



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Ανάπτυξη Μοντέλου Βελτιστοποίησης της Κατανομής Πόρων για την Αναβάθμιση των Σημαντικότερων Επιβατικών Ελληνικών Λιμένων



Λουβένια Χωματά

Επιβλέποντες Καθηγητές:

Γιώργος Γιαννής, Καθηγητής ΕΜΠ

Νικόλαος Λαγαρός, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Κωνσταντίνος Κεπαπτσόγλου, Λέκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2015



Βασικά Στάδια Διπλωματικής Εργασίας

- Προσδιορισμός Θέματος
- Καθορισμός Στόχου
- Βιβλιογραφική Ανασκόπηση
- Επιλογή Μεθοδολογίας
- Συλλογή Στοιχείων
- Εφαρμογή Μεθοδολογίας
- Ανάλυση Αποτελεσμάτων
- Συμπεράσματα/Προτάσεις





Στόχος Διπλωματικής Εργασίας

- **Στόχος** είναι βέλτιστη κατανομή χρηματικών πόρων για την υλοποίηση λιμενικών έργων υποδομής με στόχο την αναβάθμιση των 12 σπουδαιότερων ελληνικών λιμένων σε χρονικό ορίζοντα 3 ετών
- **Αναπτύσσεται** μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης το οποίο στηρίζεται στις αρχές της θεωρίας του γραμμικού ακέραιου προγραμματισμού.
- **Συλλέγονται στοιχεία** αντιπροσωπευτικά της δυναμικής των λιμένων βάση των οποίων επιλέγονται οι συντελεστές που εισάγονται στο πρόβλημα.
- Η διαδικασία βελτιστοποίησης **περιορίζεται** από τον προϋπολογισμό που είναι διαθέσιμος
- **Επιλέγονται** συνολικά 7 έργα υποδομής
- **Επιλύονται** 10 σενάρια βελτιστοποίησης, τα αποτελέσματα των οποίων αναλύονται και οδηγούν στα τελικά συμπεράσματα





Βιβλιογραφική Ανασκόπηση (1/2)

- Λόγω της γεωγραφικής της θέσης η Ελλάδα είναι από τις λίγες χώρες παγκοσμίως που διαθέτουν τόσους πολλούς επιβατικούς λιμένες, συνεπώς οι περισσότερες μελέτες σε παγκόσμιο επίπεδο έχουν πραγματοποιηθεί για εμπορευματικούς λιμένες.
- Δεν υπάρχει διαθέσιμη μελέτη βελτιστοποίησης κατανομής χρηματικών πόρων για αναβάθμιση λιμενικών υποδομών στην Ελλάδα
- Έχουν πραγματοποιηθεί ελάχιστες μελέτες για την αξιοποίηση των ελληνικών λιμένων και την αναβάθμιση των λιμενικών τους υποδομών.
- Η αναβάθμιση λιμενικών υποδομών κρίνεται κρίσιμη καθώς έτσι διευκολύνεται το παγκόσμιο εμπόριο και αναβαθμίζεται η εγχώρια οικονομία.





Βιβλιογραφική Ανασκόπηση (2/2)

Σημαντικοί Δείκτες Απόδοσης Λιμένων

- Εμπορευματοκιβώτια/Μέτρα Κρηπιδώματος
- Επιβάτες/Μέτρα Κρηπιδώματος
- Συνολικά Έξοδα/Συνολικά Έσοδα
- Έξοδα/ Επιβάτες
- Μήκος Κρηπιδωμάτων και Βάθος Λιμένα
- Μέσος χρόνος Διαθεσιμότητας Κρηπιδωμάτων

Σημαντικά Έργα Αναβάθμισης Λιμενικών Υποδομών

- Επέκταση κρηπιδώματος για επιβατικά πλοία και κρουαζιερόπλοια
- Επέκταση Επιβατικής Πλατφόρμας
- Αναβάθμιση Υπαρχουσών Λιμενικών Υποδομών
- Περιβαλλοντικές Υποδομές
- Εκβάθυνση Λιμένα
- Αναβάθμιση εξοπλισμού για μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων



Θεωρητικό Υπόβαθρο (1/3)

Μη Γραμμικός/Δυναμικός Προγραμματισμός

Τα προβλήματα παρουσιάζουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- Μη Γραμμικά
- Ασυνεχείς Μεταβλητές
- Μικρός Αριθμός Περιορισμών

Η **εφαρμογή** μη γραμμικών προβλημάτων βελτιστοποίησης παρουσιάστηκε σε εργασίες αναβάθμισης της ασφάλειας συγκοινωνιακών υποδομών αλλά και συντήρησης πεζοδρομίων. Σε αυτές τις εργασίες επιδιώκεται η βελτιστοποίηση πολλαπλών συναρτήσεων ταυτόχρονα όπως υποδεικνύει το θεώρημα **Pareto**.





