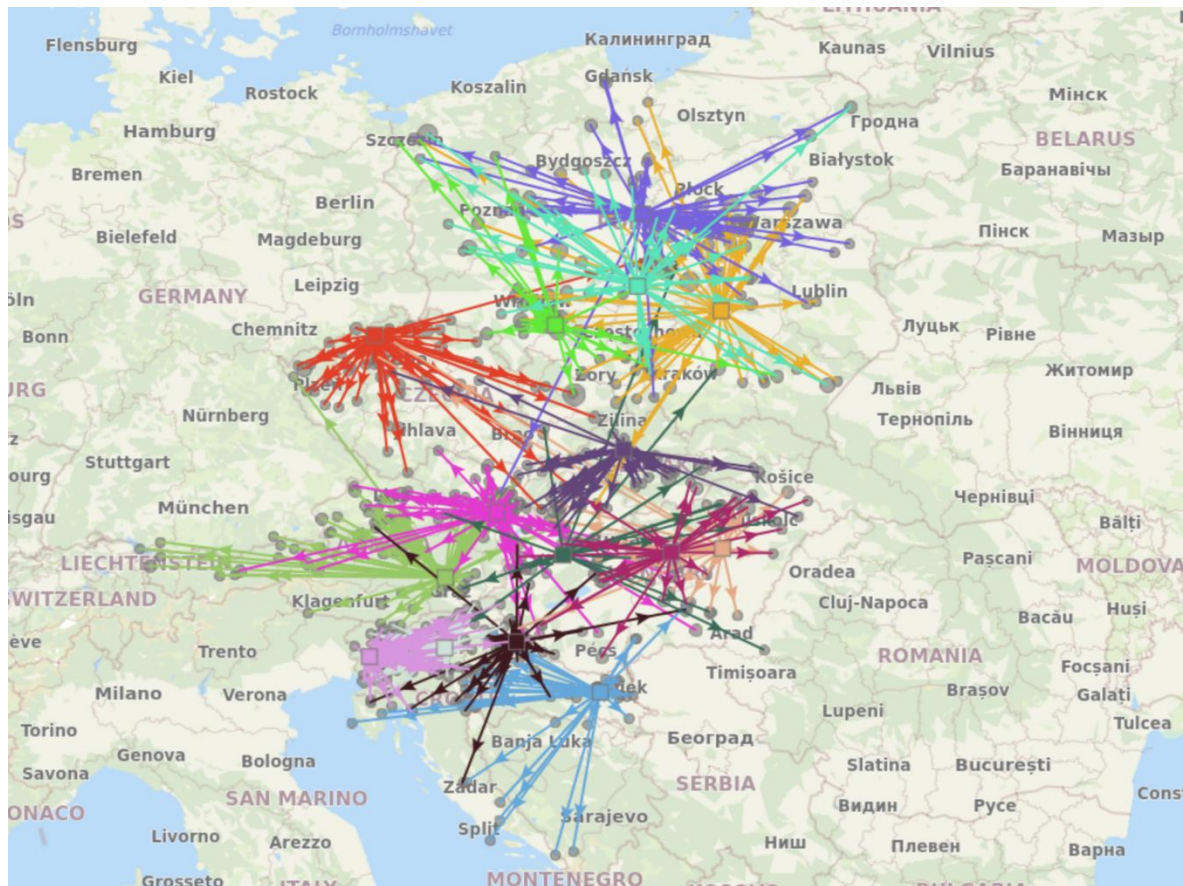
5. Ανάλυση και Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης του δικτύου παραγωγής και διανομής. Η παρουσίαση ξεκινά από το Baseline, το οποίο λειτουργεί ως σημείο αναφοράς, και συνεχίζει με τα τρία βελτιστοποιημένα σενάρια. Στο τέλος του κεφαλαίου πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση, με έμφαση στη συνολική εξοικονόμηση κόστους, στη μεταβολή των ροών παραγωγής, στην αξιοποίηση των εργοστασίων και στην επιλογή του τελικού σεναρίου εφαρμογής.

Η σύγκριση βασίζεται σε τέσσερις βασικές ομάδες αποτελεσμάτων από το Supply Chain Guru: Financial Summary, Cost-to-Serve, Site Summary και Work Center Summary. Επειδή η συνολική ζήτηση παραμένει σταθερή σε όλα τα σενάρια, ίση με 758.326.039 μονάδες, οι διαφορές που εμφανίζονται στα αποτελέσματα οφείλονται αποκλειστικά στην ανακατανομή παραγωγής, στις πολιτικές εξυπηρέτησης και στη διαθέσιμη παραγωγική δυναμικότητα.

5.1 Baseline Scenario

Το Baseline Scenario αποτυπώνει την υφιστάμενη κατάσταση του δικτύου πριν από οποιαδήποτε βελτιστοποιημένη ανακατανομή της παραγωγής. Σκοπός του δεν είναι να αποτελέσει προτεινόμενη λύση, αλλά να λειτουργήσει ως βάση σύγκρισης για την αξιολόγηση των εναλλακτικών σεναρίων. Στο σενάριο αυτό χρησιμοποιούνται και τα 15 παραγωγικά sites.



Σχήμα 5.1: Γεωγραφική απεικόνιση των ροών εξυπηρέτησης στο *Baseline Scenario*.

Η χαρτογραφική αποτύπωση του *Baseline Scenario* δείχνει ένα πλήρως ανεπτυγμένο και γεωγραφικά εκτεταμένο δίκτυο ροών, στο οποίο η ζήτηση εξυπηρετείται από πολλαπλά παραγωγικά σημεία. Οι ροές εκτείνονται κυρίως στην Κεντρική, Ανατολική και Νοτιοανατολική Ευρώπη, γεγονός που αποτυπώνει την ευρεία γεωγραφική κάλυψη του υφιστάμενου δικτύου και τη σημαντική απόσταση μεταξύ ορισμένων παραγωγικών sites και πελατών.

Η έντονη πυκνότητα και η αλληλοεπικάλυψη των γραμμών υποδηλώνουν ότι το *Baseline* χαρακτηρίζεται από αυξημένη λειτουργική πολυπλοκότητα. Η πολυπλοκότητα αυτή δεν προκύπτει μόνο από τον αριθμό των ενεργών εγκαταστάσεων, αλλά και από τον μεγάλο αριθμό επιμέρους συνδέσεων μεταξύ εργοστασίων και πελατών. Συνεπώς, η υφιστάμενη κατάσταση απαιτεί σημαντικό συντονισμό σε επίπεδο προγραμματισμού παραγωγής, δρομολόγησης, μεταφορικής εκτέλεσης και παρακολούθησης της εξυπηρέτησης.

Παράλληλα, ο χάρτης αναδεικνύει ότι αρκετές ροές δεν περιορίζονται σε άμεση τοπική εξυπηρέτηση, αλλά εκτείνονται σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Για τη βιομηχανία χαρτονιού, όπου τα προϊόντα έχουν υψηλό όγκο σε σχέση με την αξία τους, η χωρική

αυτή διάσταση είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς το κόστος μεταφοράς μπορεί να επηρεάσει ουσιαστικά το συνολικό κόστος εξυπηρέτησης. Επομένως, το Baseline παρέχει μια ρεαλιστική εικόνα του σημερινού τρόπου λειτουργίας, αλλά ταυτόχρονα αναδεικνύει σημεία πιθανής αναποτελεσματικότητας στο δίκτυο ροών.

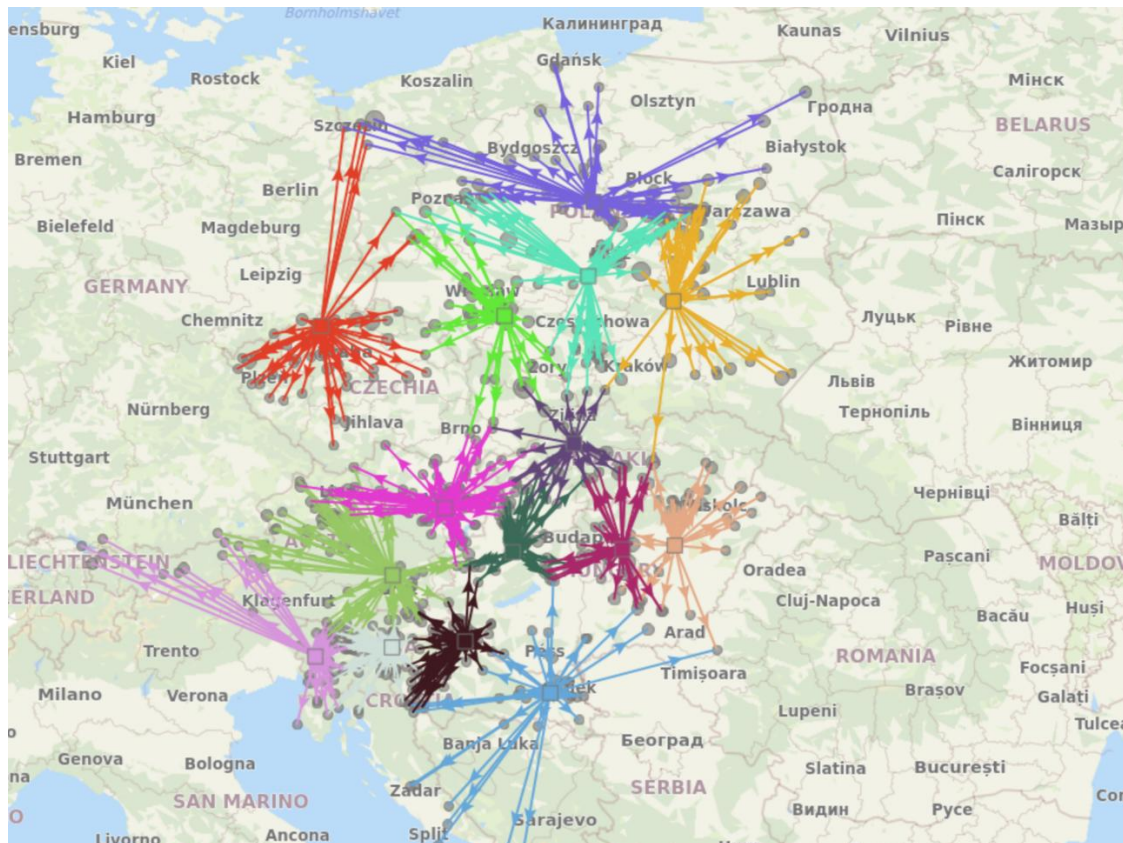
Το συνολικό κόστος του Baseline ανέρχεται σε €94.82 εκ.. Από αυτό, €68.94 εκ. αφορά παραγωγικό κόστος, €16.61 εκ. αφορά κόστος μεταφοράς και €9.28 εκ. αφορά fixed operating cost. Το μοναδιαίο κόστος διαμορφώνεται σε €0.1250 ανά μονάδα. Η εικόνα αυτή επιβεβαιώνει ότι το παραγωγικό κόστος αποτελεί τον βασικό οδηγό κόστους, ενώ το μεταφορικό κόστος παραμένει επίσης σημαντικό, λόγω του όγκου και της γεωγραφικής διασποράς των ροών.

