



ΔΡΑΣΗ: «ΑΡΙΣΤΕΙΑ ΙΙ»

ΤΙΤΛΟΣ:

«Πρωτότυπες έννοιες σχεδιασμού μεταλλικών κατασκευών
για τον ενεργειακό τομέα με χρήση σύγχρονων υλικών»

4916-ENSSTRAM

Επιστημονικός Υπεύθυνος: **Καθ. Χ. ΓΑΝΤΕΣ**

ΕΝΟΤΗΤΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ (Ε.Ε.) 5

*Παραμετρικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων πυλώνων
ανεμογεννητριών από κελύφη τύπου sandwich*

ΠΑΡΑΔΟΤΕΟ 5.1:

*Τεχνική έκθεση παραμετρικών αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων
πυλώνων ανεμογεννητριών από κελύφη τύπου sandwich*

2015



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING

9 Iroon Polytechniou Str., GR-15780, Zografou, Greece

PROJECT: «ARISTEIA II»

TITLE:

«Novel design concepts for ENergy related Steel
STRuctures using Advanced Materials»

4916-ENSSTRAM

Research Coordinator: **Prof. C. GANTES**

WORKPACKAGE (W.P.) 5

*Parametric finite element analyses of sandwich-type wind
turbine tower shells*

DELIVERABLE 5.1:

*Technical report of parametric finite element analyses of sandwich-
type wind turbine tower shells*

2015



European Union
European Social Fund



MINISTRY OF EDUCATION & RELIGIOUS AFFAIRS, CULTURE & SPORTS
MANAGING AUTHORITY

Co-financed by Greece and the European Union



EUROPEAN SOCIAL FUND

Summary

Taking into account the full convergence between the two analytical solutions formulated within the context of deliverable 2.1 with finite element numerical results, a thorough parametric analysis was carried out regarding the effects of the key section parameters' variation employing the analytical solutions, using a pertinent code written in Mathematica [1] environment in the case of the more accurate solution, and Matlab [2] environment for the simplified one. As key parameters, the outer radius as well as faces and core thicknesses were selected, regarding the geometry of the section, while the elastic and plastic strength and Young's modulus were taken into account, as far as material properties were concerned. Through the more exact solution the core thickness maximizing strength, while keeping the section's stiffness as high as possible, was optimized for specific values of the other parameters mentioned above, while the increase in strength provided by the sandwich solution was calculated, compared to a steel-only section of the same amount of steel. By the simplified solution, the extraction of dimensionless charts was made possible, for the selection of core and faces thicknesses as a fraction of the diameter of the section, according to the pertinent requirements in strength and the selected materials properties, while, via the same processing method, the construction cost of the sandwich section as a function of material quantities was introduced as an additional parameter, based on which, further optimization was performed.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή.....	3
2	Βελτιστοποίηση ελαστικής ροπής αντοχής και δυσκαμψίας με χρήση της ακριβούς διαδικασίας.....	5
3	Σύγκριση πλαστικής ροπής αντοχής διατομής sandwich και αμιγώς χαλύβδινης με εφαρμογή της ακριβούς διαδικασίας.....	12
4	Ποιοτικά διαγράμματα βελτιστοποίησης με εφαρμογή της προσεγγιστικής διαδικασίας.....	15
1.1	Ροπή αντοχής, αξονικό φορτίο και ποιότητα υλικών ως κριτήρια για την επιλογή παχών ελασμάτων και πυρήνα	15
1.2	Ισοδύναμη δυσκαμψία, αξονικό φορτίο και ποιότητα υλικών ως κριτήρια για την επιλογή παχών ελασμάτων και πυρήνα	22
1.3	Βελτιστοποίηση βάσει κόστους κατασκευής.....	24
1.3.1	Υπολογισμός κόστους.....	24
1.3.2	Βελτιστοποίηση βάσει κόστους για δεδομένη ροπή αντοχής	25
1.3.3	Βελτιστοποίηση βάσει κόστους για δεδομένη δυσκαμψία.....	32
5	Συμπεράσματα	35
6	Αναφορές.....	36

Εισαγωγή

Η παρούσα Τεχνική Έκθεση αποτελεί παραδοτέο του Ερευνητικού Προγράμματος με τίτλο:

ΔΡΑΣΗ «ΑΡΙΣΤΕΙΑ II»

Πρωτότυπες έννοιες σχεδιασμού μεταλλικών κατασκευών για τον ενεργειακό τομέα με χρήση σύγχρονων υλικών (ENSSTRAM)

που πραγματοποιείται κάτω από το γενικό συντονισμό του Καθηγητή Χαράλαμπου Γαντέ (Κύριος Ερευνητής).

Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζει τις δράσεις που προδιαγράφονται στην **Ενότητα Εργασίας Ε.Ε 5**, με τίτλο:

«Παραμετρικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων πυλώνων ανεμογεννητριών από κελύφη τύπου sandwich»

Το αντικείμενο της **Ενότητας Εργασίας Ε.Ε. 5**, έχει περιγραφεί στην εγκεκριμένη Ερευνητική Πρόταση ως:

«Θα πραγματοποιηθούν εκτεταμένες παραμετρικές αναλύσεις, για πυλώνες ανεμογεννητριών από κελύφη τύπου sandwich αλλά και από συμβατικά υλικά, προκειμένου να προκύψουν τα απαραίτητα δεδομένα για μία συγκριτική αποτίμηση της καινοτόμου ιδέας σχεδιασμού που προτείνεται στη συγκεκριμένη έρευνα. Στις αναλύσεις αυτές θα χρησιμοποιηθούν τα βαθμονομημένα μοντέλα που μορφώθηκαν στην ΕΕ4 και θα διερευνηθούν οι παράμετροι που αναφέρθηκαν στην ΕΕ2. Η σύγκριση θα οδηγήσει σε συστάσεις σχεδιασμού που θα αποτελέσουν το αντικείμενο της ΕΕ6.».

Το εν λόγω αντικείμενο έχει καλυφθεί πλήρως, όπως περιγράφεται στα κεφάλαια που ακολουθούν. Λαμβάνοντας υπόψη την πλήρη συμφωνία μεταξύ των αναλυτικών λύσεων που αναπτύχθηκαν στο Παραδοτέο 2.1 και των αντίστοιχων αριθμητικών αποτελεσμάτων βάσει της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων, οι παραμετρικές αναλύσεις έγιναν βάσει των αναλυτικών λύσεων, οι οποίες επιτρέπουν πολύ ευρύτερη παραμετροποίηση. Πιο συγκεκριμένα, με στόχο την εξαγωγή ποιοτικών συμπερασμάτων για την επιρροή των διαφόρων παραγόντων που υπεισέρχονται στο

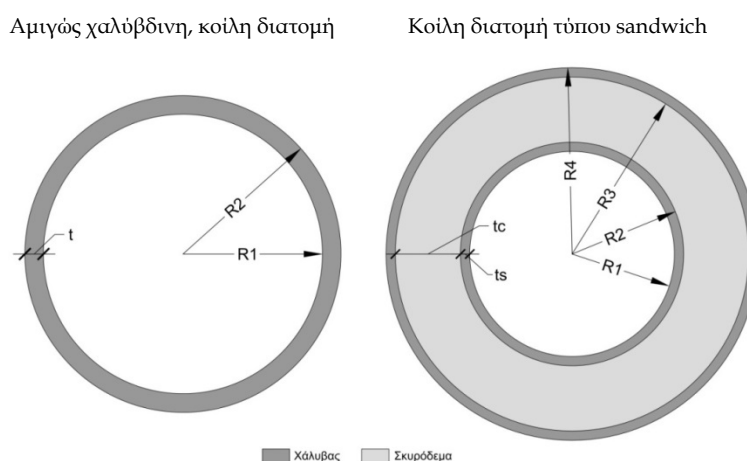
σχεδιασμό μιας διατομής sandwich, και τελικά την αναζήτηση των βέλτιστων συνδυασμών τους, πραγματοποιήθηκε ένας μεγάλος αριθμός παραμετρικών αναλύσεων μέσω κατάλληλου κώδικα, σε περιβάλλον Mathematica [1] και Matlab [2], ο οποίος ενσωματώνει τις δύο αναλυτικές λύσεις που περιγράφηκαν στο παραδοτέο 2.1, ενώ, βάσει των διαπιστώσεων που προέκυψαν οι οποίες αφορούν την αποτελεσματικότητα της κάθε λύσης, εφαρμόστηκε για κάθε περίπτωση η καταλληλότερη από τις δύο. Αρχικά, με εφαρμογή της ακριβούς διαδικασίας, διερευνήθηκε η επιρροή του πάχους του πυρήνα σκυροδέματος, για διαφορετικούς συνδυασμούς ιδιοτήτων των υλικών, στη συμπεριφορά της διατομής υπό καθαρή κάμψη εντός της ελαστικής περιοχής, όπου η απλοποιημένη διαδικασία παρουσιάζει σημαντικό σφάλμα στον υπολογισμό της ισοδύναμης δυσκαμψίας και παρουσιάζεται ένα παράδειγμα υπολογισμού του βέλτιστου πάχους πυρήνα για μεγιστοποίηση της ροπής αντοχής και της δυσκαμψίας. Για την πλαστική περιοχή, με χρήση και πάλι της λεπτομερούς μεθόδου, εκτιμήθηκε η αύξηση της αντοχής της διατομής sandwich σε σχέση με την αμιγώς χαλύβδινη, σε συνδυασμό καμπτικής και θλιπτικής φόρτισης. Στη συνέχεια, με χρήση των απλούστερων εκφράσεων της προσεγγιστικής μεθόδου, παρουσιάζονται γενικευμένες λύσεις με τη μορφή ποιοτικών, αδιαστατοποιημένων διαγραμμάτων βελτιστοποίησης της διατομής, βάσει απαιτήσεων στατικής συμπεριφοράς και κόστους κατασκευής.

Οι εργασίες που περιγράφονται έχουν πραγματοποιηθεί με τη συνεισφορά των παρακάτω μελών της **Ερευνητικής Ομάδας**:

- Χαράλαμπος Γαντές, Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- Γεώργιος Μπουκοβάλας, Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- Αθανάσιος Τριανταφύλλου, Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών
- Κωνσταντίνος Καλοχαιρέτης, Διδάκτωρ Πολιτικός Μηχανικός, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- Αλέξανδρος Βαλοσαμής, Διδάκτωρ Πολιτικός Μηχανικός, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- Στυλιανός Βερνάρδος, Υποψήφιος Διδάκτωρ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- Αριστομένης Τσαντίλης, Υποψήφιος Διδάκτωρ, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών

Βελτιστοποίηση ελαστικής ροπής αντοχής και δυσκαμψίας με χρήση της ακριβούς διαδικασίας

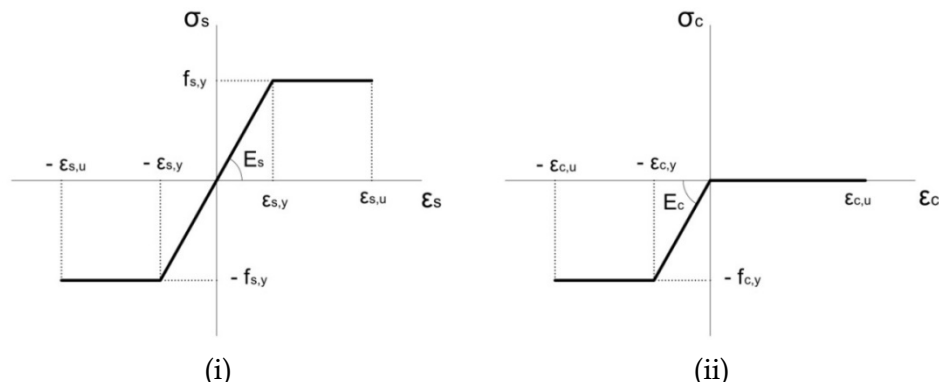
Η υπό εξέταση διατομή, η οποία αποτελείται από δύο χαλύβδινα ελάσματα, συγκρατούμενα από έναν πυρήνα σκυροδέματος, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1, ενώ οι καταστατικοί νόμοι των δύο υλικών εκφράζονται από τα διαγράμματα του Σχήματος 2.2. Κατά παραδοχή, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.2, ο εξεταζόμενος χάλυβας συμπεριφέρεται ακριβώς κατά τον ίδιο τρόπο σε θλίψη και εφελκυσμό, ενώ αμελείται πλήρως η ικανότητα του σκυροδέματος να παραλάβει εφελκυστικά φορτία. Επιπλέον προϋποτίθεται πλήρης συνεργασία μεταξύ των δύο ελασμάτων και του πυρήνα, κάτι που επιβεβαιώθηκε πειραματικά, όπως περιγράφεται στο παραδοτέο 3.1.



Σχήμα 2.1: Γεωμετρικά στοιχεία τυπικής, αμιγώς χαλύβδινης, κοίλης διατομής και κοίλης διατομής τύπου sandwich (οι αναλογίες των παχών αποσκοπούν στην ευκρίνεια της απεικόνισης και όχι στη ρεαλιστική προσομοίωση των διατομών)

Figure 2.1: Geometry of typical steel and sandwich-type hollow sections (presented thicknesses are not realistic and only outline the geometry of the sections)

Κεφάλαιο 2: Βελτιστοποίηση ελαστικής ροπής αντοχής και δυσκαμψίας με χρήση της ακριβούς διαδικασίας



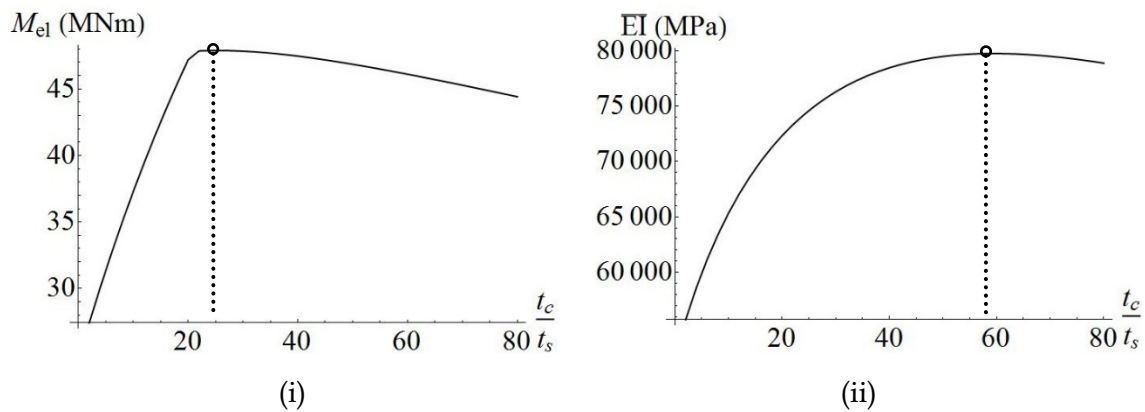
Σχήμα 2.2: Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων (i) χάλυβα, (ii) σκυροδέματος

Figure 2.2: Stress - strain diagrams of (i) steel and (ii) concrete

Οι ακόλουθες παραμετρικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με βάση την ακριβή αναλυτική διαδικασία και στοχεύουν στη διερεύνηση της επιρροής του πάχους του πυρήνα σκυροδέματος, για διαφορετικούς συνδυασμούς ιδιοτήτων των υλικών, στη συμπεριφορά της διατομής υπό καθαρή κάμψη. Καθώς κατά κανόνα ο σχεδιασμός πυλώνων ανεμογεννητριών, και ειδικότερα εκείνων που χαρακτηρίζονται από μεγάλο ύψος και συνεπώς αυξημένο κόστος κατασκευής, είναι τόσο συντηρητικός ώστε να αφορά μόνο στο εύρος της ελαστικής περιοχής, στα παρακάτω αγνοείται η όποια μετελαστική ικανότητα παραλαβής φορτίων.

Αρχικά, μεταβλήθηκε το πάχος του πυρήνα σκυροδέματος λαμβάνοντας τιμές από $t_c=10\text{mm}$ έως $t_c=400\text{mm}$, με βήμα 10mm , διατηρώντας τις ιδιότητες των υλικών ως έχουν στην περιγραφή του Σχήματος 2.2 και επιλέγοντας πάχος χαλύβδινων ελασμάτων $t_s=5\text{mm}$. Η μεταβολή της ελαστικής ροπής σε συνάρτηση με το λόγο των παχών των υλικών παρουσιάζεται στο διάγραμμα του Σχήματος 2.3i. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα αυτό, για το συγκεκριμένο συνδυασμό ποιότητας υλικών και πάχους χάλυβα, υπάρχει μία τιμή του σκυροδέματος για την οποία μεγιστοποιείται η ελαστική ροπή αντοχής της διατομής και πέρα από την οποία η αύξηση του πάχους δεν ωφελεί, αλλά αντιθέτως υποβιβάζει την αντοχή. Από το ίδιο σχήμα φαίνεται πως η τιμή αυτή του λόγου παχών, για τα συγκεκριμένα δεδομένα, βρίσκεται περίπου στο 26. Ωστόσο, θα ήταν επιπόλαιο να αποφανθεί κανείς για τη βέλτιστη - από στατικής άποψης - αναλογία υλικών, αν δεν εξετάσει επιπλέον την επιρροή του λόγου των παχών στην ισοδύναμη δυσκαμψία της διατομής. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.3ii, η ισοδύναμη δυσκαμψία παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με την ελαστική ροπή, όμως ο βέλτιστος λόγος παχών βρίσκεται σε αυτήν την περίπτωση κοντά στο 58, κάτι το οποίο συνεπάγεται περισσότερο από διπλάσιο πάχος σκυροδέματος σε σχέση με εκείνο που προέκυψε βάσει του προηγούμενου κριτηρίου, ενώ και τα αντίστοιχα διαγράμματα για τους υπόλοιπους συνδυασμούς ιδιοτήτων των υλικών, προκύπτουν ποιοτικώς όμοια.