Θεωρητικό Υπόβαθρο (2/3)

Γραμμικός Προγραμματισμός

Τα **Γραμμικά Προβλήματα** παρουσιάζουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- Προσδιοριστικότητα
- Αναλογικότητα
- Προσθετικότητα
- Διαιρετότητα

Δυαδικός Ακέραιος Προγραμματισμός

- Οι τιμές των μεταβλητών δεν είναι Συνεχείς αλλά Ακέραιες
- Χρήση μεταβλητών με τιμές 0-1 (δυαδικές)
- Μεγιστοποίηση Μοναδικής Αντικειμενικής Συνάρτησης και εισαγωγή Περιορισμών





Θεωρητικό Υπόβαθρο (3/3)

Μαθηματικό Μοντέλο Γραμμικού Προγραμματισμού

❖ Αντικειμενική Συνάρτηση

$$\max / \min (c_1 \cdot x_1 + c_2 \cdot x_2 + \dots c_n \cdot x_n)$$

❖ Περιορισμοί

$$a_{11} \cdot x_1 + a_{12} \cdot x_2 + \dots + a_{1n} \cdot x_n [\leq, =, \geq] b_1$$

$$a_{21} \cdot x_1 + a_{22} \cdot x_2 + \dots + a_{2n} \cdot x_n [\leq, =, \geq] b_2$$

.....

$$a_{11} \cdot x_1 + a_{12} \cdot x_2 + \dots + a_{1n} \cdot x_n [\leq, =, \geq] b_1$$

$$x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0$$

Όλες οι συναρτήσεις του προβλήματος (**αντικειμενική συνάρτηση και περιορισμοί**) πρέπει να είναι γραμμικές ως προς τις άγνωστες μεταβλητές $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$.



Συλλογή Στοιχείων(1/3)

12 Σπουδαιότεροι Ελληνικοί Λιμένες

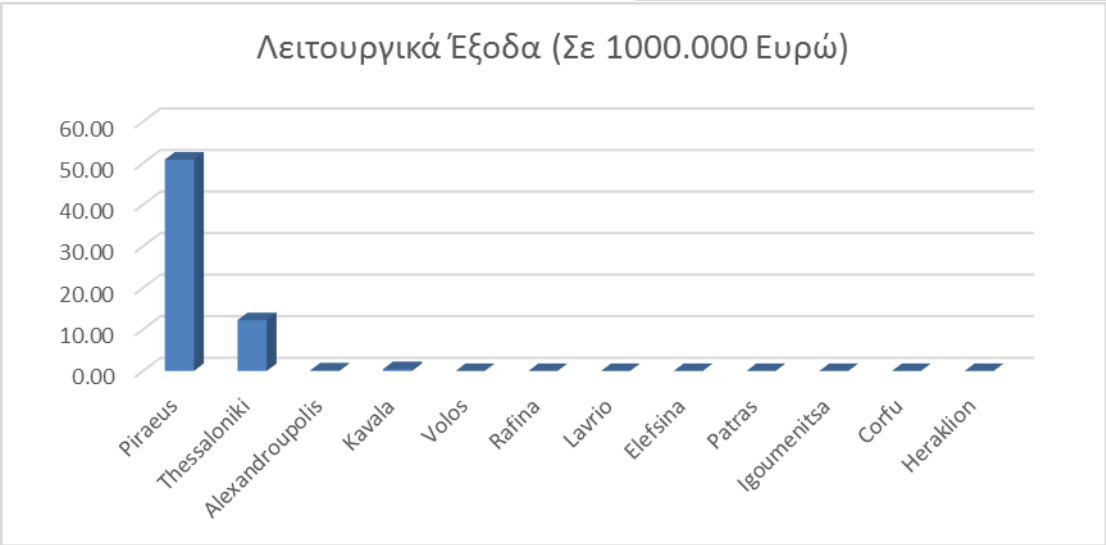
- Λιμένας Πειραιά
- Λιμένας Θεσσαλονίκης
- Λιμένας Αλεξανδρούπολης
- Λιμένας Καβάλας
- Λιμένας Βόλου
- Λιμένας Ραφήνας
- Λιμένας Λαυρίου
- Λιμένας Ελευσίνας
- Λιμένας Πάτρας
- Λιμένας Ηγουμενίτσας
- Λιμένας Κερκύρας
- Λιμένας Ηρακλείου