Πίνακας 5.1: Βασικοί δείκτες του Baseline Scenario.

Δείκτης	Baseline
Συνολική Ποσότητα	758.326.039
Συνολικό Κόστος	€94.82 εκ.
Κόστος Παραγωγής	€68.94 εκ.
Κόστος Μεταφοράς	€16.61 εκ.
Σταθερό Κόστος	€9.28 εκ.
Μοναδιαίο Κόστος	€0.1250
Ενεργές Εγκαταστάσεις	15
Δρομολόγια	636
Μέση απόσταση εξυπηρέτησης	152 χλμ

5.2 Optimized Baseline Scenario

Το Optimized Baseline Scenario διατηρεί την ίδια διαθέσιμη παραγωγική δυναμικότητα και τα ίδια ανοικτά sites με το Baseline, αλλά επιτρέπει στο μοντέλο να ανακαταનેίμει την παραγωγή και τις ροές εξυπηρέτησης με στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους. Επομένως, το σενάριο απομονώνει την επίδραση της βελτιστοποιημένης ανάθεσης χωρίς αλλαγή στις δυναμικότητες του δικτύου.



Σχήμα 5.2: Γεωγραφική απεικόνιση των ροών εξυπηρέτησης στο Optimized Baseline Scenario.

Η χαρτογραφική αποτύπωση του Optimized Baseline Scenario δείχνει ότι το δίκτυο παραμένει γεωγραφικά εκτεταμένο, όμως οι ροές κατανέμονται πλέον με διαφορετικό τρόπο σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση. Παρότι τα sites και οι συνολικοί περιορισμοί δυναμικότητας δεν μεταβάλλονται, η βελτιστοποίηση αναδιοργανώνει τη σχέση μεταξύ εργοστασίων και πελατών, δημιουργώντας νέο χωρικό μοτίβο εξυπηρέτησης.

Στον χάρτη διακρίνεται αυξημένη πυκνότητα και αλληλοεπικάλυψη ροών, ιδίως γύρω από τις περιοχές της Πολωνίας, της Ουγγαρίας και της Κεντρικής Ευρώπης. Το εύρημα αυτό συνδέεται με την αύξηση των δρομολόγια και δείχνει ότι το μοντέλο επιλέγει πιο λεπτομερή και περισσότερο διασπασμένη ανάθεση εξυπηρέτησης, ώστε να εκμεταλλευθεί καλύτερα τις διαφορές μεταξύ παραγωγικού και μεταφορικού κόστους.

Επομένως, το Optimized Baseline δεν αλλάζει τη βασική αρχιτεκτονική του δικτύου, αλλά βελτιώνει τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιείται η ήδη διαθέσιμη υποδομή. Η οικονομική βελτίωση προκύπτει κυρίως από τη χωρική ανακατανομή των ροών και όχι από κλείσιμο εγκαταστάσεων ή αύξηση δυναμικότητας. Από διοικητική

άποψη, αυτό σημαίνει ότι το σενάριο είναι άμεσα εφαρμόσιμο, αλλά συνοδεύεται από αυξημένη λειτουργική πολυπλοκότητα στην εκτέλεση.

Το συνολικό κόστος μειώνεται σε €89.09 εκ., δηλαδή επιτυγχάνεται εξοικονόμηση €5.73 εκ. ή 6.04% σε σχέση με το Baseline. Η μεγαλύτερη συνεισφορά της βελτίωσης προέρχεται από το transportation cost, το οποίο μειώνεται από €16.61 εκ. σε €12.17 εκ.. Το production cost μειώνεται επίσης, αλλά σε μικρότερο βαθμό, από €68.94 εκ. σε €67.64 εκ..

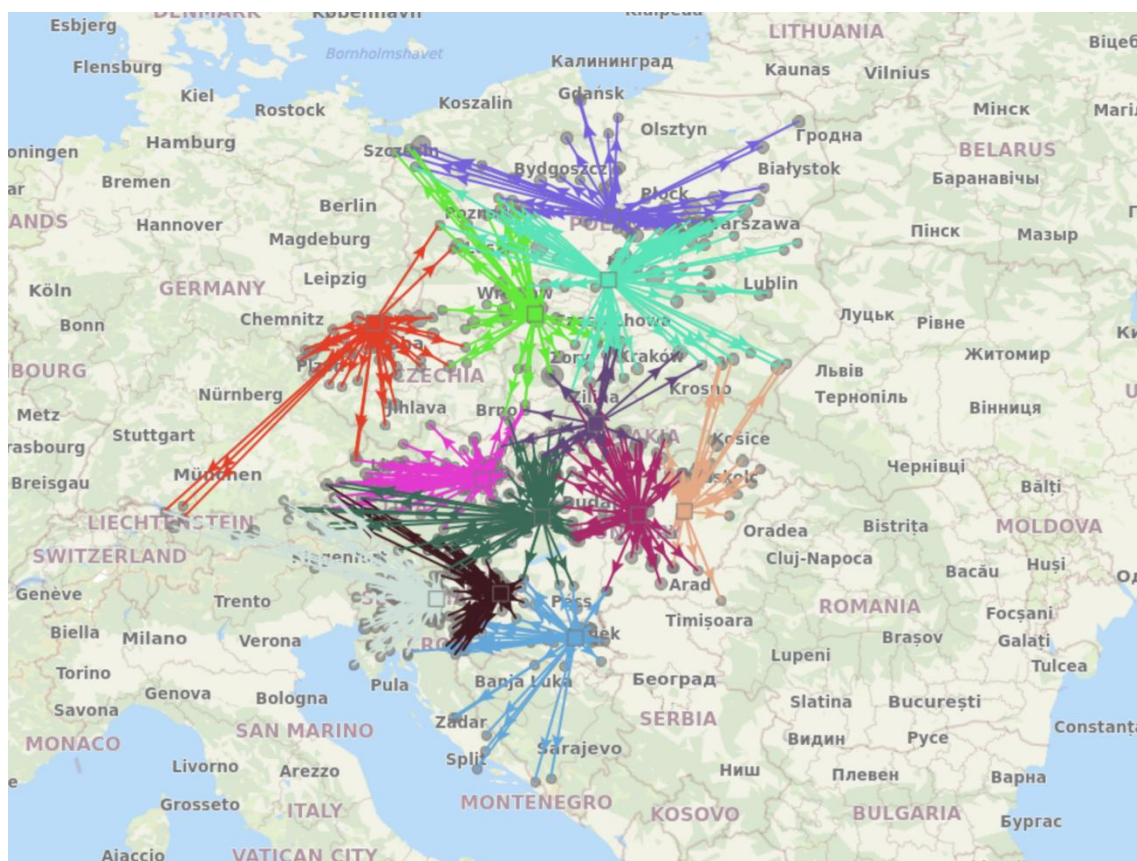
Πίνακας 5.2: Βασικοί δείκτες του Optimized Baseline Scenario.

Δείκτης	Optimized Baseline
Συνολική Ποσότητα	758.326.039
Συνολικό Κόστος	€89.09 εκ.
Κόστος Παραγωγής	€67.64 εκ.
Κόστος Μεταφοράς	€12.17 εκ.
Σταθερό Κόστος	€9.28 εκ.
Μοναδιαίο Κόστος	€0.1175
Ενεργές Εγκαταστάσεις	15
Δρομολόγια	722
Μέση απόσταση εξυπηρέτησης	105 χλμ

Η αύξηση των δρομολογίων από 636 σε 722 δείχνει ότι το μοντέλο επιλέγει πιο σύνθετη δικτυακή λύση για να πετύχει χαμηλότερο κόστος. Αυτό είναι τυπικό αποτέλεσμα σε περιβάλλον multi-source optimization: η οικονομική λύση μπορεί να διασπάσει την εξυπηρέτηση σε περισσότερες ροές, εφόσον αυτό μειώνει το άθροισμα παραγωγικού και μεταφορικού κόστους. Επίσης, η μείωση της μέσης απόστασης εξυπηρέτησης από 152 χλμ. στο Baseline σε 105 χλμ. δείχνει ότι, ακόμη και χωρίς αύξηση της διαθέσιμης παραγωγικής δυναμικότητας ή αλλαγή των ενεργών sites, το μοντέλο καταφέρνει να ανακαταναείμει τις ροές με τρόπο που φέρνει την παραγωγή πιο κοντά στους τελικούς πελάτες. Συνεπώς, η μείωση του transportation cost δεν οφείλεται μόνο σε διαφορετική τιμολόγηση ή επιλογή παραγωγικών μονάδων, αλλά και σε πραγματική χωρική βελτίωση του δικτύου. Διοικητικά, το σενάριο αυτό έχει σαφές οικονομικό όφελος, αλλά αυξάνει την πολυπλοκότητα εκτέλεσης και παρακολούθησης των ροών.

5.3 Optimized & Full Capacities Scenario

Το τρίτο σενάριο εξετάζει τη βελτιστοποίηση του δικτύου υπό αυξημένη διαθέσιμη παραγωγική δυναμικότητα, δηλαδή μετατροπή όλων των εργοστασίων σε λειτουργία τριών βαρδιών και 6 ημερών. Η λογική του σεναρίου είναι να ελεγχθεί αν η διεύρυνση της δυναμικότητας ανα εργοστάσιο επιτρέπει στο μοντέλο να μεταφέρει μεγαλύτερο όγκο παραγωγής σε πιο αποδοτικά εργοστάσια.



Σχήμα 5.3: Γεωγραφική απεικόνιση των ροών εξυπηρέτησης στο Optimized & Full Capacities Scenario.

Ο χάρτης του Optimized & Full Capacities Scenario παρουσιάζει πιο συγκεντρωμένη χωρική δομή σε σχέση με τα προηγούμενα σενάρια. Η δυνατότητα αξιοποίησης αυξημένων παραγωγικών δυναμικοτήτων επιτρέπει στο μοντέλο να αναθέτει μεγαλύτερους όγκους σε λιγότερα και αποδοτικότερα παραγωγικά σημεία, με αποτέλεσμα πιο καθαρές ζώνες εξυπηρέτησης και εντονότερη συγκέντρωση ροών σε επιλεγμένους κόμβους.

