



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



«ΘΕΡΜΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΕ ΥΠΟΓΕΙΟ ΑΝΟΙΓΜΑ»

Νίκος Γ. Γκουβέρης

Εξεταστική Επιτροπή

Αγιουτάντης Ζαχαρίας, Καθηγητής (επιβλέπων)

Εξαδάκτυλος Γεώργιος, Καθηγητής

Προβιδάκης Κωνσταντίνος, Καθηγητής

ΧΑΝΙΑ,
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2010

Περίληψη

Ο σχεδιασμός μιας σήραγγας περιλαμβάνει, μεταξύ άλλων, την εκτίμηση των θερμικών τάσεων στα τοιχώματα της σήραγγας, σε ενδεχόμενη πυρκαγιά. Η εκτίμηση των θερμικών αυτών τάσεων είναι σημαντική για τη διαστασιολόγηση της επένδυσης ώστε να προσφέρεται ασφάλεια, ακόμη και υπό δυσμενείς συνθήκες που μπορεί να προκληθούν λόγω πυρκαγιάς στο εσωτερικό της σήραγγας.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η προσομοίωση των επιπτώσεων των θερμικών τάσεων στην υποστήριξη μιας σήραγγας, σε περίπτωση πυρκαγιάς, με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ). Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκαν μια σειρά από ελαστικά και μη, ομογενή και ισότροπα μοντέλα τόσο για την επένδυση του σκυροδέματος όσο και για το πέτρωμα.

Για την εκπόνηση της εργασίας αυτής χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό **MARC Mentat 2005r3** της MSC Software. Η επίλυση του προβλήματος έγινε σε δυο διαστάσεις και τα μοντέλα βαθμονομήθηκαν με βάση αναλυτικές μεθόδους για θερμική διαστολή περιορισμένου σώματος.

Abstract

Tunnel design involves among other things the estimation of thermal stresses on the tunnel lining due to a potential fire during tunnel operation. The estimation of thermal stresses is very important for dimensioning the lining in order to provide safety even under adverse - high temperature – conditions that may develop due to a fire inside the tunnel.

This thesis presents the results of a preliminary investigation involving a thermo-mechanical simulation of an underground circular opening. In this preliminary investigation, a simple isotropic model both for the rock and the lining is constructed. Parameters regarding the thermal characteristics of the materials are taken from the literature. Simulations are performed using a commercial finite element code in two dimensions, plane stress conditions for the mechanical part and conductivity for the thermal part.

The models are calibrated based on analytical solutions for simply supported beams. Temperatures and stress distributions are given along the lining as well as along the lining cross section.

Πρόλογος

Η ολοκλήρωση της εργασίας αυτής ήταν μια δύσκολη και πρωτόγνωρη, για εμένα, προσπάθεια. Δε θα μπορούσα παρά να ευχαριστήσω θερμά τους ανθρώπους χωρίς την βοήθεια και τη συμπαράστασή των οποίων, δε θα ήταν δυνατή η ολοκλήρωσή της. Συγκεκριμένα ευχαριστώ

- Τον **κ. Ζαχαρία Αγιουτάντη**, επιβλέποντα Καθηγητή, για την ανάθεση του θέματος, την αμέριστη βοήθειά του όποτε χρειάστηκε, την άψογη συνεργασία μας, τις άριστες γνώσεις του πάνω στο λογισμικό πακέτο «MARC.Mentat», καθώς επίσης για τις συμβουλές που παρείχε κατά τη διάρκεια των διορθώσεων την εργασίας.
- Τον **κ. Γεώργιο Εξαδάκτυλο**, Καθηγητή και μέλος της εξεταστικής επιτροπής, για τα σχόλια και τις συμβουλές όσον αφορά την τελική διαμόρφωση της εργασίας.
- Τον **κ. Κωνσταντίνο Προβιδάκη**, Καθηγητή και μέλος της εξεταστικής επιτροπής, για τα σχόλια και τις συμβουλές όσον αφορά την τελική διαμόρφωση της εργασίας καθώς επίσης και στη βοήθεια ανεύρεσης βιβλιογραφίας.
- Τον **κ. Πολυχρόνη Βιόπουλο**, υποψήφιο διδάκτορα του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, για το ενδιαφέρον που έδειξε και την πολύτιμη βοήθειά του με το λογισμικό «MARC.Mentat».
- Τον **κ. Χρύσανθο Στειακάκη**, Γεωτεχνικό Μηχανικό, για την βοήθεια της επιλογής του θέματος.
- Τον **κ. Στέλιο Μαυριγιαννάκη**, Μηχανικό Μεταλλείων, για τη βοήθειά του στην εκμάθηση του λογισμικού «MARC.Mentat» καθώς και στην άψογη συνεργασία κατά τη διάρκεια των προβλημάτων της μοντελοποίησης της σήραγγας.

Επίσης, οφείλω πολλά ευχαριστώ στους γονείς μου, **Γρηγόρη** και **Σοφία Γκουβέρη**, τόσο για την υλική όσο και την ψυχολογική υποστήριξη που μου παρείχαν κατά τα χρόνια της φοίτησής μου στο Πολυτεχνείο Κρήτης.

*Αφιερώνεται
στην οικογένειά μου
και στους φίλους μου*

Περιεχόμενα

Περίληψη	i
Abstract.....	ii
Πρόλογος	iii
Περιεχόμενα	v
Κατάλογος Εικόνων και Διαγραμμάτων	viii
Κατάλογος Πινάκων	xiii
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Γενικές πληροφορίες.....	1
1.2 Βασικοί παράγοντες πυρασφάλειας	3
1.2.1 Αιτίες πυρκαγιάς.....	3
1.2.1.1 Οδικές σήραγγες	3
1.2.1.2 Σιδηροδρομικές σήραγγες	4
1.2.1.3 Σήραγγες του μετρό	5
1.2.2 Συνέπειες πυρκαγιάς	6
1.2.3 Μέτρα πυρασφάλειας	7
Κεφάλαιο 2 Το σκυρόδεμα και η πυρκαγιά.....	8
2.1 Γενικά στοιχεία.....	8
2.2 Σκυρόδεμα	8
2.3 Οπλισμένο Σκυρόδεμα.....	9
2.4 Σκυρόδεμα υψηλής απόδοσης	10
2.5 Πρότυπες καμπύλες εκτίμησης πυρκαγιών.....	10
2.5.1 Πρότυπη καμπύλη ISO-834 (Cellulosic curve)	11
2.5.2 Πρότυπη καμπύλη υδρογονανθράκων	11
2.5.3 Πρότυπη τροποποιημένη καμπύλη υδρογονανθράκων	12
2.5.4 Πρότυπες καμπύλες RABT ZTV	12
2.5.5 Πρότυπη καμπύλη RWS (Rijkswaterstaat curve).....	12
2.6 Επιπτώσεις πυρκαγιάς στο σκυρόδεμα.....	13
2.6.1 Επιδείνωση των μηχανικών ιδιοτήτων.....	14
2.6.1.1 Θλιπτική και εφελκυστική αντοχή	15
2.6.1.1.1 Επίπτωση στον μεταβατικό ερπυσμό	15

2.6.1.1.2	Επίπτωση της φόρτισης λόγω θέρμανσης	15
2.6.1.1.3	Επίδραση της θερμοκρασίας.....	16
2.6.1.2	Μελέτη σύνθεσης κατά την απώλεια αντοχής	17
2.6.1.2.1	Αδρανή.....	17
2.6.1.2.2	Τσιμεντοπολφός	18
2.6.2	Αποφλοΐωση	18
2.6.2.1	Αποφλοΐωση αδρανών.....	19
2.6.2.2	Αποφλοΐωση γωνιών.....	19
2.6.2.3	Επιφανειακή αποφλοΐωση.....	20
2.6.2.4	Εκρηκτική αποφλοΐωση	20
2.6.3	Εκρηκτική Αποφλοΐωση	20
2.6.3.1	Παράγοντες που επηρεάζουν την εκρηκτική αποφλοΐωση	21
2.6.3.2	Μηχανισμοί της εκρηκτικής αποφλοΐωσης	23
Κεφάλαιο 3	Αριθμητική ανάλυση στις σήραγγες	26
3.1	Εισαγωγή.....	26
3.2	Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων	27
3.2.1	Ιστορικά στοιχεία.....	27
3.2.2	Διαδικασία της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων	28
3.2.3	Διακριτοποίηση	29
3.2.4	Είδη στοιχείων	30
3.2.5	Διαίρεση του πεδίου.....	31
3.2.6	Συνοριακές συνθήκες	31
3.3	Μετάδοση θερμότητας	33
3.3.1	Μετάδοση ενέργειας λόγω αγωγής (conduction).....	33
3.3.2	Μετάδοση ενέργειας λόγω συναγωγής (convection).....	35
3.3.3	Μετάδοση ενέργειας με ακτινοβολία (thermal radiation)	37
3.4	Θερμικές εξισώσεις.....	Error! Bookmark not defined.
Κεφάλαιο 4	Αριθμητικά μοντέλα.....	43
4.1	Απλό ορθογωνικό μοντέλο	43
4.2	Μοντέλο σήραγγας εγκάρσιας διατομής	47
4.2.1	Αποτελέσματα προσομοίωσης ελαστικού μοντέλου.....	51
4.2.1.1	Στον οριζόντιο άξονα συμμετρίας της σήραγγας	52

4.2.1.2	Σε γωνία 45° από τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας της σήραγγας	56
4.2.1.3	Στη στέψη της σήραγγας.....	60
4.2.1.4	Συζήτηση αποτελεσμάτων	63
4.2.2	Αποτελέσματα προσομοίωσης ελαστοπλαστικού μοντέλου	63
4.2.2.1	Στον οριζόντιο άξονα συμμετρίας της σήραγγας	63
4.2.2.2	Σε γωνία 45° από τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας της σήραγγας	68
4.2.2.3	Στη στέψη της σήραγγας.....	73
Κεφάλαιο 5	Συμπεράσματα και Προτάσεις.....	78
Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία.....		80
Ελληνική Βιβλιογραφία		80
Ιστοσελίδες		81