Κεφάλαιο 2: Βελτιστοποίηση ελαστικής ροπής αντοχής και δυσκαμψίας με χρήση της ακριβούς διαδικασίας



Σχήμα 2.3: Επιρροή του λόγου παχών σκυροδέματος και χάλυβα (i) στην ελαστική ροπή αντοχής, (ii) στην ισοδύναμη δυσκαμψία διατομής τύπου sandwich, χαρακτηριστικών:

$$E_s=210\text{GPa}, f_{sy}=355\text{MPa}, E_c=32\text{GPa}, f_c=30\text{MPa}, t_s=5\text{mm}, R_4=2000\text{mm}$$

Figure 2.3: Influence of concrete and steel thicknesses on (i) the elastic resistance moment, (ii) the equivalent stiffness of a sandwich-type section with the following properties:

$$E_s=210\text{GPa}, f_{sy}=355\text{MPa}, E_c=32\text{GPa}, f_c=30\text{MPa}, t_s=5\text{mm}, R_4=2000\text{mm}$$

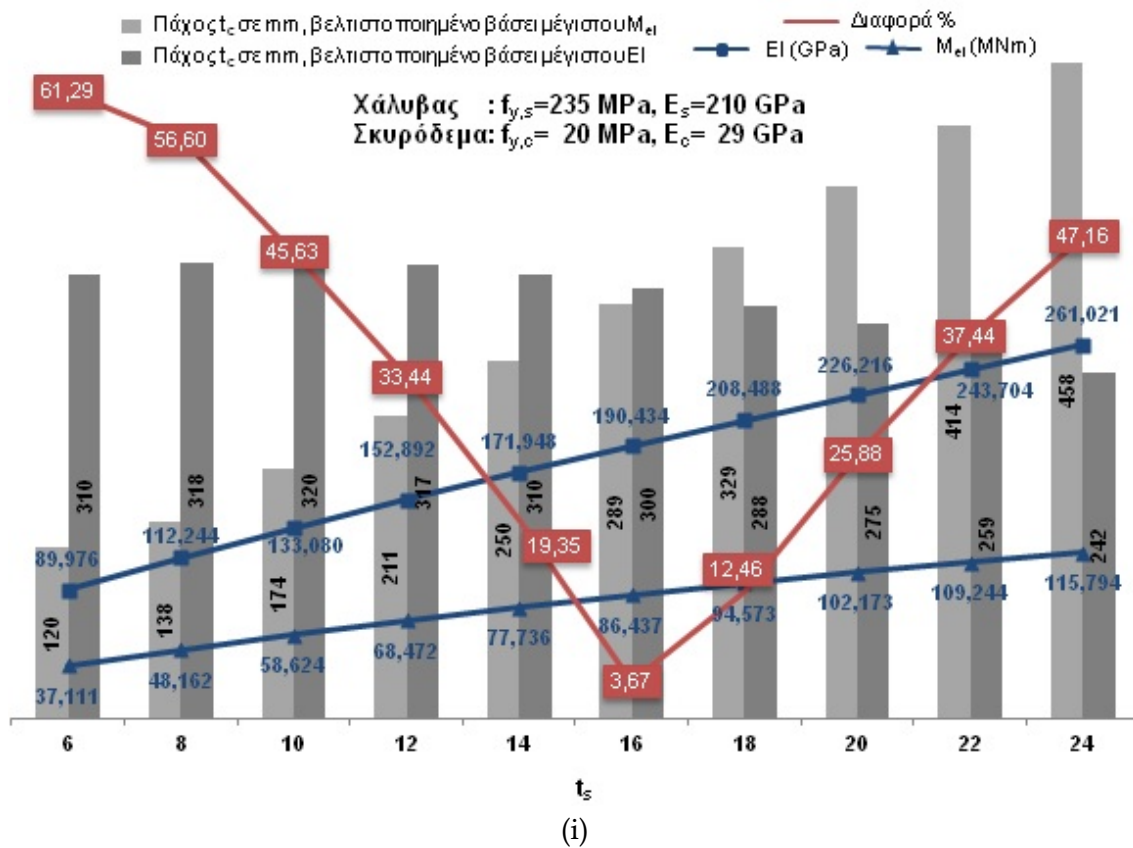
Με βάση την παρατήρηση αυτή, προκύπτει η ανάγκη να αναζητηθεί το πάχος σκυροδέματος εκείνο, το οποίο θα ικανοποιεί κατά το δυνατόν την απαίτηση τόσο για μέγιστη ροπή αντοχής, όσο και για μέγιστη δυσκαμψία. Μέσω κατάλληλου αλγορίθμου, που αναπτύχθηκε για το σκοπό αυτό σε κώδικα Mathematica [1], εντοπίστηκαν για ένα σημαντικό εύρος ποιοτικών χαρακτηριστικών των υλικών, αλλά και παχών των χαλύβδινων ελασμάτων, οι τιμές πάχους του πυρήνα σκυροδέματος που επιτυγχάνουν την ταυτόχρονη ικανοποίηση των δύο απαιτήσεων, στο μέγιστο εφικτό βαθμό.

Στα διαγράμματα του Σχήματος 2.4 παρουσιάζονται - ενδεικτικά για δύο επιλογές ποιότητας υλικών - τα αποτελέσματα της αναζήτησης εκείνων των αναλογιών πάχους, οι οποίες επιφέρουν είτε μέγιστη ελαστική ροπή, είτε μέγιστη ισοδύναμη δυσκαμψία στη διατομή. Συγκεκριμένα, για δεδομένο κάθε φορά συνδυασμό ποιοτικών χαρακτηριστικών των υλικών, τοποθετούνται στον οριζόντιο άξονα τα πάχη των χαλύβδινων ελασμάτων, ενώ στον κατακόρυφο άξονα απεικονίζονται τα βέλτιστα πάχη του πυρήνα σκυροδέματος, στην αριστερή στήλη βάσει του πρώτου κριτηρίου και στη δεξιά βάσει του δεύτερου. Αναγράφονται ακόμα, για κάθε τιμή πάχους ελάσματος, οι μέγιστες τιμές ελαστικής ροπής και ισοδύναμης δυσκαμψίας που προκύπτουν από το αντίστοιχο βέλτιστο πάχος του πυρήνα σκυροδέματος και τέλος, επισημαίνεται η ποσοστιαία απόκλιση που παρουσιάζουν τα δύο κριτήρια, όσον αφορά το βέλτιστο πάχος του πυρήνα, ώστε να καθίσταται εύκολος ο εντοπισμός της λύσης εκείνης που ευνοεί κατά το δυνατόν ισότιμα τα δύο μεγέθη.

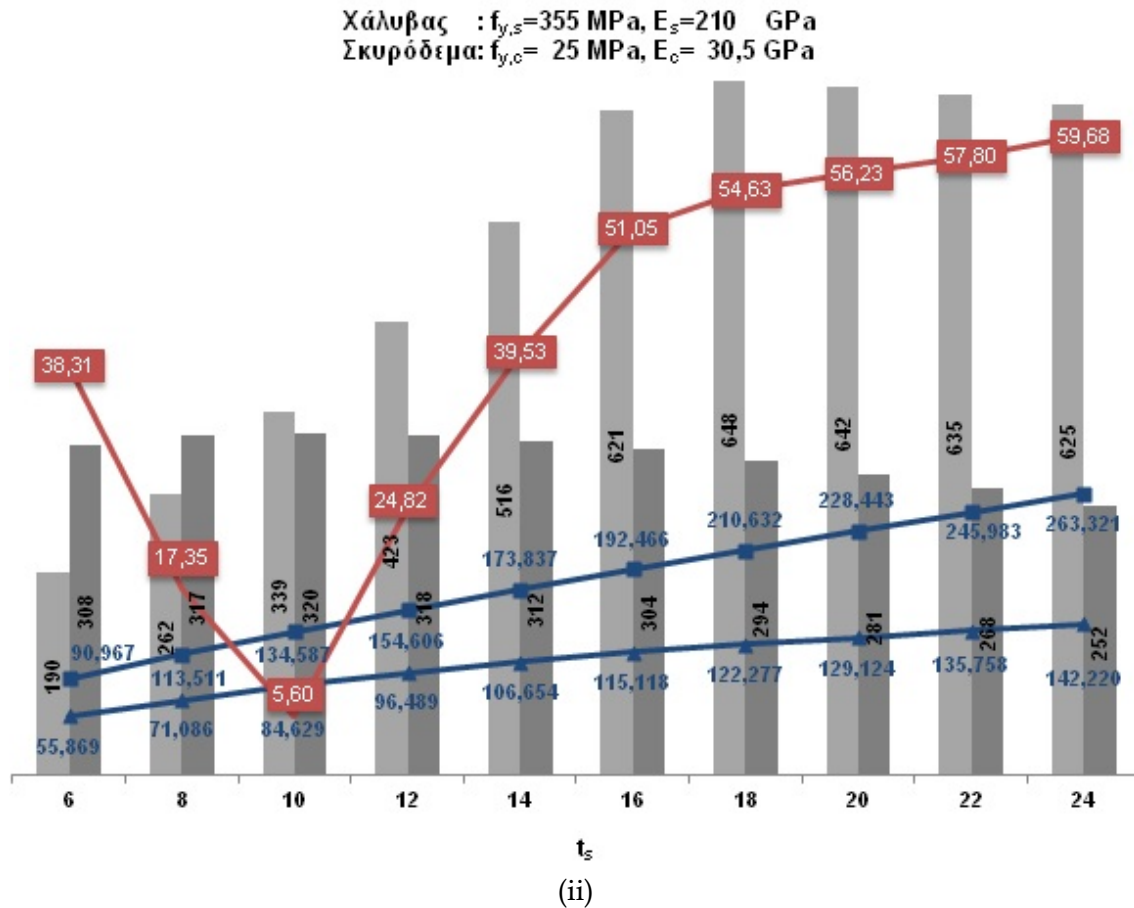
Αντίστοιχα διαγράμματα, όπως αυτά του Σχήματος 2.4, δημιουργήθηκαν για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς που προκύπτουν από τρεις διαφορετικές ποιότητες χάλυβα με επιμέρους χαρακτηριστικά: $\{E_s=210\text{GPa}, f_{sy}=235\text{MPa}\}$, $\{E_s=210\text{GPa},$

Κεφάλαιο 2: Βελτιστοποίηση ελαστικής ροπής αντοχής και δυσκαμψίας με χρήση της ακριβούς διαδικασίας

$f_{sy}=355\text{MPa}$ }, $\{E_s=210\text{GPa}, f_{sy}=460\text{MPa}\}$ και πέντε διαφορετικές ποιότητες σκυροδέματος με αντίστοιχες ιδιότητες: $\{E_c=29\text{GPa}, f_c=20\text{MPa}\}$, $\{E_c=30,5\text{GPa}, f_c=25\text{MPa}\}$, $\{E_c=32\text{GPa}, f_c=30\text{MPa}\}$, $\{E_c=33,5\text{GPa}, f_c=35\text{MPa}\}$, $\{E_c=35\text{GPa}, f_c=40\text{MPa}\}$. Το αποτέλεσμα της μελέτης των διαγραμμάτων αυτών, συνοψίζεται στο Σχήμα 2.5, όπου παρουσιάζεται για κάθε συνδυασμό ποιοτικών ιδιοτήτων των υλικών η βέλτιστη τιμή πάχους χαλύβδινων ελασμάτων και πυρήνα σκυροδέματος, η οποία οδηγεί στη σύγκλιση των κριτηρίων της μεγιστοποίησης της ελαστικής ροπής και της ισοδύναμης δυσκαμψίας της διατομής. Η απουσία συγκεκριμένων συνδυασμών από το διάγραμμα οφείλεται στην αδυναμία τους να ικανοποιήσουν επαρκώς και ταυτοχρόνως τα δύο κριτήρια, ανεξαρτήτως της επιλογής πάχους των στρώσεων της διατομής.



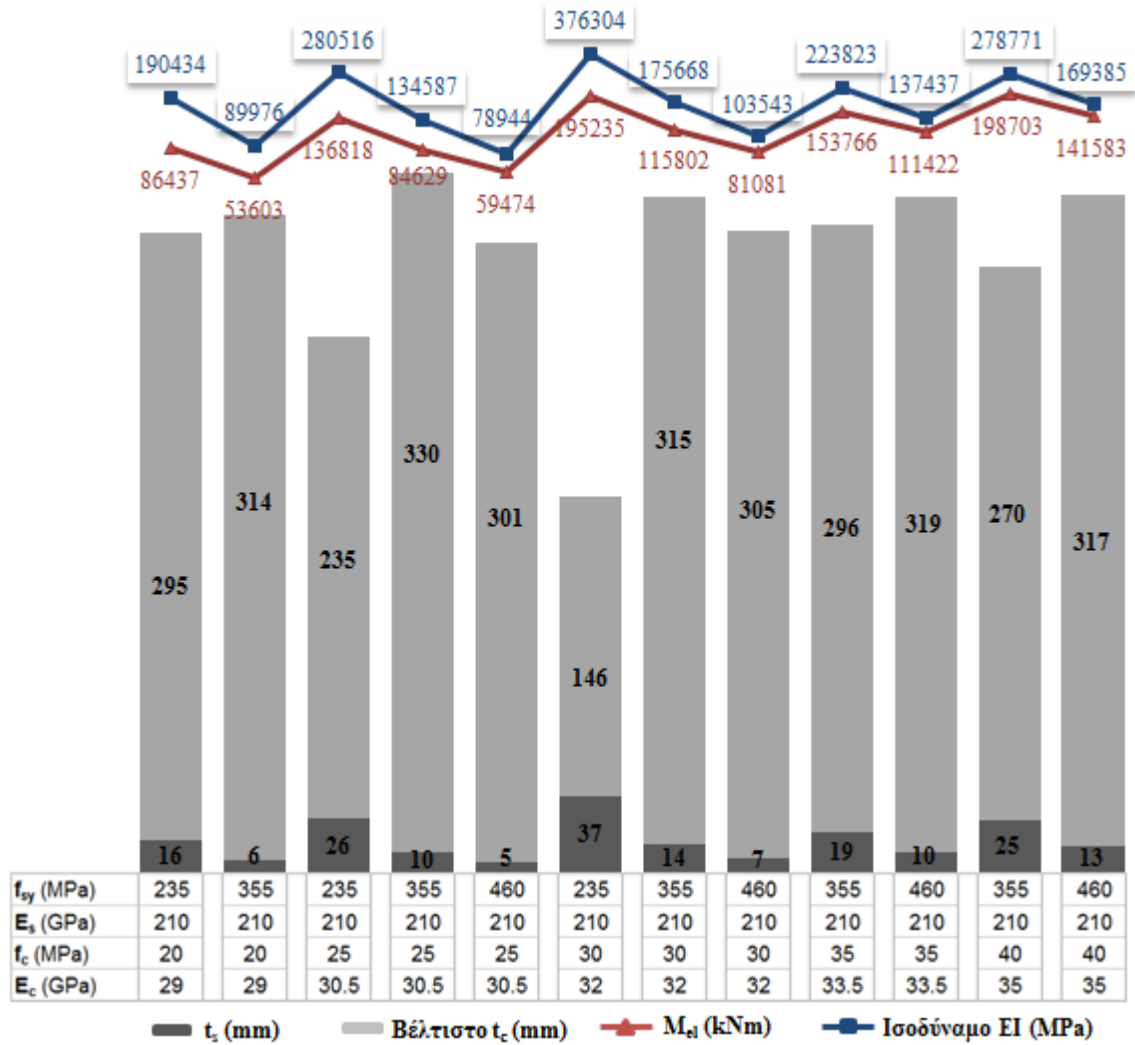
Κεφάλαιο 2: Βελτιστοποίηση ελαστικής ροπής αντοχής και δυσκαμψίας με χρήση της ακριβούς διαδικασίας



Σχήμα 2.4: Βέλτιστοι συνδυασμοί παχών πυρήνα σκυροδέματος - χαλύβδινων ελασμάτων για μεγιστοποίηση της ελαστικής ροπής και της ισοδύναμης δυσκαμψίας, για $R_4=2000\text{mm}$ και (i) $f_{s,y}=235\text{MPa}$, $E_s=210\text{GPa}$, $f_{c,y}=20\text{MPa}$, $E_c=29\text{GPa}$, (ii) $f_{s,y}=355\text{MPa}$, $E_s=210\text{GPa}$, $f_{c,y}=25\text{MPa}$, $E_c=30.5\text{GPa}$

Figure 2.4: Optimal combinations of concrete-core and steel-faces thicknesses, for maximization of elastic moment resistance and stiffness, for $R_4=2000\text{mm}$ and (i) $f_{s,y}=235\text{MPa}$, $E_s=210\text{GPa}$, $f_{c,y}=20\text{MPa}$, $E_c=29\text{GPa}$, (ii) $f_{s,y}=355\text{MPa}$, $E_s=210\text{GPa}$, $f_{c,y}=25\text{MPa}$, $E_c=30.5\text{GPa}$