Στη χαρτογραφική αποτύπωση φαίνεται ότι ορισμένα sites αποκτούν ευρύτερη εμβέλεια και εξυπηρετούν πελάτες πέρα από την άμεση γειτονική τους περιοχή. Αυτό υποδηλώνει ότι, όταν αυξάνεται η διαθέσιμη δυναμικότητα, η βελτιστοποίηση δεν

βασίζεται αποκλειστικά στη γεωγραφική εγγύτητα, αλλά αξιοποιεί έναν πιο ισορροπημένο συνδυασμό κόστους παραγωγής, κόστους μεταφοράς και διαθεσιμότητας πόρων.

Το συνολικό κόστος μειώνεται σε €85.75 εκ., δηλαδή επιτυγχάνεται εξοικονόμηση €9.07 εκ. ή 9.57% σε σχέση με το Baseline. Η μεγαλύτερη συνεισφορά της βελτίωσης προέρχεται από το Κόστος παραγωγής το οποίο μειώνεται από €68.94 εκ. σε €64.76 εκ. Το κόστος μεταφοράς μειώνεται επίσης, αλλά σε μικρότερο βαθμό, από €16.61 εκ. σε €13.85 εκ..

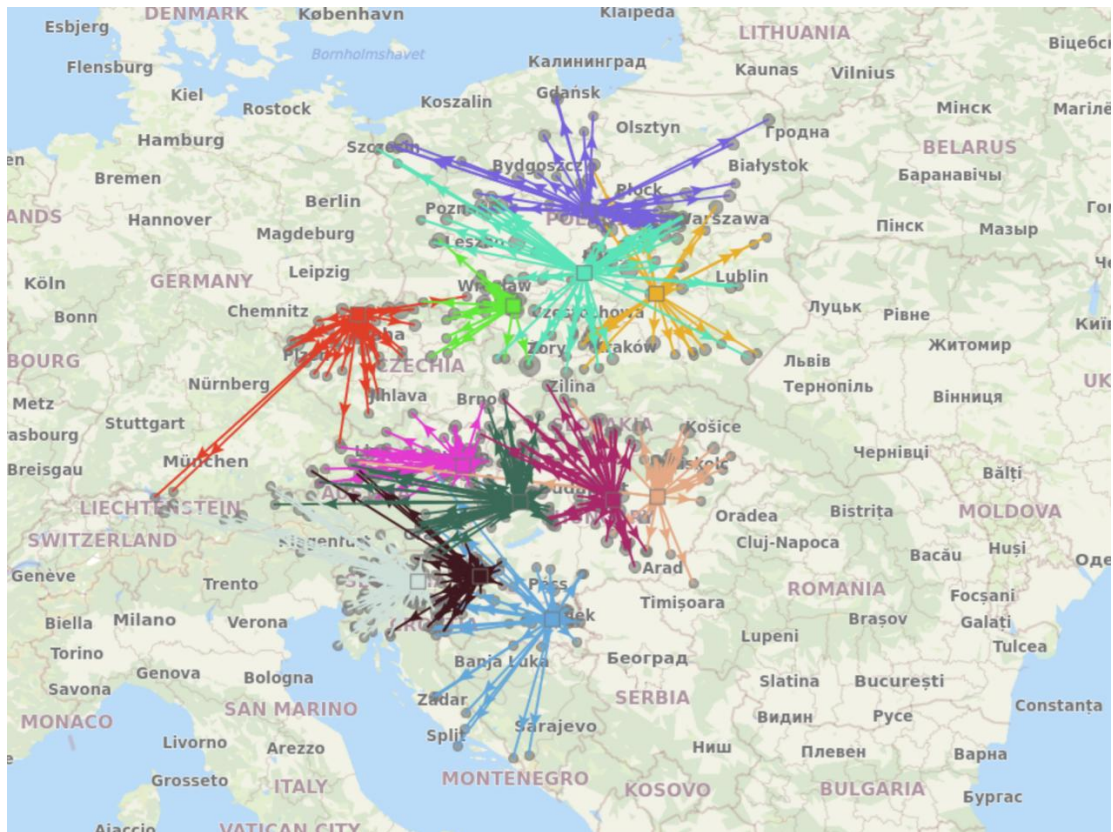
Πίνακας 5.3: Βασικοί δείκτες του Optimized & Full Capacities Scenario.

Δείκτης	Optimized & Full Capacities
Συνολική Ποσότητα	758.326.039
Συνολικό Κόστος	€85.75 εκ.
Κόστος Παραγωγής	€64.76 εκ.
Κόστος Μεταφοράς	€13.85 εκ.
Σταθερό Κόστος	€7.15 εκ.
Μοναδιαίο Κόστος	€0.1131
Ενεργές Εγκαταστάσεις	12
Δρομολόγια	734
Μέση απόσταση εξυπηρέτησης	126 χλμ

Σε επίπεδο παραγωγικής κατανομής, το σενάριο αυτό κλείνει τα AT1, PL1 και SI2, ενώ συγκεντρώνει μεγαλύτερο όγκο σε sites όπως PL4, HU2, HU3 και SI1. Η μεταβολή αυτή δείχνει ότι η βελτιστοποίηση δεν επιδιώκει απλώς γεωγραφική εγγύτητα προς τον πελάτη, αλλά αξιολογεί ταυτόχρονα παραγωγικό κόστος, μεταφορικό κόστος και τη δυναμικότητα παραγωγής. Η αύξηση της διαθέσιμης δυναμικότητας μειώνει την πίεση στο δίκτυο και επιτρέπει την επιλογή πιο οικονομικών εργοστασίων.

5.4 Optimized & Full Capacities & Single Source Scenario

Το τέταρτο σενάριο εφαρμόζει την ίδια λογική αυξημένων δυναμικοτήτων με το προηγούμενο σενάριο, αλλά προσθέτει πολιτική single source στην εξυπηρέτηση πελατών. Η λογική του single source είναι ότι κάθε πελάτης εξυπηρετείται από ένα κύριο παραγωγικό site, μειώνοντας τη διαχειριστική πολυπλοκότητα, τις πολλαπλές αναθέσεις και την ανάγκη συντονισμού περισσότερων ροών ανά πελάτη.



Σχήμα 5.4: Γεωγραφική απεικόνιση των ροών εξυπηρέτησης στο Optimized & Full Capacities & Single Source Scenario.

Η χαρτογραφική εικόνα του Single Source Scenario αναδεικνύει ένα σαφώς πιο δομημένο και ευανάγνωστο δίκτυο εξυπηρέτησης. Οι ροές οργανώνονται σε πιο καθαρές γεωγραφικές περιοχές ευθύνης, καθώς κάθε πελάτης συνδέεται με μία βασική πηγή εξυπηρέτησης. Σε αντίθεση με τα multi-source σεσνάρια, η αλληλοεπικάλυψη των γραμμών είναι περιορισμένη και η χωρική διάρθρωση του δικτύου εμφανίζεται πιο συνεκτική.

Ο χάρτης δείχνει ότι η πολιτική single source οδηγεί σε σαφέστερη οριοθέτηση των ζωνών κάλυψης των παραγωγικών sites, διατηρώντας ταυτόχρονα ευρεία γεωγραφική κάλυψη. Κάθε κόμβος αναλαμβάνει ένα πιο διακριτό χαρτοφυλάκιο πελατών, γεγονός που διευκολύνει τον προγραμματισμό παραγωγής, τη διαχείριση παραγγελιών και την παρακολούθηση της εξυπηρέτησης σε επιχειρησιακό επίπεδο.

Παρά το γεγονός ότι ορισμένες ροές παραμένουν σχετικά μεγάλες σε απόσταση, η συνολική εικόνα είναι λειτουργικά απλούστερη. Η μείωση των δρομολογίων αποτυπώνεται οπτικά σε ένα δίκτυο με λιγότερες και πιο ξεκάθαρες συνδέσεις, στοιχείο που ενισχύει τη διοικητική προτίμηση του σεναρίου και δικαιολογεί τη χρήση του ως τελική προτεινόμενη λύση.

Το συνολικό κόστος του σεναρίου ανέρχεται σε €86.32 εκ.. Σε σχέση με το Baseline, η τελική εξοικονόμηση είναι €8.50 εκ., δηλαδή 8.97%. Παρότι το σενάριο είναι κατά περίπου €0.57 εκ. ακριβότερο από το καθαρά οικονομικά βέλτιστο Full Capacities σενάριο, προσφέρει σημαντική απλοποίηση στο δίκτυο μειώνοντας τα δρομολόγια σε 588.

Πίνακας 5.4: Βασικοί δείκτες του Optimized & Full Capacities Scenario.

Δείκτης	Optimized & Full Capacities
Συνολική Ποσότητα	758.326.039
Συνολικό Κόστος	€86.32 εκ.
Κόστος Παραγωγής	€65.07 εκ.
Κόστος Μεταφοράς	€13.69 εκ.
Σταθερό Κόστος	€7.56 εκ.
Μοναδιαίο Κόστος	€0.1138
Ενεργές Εγκαταστάσεις	12
Δρομολόγια	588
Μέση απόσταση εξυπηρέτησης	126 χλμ