Κατάλογος Εικόνων και Διαγραμμάτων

Εικόνα 1.1. Συνέπειες της πυρκαγιάς στη σήραγγα του Mont Blanc, 1999 (Swiss News Worldwide, swissinfo.ch)	2
Εικόνα 1.2. Φωτογραφία από την πυρκαγιά της σήραγγας του St. Gotthard, 2001 (British Broadcasting Corporation, bbc.co.uk).....	2
Εικόνα 2.1. Πρότυπες καμπύλες πυρκαγιών (Promat, promat-tunnel.com)	11
Εικόνα 2.2. Επίδραση της θερμοκρασίας και του επιπέδου φορτίου κατά τη διάρκεια της θέρμανσης που δόθηκε από την υπολειμματική σχέση τάσης-παραμόρφωσης σε μονοαξονική θλίψη μη-στεγανοποιημένων κυλινδρικών δοκιμών C70 HITECO. Οι δοκιμές διεξήχθησαν σε σταθερό ρυθμό φόρτισης (Khoury, 2000).	16
Εικόνα 2.3. Αποφλοίωση της εσωτερικής επένδυσης της Σήραγγας της Μάγχης (Ηνωμένο Βασίλειο / Γαλλία, 1996) (Krause, 2006)	19
Εικόνα 2.4. Αποφλοίωση της εσωτερικής επένδυσης της σήραγγας του Montblanc (Γαλλία / Ιταλία, 1999) (Krause, 2006).....	19
Εικόνα 2.5. Αποφλοίωση αδρανών (aggregate spalling) σε τοίχωμα σήραγγας (Nishio et. al, 2006).....	19
Εικόνα 2.6. Εμπειρικός φάκελος φάσεων εκρηκτικής αποφλοίωσης για άοπλο σκυρόδεμα, συναρτήσει περιεχόμενης υγρασίας και υπαρχουσών τάσεων (Khoury, 2000).	22
Εικόνα 2.7. Συνιστώσες της θερμοκρασίας (T), της πίεσης των πόρων (P), και της υγρασίας (W) σε άοπλο (a) και υψηλής απόδοσης (HPC) (b) σκυρόδεμα κατά τη διάρκεια της θέρμανσης από μη στεγανοποιημένη επιφάνεια (Khoury, 2000).	22
Εικόνα 2.8. Καμπτική αστοχία λόγω πυρκαγιάς σε ορθογωνική σήραγγα και μέτρα παθητικής υποστήριξης (Αγγελόπουλος & Γιόκαρης, 2005).....	23
Εικόνα 2.9. Μοντέλο ενός τμήματος επένδυσης (protection layer) κατά τη θέρμανση (Αγγελόπουλος & Γιόκαρης, 2005).....	24
Εικόνα 2.10. Κατανομή θερμοκρασίας, πίεσης πόρων και υγρασίας συναρτήσει της απόστασης από την επιφάνεια θέρμανσης (Αγγελόπουλος & Γιόκαρης, 2005).....	25
Εικόνα 3.1. Περιπτώσεις διακριτοποίησης απλών σωμάτων (Αγιουτάντης, 2002).	28

Εικόνα 3.2. Είδη στοιχείων (Αγιουτάντης, 2002)	30
Εικόνα 3.3. Μονοδιάστατη μετάδοση θερμότητας με αγωγή σε σώμα πάχους L κατά τη x διεύθυνση και απείρων διαστάσεων στις υπόλοιπες διευθύνσεις (Νικολός, 2007).	34
Εικόνα 3.4. Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία μεταξύ δύο επιφανειών, όπου η μια περικλείει την άλλη. Οι δύο επιφάνειες βρίσκονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες (Νικολός, 2007).	39
Εικόνα 4.1. Η διακριτοποίηση του απλού μοντέλου	43
Εικόνα 4.2. Τμήμα διακριτοποίησης του ανώτερου τμήματος του μοντέλου ..	44
Εικόνα 4.3. Οι θερμομηχανικές συνοριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν στο απλοποιημένο μοντέλο	45
Εικόνα 4.4. Η θερμική απόκριση του απλού μοντέλου σκυροδέματος, για συντελεστή θερμικής διαστολής 25 W/m^2 , συγκρινόμενη με τις πειραματικές καμπύλες RWS (Bostrom & Larsen, 2006) για διάφορα βάθη από τη θερμαινόμενη επιφάνεια.....	46
Εικόνα 4.5. Η θερμική απόκριση του απλού μοντέλου σκυροδέματος, για συντελεστή θερμικής διαστολής 50 W/m^2 , συγκρινόμενη με τις πειραματικές καμπύλες RWS (Bostrom & Larsen, 2006) για διάφορα βάθη από τη θερμαινόμενη επιφάνεια.....	46
Εικόνα 4.6. Η θερμική απόκριση του απλού μοντέλου σκυροδέματος, για συντελεστή θερμικής διαστολής 75 W/m^2 , συγκρινόμενη με τις πειραματικές καμπύλες RWS (Bostrom & Larsen, 2006) για διάφορα βάθη από τη θερμαινόμενη επιφάνεια.....	47
Εικόνα 4.7. Οι θερμομηχανικές συνοριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν στη σήραγγα	49
Εικόνα 4.8. Η στέψη της σήραγγας. Διακρίνεται η επένδυση του σκυροδέματος καθώς και τα υπερκείμενα.	49
Εικόνα 4.9. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης στην ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στον οριζόντιο άξονα συμμετρίας.	52
Εικόνα 4.10. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 2.5 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στον οριζόντιο άξονα συμμετρίας.	53

Εικόνα 4.11. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 5 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στον οριζόντιο άξονα συμμετρίας.	53
Εικόνα 4.12. Διάγραμμα τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 10 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στον οριζόντιο άξονα συμμετρίας. ...	54
Εικόνα 4.13. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 20 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στον οριζόντιο άξονα συμμετρίας.	54
Εικόνα 4.14. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 30 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στον οριζόντιο άξονα συμμετρίας.	55
Εικόνα 4.15. Η θερμική απόκριση το ελαστικού μοντέλου της επένδυσης, συγκρινόμενη με τις πειραματικές καμπύλες RWS (Bostrom & Larsen, 2006) για διάφορα βάθη από τη θερμαινόμενη επιφάνεια, στη βάση της σήραγγας.....	56
Εικόνα 4.16. Διάγραμμα τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης στην ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, σε γωνία 45° από τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας της σήραγγας.	56
Εικόνα 4.17. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 2.5 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, σε γωνία 45° από τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας της σήραγγας.	57
Εικόνα 4.18. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 5 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, σε γωνία 45° από τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας της σήραγγας.	57
Εικόνα 4.19. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 10 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, σε γωνία 45° από τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας της σήραγγας.	58
Εικόνα 4.20. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 15 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, σε γωνία 45° από τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας της σήραγγας.	58
Εικόνα 4.21. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 30 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, σε γωνία 45° από τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας της σήραγγας.	59
Εικόνα 4.22. Η θερμική απόκριση το ελαστικού μοντέλου της επένδυσης, συγκρινόμενη με τις πειραματικές καμπύλες RWS (Bostrom & Larsen, 2006) για	

διάφορα βάθη από τη θερμαινόμενη επιφάνεια, σε γωνία 45° από τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας της σήραγγας.59

Εικόνα 4.23. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης στην ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στη στέψη της σήραγγας.....60

Εικόνα 4.24. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 2.5 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στη στέψη της σήραγγας.60

Εικόνα 4.25. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 5 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στη στέψη της σήραγγας.61

Εικόνα 4.26. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 10 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στη στέψη της σήραγγας.61

Εικόνα 4.27. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 20 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στη στέψη της σήραγγας.62

Εικόνα 4.28. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 30 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στη στέψη της σήραγγας.62

Εικόνα 4.29. Η θερμική απόκριση το ελαστικού μοντέλου της επένδυσης, συγκρινόμενη με τις πειραματικές καμπύλες RWS (Bostrom & Larsen, 2006) για διάφορα βάθη από τη θερμαινόμενη επιφάνεια, στη στέψη της σήραγγας.63

Εικόνα 4.30. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης στην ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στον οριζόντιο άξονα συμμετρίας.64

Εικόνα 4.31. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 2.5 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στον οριζόντιο άξονα συμμετρίας.65

Εικόνα 4.32. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 5 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στον οριζόντιο άξονα συμμετρίας.65

Εικόνα 4.33. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 10 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στον οριζόντιο άξονα συμμετρίας.66

Εικόνα 4.34. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 20 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στον οριζόντιο άξονα συμμετρίας.	67
Εικόνα 4.35. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 30 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στον οριζόντιο άξονα συμμετρίας.	67
Εικόνα 4.36. Διάγραμμα τάσης – θερμικής παραμόρφωσης για διάφορα βάθη από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στον οριζόντιο άξονα συμμετρίας. ...	68
Εικόνα 4.37. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης στην ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, σε γωνία 45° από τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας της σήραγγας.	69
Εικόνα 4.38. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 2.5 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, σε γωνία 45° από τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας της σήραγγας.	69
Εικόνα 4.39. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 5 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, σε γωνία 45° από τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας της σήραγγας.	70
Εικόνα 4.40. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 10 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, σε γωνία 45° από τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας της σήραγγας.	71
Εικόνα 4.41. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 20 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, σε γωνία 45° από τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας της σήραγγας.	71
Εικόνα 4.42. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 30 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, σε γωνία 45° από τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας της σήραγγας.	72
Εικόνα 4.43. Διάγραμμα τάσης – θερμικής παραμόρφωσης για διάφορα βάθη από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, σε γωνία 45° από την οριζόντιο.	72
Εικόνα 4.44. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης στην ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στη στέψη της σήραγγας.....	73
Εικόνα 4.45. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 2.5 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στη στέψη της σήραγγας.	74

Εικόνα 4.46. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 5 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στη στέψη της σήραγγας.	74
Εικόνα 4.47. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 10 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στη στέψη της σήραγγας.	75
Εικόνα 4.48. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 20 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στη στέψη της σήραγγας.	76
Εικόνα 4.49. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 30 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στη στέψη της σήραγγας.	76
Εικόνα 4.50. Διάγραμμα τάσης – θερμικής παραμόρφωσης για διάφορα βάθη από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στη στέψη της σήραγγας.	77