Συλλογή Στοιχείων(2/3)

Στόχος η Εξαγωγή Συμπερασμάτων για την **Επισκεψιμότητα**, το **Μέγεθος**, τη **Δυναμική** αλλά και τον **Οικονομικό Κύκλο** του κάθε Λιμένα





Συλλογή Στοιχείων(3/3)

Επιλογή Έργων Αναβάθμισης Λιμενικών Υποδομών

- Επέκταση κρηπιδώματος για επιβατικά πλοία
- Επέκταση Επιβατικής Πλατφόρμας
- Επέκταση κρηπιδώματος για κρουαζιερόπλοια
- Επέκταση πλατφόρμας για κρουαζιερόπλοια
- Αναβάθμιση Υπαρχουσών Λιμενικών Υποδομών
- Περιβαλλοντικές Υποδομές
- Εκβάθυνση Λιμένα



Μαθηματικό Μοντέλο Βελτιστοποίησης (1/4)

Αντικειμενική Συνάρτηση



$$\text{Max}(\sum \Delta X_{ijk} * X_{ijk} * B_{ijk})$$

i:Λιμάνι

j:Χρονιά

k:Ενέργεια αναβάθμισης

ΔX_{ijk} :Συντελεστής μεταβολής αναβάθμισης μετά την ολοκλήρωση ενέργειας

B_{ijk} :Συντελεστής μεγέθους/Σημασίας του λιμένα

X_{ijk} :Μεταβλητή που παίρνει τιμές 0 ή 1

Περιορισμός Κεφαλαίου



$$\sum (X_{ij} * C_{ijk}) \leq B_k$$

X_{ijk} :Μεταβλητή που παίρνει τιμές 0 ή 1

C_{ijk} : Κόστος Κάθε Ενέργειας που Ενεργοποιείται

B_k : Διαθέσιμος Προυπολογισμός

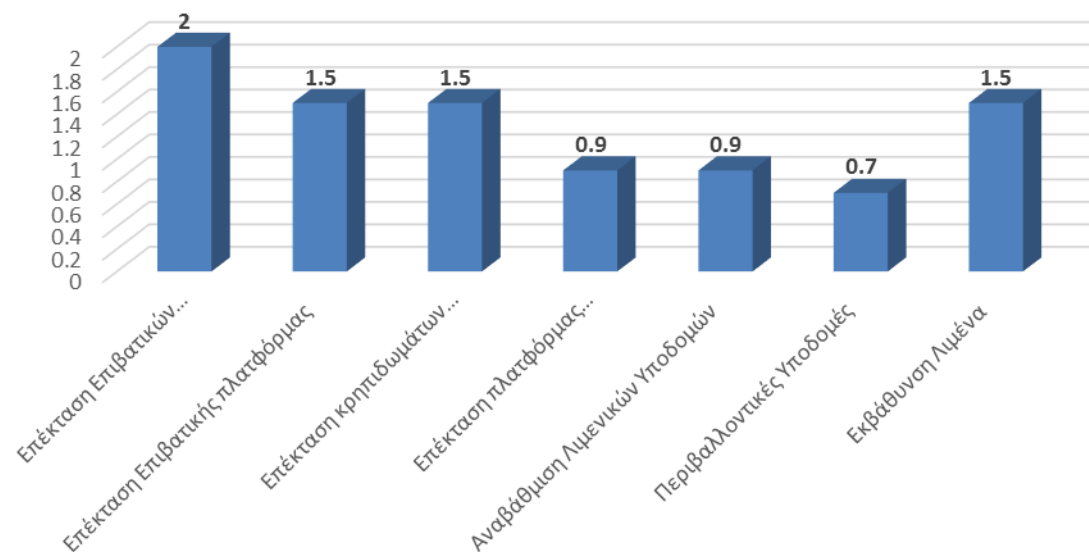
Συνολικά Εισάγονται στο Μοντέλο 252 Μεταβλητές (12Λιμένες*3 Έτη*7 Ενέργειες Αναβάθμισης)