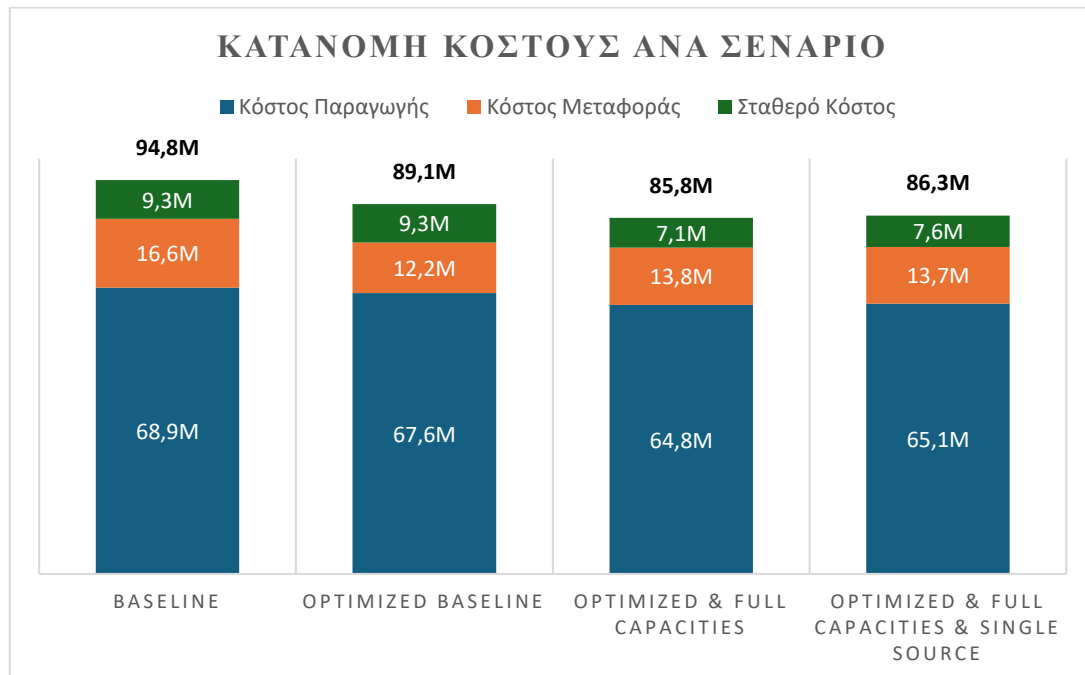
Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό του σεναρίου είναι η μείωση των δρομολογίων σε 588, δηλαδή στο ίδιο επίπεδο με τον αριθμό των πελατών. Αυτό σημαίνει ότι κάθε πελάτης συνδέεται με μία βασική πηγή εξυπηρέτησης, σε αντίθεση με τα multi-source σενάρια όπου μπορεί να υπάρχουν περισσότερες ροές ανά πελάτη. Από επιχειρησιακή άποψη, η απλοποίηση αυτή διευκολύνει τον προγραμματισμό παραγωγής, τη διαχείριση παραγγελιών και τη παρακολούθηση των παραγγελιών.

Σε επίπεδο sites, το single source σενάριο κλείνει τα AT1, SI2 και SK1, ενώ διατηρεί μερική παραγωγή στο PL1. Η μεγαλύτερη αύξηση παραγωγικού όγκου εμφανίζεται στο PL4, στο HU2, στο HU3 και στο SI1, γεγονός που δείχνει συγκέντρωση της παραγωγής σε κόμβους με ευνοϊκότερο συνδυασμό κόστους παραγωγής και κόστους διανομής.

5.5 Συγκριτική αξιολόγηση σεναρίων

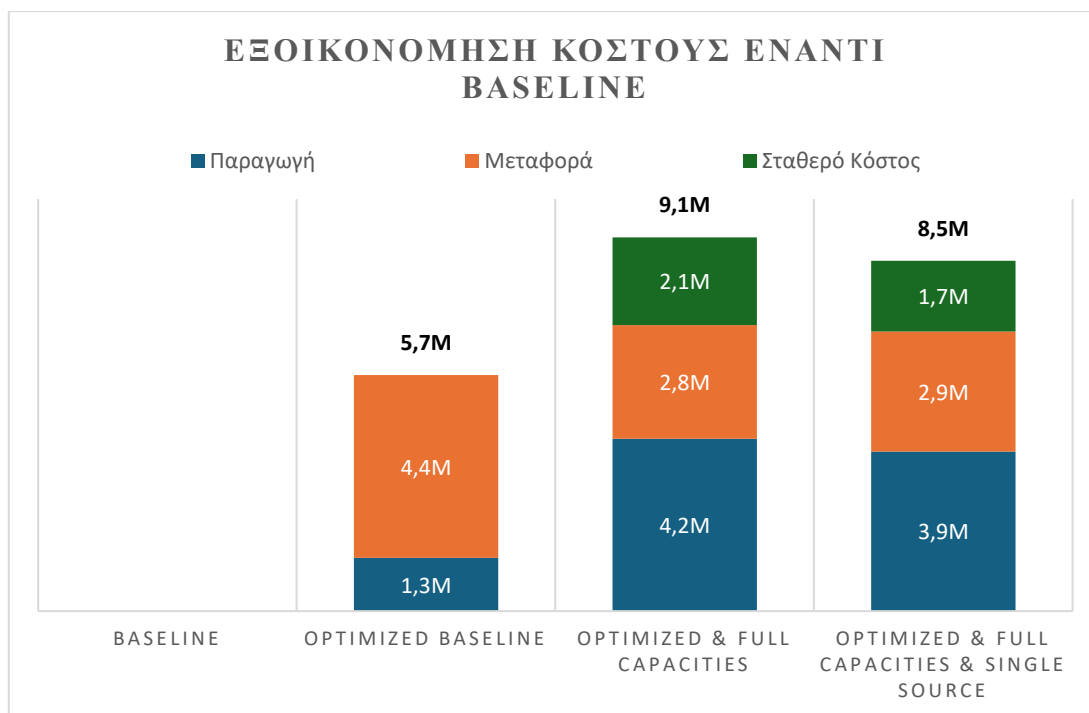
Η συγκριτική αξιολόγηση επιβεβαιώνει ότι και τα τρία βελτιστοποιημένα σενάρια δημιουργούν οικονομικό όφελος έναντι του Baseline. Το Optimized Baseline δείχνει ότι ακόμη και χωρίς αύξηση δυναμικότητας μπορεί να επιτευχθεί ουσιαστική μείωση κόστους μέσω ανακατανομής ροών. Το Optimized & Full Capacities επιτυγχάνει το

χαμηλότερο συνολικό κόστος, ενώ το Single Source θυσιάζει μικρό μέρος της μέγιστης εξοικονόμησης για σημαντική μείωση της λειτουργικής πολυπλοκότητας.



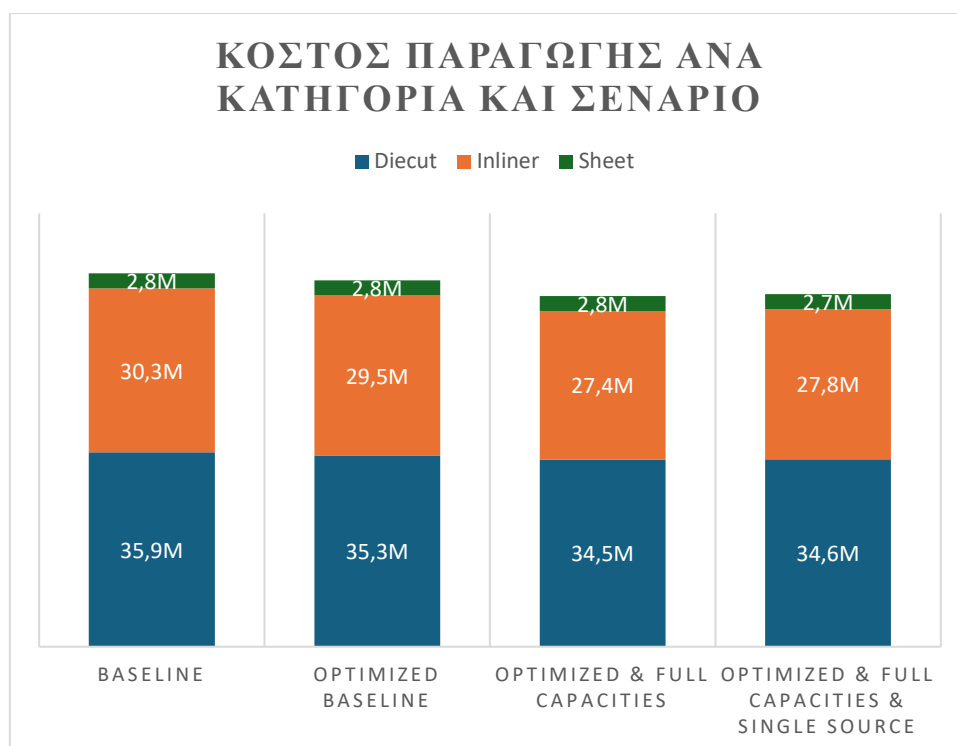
Σχήμα 5.5: Διάρθρωση κόστους παραγωγής, μεταφοράς και σταθερού κόστους ανά σενάριο.

Παρατηρείται ότι το κόστος παραγωγής παραμένει η μεγαλύτερη συνιστώσα του συνολικού κόστους σε όλα τα σενάρια, με ποσοστό περίπου 70%-75%. Αυτό σημαίνει ότι η επιλογή εργοστασίου έχει καθοριστική επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα. Το κόστος μεταφοράς μειώνεται σημαντικά στο Optimized Baseline, αλλά αυξάνεται ελαφρά στα full capacity σενάρια σε σχέση με το Optimized Baseline, επειδή η βελτιστοποίηση επιλέγει ορισμένες παραγωγικές ροές που είναι συνολικά φθηνότερες, ακόμη κι αν συνεπάγονται μεγαλύτερη μεταφορική επιβάρυνση από την καθαρά τοπική επιλογή.



Σχήμα 5.6: Εξοικονόμηση κόστους παραγωγής, μεταφοράς και σταθερού κόστους ανά σενάριο έναντι του Baseline.

Η μεγαλύτερη συνολική εξοικονόμηση επιτυγχάνεται στο σενάριο Optimized & Full Capacities, με 9.1M, κυρίως λόγω μείωσης στο κόστος παραγωγής και μεταφοράς. Το σενάριο Optimized & Full Capacities & Single Source ακολουθεί με 8.5M, ενώ το Optimized Baseline έχει μικρότερη εξοικονόμηση, 5.7M, η οποία προέρχεται κυρίως από τη μεταφορά.



Σχήμα 5.7: Παραγωγικό κόστος ανά κατηγορία προϊόντος και σεναρίου.

Επίσης τα Diecut και Inliner αποτελούν τις σημαντικότερες κατηγορίες παραγωγικού κόστους. Η μείωση του κόστους στις κατηγορίες αυτές εξηγεί μεγάλο μέρος της συνολικής εξοικονόμησης. Το Sheet εμφανίζει χαμηλότερο απόλυτο κόστος, άρα έχει μικρότερη βαρύτητα στη συνολική απόφαση. Παράλληλα, η μείωση των ενεργών sites στα full capacity σενάρια δείχνει ότι η βελτιστοποίηση συγκεντρώνει την παραγωγή σε επιλεγμένα αποδοτικότερα εργοστάσια.

5.6 Επιλογή τελικού σεναρίου και σύγκριση με το Baseline

Με βάση την οικονομική αξιολόγηση, το Optimized & Full Capacities Scenario είναι το σενάριο με το χαμηλότερο συνολικό κόστος. Ωστόσο, για την τελική πρόταση της παρούσας εργασίας επιλέγεται το Optimized & Full Capacities & Single Source Scenario. Η επιλογή αυτή βασίζεται στη λογική ότι η απόφαση δεν πρέπει να αξιολογείται μόνο ως μαθηματικό ελάχιστο κόστος, αλλά ως εφαρμόσιμη επιχειρησιακή πολιτική σε πραγματικό περιβάλλον παραγωγής και διανομής.