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1. Πρότυπες τιμές χρόνου και θερμοκρασίας στις καμπύλες RABT ZTV (Promat, promat-tunnel.com)	12
Πίνακας 2.2. Πρότυπες τιμές χρόνου και θερμοκρασίας στην καμπύλη RWS (Promat, promat-tunnel.com)	13
Πίνακας 2.3. Θερμοκρασιακές μεταβολές του σκυροδέματος κατά τη θέρμανση (Σακκάς κ.α., 2010)	14
Πίνακας 3.1. Μείωση θερμοκρασίας και μέτρου ελαστικότητας σκυροδέματος (Hetnarski, 1996)	42
Πίνακας 4.1. Μηχανικές και θερμικές ιδιότητες του υλικού (engineeringtoolbox.com)	44
Πίνακας 4.2. Μηχανικές και θερμικές ιδιότητες σκυροδέματος και ασβεστολίθου (engineeringtoolbox.com)	50
Πίνακας 4.3. Μηχανικές και θερμικές ιδιότητες σκυροδέματος και βιοτιτικού γρανίτη κατά Serafim και Pereira (Chung, 2006)	51

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Γενικές πληροφορίες

Το ενδιαφέρον για την μελέτη των επιπτώσεων των πυρκαγιών σε σήραγγες είναι αρκετά πρόσφατο. Μόλις το 2001 ιδρύθηκε το Θεματικό Δίκτυο «Πυρκαγιές σε Σήραγγες» (Thematic Network FIT 'Fire in Tunnels') στα πλαίσια του 5^{ου} Προγράμματος «Ανταγωνιστικότητα και Βιώσιμη Ανάπτυξη» της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Η πρωτοβουλία αυτή προήλθε από το αυξανόμενο ενδιαφέρον του κοινού και των άμεσα ενδιαφερομένων επαγγελματιών σε θέματα που αφορούν τις πυρκαγιές στις σήραγγες.

Το ενδιαφέρον αυτό είχε επηρεαστεί αρκετά από αρκετά μεγάλες πυρκαγιές που προκλήθηκαν στο εσωτερικό σηράγγων, οι οποίες έλαβαν τεράστια προσοχή των Μέσων Μαζικής Ενημέρωσης, όπως (European Thematic Network on Fire in Tunnels, 2006):

- Η πυρκαγιά στη σήραγγα της Μάγχης, στις 18 Νοεμβρίου 1996, λόγω ανάφλεξης βαρέως οχήματος (*Wikipedia, wikipedia.org*).
- Η πυρκαγιά στη σήραγγα του Έκεμπεργκ (Όσλο), τον Αύγουστο του 1996, λόγω πυρκαγιάς σε λεωφορείο και προκάλεσε σοβαρές ζημιές σε εξοπλισμό και υποδομές.
- Η πυρκαγιά στη σήραγγα του Μοντ Μπλαν (Άλπεις), στις 24 Μαρτίου 1999, προκάλεσε το θάνατο 39 ανθρώπων λόγω αναθυμιάσεων, όταν το φορτίο ενός Βέλγικου φορτηγού έπιασε φωτιά (Εικόνα 1.1) (*Wikipedia, wikipedia.org*).
- Η πυρκαγιά στη σήραγγα του Τάουερν (Σάλτσμπουργκ, Αυστρία), στις 29 Μαΐου 1999, προκάλεσε το θάνατο 12 ανθρώπων. Η αιτία της πυρκαγιάς ήταν η καραμπόλα περίπου 60 οχημάτων (*Wikipedia, wikipedia.org*).
- Η πυρκαγιά στη σήραγγα του Καπρούν (Αυστρία), στις 11 Νοεμβρίου 2000, προκάλεσε το θάνατο 155 ανθρώπων. Η αιτία της πυρκαγιάς ήταν ένα βραχυκύκλωμα στο μηχανισμό θέρμανσης ενός τρένου (*Wikipedia, wikipedia.org*).
- Η πυρκαγιά στη σήραγγα του Γκλέιναλμ (Αυστρία), στις 6 Αυγούστου 2001, προκάλεσε το θάνατο 5 ατόμων. Η πυρκαγιά προκλήθηκε από τη μετωπική σύγκρουση 2 οχημάτων.

- Η πυρκαγιά στην οδική σήραγγα του St. Gotthard (Σουηδία), στις 24 Οκτωβρίου 2001 (Εικόνα 1.2), προκάλεσε το θάνατο 11 ατόμων και το τραυματισμό πολλών περισσότερων, λόγω της πρόσκρουσης 2 φορτηγών οχημάτων (Wikipedia, wikipedia.org).



Εικόνα 1.1. Συνέπειες της πυρκαγιάς στη σήραγγα του Mont Blanc, 1999 (Swiss News Worldwide, swissinfo.ch)



Εικόνα 1.2. Φωτογραφία από την πυρκαγιά της σήραγγας του St. Gotthard, 2001 (British Broadcasting Corporation, bbc.co.uk)

Η αυξημένη προσοχή γύρω από το θέμα των πυρκαγιών σε σήραγγες εξηγείται εύκολα λόγω των καταστροφικών επιπτώσεων κάθε πυρκαγιάς σε σύγκριση με ατυχήματα και φωτιές σε ανοικτό δρόμο. Είναι σημαντική η κατανόηση του γεγονότος, ότι παρόλο που η συχνότητα των ατυχημάτων και των πυρκαγιών σε σήραγγες είναι περιορισμένη, μπορούν στη χειρότερη περίπτωση, να οδηγήσουν σε απώλειες ζωών, υλικές ζημιές και καταστροφές σημαντικών έργων υποδομής. Ακόμη ένας λόγος της αυξημένης προσοχής είναι ότι οι σήραγγες αποτελούν πολύπλοκα συστήματα δομών, εξοπλισμού και λειτουργίας, στις οποίες η ασφάλεια δεν είναι μόνο στα χέρια των οδηγών αλλά και στα χέρια των επαγγελματιών που σχεδίασαν, και συντηρούν τη σήραγγα. Τα ατυχήματα σε σήραγγες πάντα λαμβάνουν μεγάλη προσοχή από τα μέσα ενημέρωσης και, κατά συνέπεια, έχουν μεγάλο αντίκτυπο στο κοινό (European Thematic Network on Fire in Tunnels, 2006).

Σε γενικές γραμμές μπορεί να παρατηρηθεί ότι το επίπεδο ασφαλείας στις σήραγγες είναι παρόμοιο με το υπόλοιπο οδικό δίκτυο. Στην πραγματικότητα, ο

κίνδυνος θανατηφόρου ατυχήματος μέσα σε σήραγγες είναι συνήθως χαμηλότερος ανά όχημα ανά χιλιόμετρο συγκριτικά με το ανοικτό οδικό δίκτυο. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένοι παράγοντες οι οποίοι είναι μοναδικοί για τις σήραγγες ή έχουν σοβαρότερες συνέπειες απ' ό,τι αν η πυρκαγιά συνέβαινε σε ανοικτό δρόμο. Χαρακτηριστικά παραδείγματα περιλαμβάνουν εκρήξεις, απελευθέρωση τοξικών αερίων και σε ορισμένες περιπτώσεις σηράγγων ακόμη και πλημμύρες.

Το θέμα των πυρκαγιών σε σήραγγες βρίσκεται στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος τα τελευταία χρόνια. Οι πυρκαγιές αυτές καθ' αυτές και η κάλυψη των γεγονότων από τα Μέσα Ενημέρωσης, άφησαν μεγάλο αντίκτυπο στην αντίληψη της ασφάλειας των σηράγγων. Για το λόγο αυτό, τα τελευταία χρόνια, οι κατασκευαστικές εταιρίες, έχουν αναλάβει τη βελτίωση της ασφάλειας των σηράγγων (European Thematic Network on Fire in Tunnels, 2006).

1.2 Βασικοί παράγοντες πυρασφάλειας

1.2.1 Αιτίες πυρκαγιάς

Για την εκδήλωση πυρκαγιάς απαιτούνται 3 βασικά στοιχεία: καύσιμο, οξυγόνο και μια πηγή ανάφλεξης. Τα παραπάνω στοιχεία βρίσκονται σε όλες τις σήραγγες σε κάποιο βαθμό, οπότε ο κίνδυνος της πυρκαγιάς δεν μπορεί να αποφευχθεί εντελώς.

Η διαδικασία της μελέτης πυρασφάλειας περιλαμβάνει την εξέταση των υλικών που ήδη υπάρχουν ή δύναται να υπάρξουν μέσα στη σήραγγα, πως είναι δυνατόν να αναφλεγούν καθώς και τον προσδιορισμό του τρόπου ανάπτυξης της διαδικασίας καύσης τους, υπό δεδομένες συνθήκες. Τα εύφλεκτα υλικά συμπεριφέρονται με αρκετά διαφορετικούς τρόπους ανάλογα με την φυσική τους κατάσταση και μια σειρά από παράγοντες και συνθήκες που λαμβάνουν χώρα στη σήραγγα τη στιγμή της πυρκαγιάς. Η αλληλεπίδραση με συστήματα εξαερισμού και άλλα συστήματα ασφαλείας πρέπει να ληφθούν υπόψη.

1.2.1.1 Οδικές σήραγγες

Περίπου το 95% των πυρκαγιών σε οδικές σήραγγες, οφείλονται σε ηλεκτρολογικές και μηχανολογικές δυσλειτουργίες, των διερχόμενων οχημάτων, όπως για παράδειγμα:

- Βραχυκύκλωμα ηλεκτρικών εξαρτημάτων
- Υπερθέρμανση του κινητήρα
- Υπερθέρμανση του μηχανισμού πέδησης (φρένα)

Άλλες αιτίες, λιγότερο συχνές, αφορούν:

- Συγκρούσεις οχημάτων
- Τεχνικά ελαττώματα του εξοπλισμού της σήραγγας
- Εργασίες συντήρησης στις σήραγγες

Η συχνότερη αιτία των συγκρούσεων μεταξύ οχημάτων είναι η μειωμένη προσοχή των οδηγών κατά τη διάρκεια της οδήγησης. Τέτοιου είδους ατυχήματα όμως, δεν είναι η αιτία για τις σοβαρές πυρκαγιές που λαμβάνουν χώρα σε σήραγγες (European Thematic Network on Fire in Tunnels, 2006).