Κεφάλαιο 2: Βελτιστοποίηση ελαστικής ροπής αντοχής και δυσκαμψίας με χρήση της ακριβούς διαδικασίας



Σχήμα 2.5: Συνδυασμοί παχών χαλύβδινων ελασμάτων και πυρήνα σκυροδέματος που οδηγούν σε σύγκλιση των κριτηρίων μεγιστοποίησης της ελαστικής ροπής και της ισοδύναμης δυσκαμψίας, για διάφορους συνδυασμούς ποιότητας υλικών και εξωτερική ακτίνα $R_4=2000\text{mm}$

Figure 2.5: Concrete-core and steel-faces thickness combinations providing convergence of the criteria of elastic moment resistance and stiffness maximization, for an outer radius of $R_4=2000\text{mm}$ and various combinations of material properties

Βάσει του Σχήματος 2.5, καθίσταται εφικτή αλλά και ευχερής η επιλογή της βέλτιστης - από στατικής άποψης - γεωμετρίας μίας διατομής τύπου sandwich, με δεδομένα υλικά και συγκεκριμένες απαιτήσεις καμπτικής αντοχής αλλά και δυσκαμψίας, καλύπτοντας ένα σημαντικό εύρος, από περίπου 53600kNm έως 198700kNm, όσον αφορά την πρώτη και μεταξύ περίπου 78900MPa και 376300MPa, όσον αφορά τη δεύτερη. Μπορεί να αποφευχθεί, έτσι, η επιλογή γεωμετρικών χαρακτηριστικών τα οποία ικανοποιούν το ένα κριτήριο, εις βάρος όμως του άλλου, όπως φαίνεται σε πολλές περιπτώσεις του

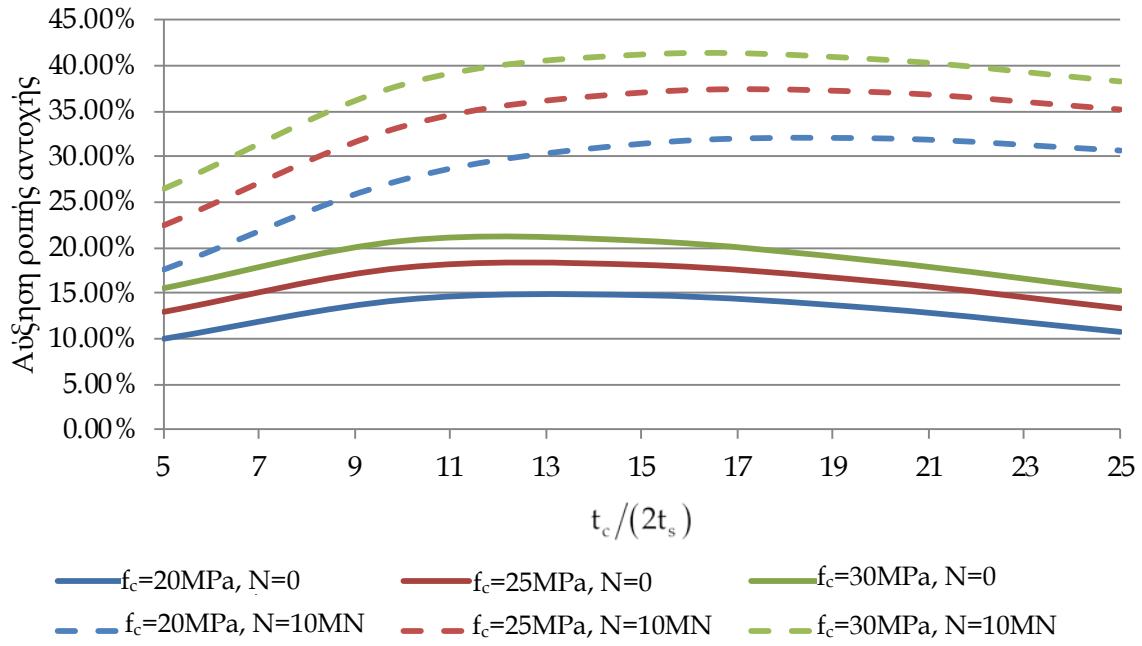
Κεφάλαιο 2: Βελτιστοποίηση ελαστικής ροπής αντοχής και δυσκαμψίας με χρήση της ακριβούς διαδικασίας

Σχήματος 2.4, ή καλύπτουν επαρκώς τις δύο απαιτήσεις αλλά με περιττή ποσότητα ή άσκοπα υψηλή ποιότητα υλικών, εις βάρος της οικονομίας της κατασκευής.

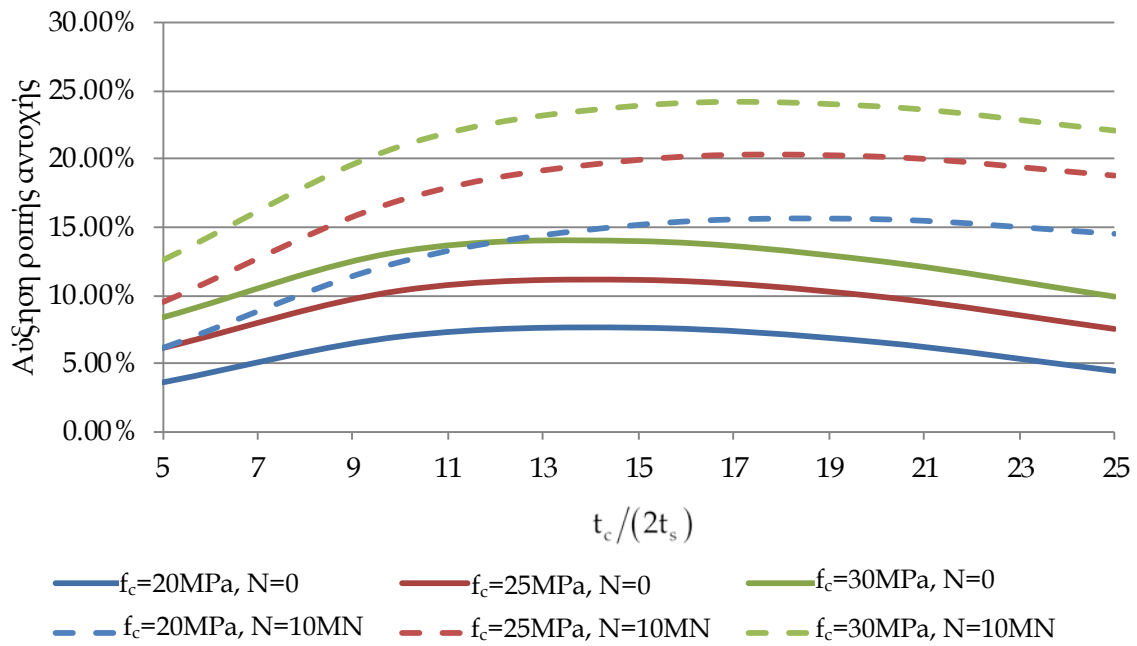
Σύγκριση πλαστικής ροπής αντοχής διατομής sandwich και αμιγώς χαλύβδινης με εφαρμογή της ακριβούς διαδικασίας

Τα διαγράμματα του Σχήματος 3.1 που ακολουθεί απεικονίζουν την ποσοστιαία αύξηση της πλαστικής ροπής αντοχής μίας διατομής sandwich σε σχέση με μία συμβατική, αμιγώς χαλύβδινη διατομή, ίδιας ποσότητας χάλυβα. Η αντοχή σε κάμψη της διατομής εξετάστηκε για πολλά επίπεδα ταυτόχρονης αξονικής έντασης. Βάσει της χονδρικής εκτίμησης που πραγματοποιήθηκε στο παραδοτέο 2.1 για το αξονικό φορτίο που θα καταπονούσε τη βάση του πυλώνα μίας ανεμογεννήτριας μεγάλου μεγέθους, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1 η επίδραση ενός ρεαλιστικού αξονικού φορτίου $N=10\text{MN}$ στην αύξηση της αντοχής. Όπως φαίνεται, το αξονικό φορτίο τέτοιας τάξης μεγέθους δρα ευεργετικά κατά την κάμψη της διατομής, αφού ενεργοποιεί την ικανότητα παραλαβής θλιπτικού φορτίου από το σκυρόδεμα, προσδίδοντάς του έναν πιο ενεργό ρόλο στη συνολική συμπεριφορά της διατομής. Όπως είναι προφανές, η επιρροή της παρουσίας του σκυροδέματος στη διατομή εξασθενεί όσο η ποιότητά του υποβαθμίζεται, ή η ποιότητα του χάλυβα βελτιώνεται. Σε κάθε περίπτωση ωστόσο, εκτός της ακραίας όπου $f_{sy}=460\text{MPa}$ και $f_c=20\text{MPa}$, η αντοχή της διατομής sandwich παρουσιάζεται σημαντικά αυξημένη σε σχέση με εκείνη της συμβατικής χαλύβδινης διατομής.

Κεφάλαιο 3: Σύγκριση πλαστικής ροπής αντοχής διατομής sandwich και αμιγώς χαλύβδινης με εφαρμογή της ακριβούς διαδικασίας

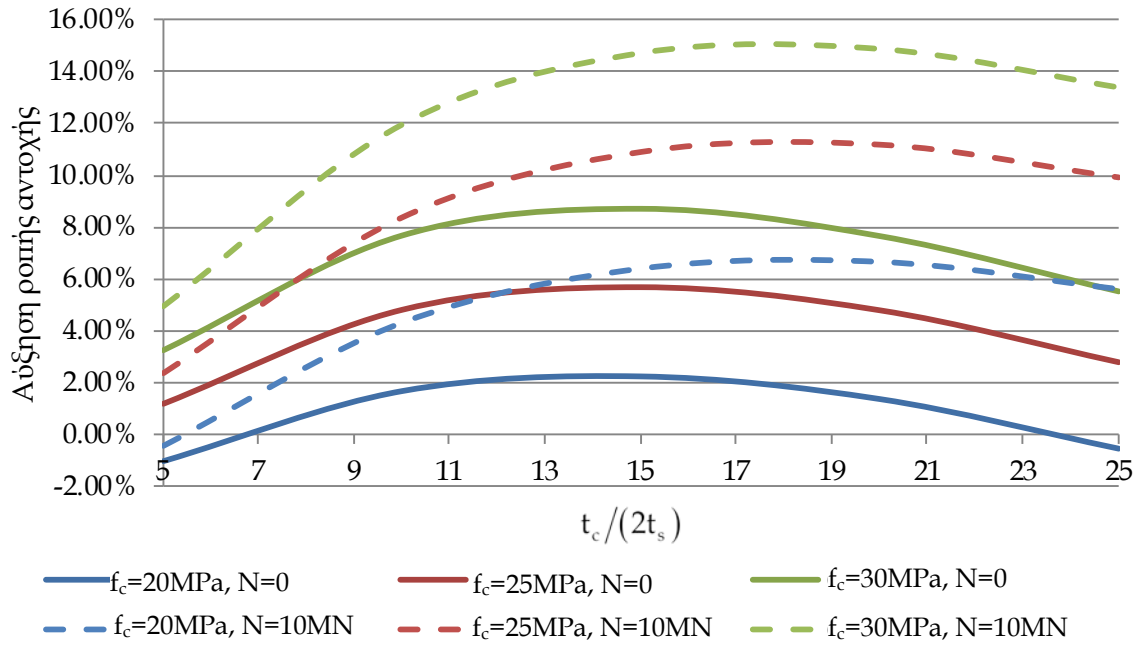


(i)



(ii)

Κεφάλαιο 3: Σύγκριση πλαστικής ροπής αντοχής διατομής sandwich και αμιγώς χαλύβδινης με εφαρμογή της ακριβούς διαδικασίας



(iii)

Σχήμα 3.1: Ποσοστιαία διαφορά πλαστικής ροπής αντοχής μεταξύ διατομής sandwich και αμιγώς χαλύβδινης διατομής, για (i) $f_{sy}=235\text{MPa}$, (ii) $f_{sy}=355\text{MPa}$ και (iii) $f_{sy}=460\text{MPa}$

Figure 3.1: Percentage difference in plastic resistance moment between a sandwich section and a steel-only section, for (i) $f_{sy}=235\text{MPa}$, (ii) $f_{sy}=355\text{MPa}$ and (iii) $f_{sy}=460\text{MPa}$

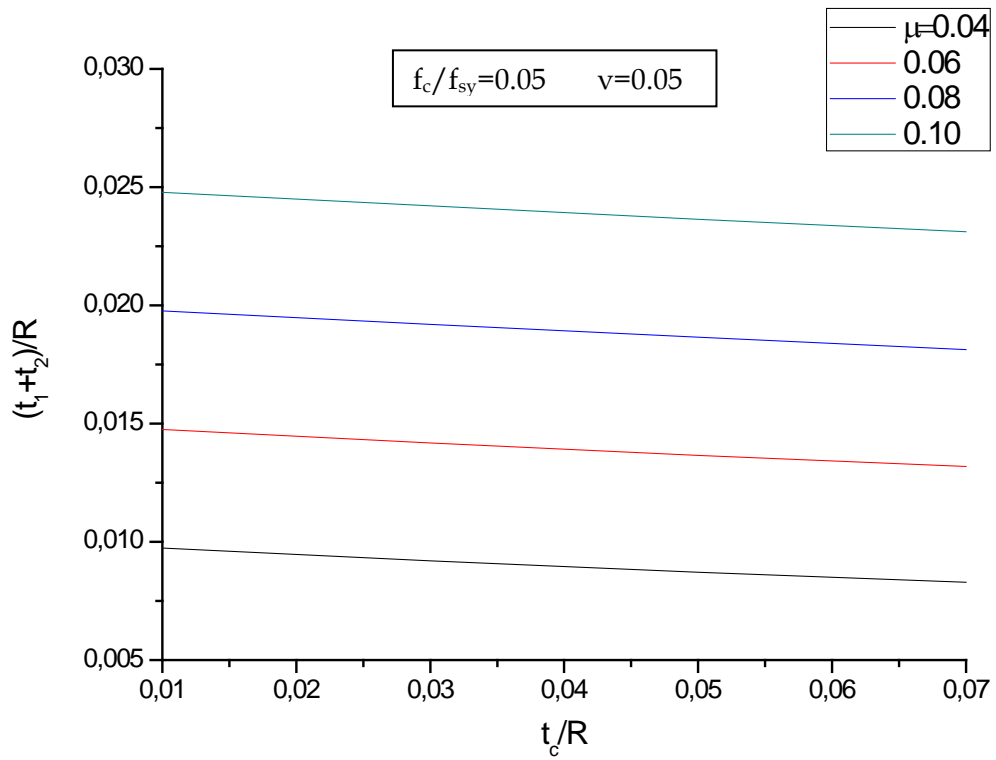
Ποιοτικά διαγράμματα βελτιστοποίησης με εφαρμογή της προσεγγιστικής διαδικασίας

Η δυνατότητα για συμβολική επίλυση των εξισώσεων, που απορρέει από την παραδοχή λεπτότοιχης διατομής, όπως παρουσιάστηκε στο παραδοτέο 2.1, κατέστησε εφικτή την εξαγωγή πλήρως αδιαστατοποιημένων διαγραμμάτων που αφορούν την επιρροή της απαιτούμενης πλαστικής ροπής αντοχής, της απαιτούμενης δυσκαμψίας, του επιβαλλόμενου αξονικού φορτίου και της αντοχής των υλικών στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής. Επιπλέον, η προσεγγιστική μέθοδος επέτρεψε την εκτίμηση του κόστους κατασκευής ως συνάρτηση των παραπάνω παραγόντων. Βάσει της εκτίμησης αυτής δημιουργήθηκαν επιπρόσθετα διαγράμματα βελτιστοποίησης ανάλογα με την απαιτούμενη πλαστική ροπή αντοχής ή τη δυσκαμψία. Σημειώνεται ότι, όπως αναφέρθηκε στο παραδοτέο 2.1, ο υπολογισμός της δυσκαμψίας με την προσεγγιστική μέθοδο παρουσιάζει σημαντικό σφάλμα και, συνεπώς, τα αντίστοιχα διαγράμματα προσφέρουν μια αδρή μόνο αποτύπωση της επιρροής των επιμέρους παραγόντων σε αυτήν. Στο παρουσιάζεται η

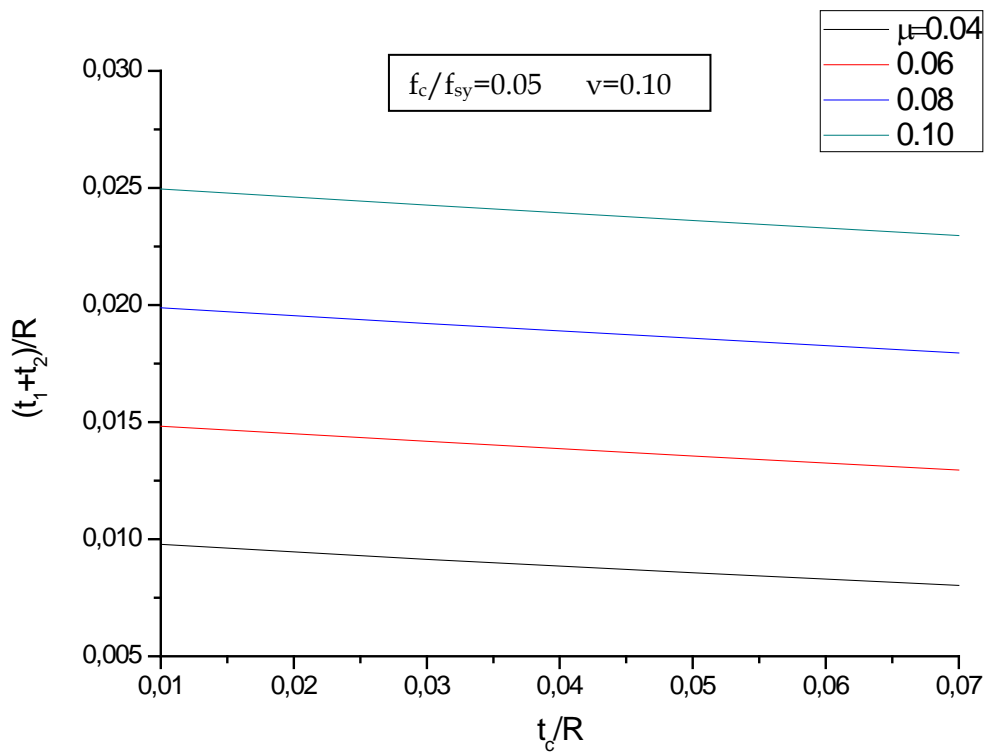
4.1 Ροπή αντοχής, αξονικό φορτίο και ποιότητα υλικών ως κριτήρια για την επιλογή παχών ελασμάτων και πυρήνα

Η μεταβολή των λόγων $2t_s/R$ και t_c/R για δεδομένη ανηγμένη ροπή αντοχής δίνεται ενδεικτικά στα Σχήματα 4.1, 4.2, 4.3, για $f_c/f_{sy} = 0.05, 0.10$ και 0.15 , αντίστοιχα. Για κάθε ένα από τα σχήματα αυτά δίνονται τέσσερις ομάδες καμπυλών, για τιμές του $\nu = 0.05, 0.10, 0.20$ και 0.40 . Κάθε καμπύλη αντιστοιχεί σε δεδομένη ροπή, γι' αυτό και τα σημεία της αντιστοιχούν σε όλους τους πιθανούς συνδυασμούς πάχους ελασμάτων (χάλυβα) και πυρήνα (σκυροδέματος) για δεδομένη ροπή (με γνωστό το λόγο αντοχών των δύο υλικών και την αξονική δύναμη).