Το επιλεγμένο σενάριο επιτυγχάνει τελική εξοικονόμηση €8.50 εκ. σε σχέση με το Baseline, δηλαδή 8.97%. Η διαφορά του από το οικονομικά ελάχιστο σενάριο είναι περιορισμένη, περίπου €0.57 εκ., ενώ παρέχει πιο καθαρή και ελέγξιμη δομή εξυπηρέτησης. Με δεδομένο ότι κάθε πελάτης συνδέεται με ένα βασικό εργοστάσιο,

μειώνεται η πολυπλοκότητα της διαχείρισης των παραγγελιών, της παραγωγικής δέσμευσης και της καθημερινής εκτέλεσης των αποστολών.

Πίνακας 5.5: Τελική σύγκριση μεταξύ οικονομικά βέλτιστου σεναρίου και επιλεγμένου Single Source σεναρίου.

Κριτήριο	Full Capacities	Single Source	Ερμηνεία
Συνολικό κόστος	€85.75 εκ.	€86.32 εκ.	Το Full Capacities είναι οικονομικά χαμηλότερο.
Εξοικονόμηση vs Baseline	€9.07 εκ.	€8.50 εκ.	Και τα δύο δημιουργούν υψηλή εξοικονόμηση.
Μοναδιαίο κόστος	€0.1131	€0.1138	Η διαφορά μοναδιαίου κόστους είναι μικρή.
Δρομολόγια	734	588	Το Single Source μειώνει αισθητά την πολυπλοκότητα.
Ενεργά εργοστάσια	12	12	Το Single Source διατηρεί ελαφρώς περισσότερους ενεργούς πόρους.
Κλειστά εργοστάσια	AT1, SI2, PL1	AT1, SI2, SK1	Διαφορετική συγκέντρωση παραγωγής ανά πολιτική ανάθεσης.

Η επιλογή του Single Source μπορεί να υποστηριχθεί ως ισορροπημένη λύση ανάμεσα στην οικονομική αποδοτικότητα και την επιχειρησιακή απλότητα. Για τη βιομηχανία χαρτονιού, όπου η παραγωγή περιλαμβάνει τεχνικούς περιορισμούς μηχανών, υψηλό όγκο προϊόντων και ανάγκη σταθερής εξυπηρέτησης πελατών, η υπερβολική διάσπαση των ροών μπορεί να δημιουργήσει δυσκολίες στον καθημερινό προγραμματισμό. Επομένως, ένα σενάριο που παραμένει πολύ κοντά στο ελάχιστο κόστος, ενώ παράλληλα προσφέρει πιο ξεκάθαρη και λειτουργική ανάθεση πελατών, αποτελεί πρακτικά ισχυρότερη πρόταση.

Μετά τη σύγκριση του επιλεγμένου σεναρίου με το οικονομικά βέλτιστο σενάριο Full Capacities, κρίνεται απαραίτητη η άμεση αξιολόγησή του έναντι του Baseline. Η σύγκριση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς δείχνει την πραγματική επιχειρησιακή αξία της προτεινόμενης λύσης σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση του δικτύου. Επομένως, ο Πίνακας 5.6 παρουσιάζει συγκεντρωτικά τις βασικές μεταβολές κόστους, απόστασης εξυπηρέτησης, μοναδιαίου κόστους και πολυπλοκότητας ροών μεταξύ Baseline και Single Source.

Πίνακας 5.6: Συγκριτική αξιολόγηση Baseline και Single Source

Δείκτης	Baseline	Single Source	Βελτίωση	% βελτίωση
Συνολικό κόστος	€94.823.187	€86.319.281	€8.503.906	8,97%
Κόστος παραγωγής	€68.940.186	€65.067.031	€3.873.155	5,62%
Κόστος μεταφοράς	€16.606.841	€13.690.650	€2.916.191	17,56%
Σταθερό λειτουργικό κόστος	€9.276.160	€7.561.600	€1.714.560	18,48%
Μέση απόσταση εξυπηρέτησης	152 χλμ	126 χλμ	26 χλμ	17,11%
Κόστος ανά μονάδα	0,1250	0,1138	0,0112	8,97%
Μοναδικές ροές	636	588	48	7,55%

Η σύγκριση Baseline και Single Source δείχνει ότι η προτεινόμενη λύση οδηγεί σε ουσιαστική βελτίωση σε όλες τις βασικές κατηγορίες κόστους. Το συνολικό κόστος μειώνεται από €94.823.187 σε €86.319.281, δηλαδή επιτυγχάνεται εξοικονόμηση €8.503.906 ή 8,97%. Η μείωση αυτή επιβεβαιώνει ότι η ανακατανομή της παραγωγής και η εφαρμογή πολιτικής single source μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά την οικονομική απόδοση του δικτύου χωρίς να επηρεάζεται η πλήρης κάλυψη της ζήτησης.

Σε επίπεδο επιμέρους κατηγοριών, η μεγαλύτερη ποσοστιαία βελτίωση εμφανίζεται στο σταθερό λειτουργικό κόστος, το οποίο μειώνεται κατά 18,48%. Αυτό συνδέεται με τη συγκέντρωση της παραγωγής σε πιο αποδοτικά sites και με τη μη αξιοποίηση ορισμένων παραγωγικών πόρων που δεν είναι πλέον απαραίτητοι στο βελτιστοποιημένο δίκτυο. Παράλληλα, το κόστος μεταφοράς μειώνεται κατά 17,56%, γεγονός που δείχνει ότι η νέα ανάθεση πελατών σε εργοστάσια δεν βελτιώνει μόνο το παραγωγικό σκέλος, αλλά και τη γεωγραφική αποδοτικότητα των ροών.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι και η μείωση της μέσης απόστασης εξυπηρέτησης από 152 χλμ. σε 126 χλμ., δηλαδή κατά 26 χλμ. ή 17,11%. Η μεταβολή αυτή δείχνει ότι το Single Source δεν επιλέγει απλώς φθηνότερα παραγωγικά σημεία, αλλά οδηγεί και σε πιο ορθολογική χωρική κατανομή των ροών. Για τη βιομηχανία χαρτονιού, όπου το μεταφορικό κόστος επηρεάζεται έντονα από τον όγκο του προϊόντος και τις αποστάσεις διανομής, η μείωση αυτή αποτελεί σημαντικό επιχειρησιακό πλεονέκτημα.

Το μοναδιαίο κόστος μειώνεται από €0,1250 σε €0,1138 ανά μονάδα, παρουσιάζοντας βελτίωση 8,97%. Η μείωση αυτή είναι κρίσιμη, διότι αποτυπώνει την επίδραση της βελτιστοποίησης σε επίπεδο κάθε παραγόμενης και διανεμόμενης μονάδας προϊόντος. Παράλληλα, οι μοναδικές ροές μειώνονται από 636 σε 588, δηλαδή κατά 48 ροές ή 7,55%, γεγονός που επιβεβαιώνει τη μείωση της λειτουργικής πολυπλοκότητας του δικτύου.

Συνολικά, ο Πίνακας 5.6 τεκμηριώνει ότι το Single Source Scenario αποτελεί μια ισορροπημένη λύση μεταξύ οικονομικής αποδοτικότητας και επιχειρησιακής απλότητας. Το σενάριο δεν επιτυγχάνει μόνο χαμηλότερο συνολικό κόστος, αλλά βελτιώνει ταυτόχρονα τη δομή των ροών, μειώνει τη μέση απόσταση εξυπηρέτησης και περιορίζει τον αριθμό των συνδέσεων μεταξύ εργοστασίων και πελατών. Για τον λόγο αυτό, μπορεί να θεωρηθεί πιο εφαρμόσιμη λύση σε πραγματικό περιβάλλον παραγωγής και διανομής σε σχέση με ένα καθαρά μαθηματικό minimum cost σενάριο.

Μετά τη συνολική αξιολόγηση του Single Source έναντι του Baseline, είναι σημαντικό να εξεταστεί από ποιες παραγωγικές μετατοπίσεις προκύπτει η παραπάνω εξοικονόμηση. Η βελτίωση του συνολικού κόστους δεν οφείλεται σε μία μεμονωμένη αλλαγή, αλλά στη συστηματική ανακατανομή του παραγωγικού όγκου μεταξύ των εργοστασίων. Ο Πίνακας 5.7 παρουσιάζει τις κυριότερες αυξήσεις και μειώσεις παραγωγής ανά εργοστάσιο, καθώς και την αντίστοιχη επίδραση στο κόστος.

Πίνακας 5.7: Κυριότερες μεταβολές παραγωγικού όγκου ανά εργοστάσιο στο Σενάριο 4

Εργοστάσιο	Baseline Ποσότητα (εκ.)	Single Source Ποσότητα (εκ.)	Μεταβολή (εκ.)	Επίδραση κόστους
PL4	79,5	140,3	60,8	-6.167.851 €
HU2	29,6	72,1	42,5	-3.668.766 €
HU3	43,8	83,9	40,1	-3.703.306 €
SI1	30,2	54,2	24,0	-2.978.094 €
HR2	34,0	44,6	10,6	-1.102.330 €
HU1	24,3	29,2	5,0	-396.538 €
PL2	75,7	75,5	-0,2	-128.385 €
HR1	23,8	21,4	-2,4	403.687 €
AT2	67,7	62,3	-5,4	1.260.536 €
CZ1	63,9	56,7	-7,2	1.138.752 €
PL3	99,6	91,7	-7,8	1.076.798 €

SI2	21,6	0,0	-21,6	3.125.271 €
AT1	45,1	0,0	-45,1	6.608.057 €
SK1	46,3	0,0	-46,3	6.828.109 €
PL1	73,1	26,3	-46,8	6.207.966 €