1.2.1.2 Σιδηροδρομικές σήραγγες

Όσον αφορά τις σιδηροδρομικές σήραγγες, είναι σημαντικό να γίνει διάκριση μεταξύ επιβατικών και εμπορευματικών αμαξοστοιχιών. Οι επιβατικές συνήθως αμαξοστοιχίες δεν μεταφέρουν εμπορεύματα, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις μεταφέρουν αποσκευές και ταχυδρομείο. Οι εμπορευματικές αμαξοστοιχίες μεταφέρουν πολύ μεγάλες ποσότητες εμπορευμάτων, και πολλές φορές επικίνδυνων εμπορευμάτων, αλλά ο αριθμός ατόμων που βρίσκονται στην αμαξοστοιχία περιορίζεται στον οδηγό και σε μερικές περιπτώσεις, σε προσωπικό ενός ή δυο ατόμων. Η πιθανότητα ύπαρξης δεύτερης αμαξοστοιχίας στη σήραγγα είναι ελάχιστες. Σε μεγάλου μήκους σήραγγες όπου υπάρχουν διπλές σιδηροδρομικές γραμμές, μπορεί να βρεθεί και δεύτερη αμαξοστοιχία στη σήραγγα, αλλά συνήθως αυτή μπορεί να οδηγηθεί με ασφάλεια στην έξοδο.

Ως εκ τούτου, πυρκαγιές οι οποίες εκδηλώνονται σε εμπορευματικές αμαξοστοιχίες μπορούν να αναδειχθούν σε σημαντικό φορτίο θερμότητας και να αναπτυχθούν σε ακραίες συνθήκες, οι οποίες σε ορισμένες περιπτώσεις μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο τη δομή και τις εγκαταστάσεις της σήραγγας. Ωστόσο, ο αριθμός των ανθρώπων που επηρεάζονται από τέτοιου είδους πυρκαγιές είναι μικρός, στις περισσότερες περιπτώσεις (European Thematic Network on Fire in Tunnels, 2006).

Πυρκαγιά σε εμπορικές αμαξοστοιχίες μπορεί να προκληθεί, μεταξύ άλλων, από:

- εκτροχιασμό, σύγκρουση και άλλα σιδηροδρομικά ατυχήματα,
- ελαττωματικό ηλεκτρικό ή/και ηλεκτρολογικό εξοπλισμό,
- μηχανικές βλάβες στα οχήματα, π.χ. των αξόνων και φρένα,
- ανάφλεξη των εμπορευμάτων.

Πυρκαγιές σε επιβατηγά τρένα συνεπάγεται ένα μέτριο θερμικό φορτίο, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων. Από την άλλη πλευρά, ένας μεγάλος αριθμός επιβατών μπορεί να εκτεθεί στην πυρκαγιά σε ένα πολύ περιορισμένο χώρο.

Πυρκαγιά σε επιβατηγά τρένα μπορεί να προκληθεί, μεταξύ άλλων, από:

- απροσεξία από τους επιβάτες,
- εμπρησμό,
- εκτροχιασμό, σύγκρουση και άλλα σιδηροδρομικά ατυχήματα,
- ελαττωματικό ηλεκτρικό ή/και ηλεκτρολογικό εξοπλισμό ή ατέλειες στο σύστημα θέρμανσης,
- μηχανικές βλάβες στα οχήματα, π.χ. των αξόνων και φρένα.

Η πλειοψηφία των πυρκαγιών σε τρένα δεν θα αναπτυχθεί σημαντικά κατά τη διάρκεια που η αμαξοστοιχία διέρχεται από μια σήραγγα, λόγω μειωμένου ποσοστού του οξυγόνου, σε σχέση με τις συνθήκες που επικρατούν στο εξωτερικό της σήραγγας. Οι πυρκαγιές όμως αντιμετωπίζονται πιο αποτελεσματικά εκτός σιδηρόδρομων και για τον λόγο αυτό υπάρχει ειδικό σχέδιο μεταφοράς της αμαξοστοιχίας σε ανοιχτό χώρο («drive-out-concept»), σε περίπτωση εκδήλωσης πυρκαγιάς στο τρένο, το οποίο και εφαρμόζεται σε πολλές περιπτώσεις.

Στο εσωτερικό των σιδηρόδρομων υπάρχει ηλεκτρικός και μηχανολογικός εξοπλισμός ο οποίος συμβάλλει στην επικινδυνότητα δημιουργίας εστίας πυρκαγιάς. Η πιθανότητα πυρκαγιάς εξαρτάται από την κατανάλωση ενέργειας, το πρότυπο σχεδιασμού και τη συντήρηση του εξοπλισμού πυρασφάλειας. Ο εξοπλισμός αυτός μπορεί να βρίσκεται είτε στην κυρίως σήραγγα, είτε σε διευθυντικές στοές.

Μερικά παραδείγματα ιδιαίτερα σοβαρών πυρκαγιών σε σιδηροδρομικές σήραγγες είναι (European Thematic Network on Fire in Tunnels, 2006):

- στη σήραγγα του Summit, Αγγλία, 1984, εκτροχιασμός εμπορευματικής αμαξοστοιχίας λόγω εκρήξεως 13 βυτίων πετρελαίου.
- στη σήραγγα της Μάγχης, Αγγλία/Γαλλία, 1996, σοβαρές βλάβες των εγκαταστάσεων, πιθανότατα λόγω εμπρησμού.
- στη σήραγγα του Kitzsteinhorn, Αυστρία, 2000, πυρκαγιά λόγω δυσλειτουργίας του κυκλώματος θέρμανσης προκάλεσε το θάνατο 155 ανθρώπων.

1.2.1.3 Σήραγγες του μετρό

Όσον αφορά τα αίτια των πυρκαγιών, οι σήραγγες του μετρό είναι, από πολλές απόψεις, παρόμοιες με τις σήραγγες των επιβατικών αμαξοστοιχιών. Μία σημαντική διαφορά είναι η μικρή απόσταση μεταξύ των σταθμών, το γεγονός ότι οι περισσότεροι σταθμοί είναι υπόγειοι και ότι οι υπόγειοι σταθμοί συνορεύουν συχνά με εμπορικά μαγαζιά και άλλα κτήρια. Για τις σήραγγες του μετρό, οι

πυρκαγιές που εκδηλώνονται σε σταθμούς και παρακείμενες εγκαταστάσεις και εξαπλώνονται κυρίως σήραγγα, είναι επίσης σημαντικός παράγοντας κίνδυνου. Ακόμη ένα χαρακτηριστικό του μετρό είναι η υψηλή πυκνότητα και συχνή παρουσία των επιβατών.

Παραδείγματα ιδιαίτερα σοβαρών πυρκαγιών σε σήραγγες του μετρό είναι (European Thematic Network on Fire in Tunnels, 2006):

- στον σταθμό King's Cross, Ηνωμένο Βασίλειο, 1987, λόγω πυρκαγιάς σε κυλιόμενες σκάλες, προκλήθηκαν 31 θάνατοι,
- στο μετρό Μπακού, Αζερμπαϊτζάν, 1995, λόγω ελαττωματικού ηλεκτρικού εξοπλισμού, προκλήθηκαν 300 θάνατοι,
- στο μετρό Daegu, Κορέα, 2003, λόγω εμπρησμού, προκλήθηκαν 194 θάνατοι.

1.2.2 Συνέπειες πυρκαγιάς

Οι πυρκαγιές γενικά παράγουν θερμότητα, καπνό και τοξικά προϊόντα, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν ζημιές και απώλειες ανθρώπινων ζωών. Η θερμότητα είναι η αιτία των ζημιών στην δομή και τις εγκαταστάσεις, ενώ σπάνια είναι η αρχική αιτία του θανάτου. Η απειλή για τον άνθρωπο είναι κυρίως, η απώλεια ορατότητας εξαιτίας του καπνού (που εμποδίζει την εκκένωση), και έπειτα η τοξικότητα. Δευτερεύων κίνδυνος είναι ότι οι πυρκαγιές μπορούν, δυνητικά, να αποτελέσουν κίνδυνο για το περιβάλλον που προκαλείται από την τοξικότητα του καπνού και των διαφόρων ουσιών στο αποχετευτικό δίκτυο.

Οι κυριότερες συνέπειες μιας πυρκαγιάς συμπεριλαμβάνουν (European Thematic Network on Fire in Tunnels, 2006):

- θανάτους και τραυματισμούς για:
 - τους χρήστες της σήραγγας,
 - το προσωπικό λειτουργίας και
 - τις δυνάμεις διάσωσης
- οικονομικές ζημιές που σχετίζονται με τα οχήματα, τα εμπορεύματα και το κόστος επισκευής των ζημιών, συμπεριλαμβανομένου και την ανακατασκευή της σήραγγας,
- διαταραχή της κυκλοφορίας των οχημάτων, η οποία οφείλεται στο κλείσιμο μέρους ή ολόκληρης της σήραγγας μέχρι να ολοκληρωθούν τα έργα ανακατασκευής,
- πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

1.2.3 Μέτρα πυρασφάλειας

Η πρώτη προτεραιότητα για το σχεδιασμό πυρασφάλειας όλων των σήραγγων, είναι η πρόληψη κρίσιμων καταστάσεων που ενδέχεται να θέσουν σε κίνδυνο την ανθρώπινη ζωή, το περιβάλλον, τη δομή της σήραγγας και των εγκαταστάσεων, τόσο για τις οδικές σήραγγες, όσο και για τις σιδηροδρομικές και τις αντίστοιχες του μετρό.

Συγκεκριμένα για τις οδικές σήραγγες πρέπει να δημιουργηθούν προϋποθέσεις για (European Thematic Network on Fire in Tunnels, 2006):

1. τη δυνατότητα εγκατάλειψης της σήραγγας των ατόμων που βρίσκονται μέσα σε αυτή κατά τη στιγμή της πυρκαγιάς,
2. την αποτελεσματική και άμεση δράση των σωμάτων διάσωσης,
3. την προστασία του περιβάλλοντος και
4. τον περιορισμό των υλικών ζημιών και των καταστροφών της δομής της σήραγγας.