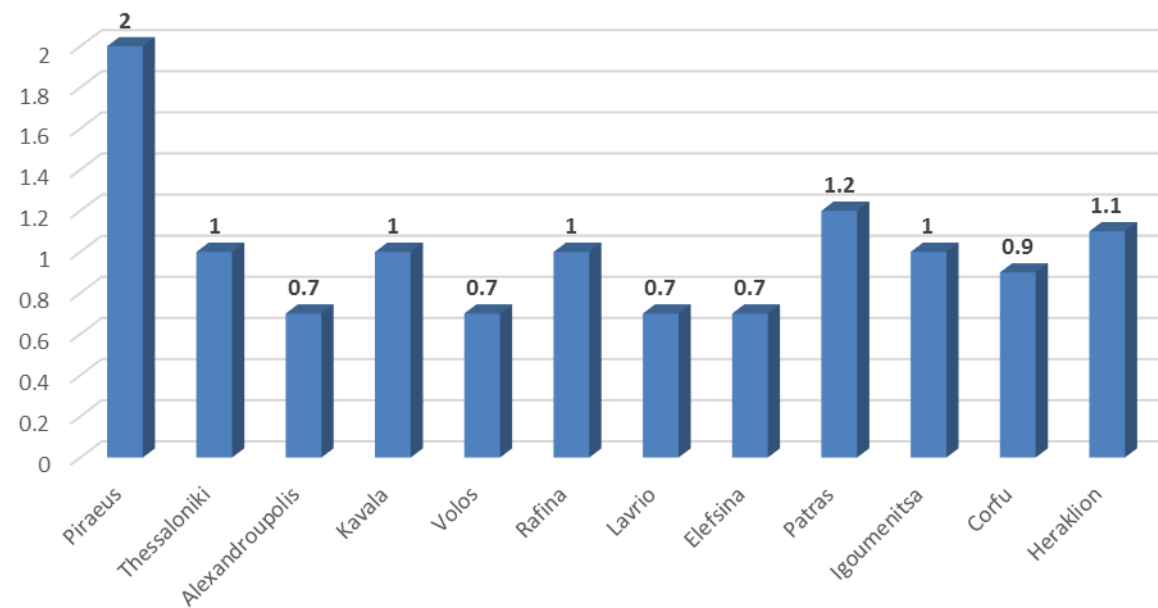
Μαθηματικό Μοντέλο Βελτιστοποίησης (2/4)

Αξιολόγηση Τιμών Συντελεστών που Εισάγονται στην Αντικειμενική Συνάρτηση

ΔΧ (Συντελεστής Μεταβολής Απόδοσης που Επιφέρει η κάθε Ενέργεια)