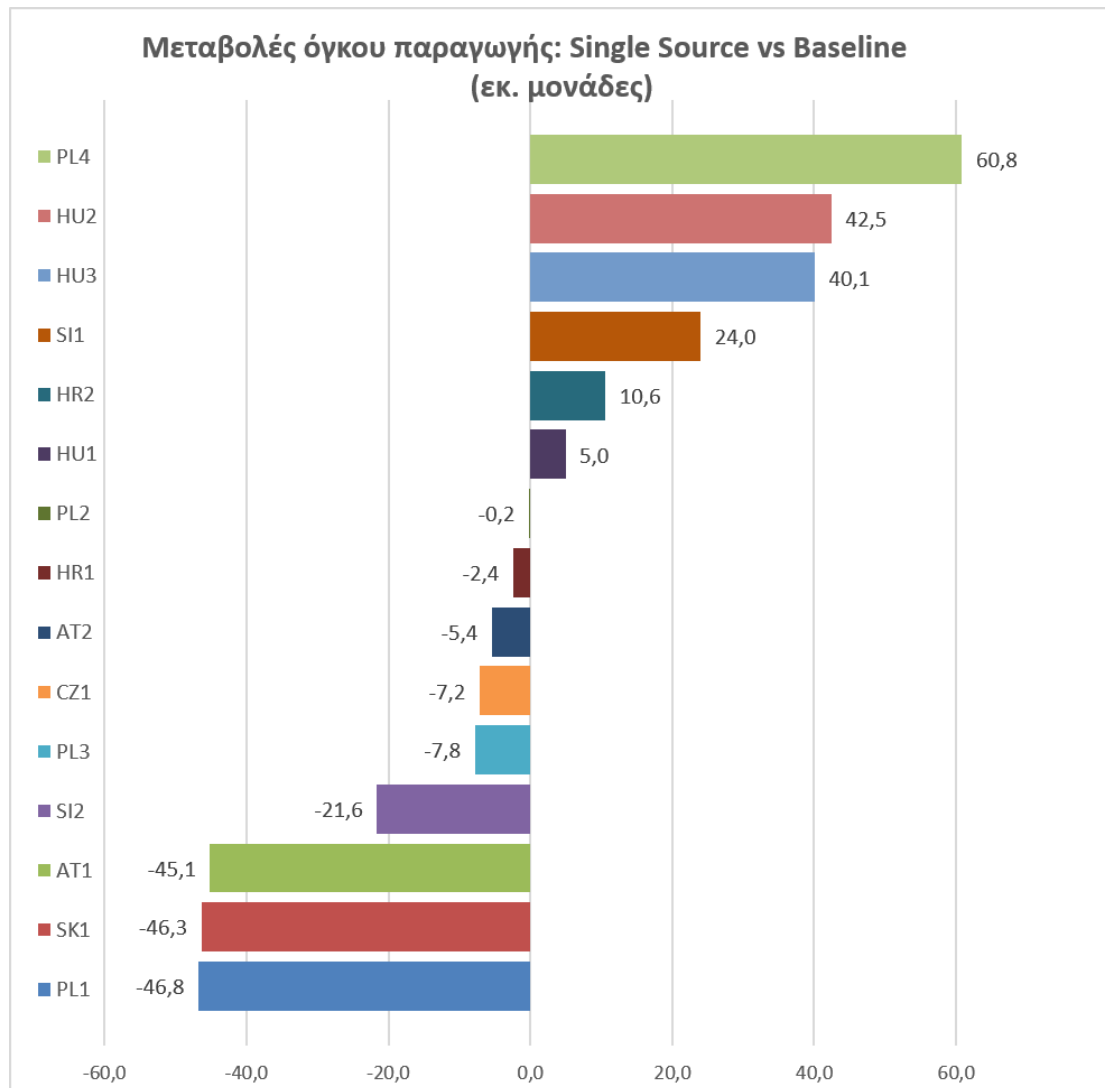
Τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.7 δείχνουν ότι το Σενάριο Single source δεν οδηγεί σε ομοιόμορφη μεταβολή της παραγωγής σε όλα τα εργοστάσια, αλλά σε στοχευμένη ανακατανομή προς συγκεκριμένες εγκαταστάσεις. Οι μεγαλύτερες αυξήσεις εμφανίζονται στα PL4, HU2, HU3 και SI1, τα οποία απορροφούν σημαντικό μέρος του όγκου που αφαιρείται από λιγότερο αποδοτικές ή λιγότερο κατάλληλες εγκαταστάσεις. Ιδιαίτερα το PL4 αυξάνει την παραγωγή του κατά περίπου 60,8 εκατ. μονάδες, δημιουργώντας τη μεγαλύτερη θετική επίδραση στο κόστος, με μείωση περίπου €6,17 εκατ..

Αντίστοιχα, τα HU2 και HU3 εμφανίζουν σημαντική αύξηση παραγωγικού όγκου, κατά 42,5 εκατ. και 40,1 εκατ. μονάδες αντίστοιχα. Η μεταφορά παραγωγής προς αυτά τα εργοστάσια δείχνει ότι το μοντέλο τα αξιολογεί ως πιο συμφέρουσες επιλογές, είτε λόγω χαμηλότερου παραγωγικού κόστους είτε λόγω καλύτερης δυνατότητας εξυπηρέτησης συγκεκριμένων γεωγραφικών περιοχών. Το SI1 αυξάνει επίσης τον όγκο του κατά 24,0 εκατ. μονάδες, συμβάλλοντας στη συνολική μείωση κόστους.

Αντίθετα, η παραγωγή μηδενίζεται στα SI2, AT1 και SK1, ενώ σημαντική μείωση παρατηρείται και στο PL1. Η μηδενική παραγωγή στα SI2, AT1 και SK1 δείχνει ότι, υπό τους περιορισμούς και τη λογική του Single Source, τα συγκεκριμένα εργοστάσια δεν αποτελούν πλέον οικονομικά συμφέρουσες επιλογές για την εξυπηρέτηση της ζήτησης. Παρότι η απομάκρυνση όγκου από ορισμένα εργοστάσια μπορεί να δημιουργεί τοπικές αυξήσεις κόστους ή οργανωτικές επιπτώσεις, το συνολικό αποτέλεσμα του δικτύου παραμένει θετικό.

Συνολικά, η νέα παραγωγική κατανομή δείχνει ότι το Single Source δεν λειτουργεί απλώς ως περιορισμός απλοποίησης, αλλά ως μηχανισμός συγκέντρωσης της παραγωγής σε πιο αποδοτικά σημεία. Η εξοικονόμηση προκύπτει κυρίως από τη μεταφορά όγκου προς εργοστάσια με καλύτερο συνδυασμό παραγωγικού κόστους, διαθέσιμης δυναμικότητας και γεωγραφικής θέσης. Με αυτόν τον τρόπο, το Σενάριο

Single source πετυχαίνει ταυτόχρονα οικονομική βελτίωση και πιο καθαρή δομή εξυπηρέτησης πελατών.



Σχήμα 5.8: Μεταβολές παραγωγικού όγκου ανά εργοστάσιο

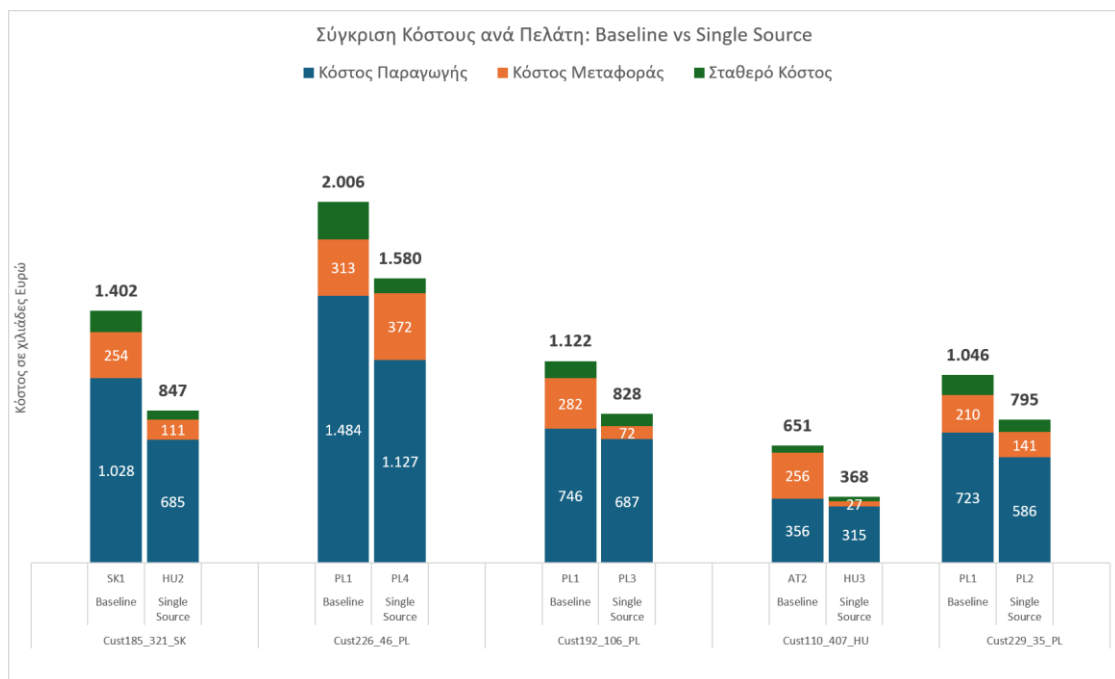
Όπως έχει γίνει κατανοητό η πολιτική single source απλοποιεί σημαντικά το δίκτυο. Σε ένα multi-source δίκτυο, ένας πελάτης μπορεί να εξυπηρετείται από περισσότερες από μία παραγωγικές εγκαταστάσεις, γεγονός που αυξάνει την πολυπλοκότητα στον προγραμματισμό παραγωγής, στη διαχείριση παραγγελιών και στη μεταφορική εκτέλεση. Στο επιλεγμένο σενάριο, η αντιστοίχιση πελάτη-εργοστασίου γίνεται πιο καθαρή, διευκολύνοντας τον διοικητικό έλεγχο, τη συμφωνία εμπορικών και παραγωγικών τμημάτων και τη μελλοντική παρακολούθηση του κόστους ανά πελάτη.

Η ανακατανομή των ροών αποτυπώνεται ενδεικτικά σε επίπεδο πελάτη. Για παράδειγμα, πελάτες που στο Baseline εξυπηρετούνταν από SK1, PL1 ή AT2

μεταφέρονται στο Σενάριο 4 σε κόμβους όπως HU2, PL4, PL3 ή HU3, όταν αυτή η επιλογή οδηγεί σε χαμηλότερο συνολικό κόστος παραγωγής και μεταφοράς. Η μεταβολή αυτή δείχνει ότι η βέλτιστη λύση δεν ταυτίζεται απαραίτητα με την ιστορική ανάθεση, αλλά προκύπτει από την ταυτόχρονη αξιολόγηση παραγωγικού κόστους, μεταφορικής απόστασης και περιορισμών δυναμικότητας.