Για τις σιδηροδρομικές σήραγγες και τις σήραγγες του μετρό, οι αντίστοιχες προϋποθέσεις είναι:

1. ο μετριασμός των επιπτώσεων του ατυχήματος,
2. η διευκόλυνση της διαφυγής,
3. η διευκόλυνση της διάσωσης,
4. η προστασία του περιβάλλοντος (κυρίως σε σιδηροδρομικές σήραγγες με εμπορευματικές αμαξοστοιχίες),
5. ο περιορισμός των υλικών ζημιών και των καταστροφών της δομής της σήραγγας.

Κεφάλαιο 2

Το σκυρόδεμα και η πυρκαγιά

2.1 Γενικά στοιχεία

Οι σήραγγες είναι υπόγεια, διαμπερή ανοίγματα με μήκος τουλάχιστον διπλάσιο από το πλάτος τους. Μια σήραγγα μπορεί να είναι οδική, σιδηροδρομική, μετρό, κανάλι.

Τα πετρώματα έχουν την ικανότητα να παραλαμβάνουν φορτία και να αυτοϋποστηρίζονται. Έτσι, όταν δημιουργούνται υπόγεια ανοίγματα σε πετρώματα, η υποστήριξη δεν είναι απαραίτητο να τοποθετηθεί αμέσως μετά την εκσκαφή του μετώπου, αλλά μπορεί να τοποθετηθεί σε κάποια απόσταση από αυτό, και μετά την παρέλευση κάποιου χρονικού διαστήματος από την ολοκλήρωση της εκσκαφής.

Η ευστάθεια του ανοίγματος εξαρτάται τόσο από την ικανότητα παραλαβής φορτίων από το πέτρωμα όσο και από τη φέρουσα ικανότητα της υποστήριξης. Για να υπολογιστούν και μελετηθούν οι μετατοπίσεις και οι τάσεις της συνδυασμένης κατασκευής πετρώματος – υποστήριξης, πρέπει να ληφθούν υπόψη τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μετώπου, καθώς και οι φάσεις εκσκαφής και τοποθέτησης της υποστήριξης (Αγιουτάντης, 2002).

2.2 Σκυρόδεμα

Το σκυρόδεμα είναι τεχνητό υλικό που αποτελείται κατά βάση από αδρανή (χαλίκι και άμμο), συγκολλημένα μέσω του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού σε μονολιθική μάζα.

Τα αδρανή είναι μεν το φθινό συστατικό αλλά έχουν πολύ ικανοποιητικές βασικές ιδιότητες όπως η μηχανική αντοχή, ανθεκτικότητα και περιβαλλοντικές επιδράσεις (χημικές ουσίες, υγρασία, κύκλους ζέστης και παγωνιάς, υψηλές θερμοκρασίες), σταθερότητα όγκου και υδατοστεγανότητα.

Ο τσιμεντοπολτός αποτελείται από τσιμέντο, νερό και (χημικά) πρόσμεικτα ή πρόσθετα. Ενώ έχει σημαντικά υψηλότερο κόστος από τα αδρανή, στη σκληρυμένη του μορφή ο τσιμεντοπολτός δεν έχει εξίσου καλές βασικές ιδιότητες. Ο ρόλος του είναι να πληροί τα κενά μεταξύ των αδρανών και να συνδέει τα αδρανή, μετατρέποντας τα, από σύνολο ισχυρών αλλά ασύνδετων κόκκων σε τεχνητό πέτρωμα. Επιπλέον λειτουργεί ως λιπαντικό μεταξύ των κόκκων των αδρανών

(αποφυγή απόμειξης), έτσι ώστε το νωπό σκυρόδεμα να είναι μια ρευστή αλλά συνεκτική μάζα (Παπαδάκη, 2010).

2.3 Οπλισμένο Σκυρόδεμα

Το άοπλο σκυρόδεμα, δίνει πολύ καλές τιμές αντοχής σε θλίψη, αλλά όχι και στον εφελκυσμό. Υπάρχουν όμως, περιπτώσεις σε τεχνικά έργα, στα οποία απαιτείται πολύ καλή αντοχή σε εφελκυστική καταπόνηση, όπως πχ. στη στέψη σήραγγας, σε δοκούς, πλαίσια, τοιχώματα κ.α. Το οπλισμένο σκυρόδεμα είναι ένας τύπος σκυροδέματος με τον οποίο, ράβδοι οπλισμού, πλέγματα ενίσχυσης, πλάκες ή ίνες έχουν ενσωματωθεί στη μάζα των στοιχείων του (Wikipedia, wikipedia.org).

Το κάθε ένα από τα παραπάνω πρόσθετα επηρεάζουν διαφορετικά τη λειτουργία του σκυροδέματος και αναπόφευκτα και την εφαρμογή του στα διάφορα έργα. Η τελική ποιότητα μίας κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα εξαρτάται από τους εξής παράγοντες (Παπαδάκη, 2010):

- την ποιότητα υλικών (σκυροδέματος και χάλυβα),
- τη σωστή κατασκευή (καλούπωμα, σκυροδέτηση),
- τη σωστή συντήρηση

Αν ένας από αυτούς τους παραπάνω παράγοντες δεν ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της κατασκευής, τότε μπορεί να επηρεαστεί αρνητικά όλη η τελική ποιότητά της. Για παράδειγμα, η κακή κατασκευή και συντήρηση μιας κατασκευής μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλο περιεχόμενο σε νερό, το οποίο μπορεί να διαβρώσει τον χάλυβα του οπλισμού του σκυροδέματος. Η σωστή κατασκευή πρέπει να διασφαλίζει το αλκαλικό περιβάλλον που δημιουργεί το τσιμέντο, το οποίο περιβάλλει τον οπλισμό και το οποίο τον προστατεύει από την οξείδωσή του. Η ταχύτητα διάβρωσης του χάλυβα αυξάνεται, τόσο εντός όσο και εκτός σκυροδέματος, με (Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε, Κ.Ε.Δ.Ε, 2008):

- την αύξηση της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας
- τη μείωση του pH
- την αύξηση της παρουσίας αλάτων (π.χ. θαλάσσιο περιβάλλον)
- την επαφή του χάλυβα με το έδαφος, το νερό κλπ.
- την επαφή του χάλυβα με διαφορετικά υλικά ή περιβάλλοντα
- την ύπαρξη ενεργών «κέντρων» στην επιφάνεια του χάλυβα (όπως οξείες αιχμές ή πληγές)
- την ύπαρξη επιφανειακής αλλοίωσης λόγω προϋπάρχουσας διάβρωσης

- την επαφή χαλύβων διαφορετικού είδους και διαφορετικού ηλεκτροχημικού δυναμικού
- την ψυχρή κατεργασία (ολκή, έλαση κλπ.)
- το αυξημένο πορώδες του σκυροδέματος

Στο οπλισμένο σκυρόδεμα είναι σημαντική η ανθεκτικότητά του (durability), δηλαδή η αντοχή του στο χρόνο. Αυτή επιτυγχάνεται μεταξύ άλλων και με την ελάχιστη περιεκτικότητα τσιμέντου, η οποία υπολογίζεται σε 270 kg τσιμέντο σε 1 m³ σκυροδέματος. Έτσι προστατεύεται ο μεταλλικός οπλισμός και περιορίζεται ο βαθμός ενανθράκωσης.

2.4 Σκυρόδεμα υψηλής απόδοσης

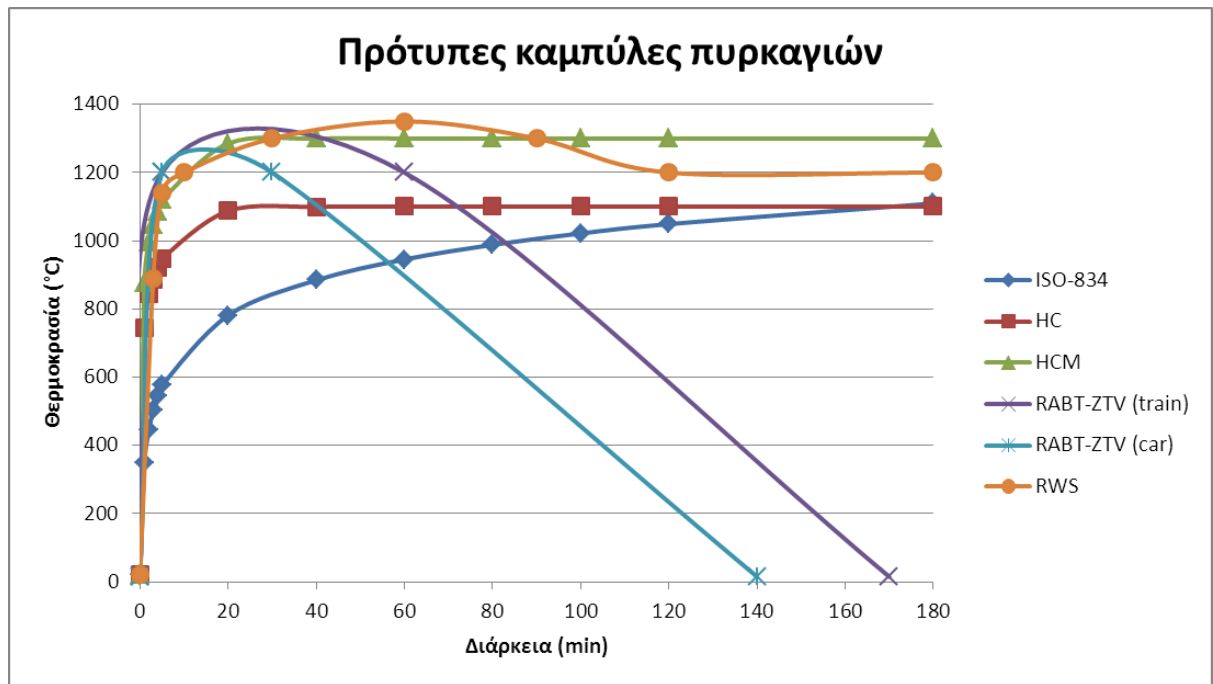
Το σκυρόδεμα υψηλής απόδοσης (HPC), το οποίο έχει χαμηλή διαπερατότητα και θλιπτική αντοχή 60 – 100 MPa, είναι πιθανότερο να εμφανίσει αποφλοίωση κατά τρόπο εκρηκτικό και σε πιο πολλά σημεία (multiple spalling) σε σχέση με το συνηθισμένο σκυρόδεμα, παρά την υψηλότερη εφελκυστική αντοχή του. Αυτό συμβαίνει επειδή κατά τη διάρκεια της θέρμανσης αναπτύσσονται μεγαλύτερες πιέσεις μέσα στους πόρους εξαιτίας της χαμηλότερης διαπερατότητας του υλικού. Επίσης, η μέγιστη τιμή της πίεσης των πόρων εμφανίζεται πλησιέστερα στην επιφάνεια, γι' αυτό παρουσιάζεται επανειλημμένη αποφλοίωση λεπτότερων τμημάτων σκυροδέματος.