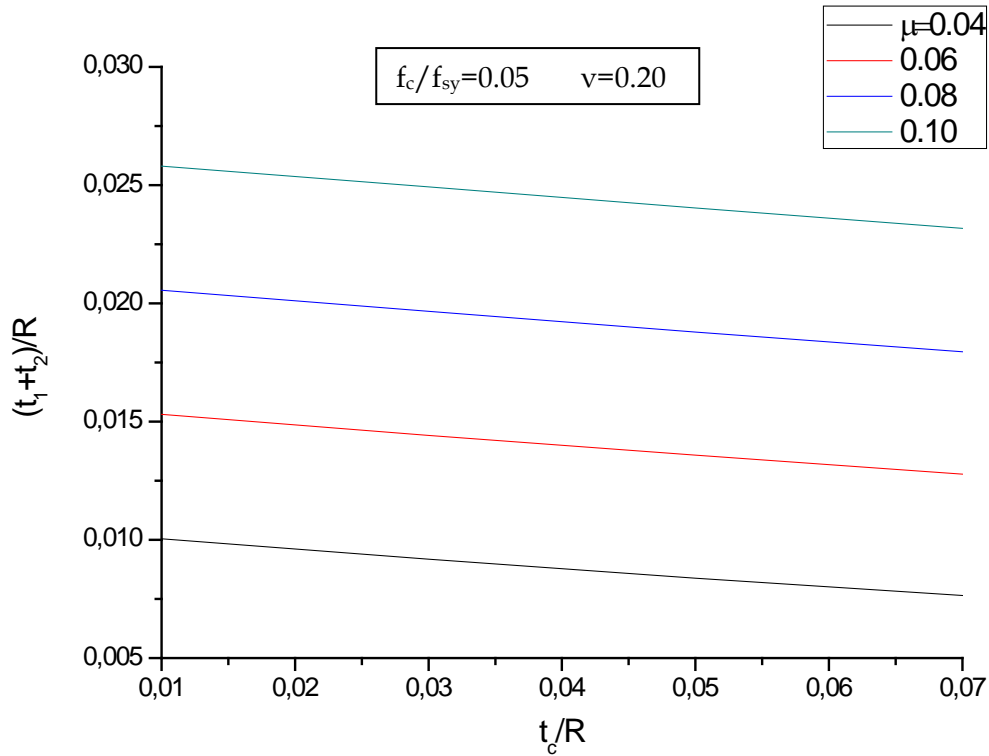
Κεφάλαιο 4: Ποιοτικά διαγράμματα βελτιστοποίησης με εφαρμογή της προσεγγιστικής διαδικασίας



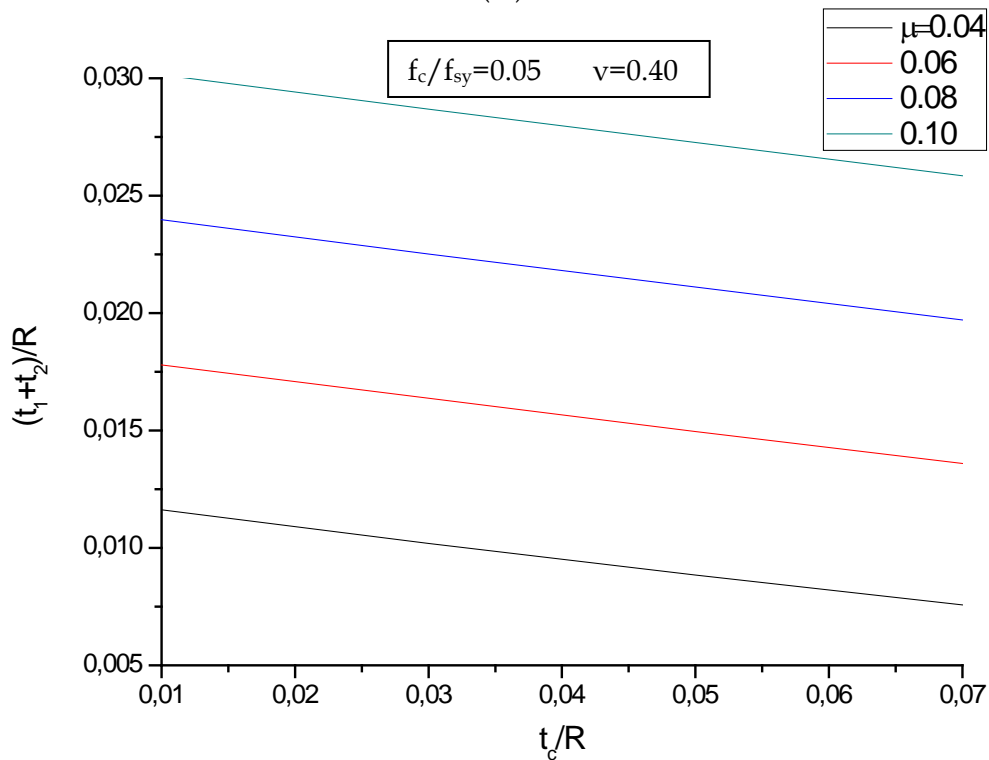
(i)



(ii)



(iii)

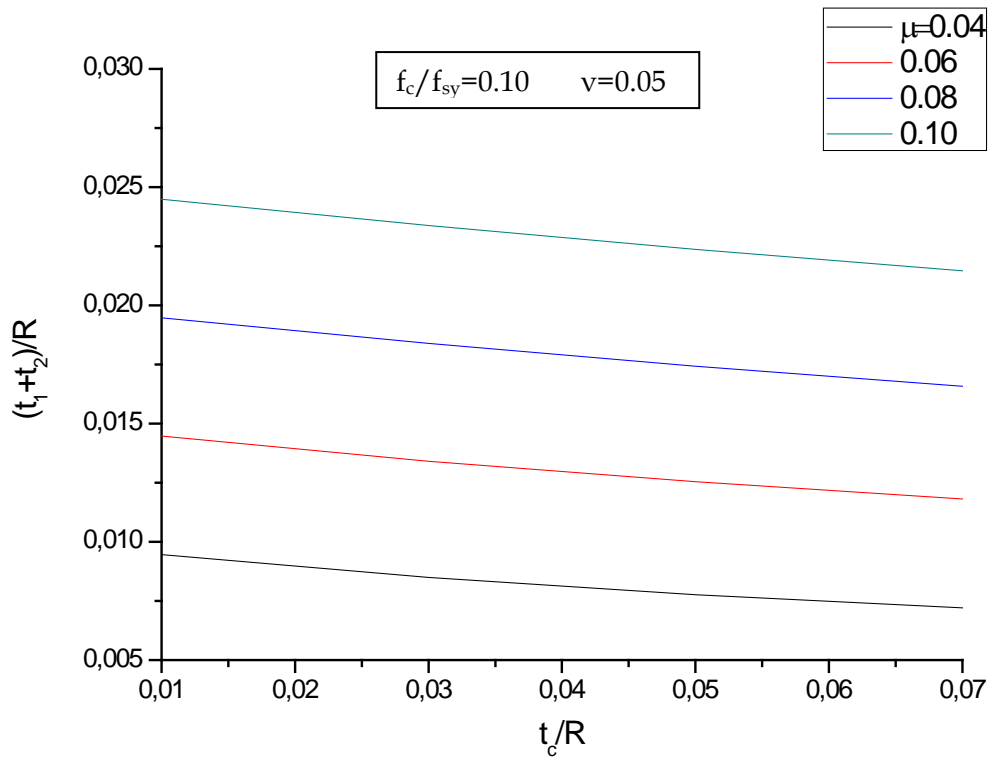


(iv)

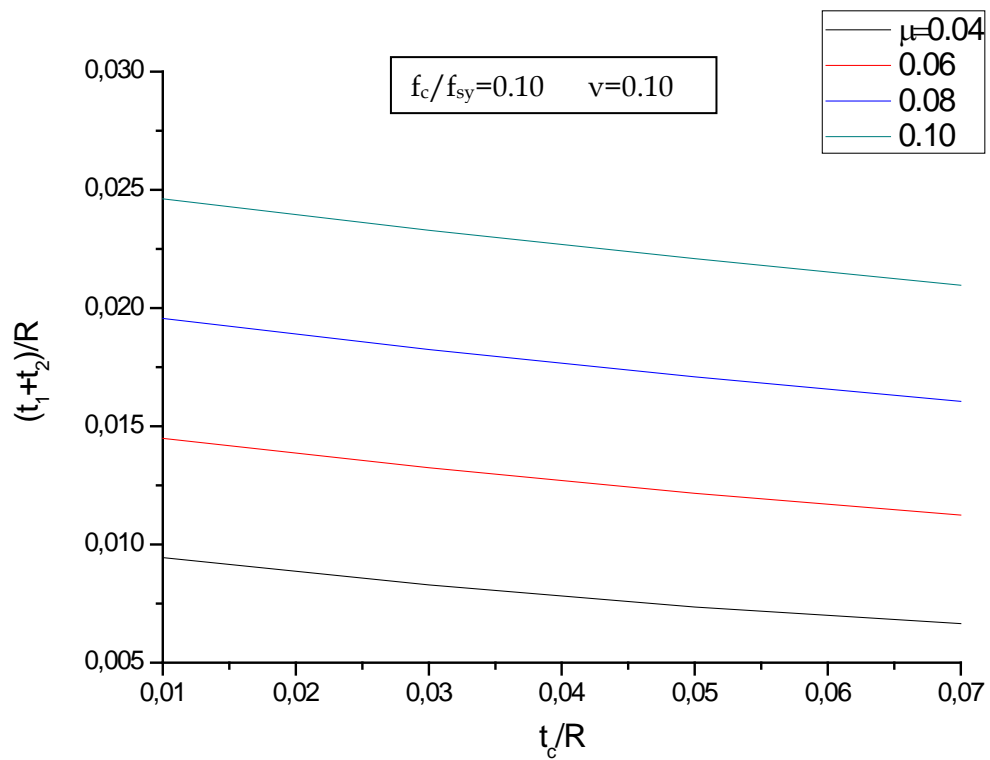
Σχήμα 4.1: Μεταβολή των γεωμετρικών παραμέτρων για διαφορετικές τιμές της ανηγμένης πλαστικής ροπής αντοχής, $f_c/f_{sy}=0.05$, και (i) $\nu=0.05$, (ii) $\nu=0.10$, (iii) $\nu=0.20$, (iv) $\nu=0.40$

Figure 4.1: Variation of geometrical parameters for different values of normalized plastic resistance moment, $f_c/f_{sy}=0.05$, and (i) $\nu=0.05$, (ii) $\nu=0.10$, (iii) $\nu=0.20$, (iv) $\nu=0.40$

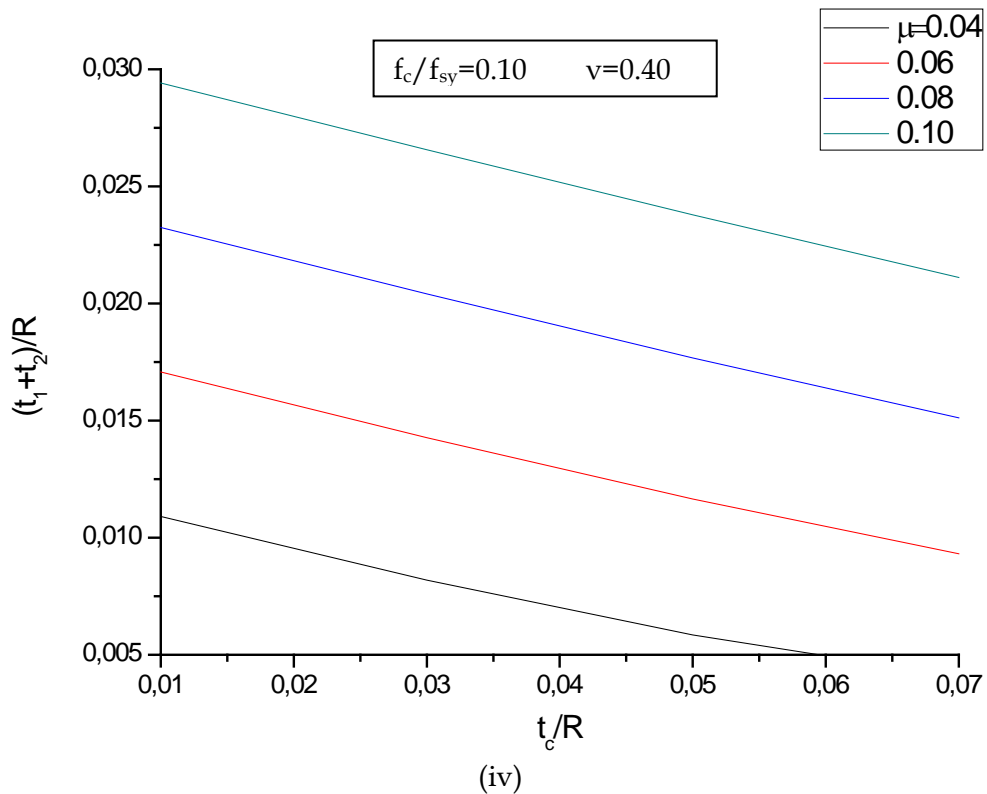
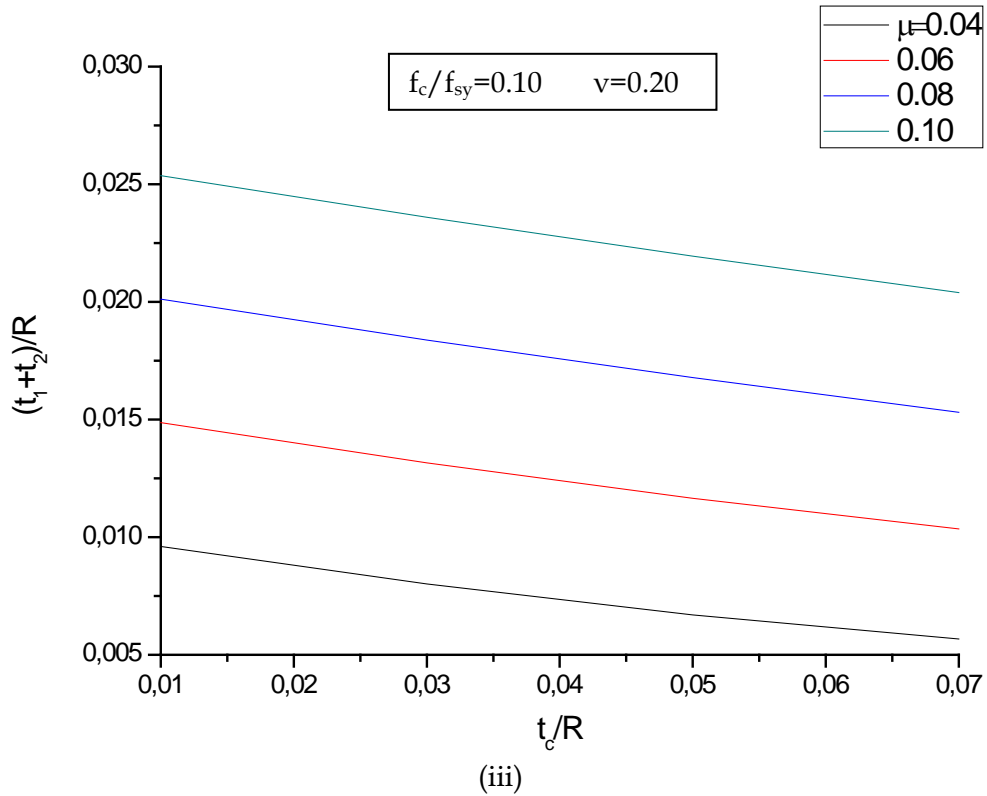
Κεφάλαιο 4: Ποιοτικά διαγράμματα βελτιστοποίησης με εφαρμογή της προσεγγιστικής διαδικασίας