Πίνακας 5.8: Top 10 μεταβολές εξυπηρέτησης πελατών με υψηλή εξοικονόμηση

Πελάτης	Χώρα	Baseline	Single Source	Εξοικονόμηση	%
Cust185_321_SK	SK	SK1	HU2	555.290 €	39,6%
Cust226_46_PL	PL	PL1	PL4	425.755 €	21,2%
Cust192_106_PL	PL	PL1	PL3	294.572 €	26,2%
Cust110_407_HU	HU	AT2	HU3	282.807 €	43,4%
Cust229_35_PL	PL	PL1	PL2	250.142 €	23,9%
Cust239_218_SK	SK	SK1	HU3	198.132 €	30,4%
Cust186_219_SK	SK	SK1	HU3	197.810 €	23,4%
Cust227_78_PL	PL	PL3	PL4	179.212 €	15,5%
Cust303_277_SK	SK	SK1	HU2	167.189 €	33,3%
Cust174_220_SK	SK	SK1	HU3	155.647 €	22,1%



Σχήμα 5.9: Ανάλυση των πέντε μεγαλύτερων εξοικονομήσεων κόστους ανά πελάτη μεταξύ Baseline και Single Source σεναρίου.

Το γράφημα παρουσιάζει τις πέντε μεγαλύτερες εξοικονομήσεις κόστους που προκύπτουν από τη σύγκριση του Baseline σεναρίου με το προτεινόμενο σενάριο Single Source. Για κάθε πελάτη απεικονίζεται το συνολικό κόστος εξυπηρέτησης και η ανάλυσή του σε κόστος παραγωγής, κόστος μεταφοράς και σταθερό κόστος. Παράλληλα, εμφανίζεται και η αλλαγή στην ανάθεση εργοστασίου, δηλαδή από ποιο εργοστάσιο εξυπηρετούνταν ο πελάτης στο Baseline και σε ποιο εργοστάσιο ανατίθεται στο Single Source.

Η μεγαλύτερη εξοικονόμηση καταγράφεται στον πελάτη Cust185_321_SK, όπου η ανάθεση μεταφέρεται από το SK1 στο HU2 και το συνολικό κόστος μειώνεται από 1.402 χιλ. € σε 847 χιλ. €. Ακολουθεί ο πελάτης Cust226_46_PL, με μεταφορά από το PL1 στο PL4 και μείωση κόστους από 2.006 χιλ. € σε 1.580 χιλ. €. Σημαντικές μειώσεις παρουσιάζονται επίσης στους πελάτες Cust192_106_PL, Cust110_407_HU και Cust229_35_PL, με αναθέσεις από PL1 σε PL3, από AT2 σε HU3 και από PL1 σε PL2, αντίστοιχα.

Η ανάλυση δείχνει ότι η εξοικονόμηση δεν προκύπτει με τον ίδιο τρόπο σε όλους τους πελάτες. Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως στον Cust226_46_PL, η βασική βελτίωση οφείλεται κυρίως στη μείωση του κόστους παραγωγής, ακόμη και αν το μεταφορικό κόστος αυξάνεται. Αντίθετα, σε περιπτώσεις όπως ο Cust110_407_HU, η εξοικονόμηση προέρχεται κυρίως από τη μείωση του κόστους μεταφοράς, λόγω πιο κατάλληλης γεωγραφικής αντιστοίχισης πελάτη και εργοστασίου.

Συνολικά, το γράφημα αναδεικνύει ότι το προτεινόμενο σενάριο Single Source επιτυγχάνει πιο αποδοτική ανάθεση παραγωγής και εξυπηρέτησης πελατών, καθώς αξιολογεί συνδυαστικά το παραγωγικό και το μεταφορικό κόστος. Με αυτόν τον τρόπο, η επιλογή εργοστασίου δεν βασίζεται αποκλειστικά στη γεωγραφική εγγύτητα ή στο χαμηλότερο παραγωγικό κόστος, αλλά στο χαμηλότερο συνολικό κόστος εξυπηρέτησης.

Σημείωση: Οι πίνακες και τα σχήματα του κεφαλαίου βασίζονται στα αποτελέσματα των αρχείων Financial Summary, Cost To Serve Details, Network Site Summary και Network Work Center Summary που εξήχθησαν από το Supply Chain Guru.

6. Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξέτασε το πρόβλημα της βέλτιστης ανάθεσης παραγωγής και διανομής σε υφιστάμενο δίκτυο εργοστασίων της βιομηχανίας χαρτονιού. Το βασικό ζητούμενο ήταν η μείωση του συνολικού λειτουργικού κόστους, χωρίς να απαιτείται μεταβολή της φυσικής δομής του δικτύου, δηλαδή χωρίς ίδρυση νέων εγκαταστάσεων ή ριζική αναδιάρθρωση της παραγωγικής βάσης. Αντίθετα, η ανάλυση επικεντρώθηκε στην καλύτερη αξιοποίηση των υφιστάμενων εργοστασίων, στη βέλτιστη κατανομή της παραγωγής ανά οικογένεια προϊόντων και στη διαμόρφωση αποδοτικότερων ροών εξυπηρέτησης πελατών.

Το κεντρικό ερευνητικό ερώτημα της εργασίας αφορούσε το ποια ανάθεση παραγωγής στα διαθέσιμα εργοστάσια οδηγεί στην ελαχιστοποίηση του συνολικού λειτουργικού κόστους παραγωγής και διανομής, διατηρώντας ταυτόχρονα την πλήρη κάλυψη της ζήτησης των πελατών. Για την απάντηση του ερωτήματος αναπτύχθηκε μοντέλο βελτιστοποίησης στο Supply Chain Guru, στο οποίο ενσωματώθηκαν δεδομένα ζήτησης, παραγωγικής δυναμικότητας, μοναδιαίου κόστους παραγωγής, μεταφορικού κόστους και σταθερών λειτουργικών εξόδων. Μέσω της ανάλυσης σεναρίων, αξιολογήθηκαν εναλλακτικές πολιτικές παραγωγής και διανομής και συγκρίθηκαν ως προς το συνολικό κόστος, τις ροές εξυπηρέτησης και την επιχειρησιακή τους πολυπλοκότητα.

Από την ανάλυση της υφιστάμενης κατάστασης προέκυψε ότι το Baseline Scenario, το οποίο αποτυπώνει τις σημερινές αναθέσεις παραγωγής και τις υφιστάμενες ροές εξυπηρέτησης, παρουσιάζει συνολικό κόστος €94,82 εκ. Η δομή του κόστους δείχνει ότι το παραγωγικό κόστος αποτελεί τη σημαντικότερη συνιστώσα, ενώ το μεταφορικό κόστος παραμένει επίσης κρίσιμο λόγω της γεωγραφικής διασποράς των πελατών και του μεγάλου όγκου των προϊόντων χαρτονιού. Το εύρημα αυτό επιβεβαιώνει ότι η βελτίωση του δικτύου δεν μπορεί να βασιστεί μόνο στη μείωση μίας κατηγορίας κόστους, αλλά απαιτεί συνολική αξιολόγηση του κόστους εξυπηρέτησης.

Η πρώτη σημαντική διαπίστωση είναι ότι ακόμη και χωρίς αύξηση της διαθέσιμης παραγωγικής δυναμικότητας, η ανακατανομή των ροών μπορεί να οδηγήσει σε ουσιαστική εξοικονόμηση. Το Optimized Baseline Scenario μειώνει το συνολικό κόστος σε €89,09 εκ., επιτυγχάνοντας εξοικονόμηση €5,73 εκ. ή 6,04% σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση. Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι μέρος της

αναποτελεσματικότητας του αρχικού δικτύου δεν οφείλεται απαραίτητα σε έλλειψη δυναμικότητας ή σε ανεπαρκή αριθμό εγκαταστάσεων, αλλά στον τρόπο με τον οποίο έχουν διαμορφωθεί οι ιστορικές αναθέσεις παραγωγής και οι ροές διανομής.

Η δεύτερη διαπίστωση αφορά τη σημασία της διαθέσιμης παραγωγικής δυναμικότητας. Στο Optimized & Full Capacities Scenario, όπου εξετάζεται η δυνατότητα λειτουργίας των εργοστασίων με αυξημένη δυναμικότητα, το συνολικό κόστος μειώνεται σε €85,75 εκ. Η εξοικονόμηση σε σχέση με το Baseline ανέρχεται σε €9,07 εκ. ή 9,57%. Το συγκεκριμένο σενάριο αποτελεί το οικονομικά βέλτιστο από τα εξεταζόμενα, καθώς η αύξηση της διαθέσιμης δυναμικότητας επιτρέπει στο μοντέλο να συγκεντρώσει μεγαλύτερο παραγωγικό όγκο σε αποδοτικότερα εργοστάσια. Συνεπώς, η δυναμικότητα δεν λειτουργεί μόνο ως τεχνικός περιορισμός, αλλά και ως κρίσιμος παράγοντας που καθορίζει τον βαθμό ελευθερίας του δικτύου και την ικανότητά του να πετύχει χαμηλότερο κόστος.

Ωστόσο, η οικονομικά ελάχιστη λύση δεν είναι απαραίτητα και η πιο κατάλληλη από πλευράς εφαρμογής. Για τον λόγο αυτό εξετάστηκε το Optimized & Full Capacities & Single Source Scenario, στο οποίο κάθε πελάτης εξυπηρετείται από ένα μόνο εργοστάσιο. Το σενάριο αυτό οδηγεί σε συνολικό κόστος €86,32 εκ., δηλαδή σε εξοικονόμηση €8,50 εκ. ή 8,97% σε σχέση με το Baseline. Παρότι είναι κατά περίπου €0,57 εκ. ακριβότερο από το οικονομικά βέλτιστο Full Capacities Scenario, παρέχει σημαντικά απλούστερη και πιο ελέγξιμη δομή εξυπηρέτησης.

Με βάση τα αποτελέσματα, ως τελική προτεινόμενη λύση επιλέγεται το Optimized & Full Capacities & Single Source Scenario. Η επιλογή αυτή δεν βασίζεται αποκλειστικά στο χαμηλότερο δυνατό κόστος, αλλά στη συνολική ισορροπία μεταξύ οικονομικής αποδοτικότητας και λειτουργικής απλότητας. Το σενάριο επιτυγχάνει σημαντική μείωση κόστους σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση, διατηρεί την πλήρη κάλυψη της ζήτησης και παράλληλα δημιουργεί ένα πιο καθαρό και διοικητικά εφαρμόσιμο δίκτυο. Η μικρή απόκλιση από το οικονομικά βέλτιστο σενάριο θεωρείται αποδεκτή, καθώς αντισταθμίζεται από τη μείωση της πολυπλοκότητας και τη μεγαλύτερη ευκολία εφαρμογής.