2.5 Πρότυπες καμπύλες εκτίμησης πυρκαγιών

Η πυρκαγιά είναι μια αντίδραση καύσης, συνοδευόμενη από ταχεία έκλυση σημαντικού ποσού θερμότητας και από ισχυρή φωταύγεια (φλόγες). Από την εκλυόμενη θερμότητα, ένα ποσοστό απορροφάται από τα καιόμενα υλικά (διαβίβαση, αγωγιμότητα) και ένα ποσοστό διαχέεται προς το περιβάλλον, μέσω θερμικής ακτινοβολίας και μέσω της κίνησης του θερμού (ή υπέρθερμου) αέρα, ο οποίος παρασύρει σπίθες και καιόμενα υλικά. Μια τυπική πυρκαγιά αποτελείται από τρεις φάσεις (T.E.E. & E.M.Π, 2008) :

- α. τη φάση της επώασης
- β. τη φάση της πλήρους ανάπτυξης, και
- γ. τη φάση της απόσβεσης

Για την εκτίμηση των μέγιστων θερμοκρασιών που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς, έχουν προταθεί διάφορες πρότυπες καμπύλες. Στην Εικόνα 2.1 δίνεται το διάγραμμα της θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου για τα διάφορα πρότυπα μοντέλα πυρκαγιών, τα οποία αναλύονται παρακάτω (Σακκάς κ.α., 2010).



Εικόνα 2.1. Πρότυπες καμπύλες πυρκαγιών (Promat, promat-tunnel.com)

2.5.1 Πρότυπη καμπύλη ISO-834 (Cellulosic curve)

Βασίζεται στο ρυθμό καύσης υλικών που συναντώνται σε κατασκευές κτηρίων. Η θερμοκρασία μετά από 30 min φτάνει τους 842 °C. Η πυρκαγιά διαρκεί τρεις ώρες και η θερμοκρασία φτάνει στους 1110 °C. Η θερμοκρασία σε κάθε χρονική στιγμή δίνεται από την εξίσωση (Promat, promat-tunnel.com):

$$T = 20 + 345 \times \log(8 \times t + 1)$$

Όπου T η θερμοκρασία σε °C και t ο χρόνος σε min.

2.5.2 Πρότυπη καμπύλη υδρογονανθράκων

Η πρότυπη καμπύλη υδρογονανθράκων (Hydrocarbon curve, HC) αναπτύχθηκε λαμβάνοντας υπόψη την καύση πετρελαίου, ή άλλων χημικών υλικών που χρησιμοποιούνται στην πετρελαϊκή βιομηχανία και δεν συναντώνται σε συνήθη οικοδομικά έργα. Συνεπώς, η καμπύλη αυτή εφαρμόζεται σε περιπτώσεις πυρκαγιών που προέρχονται από την καύση καυσίμων υλών. Η θερμοκρασία φτάνει στους 1100 °C από τα πρώτα 15 min και διατηρείται σε ισορροπία στην συγκεκριμένη θερμοκρασία για τις τρεις ώρες της πυρκαγιάς. Η θερμοκρασία σε κάθε χρονική στιγμή δίνεται από την εξίσωση (Promat, promat-tunnel.com):

$$T = 20 + 1080 \times (1 - 0.325 \times e^{-0.167 \times t} - 0.675 \times e^{-2.5 \times t})$$

Όπου T η θερμοκρασία σε °C και t ο χρόνος σε min.

2.5.3 Πρότυπη τροποποιημένη καμπύλη υδρογονανθράκων

Η διαφορά της πρότυπης τροποποιημένης καμπύλης υδρογονανθράκων (Hydrocarbon Modified curve, HCM) με την προηγούμενη είναι η μέγιστη θερμοκρασία της πυρκαγιάς. Σε αυτήν την περίπτωση η θερμοκρασία φτάνει στους 1300 °C από τα πρώτα 15 min. Η θερμοκρασία σε κάθε χρονική στιγμή δίνεται από την εξίσωση (Promat, promat-tunnel.com):

$$T = 20 + 1280 \times (1 - 0.325 \times e^{-0.167 \times t} - 0.675 \times e^{-2.5 \times t})$$

Όπου T η θερμοκρασία σε °C και t ο χρόνος σε min.

2.5.4 Πρότυπες καμπύλες RABT ZTV

Οι συγκεκριμένες καμπύλες αναπτύχθηκαν στη Γερμανία ως αποτέλεσμα μιας σειράς πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο προγραμμάτων όπως π.χ. το “EUREKA project”. Στις καμπύλες αυτές η αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι τους 1200 °C πραγματοποιείται μέσα σε πέντε λεπτά. Η διάρκεια έκθεσης στους 1200 °C είναι μικρότερη σε σχέση με άλλες πυρκαγιές με τη θερμοκρασία να αρχίζει να μειώνεται στα 30 min για πυρκαγιά σε αυτοκίνητο (RABT ZTV car) και στα 60 min για πυρκαγιά σε σιδηροδρομική αμαξοστοιχία (RABT ZTV train). Η φάση της απόσβεσης και για τις δυο περιπτώσεις είναι 110 min, ενώ οι τυπικές τιμές χρόνου και θερμοκρασίας αναφέρονται στον Πίνακα 2.1 (Σακκάς κ.α., 2010).

RABT ZTV (car)		RABT ZTV (train)	
Χρόνος (min)	Θερμοκρασία (°C)	Χρόνος (min)	Θερμοκρασία (°C)
0	15	0	15
5	1200	5	1200
30	1200	60	1200
170	15	170	15

Πίνακας 2.1. Πρότυπες τιμές χρόνου και θερμοκρασίας στις καμπύλες RABT ZTV (Promat, promat-tunnel.com)

2.5.5 Πρότυπη καμπύλη RWS (Rijkswaterstaat curve)

Η καμπύλη αυτή αναπτύχθηκε από το Υπουργείο Συγκοινωνιών της Ολλανδίας και πρόκειται για τη δυσμενέστερη περίπτωση από όλες τις καμπύλες. Βασίζεται στο σενάριο ότι πραγματοποιείται πυρκαγιά σε ένα φορτηγό με 50 m³ πετρέλαιο, η ισχύς είναι της τάξης των 300 MW σε κλειστό χώρο και διαρκεί 120 min. Τα αποτελέσματα για την κατασκευή της καμπύλης προέρχονται από τα πειράματα που έγιναν στη σήραγγα του Runehamar στη Νορβηγία. Η διαφορά της καμπύλης αυτής από εκείνη των υδρογονανθράκων είναι ότι πρόκειται για πυρκαγιά σε

κλειστό χώρο, όπως σε σήραγγες κάτι το οποίο δεν ισχύει για καμία από τις υπόλοιπες καμπύλες (Σακκάς κ.α., 2010).

Η καμπύλη RWS αποτελεί την πιο απαιτητική καμπύλη θερμικών φορτίων σχεδιασμού που όμως προσομοιώνει καλύτερα την περίπτωση πυρκαγιάς σε σήραγγα. Η απότομη αύξηση της θερμοκρασίας στα πρώτα λεπτά της πυρκαγιάς, που προβλέπει η παραπάνω καμπύλη, οδηγεί χωρίς αμφιβολία σε αποφλοίωση του σκυροδέματος αν δε ληφθούν συγκεκριμένα μέτρα προστασίας.

Οι τιμές στις με τις οποίες περιγράφεται η συγκεκριμένη καμπύλη, φαίνονται στον Πίνακα 2.2.

Χρόνος (min)	Θερμοκρασία (°C)
0	20
3	890
5	1140
10	1200
30	1300
60	1350
90	1300
120	1200
180	1200

Πίνακας 2.2. Πρότυπες τιμές χρόνου και θερμοκρασίας στην καμπύλη RWS (Promat, promat-tunnel.com)

2.6 Επιπτώσεις πυρκαγιάς στο σκυρόδεμα

Η ανθεκτικότητα στη φωτιά είναι μια έννοια που ισχύει για τα δομικά στοιχεία μιας κατασκευής και όχι για ένα υλικό, οι ιδιότητες, όμως, ενός υλικού επηρεάζουν την απόδοση του δομικού στοιχείου, του οποίου αποτελεί μέρος.

Το πλεονέκτημα του σκυροδέματος σε μια πυρκαγιά είναι διπλό, σε σχέση με άλλα υλικά. Είναι άκαυστο (π.χ. σε σύγκριση με το ξύλο) και καλό μονωτικό υλικό, καθώς διαθέτει μια πολύ χαμηλή θερμική αγωγιμότητα (π.χ. σε σχέση με τον χάλυβα). Ωστόσο, παρουσιάζει και μειονεκτήματα, όπως επιδείνωση των μηχανικών ιδιοτήτων του, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία, το οποίο οφείλεται σε φυσικοχημικές διεργασίες, που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια της θέρμανσης (Πίνακας 2.3) καθώς και το φαινόμενο της εκρηκτικής αποφλοίωσης, το οποίο οδηγεί σε απώλεια υλικού σκυροδέματος, μείωση μεγέθους υποστήριξης και άμεση έκθεση του χάλυβα σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες. Κατά συνέπεια, τόσο οι διαχωριστικές, μονωτικές και φέρουσες λειτουργίες του σκυροδέματος τίθενται σε κίνδυνο (Khoury, 2000).