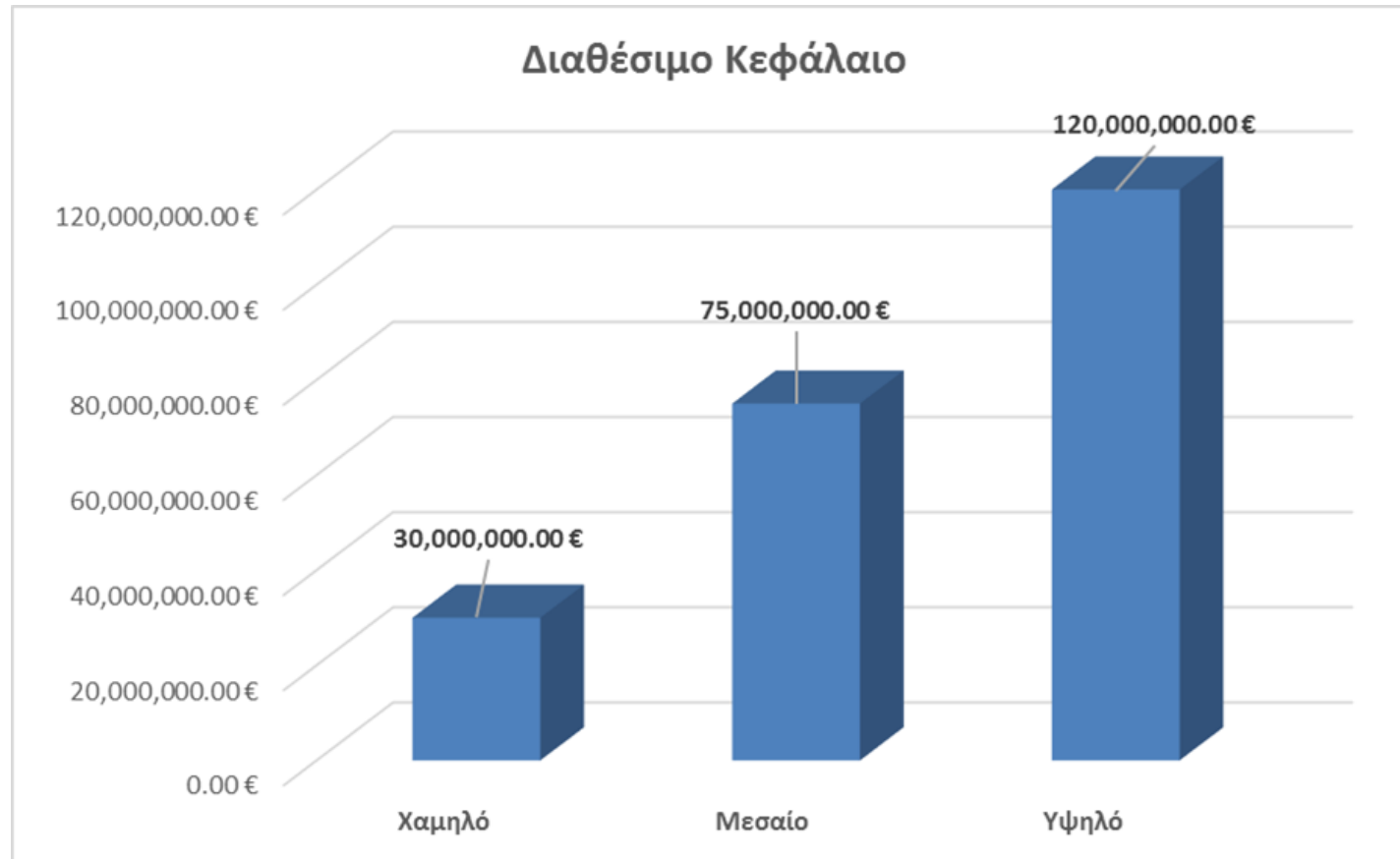
Βι (Συντελεστής Μεγέθους/Σημασίας Λιμένα)





Μαθηματικό Μοντέλο Βελτιστοποίησης (3/4)

Συνολικά Υλοποιούνται 10 Διαφορετικά Σενάρια Βελτιστοποίησης





Μαθηματικό Μοντέλο Βελτιστοποίησης (4/4)

Επιπρόσθετοι Περιορισμοί και Υποθέσεις

- Υπόθεση σταθερής χρηματικής επένδυσης ανά λιμένα
- Οι ενέργειες κοστολογούνται βάση βιβλιογραφίας για 17.000 Ευρώ ανά μέτρο επέκτασης κρηπιδώματος και 2.000 Ευρώ ανά τετραγωνικό μέτρο
- Η ενέργεια εκβάθυνσης λιμένα προηγείται της ενέργειας επέκτασης κρηπιδωμάτων
- Κάθε ενέργεια υλοποιείται μόνο μία φορά στο χρονικό ορίζοντα του έργου (3 έτη)
- Στους λιμένες της Αλεξανδρούπολης, της Ραφήνας και της Ελευσίνας δεν υλοποιούνται ενέργειες προς αξιοποίηση κρουαζιερόπολιων



Ανάλυση Αποτελεσμάτων(1/4)