(i)



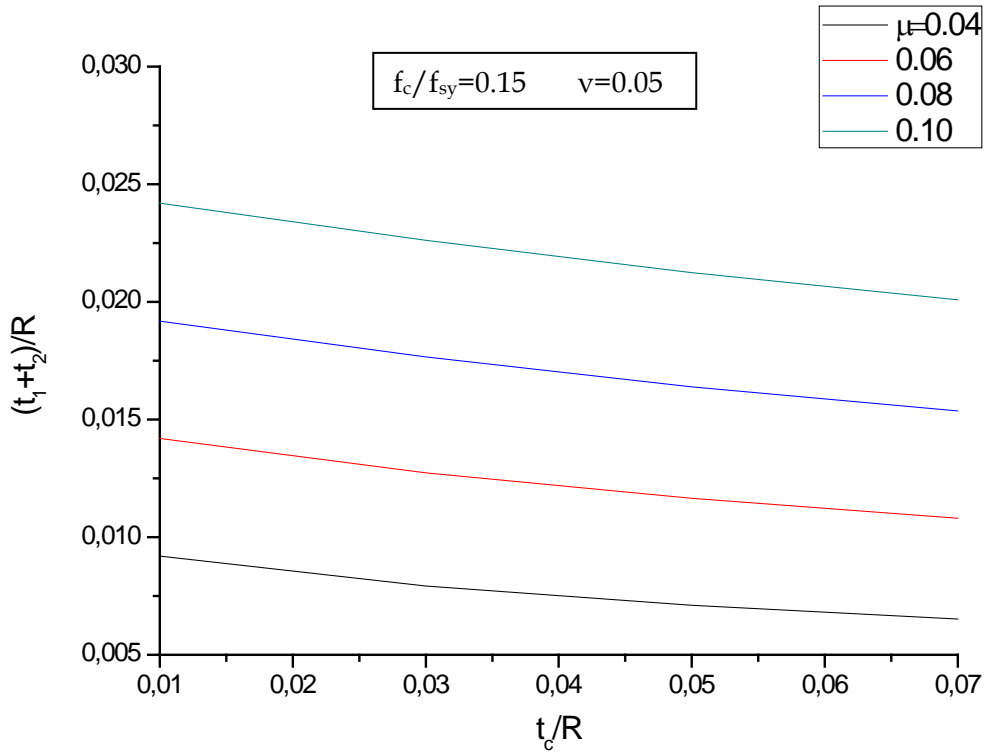
(ii)



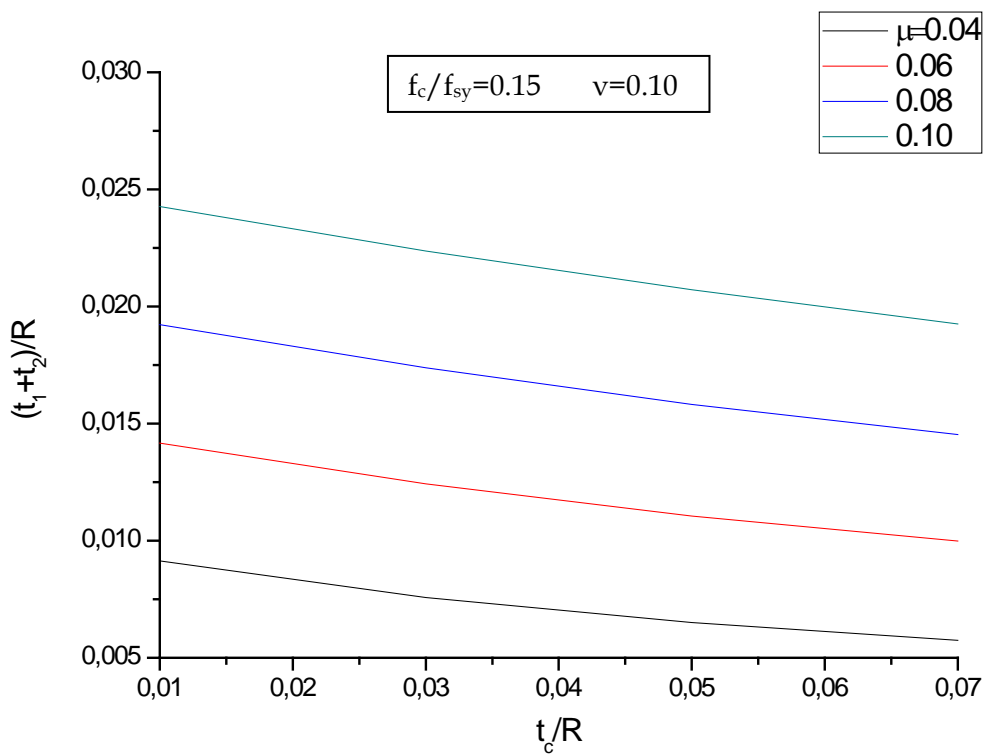
Σχήμα 4.2: Μεταβολή των γεωμετρικών παραμέτρων για διαφορετικές τιμές της ανηγμένης πλαστικής ροπής αντοχής, $f_c/f_{sy}=0.10$, και (i) $\nu=0.05$, (ii) $\nu=0.10$, (iii) $\nu=0.20$, (iv) $\nu=0.40$

Figure 4.2: Variation of geometrical parameters for different values of normalized plastic resistance moment, $f_c/f_{sy}=0.10$, and (i) $\nu=0.05$, (ii) $\nu=0.10$, (iii) $\nu=0.20$, (iv) $\nu=0.40$

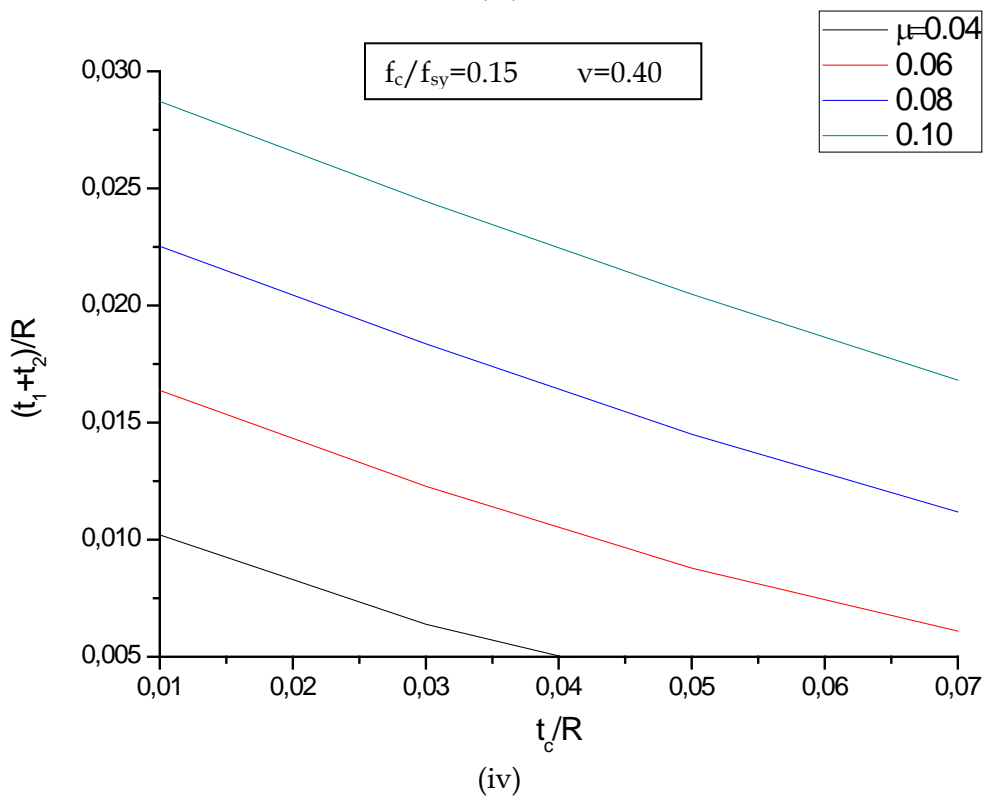
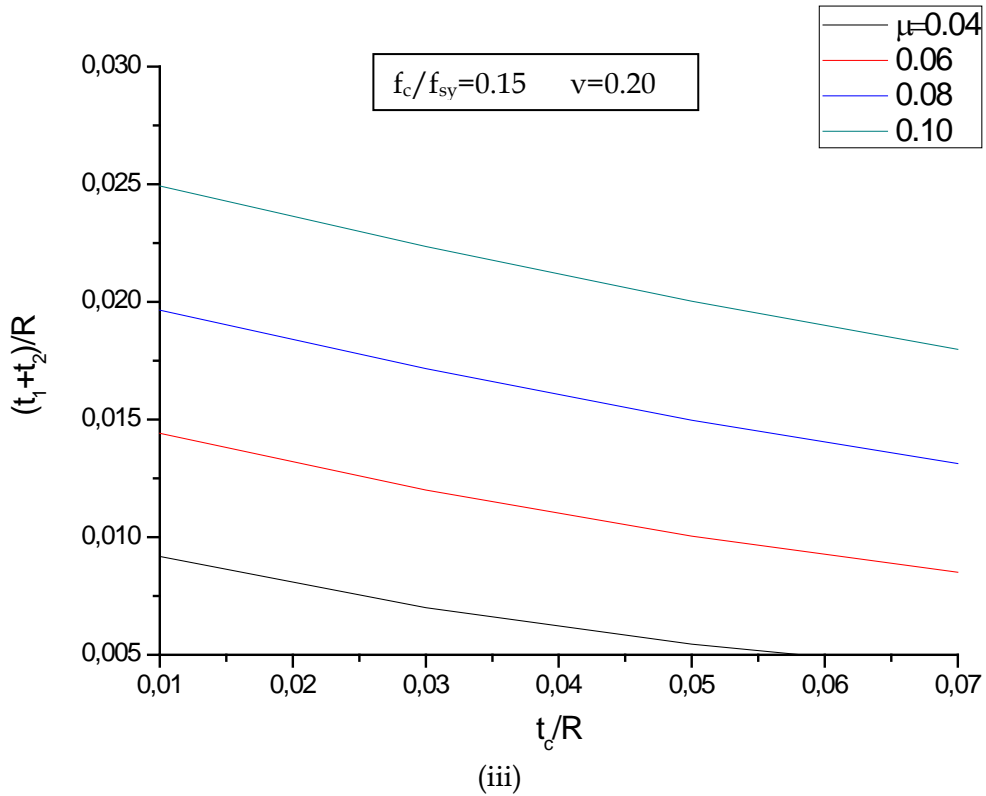
Κεφάλαιο 4: Ποιοτικά διαγράμματα βελτιστοποίησης με εφαρμογή της προσεγγιστικής διαδικασίας



(i)



(ii)



Σχήμα 4.3: Μεταβολή των γεωμετρικών παραμέτρων για διαφορετικές τιμές της ανηγμένης πλαστικής ροπής αντοχής, $f_c/f_{sy}=0.05$, και (i) $\nu=0.05$, (ii) $\nu=0.10$, (iii) $\nu=0.20$, (iv) $\nu=0.40$

Figure 4.3: Variation of geometrical parameters for different values of normalized plastic resistance moment, $f_c/f_{sy}=0.05$, and (i) $\nu=0.05$, (ii) $\nu=0.10$, (iii) $\nu=0.20$, (iv) $\nu=0.40$

Κεφάλαιο 4: Ποιοτικά διαγράμματα βελτιστοποίησης με εφαρμογή της προσεγγιστικής διαδικασίας

Κύρια συμπεράσματα από τις καμπύλες των Σχημάτων 4.1 - 4.3 είναι τα εξής:

- Για δεδομένη ροπή αντίστασης, η χρήση υλικού στον πυρήνα (σκυροδέματος) οδηγεί σε μείωση του πάχους των ελασμάτων. Η μείωση αυτή είναι περίπου γραμμική με την αύξηση του πάχους σκυροδέματος και γίνεται εντονότερη όσο αυξάνεται η αξονική δύναμη.
- Τα πάχη ελασμάτων και πυρήνα αυξάνονται περίπου γραμμικά με τη ροπή αντίστασης (οι καμπύλες σε κάθε σχήμα είναι περίπου παράλληλες και ισαπέχουσες).

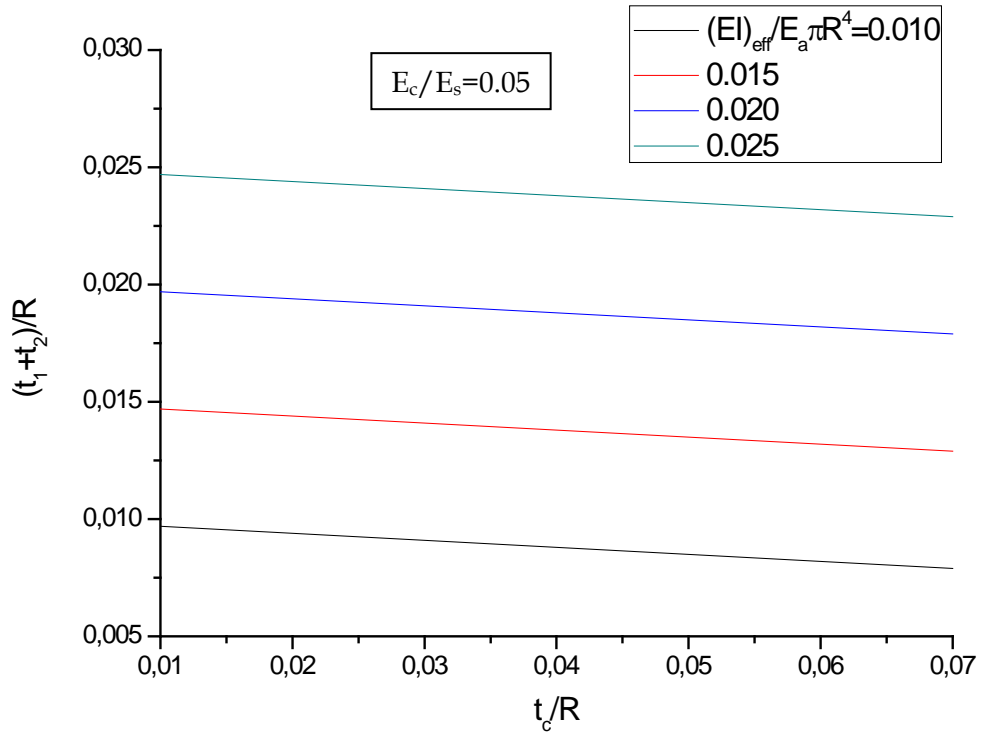
4.2 Ισοδύναμη δυσκαμψία, αξονικό φορτίο και ποιότητα υλικών ως κριτήρια για την επιλογή παχών ελασμάτων και πυρήνα

Η μεταβολή των λόγων t_s/R και t_c/R για δεδομένη ανηγμένη δυσκαμψία δίνεται ενδεικτικά στα Σχήματα 4.4i,ii,iii για $E_c/E_s = 0.05, 0.10$ και 0.15 , αντίστοιχα. Στα σχήματα αυτά τα σημεία κάθε καμπύλης δίνουν όλους τους πιθανούς συνδυασμούς πάχους ελασμάτων (χάλυβα) και πυρήνα (σκυροδέματος) για μια συγκεκριμένη τιμή $(EI)_{eff} / E_s \pi R^4$.