Θερμοκρασία (°C)	Φυσικές Διεργασίες	Επίδραση στις ιδιότητες
0 – 100	Εξάτμιση του φυσικά ροφημένου νερού	Μικρή αύξηση της θλιπτικής αντοχής και μείωση του μέτρου ελαστικότητας
100 – 400	Πραγματοποιούνται υδροθερμικές αντιδράσεις και εξάτμιση του μηχανικά συνδεδεμένου νερού	Επίτευξη της ανώτατης θλιπτικής αντοχής και περαιτέρω μείωση του μέτρου ελαστικότητας
400 – 500	Το συνδεδεμένο με τα υδροξείδια του ασβεστίου νερό ελευθερώνεται μέσω της πίεσης των υδρατμών και ενεργεί διαρρηκτικά. Ξεκινά η αποφλοίωση του σκυροδέματος	Ισχυρή πτώση της αντοχής του σκυροδέματος αλλά και του μέτρου ελαστικότητας
500 – 1000	Τα περιέχοντα χαλαζιακά συστατικά του σκυροδέματος (άμμος, χαλίκι) μεταβάλλουν αλματωδώς τον όγκο τους στους 600 °C	Μικρή παραμένουσα αντοχή
> 1000		Αρχίζει η τήξη του σκυροδέματος

Πίνακας 2.3. Θερμοκρασιακές μεταβολές του σκυροδέματος κατά τη θέρμανση (Σακκάς κ.α., 2010)

Χωρίς κανένα μέτρο προστασίας η επένδυση της σήραγγας ανθίσταται σε θερμοκρασίες περί τους 1000 °C για πολύ μικρό χρονικό διάστημα, έως ότου αρχίσει η αποφλοίωση (spalling) του σκυροδέματος.

2.6.1 Επιδείνωση των μηχανικών ιδιοτήτων

Η επιδείνωση των μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος λόγω θέρμανσης μπορεί να αποδοθεί σε τρεις παράγοντες (Khoury, 2000):

- σε φυσικοχημικές διεργασίες στον τσιμεντοπολφό,
- σε φυσικοχημικές διεργασίες στα αδρανή,
- σε θερμική ασυμβατότητα μεταξύ του τσιμεντοπολφού και των αδρανών

και επηρεάζονται από «περιβαλλοντικούς» παράγοντες, όπως:

- το επίπεδο θερμοκρασίας,
- το ρυθμό θέρμανσης,
- το υπάρχον φορτίο,
- τη στεγανοποίηση που επηρεάζει την απώλεια υγρασίας της επιφανείας.

Αυτοί οι παράγοντες, αναλύονται παρακάτω συναρτήσει των αντοχών σε θλίψη και εφελκυσμό.

2.6.1.1 Θλιπτική και εφελκυστική αντοχή

Πριν γίνει αναφορά στις επιπτώσεις στην αντοχή του σκυροδέματος ως αποτέλεσμα της αύξησης θερμοκρασίας, αξίζει να αναφερθούν δυο πλεονεκτήματα του θερμαινόμενου σκυροδέματος (Khoury, 2000).

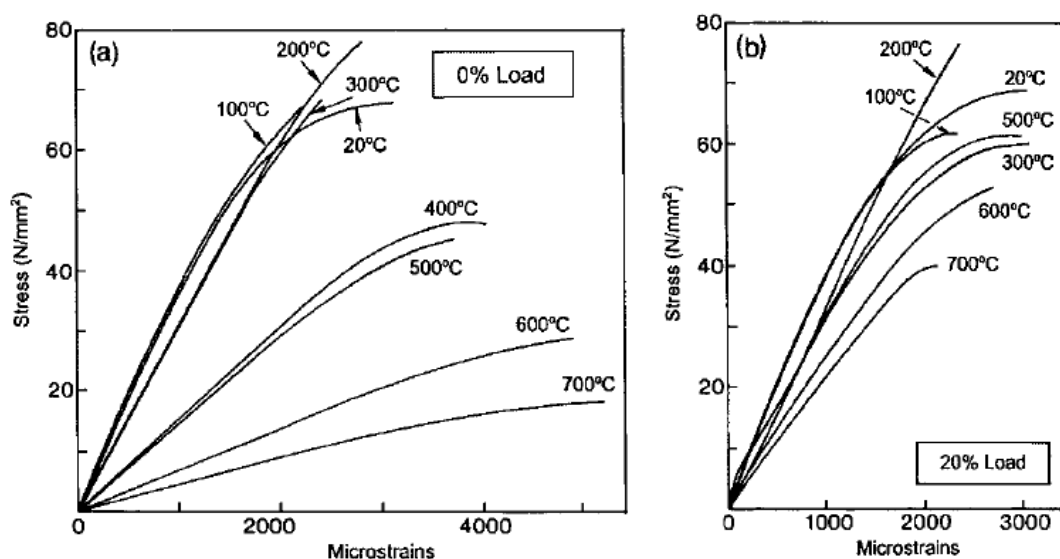
2.6.1.1.1 Επίπτωση στον μεταβατικό ερπυσμό

Μέχρι το 1970, οι επιστήμονες προβληματίζονταν ως προς το γιατί το σκυρόδεμα δεν αστοχεί όταν θερμαίνεται πάνω από τους 100 °C, και αυτό λόγω της διαφορετικής παραμόρφωσης που προκαλείται από τη διόγκωση των αδρανών και τη συρρίκνωση του τσιμεντοπολφού η οποία είναι πολύ μεγάλη ώστε να περιγραφεί από την ελαστική παραμόρφωση. Η ανακάλυψη του φαινομένου του «μεταβατικού ερπυσμού», έδωσε την απάντηση. Ο μεταβατικός ερπυσμός (ή εναλλακτικά «θερμική παραμόρφωση λόγω φορτίου» - load-induced thermal strain, LITS) εμφανίζεται κατά τα πρώτα λεπτά της θέρμανσης και όχι κατά τη φάση της ψύξης, υπό φορτίο. Αφού ξεπεραστούν οι 100 °C, το φαινόμενο του μεταβατικού ερπυσμού, είναι ουσιαστικά συνάρτηση της θερμοκρασίας και όχι του χρόνου, οπότε είναι σχετικά εύκολο να σχεδιαστεί ένα μαθηματικό μοντέλο ενός βραχυχρόνιου σεναρίου θέρμανσης, όπως είναι μια πυρκαγιά.

2.6.1.1.2 Επίπτωση της φόρτισης λόγω θέρμανσης

Μια ακόμη θετική πτυχή του σκυροδέματος σε υψηλή θερμοκρασία είναι η «ευεργετική» επίδραση της φόρτισης η οποία τοποθετεί το υλικό σε θλίψη, «συμπιέζει» το σκυρόδεμα κατά τη θέρμανση και εμποδίζει την εμφάνιση ρωγμών. Και πάλι, η επίδραση αυτή δεν εκτιμήθηκε πλήρως από τους μηχανικούς και δεν εφαρμόστηκαν κατάλληλα οι κώδικες και τα πρότυπα που έπρεπε. Ένα παράδειγμα του φαινομένου εμφανίζεται στην Εικόνα 2.2, στην οποία φαίνεται η σύγκριση τη σχέση τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε καταστάσεις υψηλών θερμοκρασιών 20 – 700 °C, για 2 περιπτώσεις φόρτισης. Η επίδραση της θερμοκρασίας μπορεί να

είναι αισθητά μειωμένη. Τόσο η αντοχή σε θλίψη, όσο και το μέτρο ελαστικότητας επηρεάζονται πολύ λιγότερο με την αύξηση της θερμοκρασίας, υπό σημαντικό φορτίο. Ωστόσο, το θερμαινόμενο σκυρόδεμα που δεν δέχεται φορτίο, πειράματα δείχνουν ότι το μέτρο ελαστικότητας μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας κατά πολύ μεγαλύτερο ποσοστό σε σχέση με την θλιπτική αντοχή (Khoury, 2000).



Εικόνα 2.2. Επίδραση της θερμοκρασίας και του επιπέδου φορτίου κατά τη διάρκεια της θέρμανσης που δόθηκε από την υπολειμματική σχέση τάσης-παραμόρφωσης σε μονοαξονική θλίψη μη-στεγανοποιημένων κυλινδρικών δοκιμών C70 HITECO. Οι δοκιμές διεξήχθησαν σε σταθερό ρυθμό φόρτισης (Khoury, 2000).

2.6.1.1.3 Επίδραση της θερμοκρασίας

Κατά τη θέρμανση από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, η θλιπτική αντοχή του, μη στεγανοποιημένου, σκυροδέματος μειώνεται, για να λάβει την ελάχιστη τιμή της στους 80 °C. Ουσιαστικά πρόκειται για μια «φαινόμενη» απώλεια αντοχής, αναστρέψιμη σε μεγάλο βαθμό μέσω ψύξης και οφείλεται στην εξασθένιση των δεσμών van der Waals καθώς τα διαστελλόμενα μόρια του νερού, μετατοπίζουν τις στοιβάδες του ένυδρου πυριτικού ασβεστίου (Calcium Silicate Hydrates – CSH layers) μακρύτερα. Αυτό το ελάχιστο, δεν εμφανίζεται όταν η εναπομένουσα αντοχή μετράται κατά την ψύξη και σχεδιάζεται συναρτήσει της προηγούμενης θερμοκρασίας. Συχνά, κατά τη διάρκεια της θέρμανσης, η αντοχή αυξάνεται και μεγιστοποιείται στους 200 – 300 °C, μεγαλύτερη από την αρχική αντοχή που είχε το σκυρόδεμα, πριν τη θέρμανση. Τα περισσότερα σκυροδέματα, παρουσιάζουν μείωση αντοχής σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 300 °C, αλλά αυτό εξαρτάται από το είδος των αδρανών και του τσιμενοπολφού που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή τους. Μεταξύ 300 και 600 °C υπάρχει περιθώριο για βελτίωση της απόδοσης του σκυροδέματος με μια συνετή μελέτη σύνθεσης.