Συγκεντρωτικός Πίνακας (1) Σύγκρισης των 10 Προβλημάτων Βελτιστοποίησης

Συγκριτικά Στοιχεία Προβλήματα Βελτιστοποίησης	Σύνολο Αρχικού Διαθέσιμου Προυπολογισμού	Μέγιστη Τιμή Αντικειμενικής Συνάρτησης	Συνολικός Αριθμός Ενεργοποιήσιμων Ενεργειών	Συνολικός Αριθμός Ενεργοποιήσιμων Ενεργειών στους 3 Σημαντικότερους Λιμένες	Συνολικός Αριθμός Ενεργοποιήσιμων Ενεργειών στους 4 Λιγότερο Σημαντικούς Λιμένες	Συνολικός Αριθμός Ενεργοποίησης της πιο Σημαντικής Ενέργειας για όλους τους Λιμένες	Σύνολο μη Αξιοποιήσιμου Κεφαλαίου(Euro)	Καταμερίσμος Ενεργοποίησης Ενεργειών
1.Χαμηλός Προυπολογισμός χωρίς μετακύλιση	30.000.000	29.11	17	13	0	3	300.000	ομοιόμορφη
2.Χαμηλός Προυπολογισμός με μετακύλιση	30.000.000	29.31	14	14	0	3	300.000	όλες ενεργοποιούνται το τρίτο έτος
3. Μεσαίος Προυπολογισμός χωρίς μετακύλιση	75.000.000	58.61	35	14	3	9	1.100.000	ομοιόμορφη
4.Μεσαίος Προυπολογισμός με μετακύλιση	75.000.000	58.92	35	15	3	9	100.000	όλες ενεργοποιούνται το τρίτο έτος
5.Μεσαίος Προυπολογισμός με 10%αυξημένα κόστη ενεργειών	75.000.000	55.74	33	14	0	8	200.000	ομοιόμορφη
6.Μεσαίος Προυπολογισμός με μετακύλιση με 10%αυξημένα κόστη ενεργειών	75.000.000	55.74	33	14	0	8	200.000	όλες ενεργοποιούνται το τρίτο έτος
7.Μεσαίος Προυπολογισμός με 10% μειωμένα κόστη ενεργειών	75.000.000	63.27	42	16	7	9	390.000	ομοιόμορφη
8.Μεσαίος Προυπολογισμός με μετακύλιση με 10% μειωμένα κόστη ενεργειών	75.000.000	63.12	39	15	6	10	480.000	όλες ενεργοποιούνται το τρίτο έτος
9. Υψηλός Προυπολογισμος χωρίς μετακύλιση	120.000.000	78.74	54	18	13	12	1.800.000	ομοιόμορφη
10. Υψηλός Προυπολογισμος με μετακύλιση	120.000.000	79.23	55	18	14	12	300.000	όλες ενεργοποιούνται το τρίτο έτος



Ανάλυση Αποτελεσμάτων(2/4)

Συγκεντρωτικός Πίνακας (2) Σύγκρισης των 10 Προβλημάτων Βελτιστοποίησης

Συνολικός Αριθμός Ενεργειών που Υλοποιούνται	Επέκταση Επιβατικών Κρηπιδωμάτων(ΔΧ1=2)	Επέκταση Επιβατικής Πλατφόρμας (ΔΧ2=1.5)	Επέκταση Κρηπιδωμάτων για Χρήση Κρουαζιερόπλοιων (ΔΧ3=1.5)	Επέκταση Πλατφόρμας για Χρήση Κρουαζιερόπλοιων (ΔΧ4=0.9)	Αναβάθμιση Λιμενικών Υποδομών(ΔΧ5=0.9)	Αναβάθμιση Περιβαλλοντικών Υποδομών(ΔΧ6=0.7)	Εκβάθυνση Λιμένα(ΔΧ8=1.5)	Σύνολο Ενεργοποιήσιμων Ενεργειών
Προβλήματα Βελτιστοποίησης								
1.Χαμηλός Προυπολογισμός χωρίς μετακύλιση	3	0	3	1	0	7	3	17
2.Χαμηλός Προυπολογισμός με μετακύλιση	3	1	3	1	0	3	3	14
3. Μεσαίος Προυπολογισμός χωρίς μετακύλιση	9	1	8	1	0	7	9	35
4.Μεσαίος Προυπολογισμός με μετακύλιση	9	1	8	2	0	6	9	35
5.Μεσαίος Προυπολογισμός με 10%αυξημένα κόστη ενεργειών	8	1	7	1	0	8	8	33
6.Μεσαίος Προυπολογισμός με μετακύλιση με 10%αυξημένα κόστη ενεργειών	8	1	7	1	0	8	8	33
7.Μεσαίος Προυπολογισμός με 10% μειωμένα κόστη ενεργειών	9	1	8	3	0	12	9	42
8.Μεσαίος Προυπολογισμός με μετακύλιση με 10% μειωμένα κόστη ενεργειών	10	1	9	1	0	7	10	38
9. Υψηλός Προυπολογισμος χωρίς μετακύλιση	12	4	9	6	0	11	12	54
10. Υψηλός Προυπολογισμος με μετακύλιση	12	4	9	6	0	12	12	55