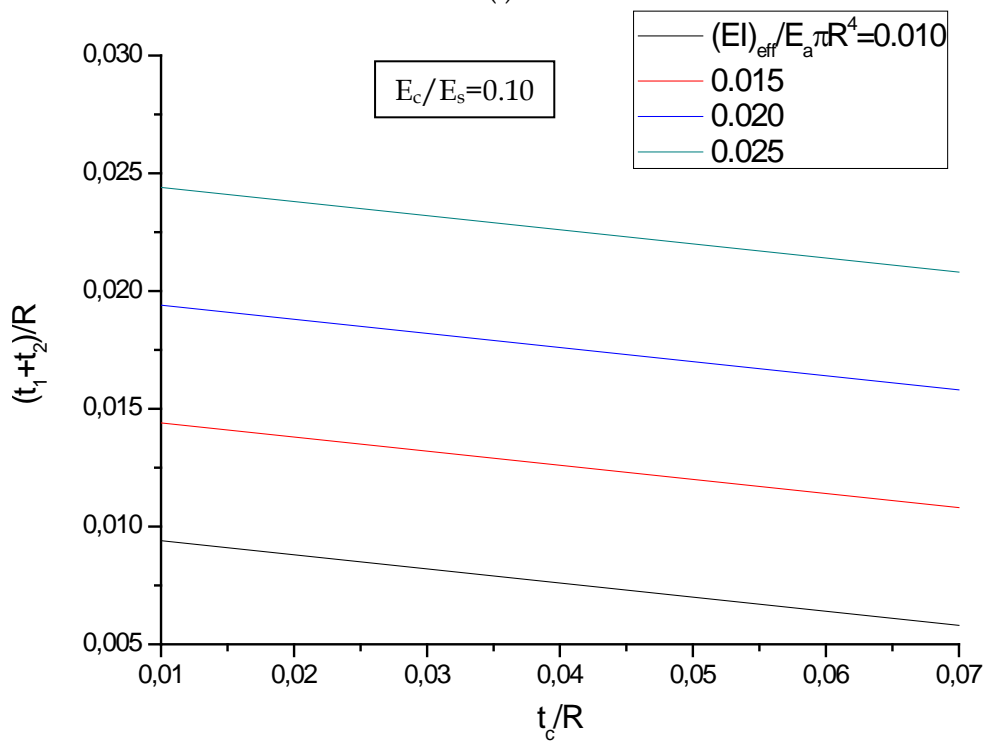
Τα συμπεράσματα από τα αποτελέσματα των Σχημάτων 4.4i,ii,iii είναι παρόμοια με αυτά για την περίπτωση της αντοχής:

- Για δεδομένη δυσκαμψία, η χρήση υλικού στον πυρήνα (σκυροδέματος) οδηγεί σε μείωση του πάχους των ελασμάτων. Η μείωση αυτή είναι γραμμική με την αύξηση του πάχους σκυροδέματος και γίνεται εντονότερη όσο αυξάνεται το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος.
- Τα πάχη ελασμάτων και πυρήνα αυξάνονται γραμμικά με τη δυσκαμψία.

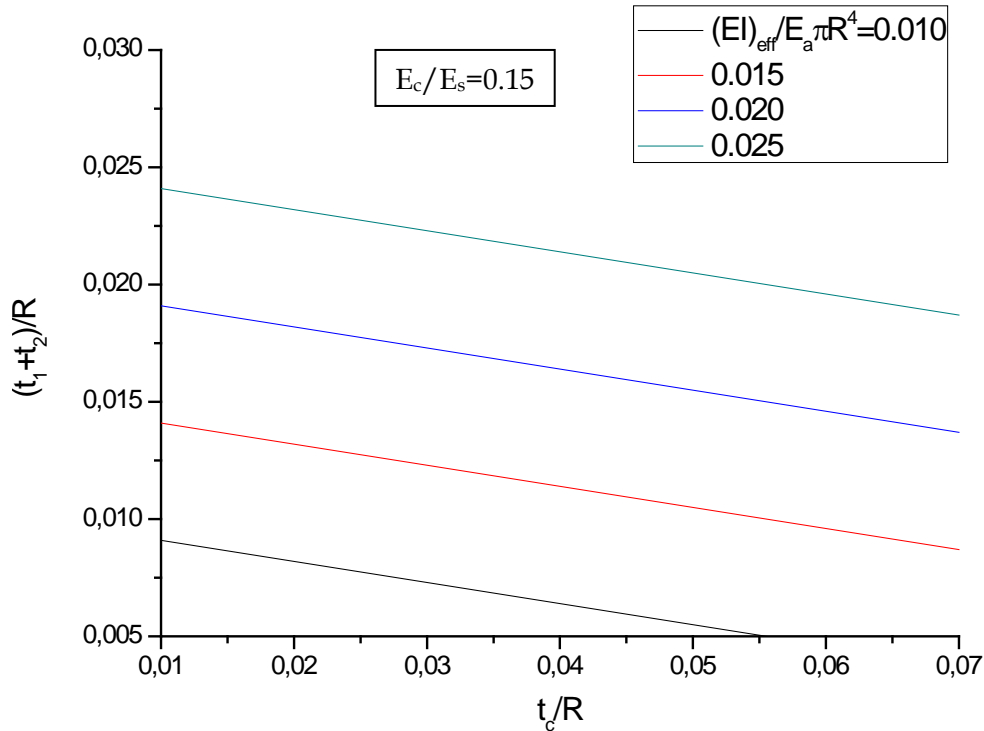
Κεφάλαιο 4: Ποιοτικά διαγράμματα βελτιστοποίησης με εφαρμογή της προσεγγιστικής διαδικασίας



(i)



(ii)



(iii)

Σχήμα 4.4: Μεταβολή των γεωμετρικών παραμέτρων για διαφορετικές τιμές της ανηγμένης δυσκαμψίας: (i) $E_c/E_s=0.05$, (ii) $E_c/E_s=0.10$, (iii) $E_c/E_s=0.15$

Figure 4.4: Variation of geometrical parameters for different values of normalized stiffness: (i) $E_c/E_s=0.05$, (ii) $E_c/E_s=0.10$, (iii) $E_c/E_s=0.15$

4.3 Βελτιστοποίηση βάσει κόστους κατασκευής

4.3.1 Υπολογισμός κόστους

Το συνολικό κόστος K , ανά μονάδα όγκου, για την κατασκευή πυλώνα ανεμογεννήτριας μοναδιαίου μήκους, υπολογίζεται (προσεγγιστικά) από τη σχέση:

$$K = 4\pi R K_s t_s + 2\pi R t_c K_c \quad (4.1)$$

όπου K_s είναι το κόστος υλικών, εργασιών, μεταφορικών κλπ που αφορούν το υλικό των ελασμάτων (χάλυβας) ανά μονάδα όγκου και K_c το κόστος υλικών, εργασιών, μεταφορικών κλπ που αφορούν το σκυρόδεμα ανά μονάδα όγκου. Διαιρώντας με $2\pi R^2$, η εξ. (4.1) γράφεται:

$$\frac{K}{2\pi R^2} = \frac{2t_s}{R} K_s + \frac{t_c}{R} K_c = K_s \left[\frac{2t_s}{R} + \frac{t_c}{R} \frac{K_c}{K_s} \right] \quad (4.2)$$

Συνεπώς, αν το K_s θεωρηθεί δεδομένο και γνωστό, συνάγεται ότι το συνολικό κόστος (ανά μονάδα μήκους πυλώνα) μπορεί να γραφεί ως

$$Cost \propto \frac{2t_s}{R} + \frac{t_c}{R} \frac{K_c}{K_s} \quad (4.3)$$

Επισημαίνεται ότι το κόστος εξαρτάται γραμμικά από τις ίδιες δύο γεωμετρικές ποσότητες $2t_s/R$ και t_c/R που υπεισέρχονται και στην εξίσωση για τον υπολογισμό της (ανηγμένης) ροπής αντίστασης.

4.3.2 Βελτιστοποίηση βάσει κόστους για δεδομένη ροπή αντοχής

Επιλέγοντας συγκεκριμένα υλικά για τα ελάσματα και τον πυρήνα, οι ποσότητες K_c/K_s και f_c/f_{sy} είναι γνωστές. Έτσι, για δεδομένη (ανηγμένη) αξονική δύναμη ν στη διατομή, τόσο η (ανηγμένη) ροπή αντίστασης όσο και το κόστος εξαρτώνται μόνο από τις γεωμετρικές ποσότητες $2t_s/R$ και t_c/R . Αυτό οδηγεί στην αναζήτηση του συνδυασμού των $2t_s/R$ και t_c/R που οδηγούν σε συγκεκριμένη ροπή αντίστασης, ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα το κόστος. Για την εύρεση του συγκεκριμένου συνδυασμού ανεπιτύχη κώδικας MatLab [2], μέσω του οποίου υπολογίζονται αφενός όλοι οι συνδυασμοί των $2t_s/R$ και t_c/R για δεδομένη ροπή αντίστασης, αφετέρου ο συγκεκριμένος συνδυασμός των $2t_s/R$ και t_c/R ο οποίος ελαχιστοποιεί το κόστος.

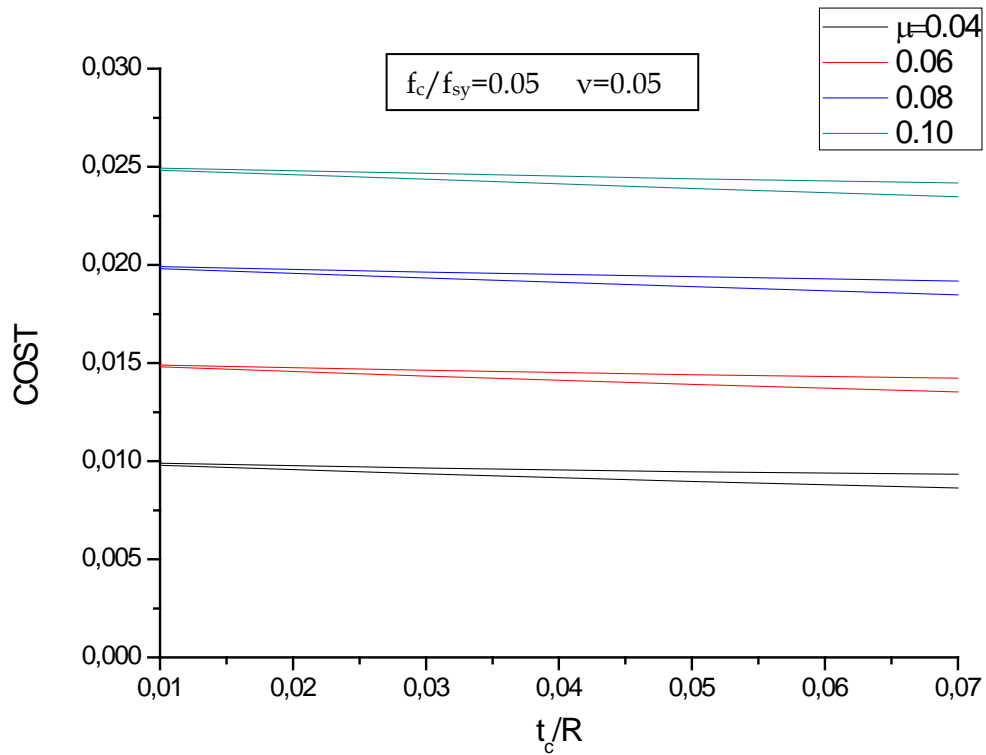
Από σειρά εκτεταμένων παραμετρικών αναλύσεων για μεγάλο εύρος των σχετικών παραμέτρων (ν από 0.05 έως 0.40, f_c/f_{sy} από 0.05 έως 1.5, μ από 0.04 έως 0.10 και K_c/K_s από 0.005 έως 0.015) προέκυψε ότι για δεδομένη τιμή της ροπής αντίστασης, σε όλες τις περιπτώσεις, το κόστος μειώνεται όσο αυξάνεται το πάχος του πυρήνα, κάτι που γίνεται εφικτό μειώνοντας το πάχος του χάλυβα.

Ενδεικτικά αποτελέσματα μεταβολής του κόστους με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά δίνονται στα Σχήματα 4.5, 4.6, 4.7, τα οποία αντιστοιχούν στις περιπτώσεις των Σχημάτων 4.1, 4.2, 4.3. Σημειώνεται ότι η κάτω καμπύλη κάθε ζεύγους στα Σχήματα 4.5 - 4.7 αντιστοιχεί σε $K_c/K_s = 0.005$ ενώ η άνω σε $K_c/K_s = 0.015$.

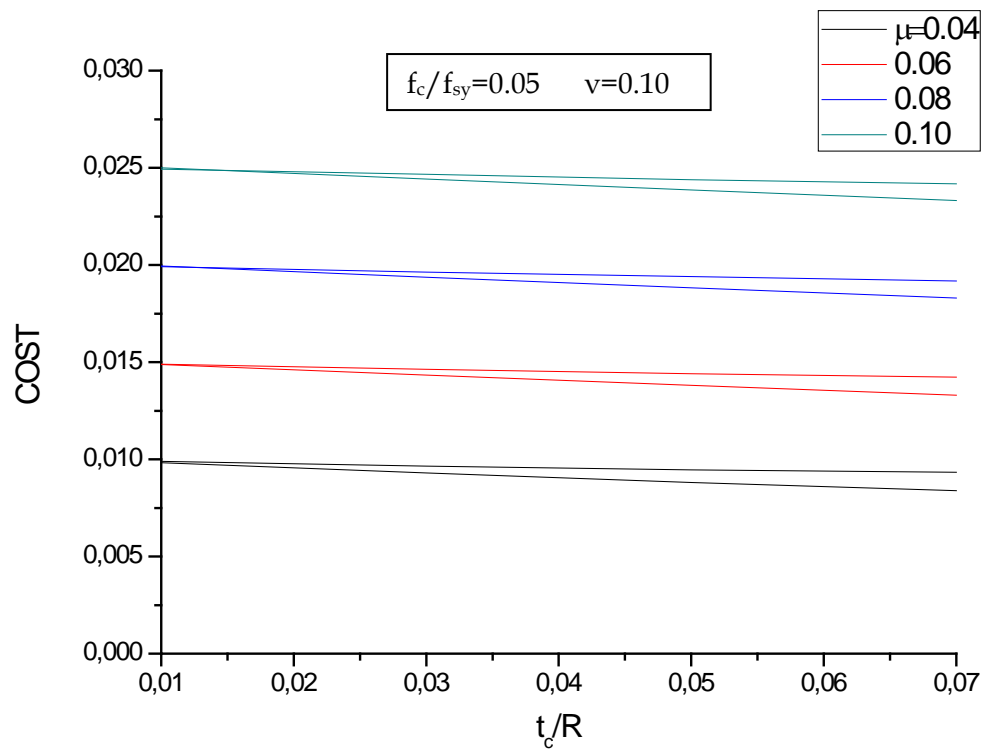
Συμπεραίνεται ότι:

- Για δεδομένη ροπή αντίστασης, το κόστος μειώνεται περίπου γραμμικά με την αύξηση του πάχους σκυροδέματος. Η μείωση αυτή είναι εντονότερη όσο αυξάνεται η αξονική δύναμη.
- Το συνολικό κόστος δεν είναι ιδιαίτερος ευαίσθητο σε μεταβολές του κόστους σκυροδέματος, ακόμα και αν αυτές είναι σημαντικές.

Κεφάλαιο 4: Ποιοτικά διαγράμματα βελτιστοποίησης με εφαρμογή της προσεγγιστικής διαδικασίας

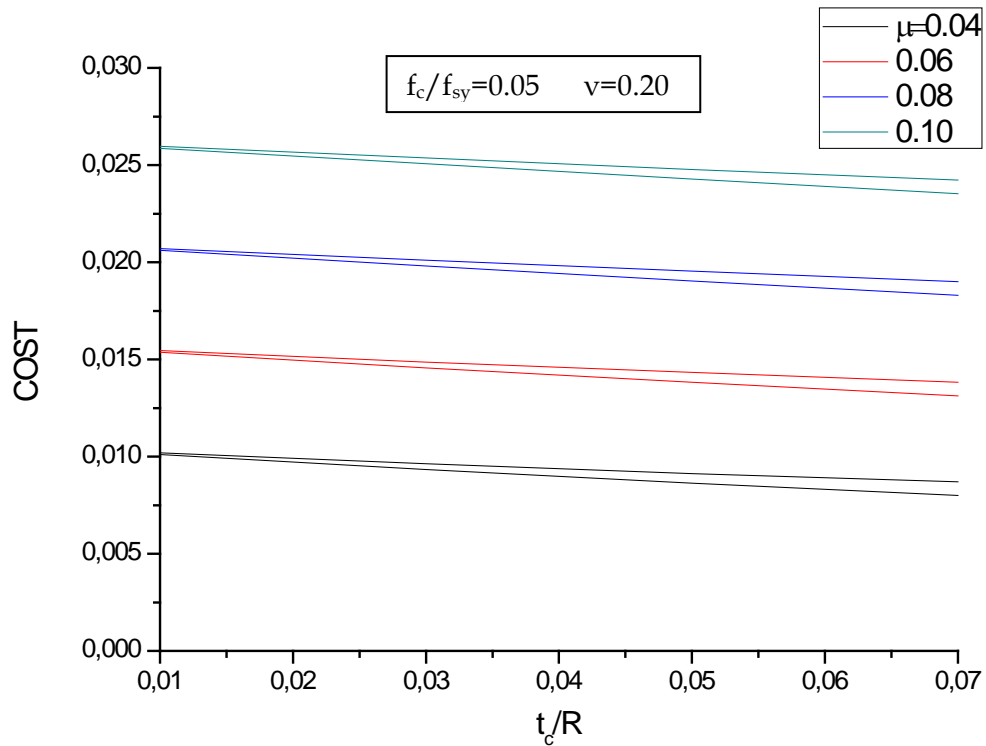


(i)