Ένα βασικό συμπέρασμα της εργασίας είναι ότι η βέλτιστη ανάθεση παραγωγής δεν μπορεί να προκύψει από την απομονωμένη εξέταση του παραγωγικού κόστους ή της γεωγραφικής εγγύτητας. Ένα εργοστάσιο με χαμηλό μοναδιαίο κόστος παραγωγής δεν

είναι απαραίτητα η βέλτιστη επιλογή όταν βρίσκεται μακριά από τον πελάτη ή όταν δημιουργεί υψηλή μεταφορική επιβάρυνση. Αντίστοιχα, ένα γεωγραφικά κοντινό εργοστάσιο μπορεί να μην είναι οικονομικά συμφέρον όταν εμφανίζει υψηλό παραγωγικό κόστος ή περιορισμένη διαθέσιμη δυναμικότητα. Η βέλτιστη λύση προκύπτει από τη συνδυαστική αξιολόγηση παραγωγικού κόστους, μεταφορικού κόστους, διαθέσιμης δυναμικότητας και πολιτικής εξυπηρέτησης.

Η ανάλυση ανέδειξε επίσης ότι η βελτιστοποίηση επαναπροσδιορίζει τον ρόλο των εργοστασίων μέσα στο δίκτυο. Εγκαταστάσεις όπως τα PL4, HU2, HU3 και SI1 αποκτούν αυξημένο ρόλο, καθώς προσφέρουν ευνοϊκότερο συνδυασμό κόστους και δυναμικότητας. Αντίθετα, εγκαταστάσεις όπως τα AT1, SI2 και SK1 δεν χρησιμοποιούνται στο τελικό σενάριο, γεγονός που υποδηλώνει ότι η συμμετοχή τους δεν είναι οικονομικά συμφέρουσα με βάση τα δεδομένα και τους περιορισμούς του μοντέλου. Η μεταβολή αυτή δείχνει ότι το μοντέλο δεν επιλέγει απλώς το κοντινότερο ή το φθηνότερο εργοστάσιο, αλλά το εργοστάσιο που ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος εξυπηρέτησης για κάθε συνδυασμό πελάτη και προϊόντος.

Σε επίπεδο προϊόντων, οι οικογένειες Diecut και Inliner αποδείχθηκαν οι πιο κρίσιμες για τη διαμόρφωση του συνολικού κόστους, καθώς αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο μέρος της ζήτησης και του παραγωγικού κόστους. Η οικογένεια Sheet, αν και έχει χαμηλότερο μοναδιαίο κόστος, παραμένει σημαντική για τη συνολική ισορροπία του δικτύου, αλλά έχει μικρότερη επίδραση στη συνολική εξοικονόμηση. Συνεπώς, οι αποφάσεις ανάθεσης παραγωγής για τις κατηγορίες Diecut και Inliner πρέπει να αποτελούν βασική προτεραιότητα στη διοικητική παρακολούθηση του δικτύου.

Η συμβολή της εργασίας είναι διπλή. Σε θεωρητικό επίπεδο, η εργασία συνδέει τη βιβλιογραφία του σχεδιασμού δικτύων εφοδιαστικής αλυσίδας και της ολοκληρωμένης βελτιστοποίησης παραγωγής και διανομής με μια πραγματική εφαρμογή στη βιομηχανία χαρτονιού. Σε πρακτικό επίπεδο, δείχνει ότι μια επιχείρηση μπορεί να πετύχει σημαντική μείωση κόστους χωρίς απαραίτητα να επενδύσει σε νέες εγκαταστάσεις, αλλά αξιοποιώντας καλύτερα τις ήδη διαθέσιμες παραγωγικές μονάδες. Η χρήση του Supply Chain Guru ως εργαλείου υποστήριξης αποφάσεων επιτρέπει την αξιολόγηση διαφορετικών σεναρίων πριν από την εφαρμογή τους και μειώνει τον κίνδυνο λήψης αποφάσεων που βασίζονται αποκλειστικά σε εμπειρικά ή ιστορικά κριτήρια.

Παρά τα σημαντικά ευρήματα, η εργασία υπόκειται σε ορισμένους περιορισμούς. Αρχικά, η ζήτηση θεωρήθηκε σταθερή για την περίοδο ανάλυσης, χωρίς να εξετάζονται εποχικές διακυμάνσεις ή μελλοντικές μεταβολές της αγοράς. Επιπλέον, το μεταφορικό κόστος προσεγγίστηκε μέσω συντελεστών κόστους ανά χιλιόμετρο, οι οποίοι βασίστηκαν σε ιστορικά δεδομένα, αλλά δεν ενσωματώνουν πλήρως όλες τις πιθανές εμπορικές συμφωνίες, ελάχιστες χρεώσεις, περιορισμούς φορτηγών ή μεταβολές τιμών καυσίμων. Επίσης, η εργασία δεν ενσωμάτωσε κόστη αποθεμάτων, χρόνους παράδοσης, επίπεδα εξυπηρέτησης, εκπομπές CO₂ ή κινδύνους διακοπής λειτουργίας εργοστασίων. Οι παράγοντες αυτοί θα μπορούσαν να επηρεάσουν τη λήψη αποφάσεων σε μια πιο εκτεταμένη μελλοντική ανάλυση.

Μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να επεκτείνει το μοντέλο προς τρεις βασικές κατευθύνσεις. Πρώτον, θα μπορούσε να ενσωματώσει δυναμική ζήτηση σε πολλαπλές χρονικές περιόδους, ώστε να εξεταστεί η επίδραση εποχικότητας και μεταβολών της αγοράς. Δεύτερον, θα μπορούσε να συμπεριλάβει περιβαλλοντικά κριτήρια, όπως εκπομπές CO₂ από μεταφορές και παραγωγή, ώστε η βελτιστοποίηση να μην περιορίζεται μόνο στο κόστος αλλά να εξετάζει και τη βιωσιμότητα του δικτύου. Τρίτον, θα μπορούσε να εξετάσει σενάρια ανθεκτικότητας, όπως διακοπή λειτουργίας ενός εργοστασίου, αύξηση μεταφορικών ναύλων ή μεταβολή της ζήτησης σε συγκεκριμένες χώρες. Με αυτόν τον τρόπο, το μοντέλο θα μπορούσε να εξελιχθεί από εργαλείο βελτιστοποίησης κόστους σε ολοκληρωμένο εργαλείο στρατηγικού σχεδιασμού εφοδιαστικής αλυσίδας.

Συμπερασματικά, η παρούσα εργασία καταδεικνύει ότι η βελτιστοποίηση ενός υφιστάμενου δικτύου παραγωγής και διανομής μπορεί να δημιουργήσει ουσιαστική οικονομική αξία. Η τελική προτεινόμενη λύση, δηλαδή το Optimized & Full Capacities & Single Source Scenario, επιτυγχάνει σημαντική μείωση του συνολικού κόστους, διατηρεί την πλήρη εξυπηρέτηση της ζήτησης και προσφέρει μια πιο απλή και εφαρμόσιμη δομή εξυπηρέτησης πελατών. Το βασικό συμπέρασμα είναι ότι η διοίκηση της εφοδιαστικής αλυσίδας δεν πρέπει να βασίζεται σε αποσπασματικές αποφάσεις παραγωγής ή μεταφοράς, αλλά σε ολοκληρωμένη ανάλυση του δικτύου. Η συνδυαστική αξιολόγηση κόστους παραγωγής, κόστους μεταφοράς, δυναμικότητας και επιχειρησιακής πολυπλοκότητας αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για τη λήψη τεκμηριωμένων και εφαρμόσιμων αποφάσεων στη σύγχρονη βιομηχανία χαρτονιού.

7. Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση

Bhutta, M. K. S., Alhawari, O. I., & Mohamed, Z. M. (2024). An integrated production-distribution optimization model for multinational manufacturing corporations. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 19(1), 29-45.

Bo, V., Bortolini, M., Malaguti, E., Monaci, M., Mora, C., & Paronuzzi, P. (2021). Models and algorithms for integrated production and distribution problems. *Computers & Industrial Engineering*, 154, 107003.

Boguniewicz-Zabłocka, J., & Kłosok-Bazan, I. (2020). Sustainable processing of paper industry water and wastewater. *Polish Journal of Environmental Studies*, 29(3), 2063-2071.

Cepi. (2024a). *Cepi Preliminary Statistics 2023*. Confederation of European Paper Industries.

Cepi. (2024b). *Solutions for the decarbonisation of the pulp and paper industry*. Confederation of European Paper Industries.

Chopra, S., Meindl, P., & Kalra, D. V. (2016). *Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation* (6th ed.). Pearson.

Christopher, M. (2011). *Logistics & Supply Chain Management* (4th ed.). Pearson Education.

Coupa (2026) *Supply Chain Network Optimization Software*. Available at: <https://www.coupa.com/products/supply-chain-design/network-optimization/>

European Commission. (n.d.). *Pulp and paper industry*. Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs.

FEFCO. (2024). *Key industry statistics 2024*. European Federation of Corrugated Board Manufacturers.

Fibre Box Association. (n.d.). *Corrugated packaging industry information*. Fibre Box Association.

- Fugihara, M. K., Utiyama, M. H. R., & Sampaio, M. (2026). Vehicle routing with backhauls in retail: A case study. *Case Studies on Transport Policy*, 23, 101715.
- Halim, I., Ang, P., & Adhitya, A. (2019). A decision support framework and system for design of sustainable pharmaceutical supply chain network. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21, 431-446.
- Hubbe, M. A. (2021). Energy efficiency challenges in pulp and paper manufacturing: A tutorial review. *BioResources*, 16(4), 8567-8639.
- International Energy Agency. (2023). Pulp & paper. IEA.
- Kong, Y., Zhang, L., Pan, Y., & Tang, D. (2024). Research on supply chain network optimization of AH Company. *Sustainability*, 16(21), 9241.
- Lambert, D. M., & Cooper, M. C. (2000). Issues in supply chain management. *Industrial Marketing Management*, 29(1), 65-83.
- Liu, S., Papageorgiou, L. G., & Shah, N. (2020). Optimal design of low-cost supply chain networks on the benefits of new product formulations. *Computers & Industrial Engineering*, 139, 106189.
- Scott, C., Lundgren, H., & Thompson, P. (2011). *Guide to Supply Chain Management*. Springer.
- Tonanont, A., Yimsiri, S., & Rogers, J. (2010). Strategic planning and performance improvements of global supply chain with network design optimization tool. *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*.
- Tsiakis, P., & Papageorgiou, L. G. (2008). Optimal production allocation and distribution supply chain networks. *International Journal of Production Economics*, 111(2), 468-483.
- Coupa (2026) *Supply Chain Network Optimization Software*. Available at: <https://www.coupa.com/products/supply-chain-design/network-optimization/>