Ανάλυση Αποτελεσμάτων(3/4)

Συγκεντρωτικός Πίνακας (3) Σύγκρισης των 10 Προβλημάτων Βελτιστοποίησης

Προβλήματα Βελτιστοποίησης	Συγκριτικά Στοιχεία	Συνόλου Προυπολογισμού / Σύνολο Ενεργοποιήσιμων Ενεργειών	Ενεργοποιήσιμες Ενέργειες στους Σημαντικότερους Λιμένες / Σύνολο Ενεργοποιήσιμων Ενεργειών	Ενεργοποιήσιμες Ενέργειες στους Λιγότερο Σημαντικούς Λιμένες / Σύνολο Ενεργοποιήσιμων Ενεργειών	Φορές Ενεργοποίησης των Σημαντικότερων Ενεργειών / Σύνολο Ενεργοποιήσιμων Ενεργειών	Φορές Ενεργοποίησης των Λιγότερο Σημαντικών Ενεργειών/Σύνολο Ενεργοποιήσιμων Ενεργειών
1.Χαμηλός Προυπολογισμός χωρίς μετακύλιση		1,764,705.88	0.76	0.00	0.53	0.47
2.Χαμηλός Προυπολογισμός με μετακύλιση		2,142,857.14	1.00	0.00	0.71	0.29
3. Μεσαίος Προυπολογισμός χωρίς μετακύλιση		2,142,857.14	0.40	0.09	0.77	0.23
4.Μεσαίος Προυπολογισμός με μετακύλιση		2,142,857.14	0.43	0.09	0.77	0.23
5.Μεσαίος Προυπολογισμός με 10%αυξημένα κόστη ενεργειών		2,272,727.27	0.42	0.00	0.73	0.27
6.Μεσαίος Προυπολογισμός με μετακύλιση με 10%αυξημένα κόστη ενεργειών		2,272,727.27	0.42	0.00	0.73	0.27
7.Μεσαίος Προυπολογισμός με 10% μειωμένα κόστη ενεργειών		1,785,714.29	0.38	0.17	0.64	0.36
8.Μεσαίος Προυπολογισμός με μετακύλιση με 10% μειωμένα κόστη ενεργειών		1,923,076.92	0.38	0.15	0.79	0.21
9. Υψηλός Προυπολογισμος χωρίς μετακύλιση		2,222,222.22	0.33	0.24	0.69	0.31
10. Υψηλός Προυπολογισμος με μετακύλιση		2,181,818.18	0.33	0.25	0.67	0.33



Συμπεράσματα(1/3)

- Οι **παράγοντες** που επηρεάζουν αλλά **όχι με γραμμικό τρόπο** την βέλτιστη κατανομή πόρων σε έργα αναβάθμισης είναι το μέγεθος του προϋπολογισμού, το κόστος των έργων, η κλιμάκωση των επενδύσεων στο χρόνο και οι συντελεστές αξιολόγησης λιμένων και ενεργειών έτσι όπως έχουν οριστεί.
- Η **απόδοση** που επιφέρει η υλοποίηση των έργων υποδομής στους λιμένες **δεν αυξάνεται ανάλογα με την αύξηση του διαθέσιμου κεφαλαίου**. Στα πρώτα στάδια αύξησης του κεφαλαίου η απόδοση των λιμένων αυξάνεται περίπου αναλογικά αλλά στη συνέχεια όσο μεγαλώνει ο προϋπολογισμός η αύξηση της απόδοσης επιβραδύνεται.
- Σε όλες τις εφαρμογές προβλημάτων βελτιστοποίησης με **μετακύλιση κεφαλαίου, το σύνολο των ενεργειών ενεργοποιείται στο τρίτο έτος που είναι και το τελευταίο**. Αυτό σημαίνει ότι το βέλτιστο σενάριο επέρχεται όταν πραγματοποιείται συσσώρευση του κεφαλαίου και δεν υπάρχουν ενδιάμεσοι περιορισμοί.