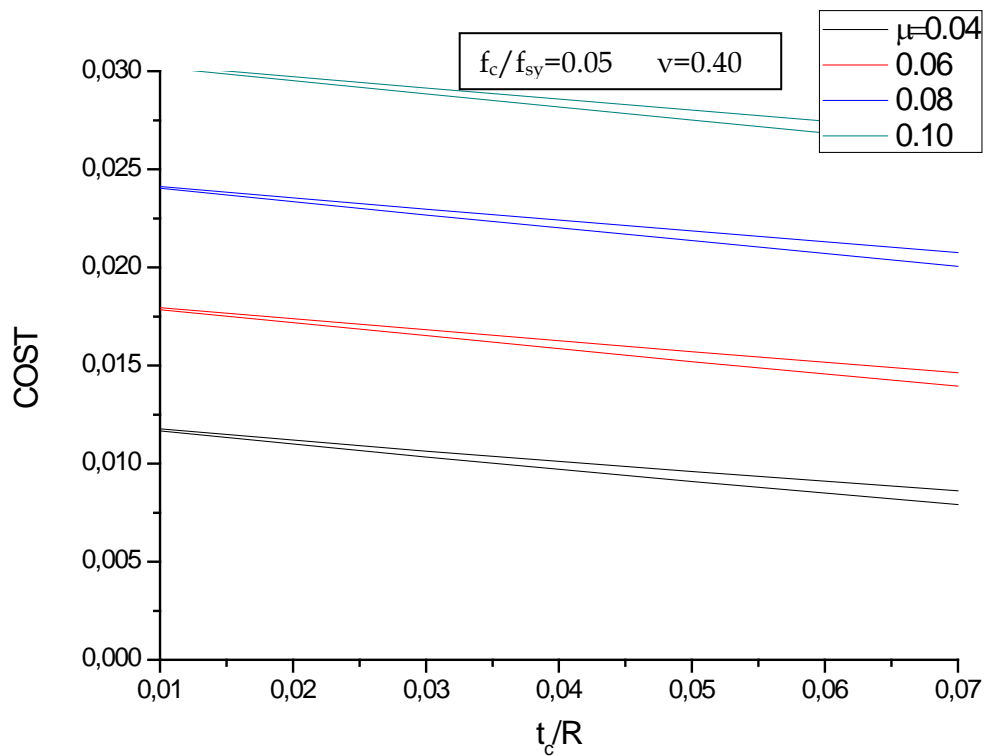


(ii)

Κεφάλαιο 4: Ποιοτικά διαγράμματα βελτιστοποίησης με εφαρμογή της προσεγγιστικής διαδικασίας



(iii)

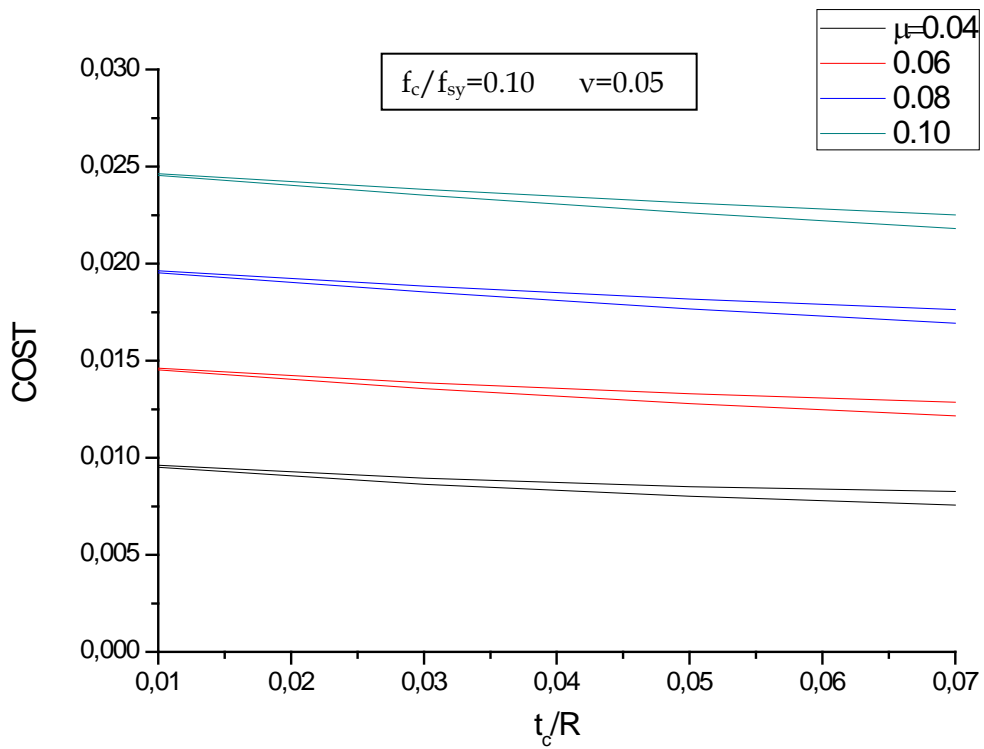


(iv)

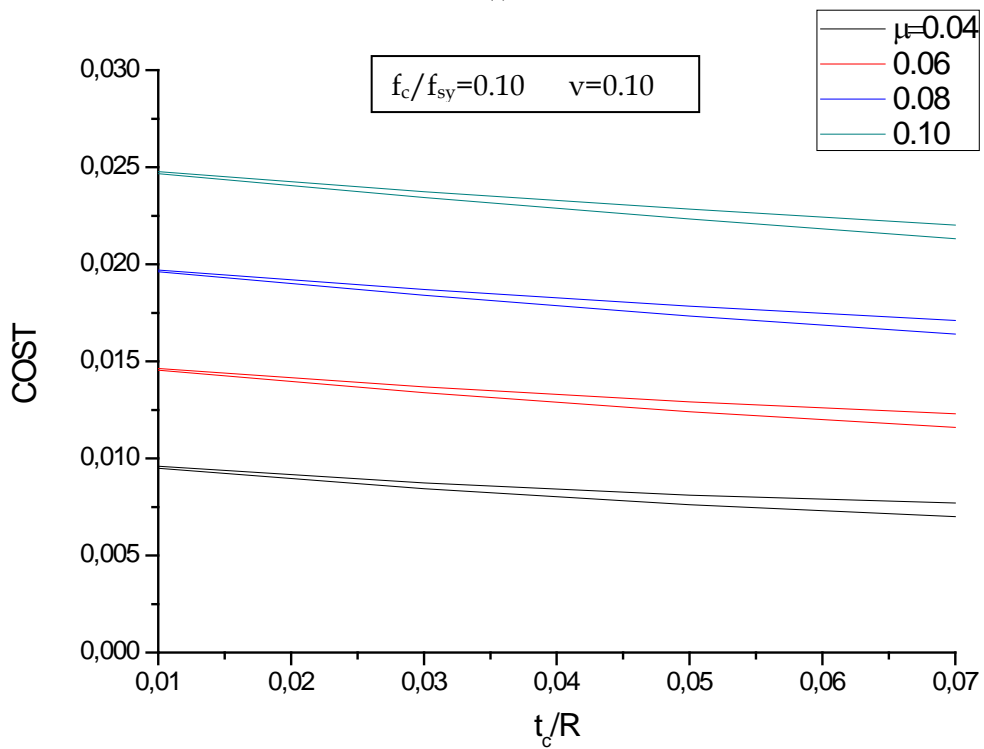
Σχήμα 4.5: Μεταβολή κόστους με το t_c/R για $f_c/f_{sy}=0.05$ και (i) $v=0.05$, (ii) $v=0.10$, (iii) $v=0.20$, (iv) $v=0.40$

Figure 4.5: Cost variation with t_c/R for $f_c/f_{sy}=0.05$ and (i) $v=0.05$, (ii) $v=0.10$, (iii) $v=0.20$, (iv) $v=0.40$

Κεφάλαιο 4: Ποιοτικά διαγράμματα βελτιστοποίησης με εφαρμογή της προσεγγιστικής διαδικασίας

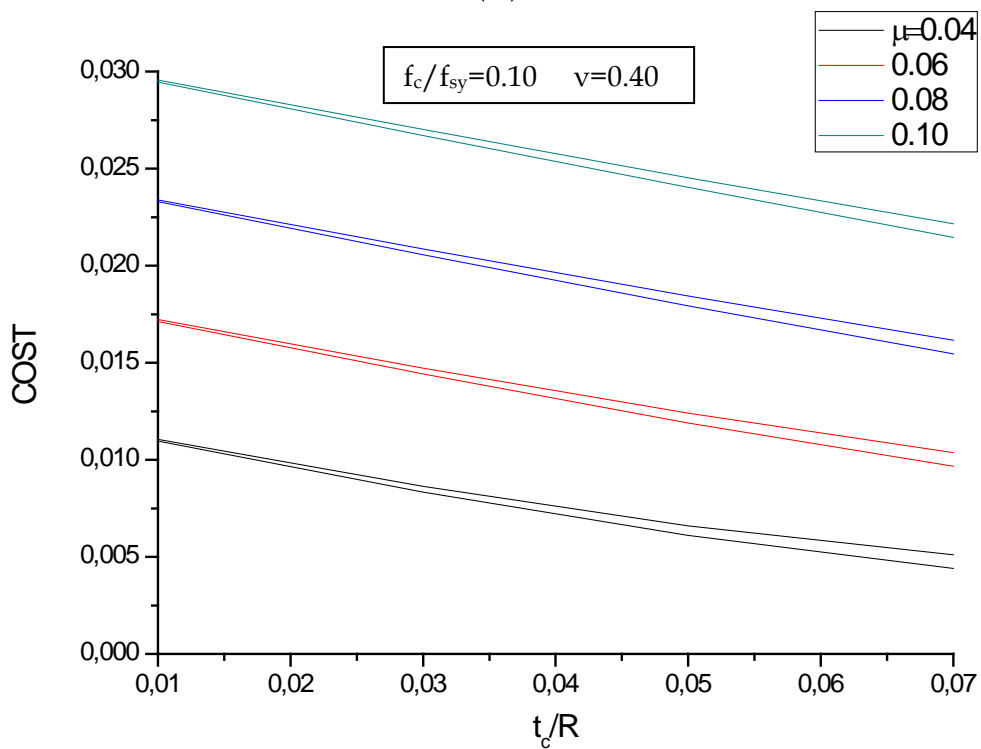
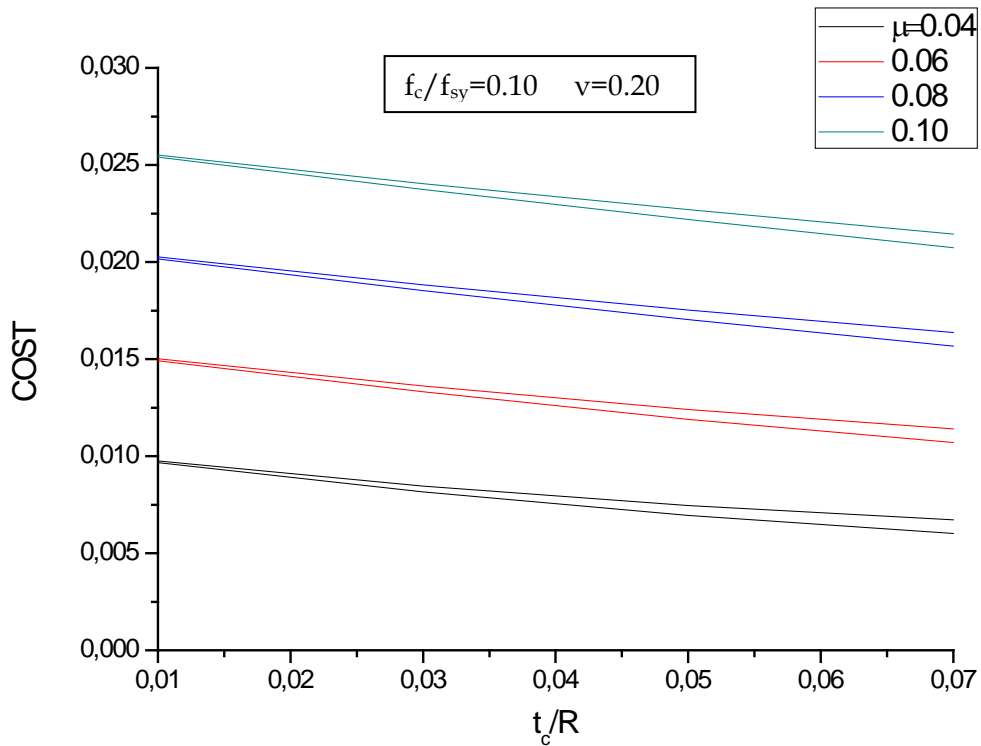


(i)



(ii)

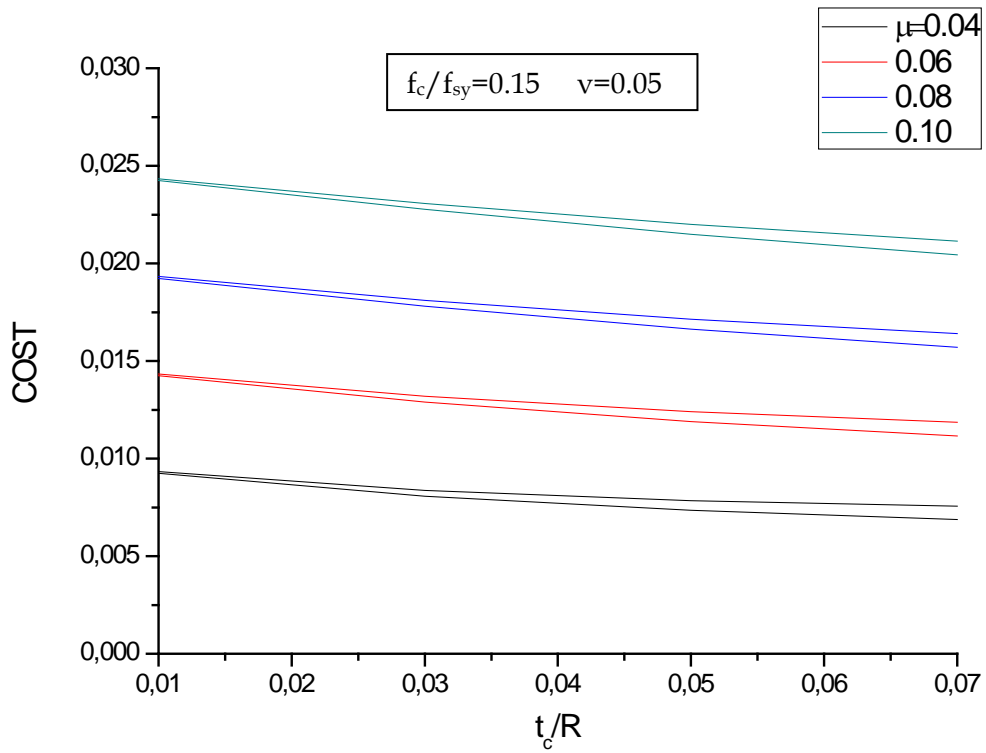
Κεφάλαιο 4: Ποιοτικά διαγράμματα βελτιστοποίησης με εφαρμογή της προσεγγιστικής διαδικασίας



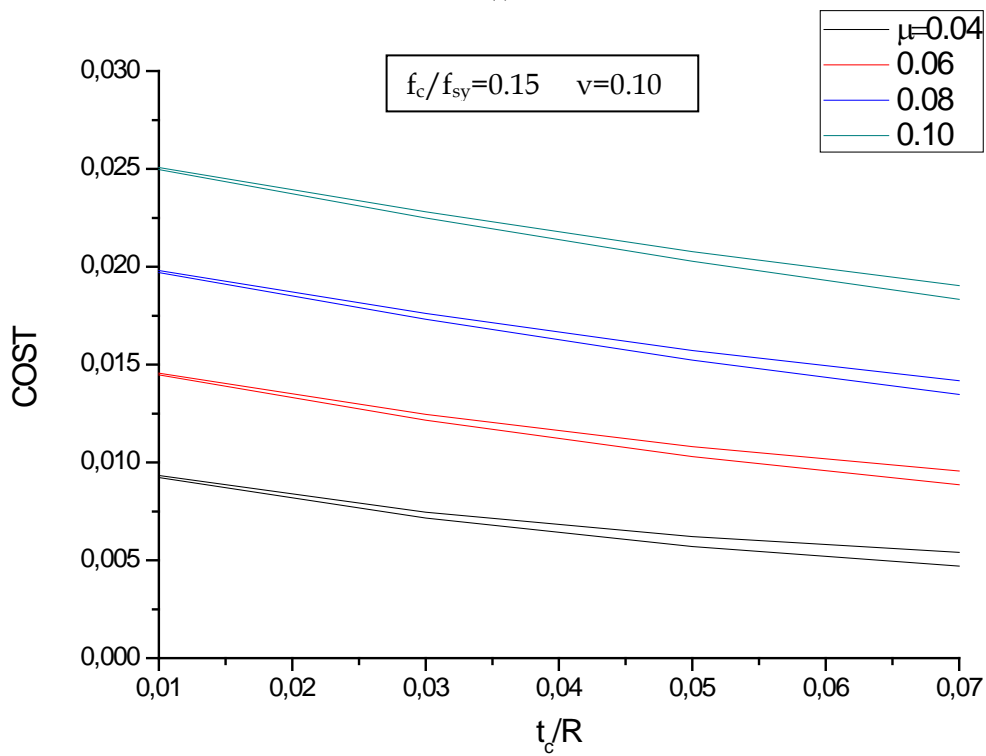
Σχήμα 4.6: Μεταβολή κόστους με το t_c/R για $f_c/f_{sy}=0.10$ και (i) $v=0.05$, (ii) $v=0.10$, (iii) $v=0.20$, (iv) $v=0.40$

Figure 4.6: Cost variation with t_c/R for $f_c/f_{sy}=0.10$ and (i) $v=0.05$, (ii) $v=0.10$, (iii) $v=0.20$, (iv) $v=0.40$

Κεφάλαιο 4: Ποιοτικά διαγράμματα βελτιστοποίησης με εφαρμογή της προσεγγιστικής διαδικασίας

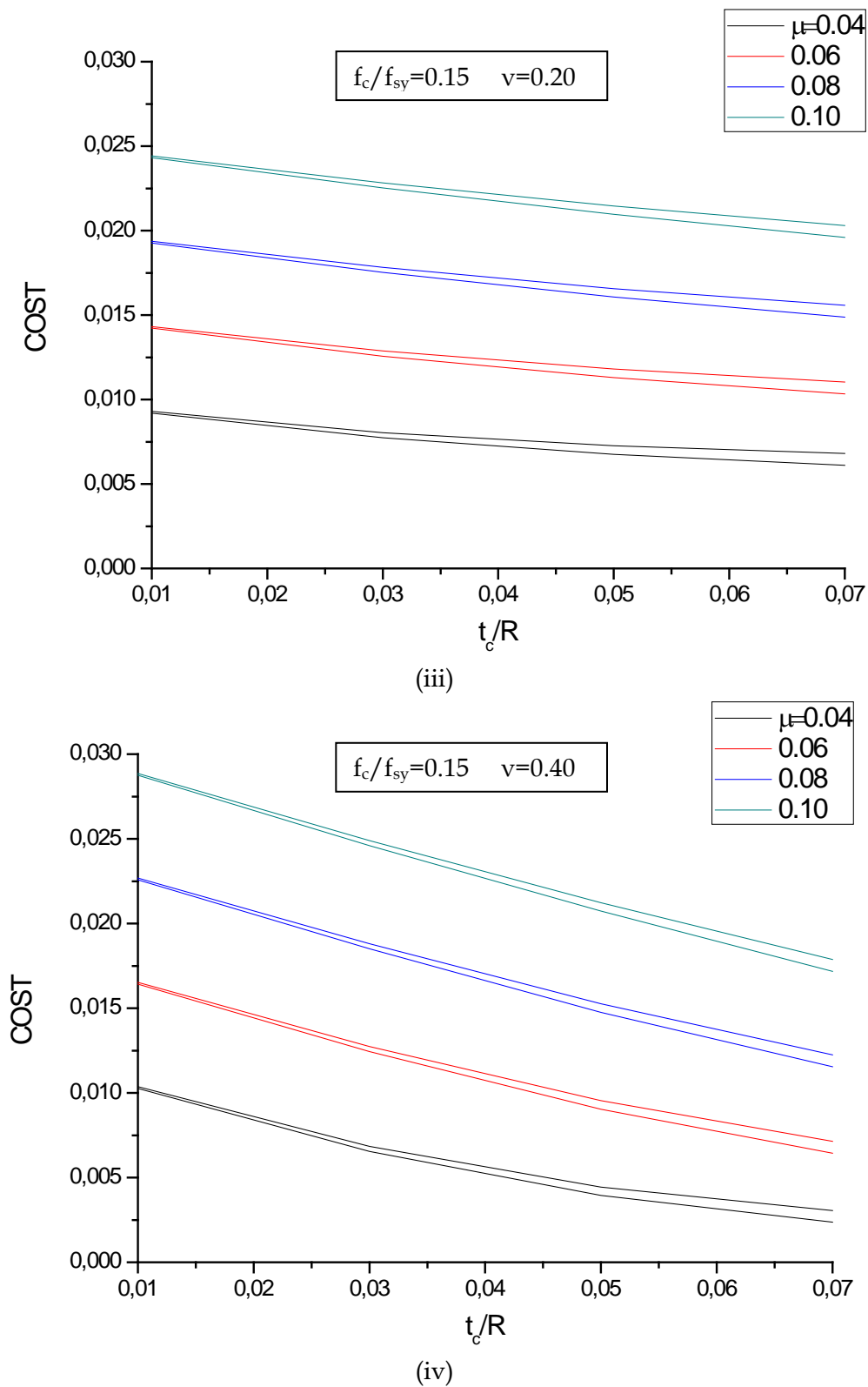


(i)



(ii)

Κεφάλαιο 4: Ποιοτικά διαγράμματα βελτιστοποίησης με εφαρμογή της προσεγγιστικής διαδικασίας



Σχήμα 4.7: Μεταβολή κόστους με το t_c/R για $f_c/f_{sy}=0.15$ και (i) $\nu=0.05$, (ii) $\nu=0.10$, (iii) $\nu=0.20$, (iv) $\nu=0.40$

Figure 4.7: Cost variation with t_c/R for $f_c/f_{sy}=0.15$ and (i) $\nu=0.05$, (ii) $\nu=0.10$, (iii) $\nu=0.20$, (iv) $\nu=0.40$

4.3.3 Βελτιστοποίηση βάσει κόστους για δεδομένη δυσκαμψία

Επιλέγοντας συγκεκριμένα υλικά για τα ελάσματα και τον πυρήνα, οι ποσότητες K_c/K_s και E_c/E_s είναι γνωστές. Έτσι, τόσο η δυσκαμψία όσο και το κόστος εξαρτώνται μόνο από τις γεωμετρικές ποσότητες $2t_s/R$ και t_c/R . Αυτό οδηγεί στην αναζήτηση του συνδυασμού των $2t_s/R$ και t_c/R που οδηγούν σε συγκεκριμένη δυσκαμψία, ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα το κόστος. Επιλύοντας την εξίσωση ανηγμένης δυσκαμψίας ως προς $2t_s/R$ και αντικαθιστώντας στην εξ. (4.3) προκύπτει:

$$Cost \propto \frac{(EI)_{eff}}{E_a \pi R^4} - \left(k_e \frac{E_c}{E_a} - \frac{K_c}{K_s} \right) \frac{t_c}{R} \quad (4.4)$$

Υπό την προϋπόθεση ότι ο όρος στην παρένθεση της εξ. (4.4) είναι θετικός, το κόστος μειώνεται γραμμικά με την αύξηση του λόγου t_c/R . Για να ικανοποιείται αυτή η συνθήκη θα πρέπει να ισχύει:

$$\frac{K_c}{K_s} \leq k_e \frac{E_c}{E_a} \quad (4.5)$$

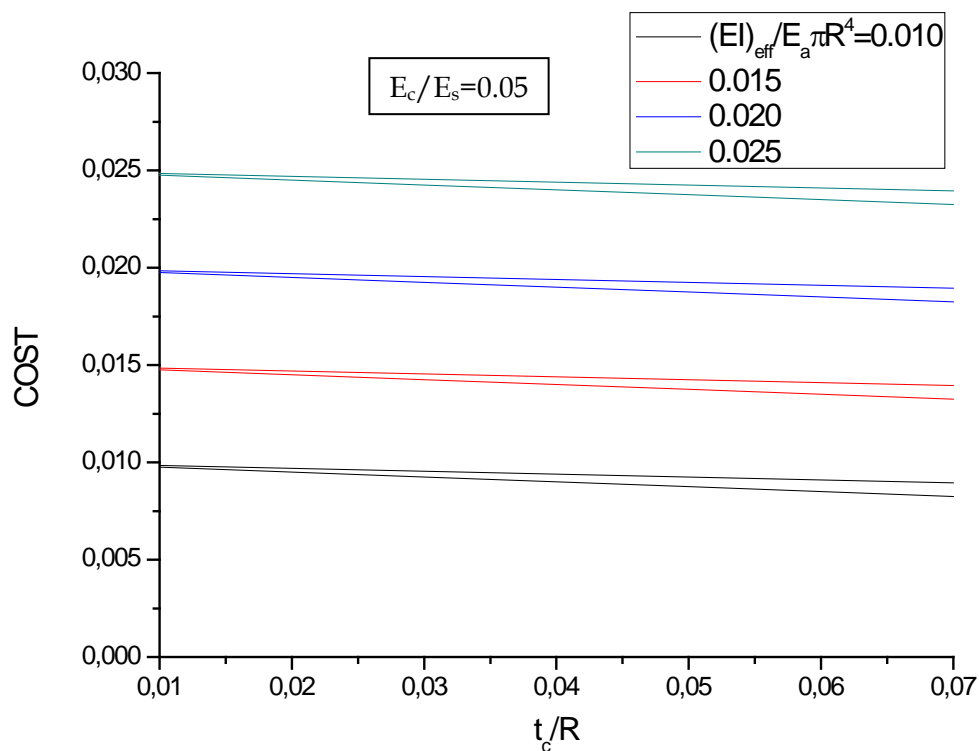
Σε περίπτωση μη ισχύος της ανισότητας (4.5) το κόστος ελαχιστοποιείται μειώνοντας την ποσότητα t_c/R στην ελάχιστη δυνατή τιμή, κάτι που οδηγεί σε αμιγώς χαλύβδινη διατομή.

Ενδεικτικά αποτελέσματα μεταβολής του κόστους με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά δίνονται στα Σχήματα 4.8i,ii,iii, για $E_c/E_s = 0.05, 0.10$ και 0.15 , αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι η κάτω καμπύλη κάθε ζεύγους στα Σχήματα 4.8i,ii,iii αντιστοιχεί σε $K_c/K_s = 0.005$ ενώ η άνω σε $K_c/K_s = 0.015$.

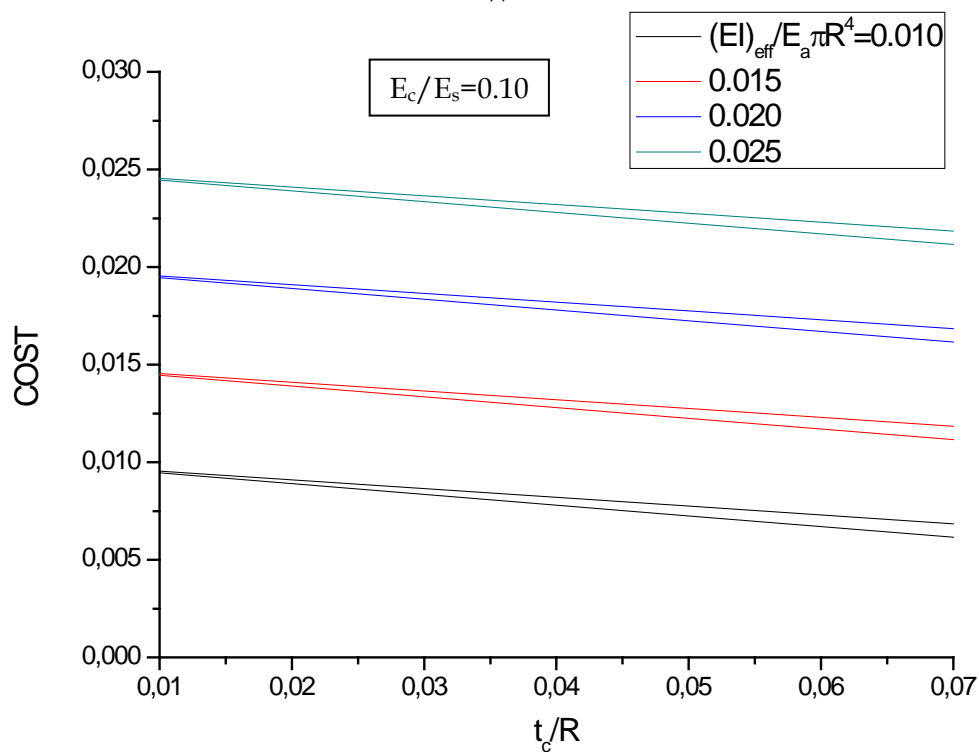
Συμπεραίνεται ότι:

- Για δεδομένη δυσκαμψία, το κόστος μειώνεται γραμμικά με την αύξηση του πάχους σκυροδέματος. Η μείωση αυτή είναι εντονότερη όσο αυξάνεται το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος.
- Το συνολικό κόστος δεν είναι ιδιαίτερος ευαίσθητο σε μεταβολές του κόστους σκυροδέματος, ακόμα και αν αυτές είναι σημαντικές.

Κεφάλαιο 4: Ποιοτικά διαγράμματα βελτιστοποίησης με εφαρμογή της προσεγγιστικής διαδικασίας

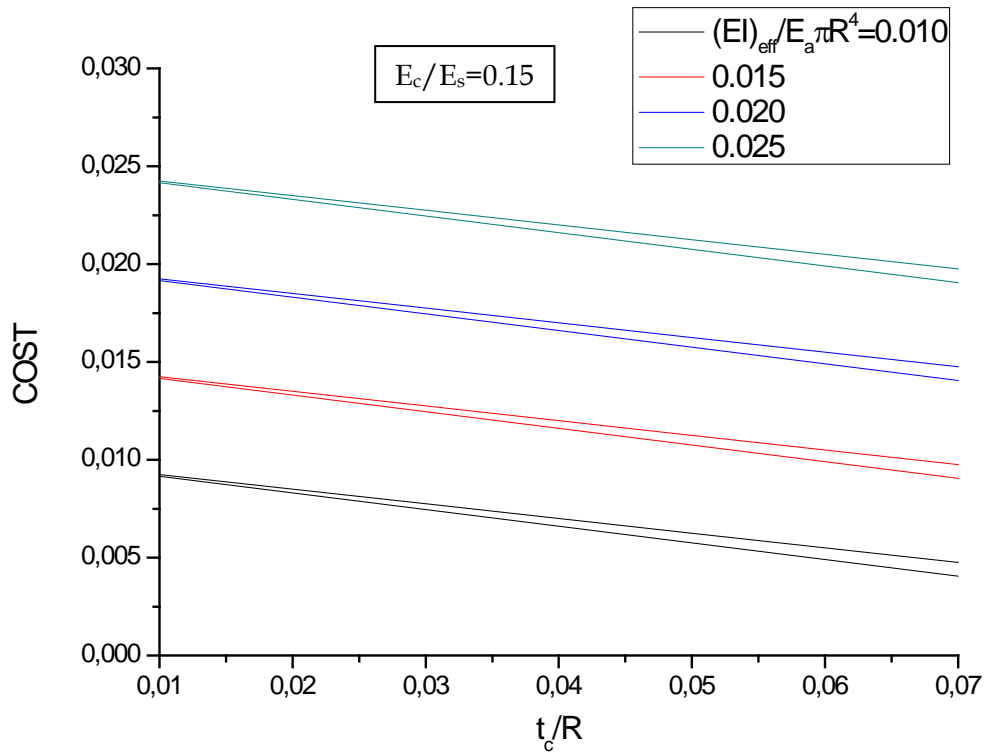


(i)



(ii)

Κεφάλαιο 4: Ποιοτικά διαγράμματα βελτιστοποίησης με εφαρμογή της προσεγγιστικής διαδικασίας



(iii)

Σχήμα 4.8: Μεταβολή κόστους για διαφορετικές τιμές της ανηγμένης δυσκαμψίας: (i) $E_c/E_s=0.05$, (ii) $E_c/E_s=0.10$, (iii) $E_c/E_s=0.15$

Figure 4.8: Cost variation for different values of normalized stiffness: (i) $E_c/E_s=0.05$, (ii) $E_c/E_s=0.10$, (iii) $E_c/E_s=0.15$

Συμπεράσματα

Βάσει των αναλυτικών σχέσεων από τις δύο προσεγγίσεις που παρουσιάστηκαν στο παραδοτέο 2.1 για μια διατομή τύπου sandwich, και συγκρίθηκαν με επιτυχία με αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων, συντάχθηκαν κατάλληλοι κώδικες στα λογισμικά Mathematica [1] και Matlab [2], και πραγματοποιήθηκαν μέσω αυτών παραμετρικές αναλύσεις για ένα σημαντικό εύρος ποιότητας υλικών και πάχους των τριών στρώσεων της διατομής, με στόχο τη μελέτη της επιρροής των επιμέρους παραμέτρων στην ελαστική και πλαστική αντοχή, στην ισοδύναμη δυσκαμψία, αλλά και στο κόστος κατασκευής. Με εφαρμογή της ακριβούς λύσης παρατηρήθηκε ότι για κάθε επιλογή πάχους χαλύβδινου ελάσματος υπάρχει ένα αντίστοιχο πάχος πυρήνα σκυροδέματος που μεγιστοποιεί την ελαστική ροπή αντοχής, πέρα από το οποίο η περαιτέρω αύξηση, όχι μόνο δεν αυξάνει την αντοχή αλλά την υποβιβάζει σημαντικά, ενώ το ίδιο φαινόμενο παρουσιάστηκε στην περίπτωση της ισοδύναμης δυσκαμψίας της διατομής. Βάσει της παρατήρησης αυτής πραγματοποιήθηκε βελτιστοποίηση, σε όρους στατικής συμπεριφοράς, όσον αφορά τα πάχη των στρώσεων και τις ποιότητες των υλικών. Σε κάθε περίπτωση, οι αναλύσεις έδειξαν ότι η διατομή sandwich παρουσιάζει σημαντικά αυξημένη αντοχή, τόσο υπό καθαρή κάμψη όσο και υπό συνδυασμό θλιπτικής και καμπτικής καταπόνησης, σε σχέση με μία αμιγώς χαλύβδινη διατομή ίδιας ποσότητας χάλυβα, με μικρή αναλογικά αύξηση του κόστους. Μέσω της απλοποιημένης διαδικασίας κατέστη δυνατή η παραγωγή αδιαστατοποιημένων διαγραμμάτων, τα οποία προσφέρουν τη δυνατότητα κατάλληλης επιλογής γεωμετρικών χαρακτηριστικών για την ικανοποίηση διαφορετικών πιθανών απαιτήσεων σε αντοχή, δυσκαμψία ή κόστος κατασκευής, αποτελώντας έτσι ένα πρώτο βοήθημα σχεδιασμού μίας διατομής sandwich.

Αναφορές

- [1] Wolfram Research, Inc., Mathematica, Version 9.0, Champaign, IL, 2012.
- [2] The MathWorks, Inc., MATLAB Release 2011b, The Natick, Massachusetts, United States, 2011.