Συμπεράσματα(2/3)

- Το **80% των σεναρίων** που εξετάστηκαν είναι πιο αποδοτικά όταν προβλέπουν μετακύλιση κεφαλαίου.
- Μία **μεταβολή κόστους ενεργειών κατά 10%** δεν σημαίνει ότι θα επιφέρει αντίστοιχη αύξηση/μείωση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης ή του αριθμού των υλοποιήσιμων ενεργειών
- Η **συχνότητα ενεργοποίησης των ενεργειών** δεν αυξάνεται το ίδιο για τις ενέργειες που διαθέτουν τους ίδιους συντελεστές μεταβολής απόδοσης λιμένων (ΔX)
- Το **μέσο κόστος ανά υλοποιήσιμη ενέργεια** ελαχιστοποιείται για το σενάριο χαμηλού προϋπολογισμού χωρίς μετακύλιση. Αυτό σημαίνει ότι το κόστος δεν μειώνεται όσο αυξάνεται ο αριθμός των έργων που υλοποιούνται, το οποίο επιτυγχάνεται στα σενάρια υψηλού προϋπολογισμού



Συμπεράσματα(3/3)

- Σε περίπτωση **χαμηλού προϋπολογισμού** δίνεται μεγάλη έμφαση και προτεραιότητα στην υλοποίηση έργων στους σημαντικούς λιμένες. Δηλαδή ο αριθμός ενεργοποιήσιμων ενεργειών στους σημαντικούς λιμένες μεταβάλλεται πολύ λιγότερο όσο αυξάνεται ο προϋπολογισμός από ότι ο αριθμός ενεργοποιήσιμων ενεργειών στους μη σημαντικούς λιμένες.
- Η **βελτιστοποίηση** αποδεικνύεται πολύ χρήσιμη καθώς καθιστά τον μόνο τρόπο με τον οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί βέλτιστα ένα χρηματικό κεφάλαιο και να επιτευχθεί ο καλύτερος συνδυασμός απόδοσης-κόστους



Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα

- Ενδιαφέρον θα παρουσίαζε μία **ανάλυση ευαισθησίας** για τον εντοπισμό του σημείου μετά το οποίο η απόδοση σταματά να αυξάνεται ανάλογα με την αύξηση του αρχικού διαθέσιμου προϋπολογισμού.
- Για την ανάπτυξη του μοντέλου βελτιστοποίησης γίνεται η υπόθεση ότι το κόστος υλοποίησης των έργων υποδομής σε κάθε λιμένα είναι σταθερό. Ενδιαφέρον θα παρουσίαζε μία διαφορετική προσέγγιση στην οποία το κόστος επένδυσης για κάθε λιμένα διαφοροποιείται ανάλογα με τις μελλοντικές απαιτήσεις, τις δυνατότητες αλλά και τα χαρακτηριστικά του κάθε λιμένα όπως η ηλικία του.
- Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται η υπόθεση ότι κάθε έργο υποδομής υλοποιείται σε κάθε λιμένα κατά τον ίδιο τρόπο. Ενδιαφέρον θα παρουσίαζε μία προσέγγιση όπου τα έργα υποδομής θα αναβαθμίζονταν ανάλογα με το μέγεθος, τη δυναμική αλλά και την προοπτική του κάθε λιμένα.



Ευχαριστώ για την προσοχή σας!





Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Ανάπτυξη Μοντέλου Βελτιστοποίησης της Κατανομής Πόρων για την Αναβάθμιση των Σημαντικότερων Επιβατικών Ελληνικών Λιμένων



Λουβένια Χωματά

Επιβλέποντες Καθηγητές:

Γιώργος Γιαννής, Καθηγητής ΕΜΠ

Νικόλαος Λαγαρός, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Κωνσταντίνος Κεπαπτσόγλου, Λέκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2015