Παρόλα, αυτά έπειτα από πειράματα παρατηρήθηκε μια αισθητή αύξηση του «βασικού» ερπυσμού, του τσιμέντου τύπου Portland και συγκεκριμένα σε θερμοκρασία 550 – 600 °C, το οποίο προδίδει μια κρίσιμη θερμοκρασία, πάνω από την οποία το σκυρόδεμα δεν είναι δομικά χρήσιμο. Το πλεονέκτημα, όμως, του σκυροδέματος είναι ότι μόνο τα πρώτα λίγα εκατοστά του σκυροδέματος θερμαίνονται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των 300 °C, λόγω του χαμηλού συντελεστή θερμικής διάχυσης που διαθέτει. Η συνήθης πρακτική μετά την πυρκαγιά είναι η αφαίρεση και αντικατάσταση του συγκεκριμένου τμήματος του σκυροδέματος που έχει υπερθερμανθεί. Όσο το σκυρόδεμα δεν παρουσιάζει αποφλοιώση, συνεχίζει και παρέχει θερμική προστασία στο χάλυβα και στην εσωτερική υποστήριξη, αν οι μηχανικές του αντοχές μειώνονται αρκετά (Khoury, 2000).

Ακόμη ένα φαινόμενο, το οποίο δεν εκτιμήθηκε πλήρως, είναι η μεγάλη διαφορά μεταξύ του μη στεγανοποιημένου και του στεγανοποιημένου σκυροδέματος, για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 100 °C. Η διαδικασία για το μη στεγανοποιημένο σκυρόδεμα σχετίζεται με την απώλεια των διαφόρων μορφών νερού (ελεύθερο, προσροφημένο και χημικώς συνδεδεμένο νερό), ενώ το στεγανοποιημένο σκυρόδεμα σχετίζεται με υδροθερμικές χημικές αντιδράσεις, οι οποίες οδηγούν στη δημιουργία ασθενέστερου ή ισχυρότερου gel, ανάλογα με την αναλογία συγκέντρωσης ασβεστιτικών προς πυριτικών (CaO/SiO₂ ratio). Η αναλογία αυτή επηρεάζεται από το είδος των υλικών που μπορεί να χρησιμοποιηθούν ως εναλλακτικό του τσιμέντου, όπως η ιπτάμενη τέφρα, η σκωρία και η πυριτική παιπάλη στον πολφό του σκυροδέματος (Khoury, 2000).

Οπότε, λόγω του μεγάλου αριθμού των υλικών και των περιβαλλοντικών παραγόντων που επηρεάζουν τη θλιπτική αντοχή του θερμαινόμενου σκυροδέματος, είναι φυσικό ότι, σε θερμοκρασία 150 °C η θλιπτική αντοχή κυμαίνεται από το 30% έως το 120% της αρχικής της τιμής.

2.6.1.2 Μελέτη σύνθεσης κατά την απώλεια αντοχής

Η επιδείνωση των μηχανικών ιδιοτήτων μπορεί να προληφθεί για θερμοκρασίες έως και 600 °C με ένα συνετό σχεδιασμό της σύνθεσης του σκυροδέματος. Σύμφωνα με τα παραπάνω, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη α) οι ιδιότητες των αδρανών, β) οι ιδιότητες του τσιμεντοπολφού και γ) η αλληλεπίδραση μεταξύ τους.

2.6.1.2.1 Αδρανή

Η σωστή επιλογή των αδρανών είναι, ίσως, το πιο σημαντικό κομμάτι του σχεδιασμού, καθώς ορισμένα αδρανή όπως ο πυριτιόλιθος (flint) και το χαλίκι

διαλύονται σε θερμοκρασία μικρότερη των 350 °C, ενώ άλλα αδρανή, όπως ο γρανίτης, παρουσιάζουν θερμική σταθερότητα, έως και τους 600 °C. Παρακάτω αναφέρονται τα συνηθέστερα υλικά που χρησιμοποιούνται ως αδρανή, ταξινομημένα σε σειρά σύμφωνα με τη θερμική τους σταθερότητα από την χαμηλότερη προς την υψηλότερη: πυριτιόλιθοι, χαλίκια, ασβεστόλιθοι, βασάλτες, γρανίτες, γάββροι. Άλλες επιθυμητές ιδιότητες των αδρανών είναι (Khoury, 2000):

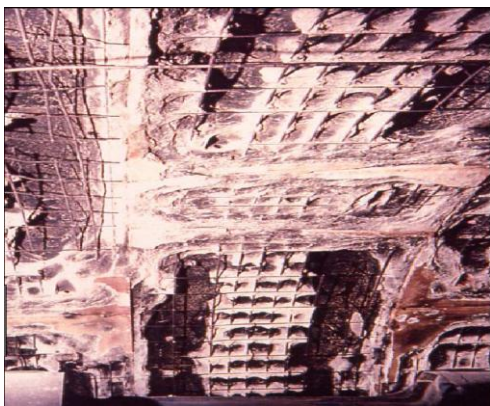
- η χαμηλή θερμική διαστολή, η οποία βελτιώνει τη θερμική συμβατότητα με τον τσιμεντοπολφό,
- η τραχεία επιφάνεια, η οποία βελτιώνει το φυσικό δεσμό με τον πολφό, και
- οι ενεργές πυριτικές ενώσεις (reactive silica), οι οποίες βελτιώνουν το χημικό δεσμό με τον πολφό.

2.6.1.2.2 Τσιμεντοπολφός

Για τον τσιμεντοπολφό, ο σημαντικότερος παράγοντας είναι η αναλογία συγκέντρωσης ασβεστιτικών προς πυριτικών υλικών (C/S ratio). Χαμηλή αναλογία, σημαίνει μικρή περιεκτικότητα υδροξειδίων του ασβεστίου (Ca(OH)_2) στην αρχική σύνθεση και εξασφαλίζει μια πιο ευεργετική υδροθερμική αντίδραση. Το υδροξείδιο του ασβεστίου δεν είναι επιθυμητό, καθώς διασπάται περίπου στους 400 °C σε CaO και CO_2 . Το CaO ενώ ενυδατώνεται, διογκώνεται επιβλαβώς και το σκυρόδεμα εκτίθεται σε υγρασία, κατά το στάδιο της ψύξης. Η αναλογία C/S, στην πράξη μειώνεται με χρήση σκωρίας, ιπτάμενης τέφρας ή πυριτικής παιπάλης. Δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, δείχνουν ότι η χρήση σκωρίας παράγει τα καλύτερα αποτελέσματα σε υψηλές θερμοκρασίες, ακολουθούμενη από την ιπτάμενη τέφρα και στη τελευταία έρχεται η πυριτική παιπάλη. Η σχετικά χαμηλή απόδοση της παιπάλης (σε αντίθεση με την υψηλή αντοχή που παρουσιάζει σε θερμοκρασία δωματίου) μπορεί να αποδοθεί στον πυκνό, χαμηλή διαπερατότητας πολφό, ο οποίος δεν επιτρέπει την υγρασία να δραπετεύσει από το θερμαινόμενο σκυρόδεμα, με αποτέλεσμα υψηλές πιέσεις πόρων και ανάπτυξη μικρορωγμών (Khoury, 2000).

2.6.2 Αποφλοίωση

Ως αποφλοίωση ορίζεται η βίαιη ή μη αποκοπή στρωμάτων ή κομματιών σκυροδέματος από την επιφάνεια μιας κατασκευής, στην προκειμένη περίπτωση μια σήραγγα, όταν εκτίθεται σε υψηλές και απότομα αυξανόμενες θερμοκρασίες όπως συμβαίνει δηλαδή στις πυρκαγιές. Συνολικά υπάρχουν τέσσερις διαφορετικοί τύποι αποφλοίωσης (Σακκάς κ.α., 2010).



Εικόνα 2.3. Αποφλοίωση της εσωτερικής επένδυσης της Σήραγγας της Μάγχης (Ηνωμένο Βασίλειο / Γαλλία, 1996) (Krause, 2006)



Εικόνα 2.4. Αποφλοίωση της εσωτερικής επένδυσης της σήραγγας του Montblanc (Γαλλία / Ιταλία, 1999) (Krause, 2006)

2.6.2.1 Αποφλοίωση αδρανών

Πρόκειται για το φαινόμενο κατά το οποίο ενιαία κομμάτια αδρανών «σκάνε» με αποτέλεσμα τη δημιουργία μικρών κρατήρων στην επιφάνεια του σκυροδέματος χωρίς, όμως, συνέπειες, για τη φέρουσα ικανότητά του. Μπορεί να οφείλεται σε εγκλείσματα νερού στα αδρανή, όπως πυριτιόλιθου (flint) και ψαμμίτη και, σε γενικές γραμμές, δεν παρουσιάζει προβλήματα στην ακεραιότητα της κατασκευής (Hertz, 2003).



Εικόνα 2.5. Αποφλοίωση αδρανών (aggregate spalling) σε τοίχωμα σήραγγας (Nishio et. al, 2006)

2.6.2.2 Αποφλοίωση γωνιών

Η γωνιακή αποφλοίωση (corner spalling) προκαλείται όταν ένα γωνιακό τεμάχιο του σκυροδέματος αποκολλείται από τη θέση μιας ράβδου οπλισμού.

Ανομοιογενή θέρμανση του σκυροδέματος οδηγεί σε παραμόρφωση (ovalisation) του σκυροδέματος γύρω από την ομοιόμορφα θερμαινόμενη ράβδο οπλισμού.

Αυτή η διαφορά στην παραμόρφωση προκαλούν τάσεις διάσπασης του σκυροδέματος, οι οποίες οδηγούν στη δημιουργία ρωγμών που με την σειρά τους μπορούν να προκαλέσουν τη γωνία ενός στύλου ή μιας πλάκας να αποκολληθεί. (Promat, promat-tunnel.com)

2.6.2.3 Επιφανειακή αποφλοίωση

Κατά το φαινόμενο της επιφανειακής αποφλοίωσης (surface spalling), μικρά ή μεγάλα τεμάχια σκυροδέματος αποκολλούνται, με αποτέλεσμα την άμεση έκθεση των ράβδων οπλισμού στην πυρκαγιά. Αυτό έχει σαν συνέπεια την απότομη μείωση της φέρουσας ικανότητας του οπλισμού. Σε κάποιες περιπτώσεις η αποφλοίωση μπορεί να είναι τόσο δραστική που να προκαλέσει την άμεση αστοχία της σήραγγας.

Ορισμένες αιτίες που μπορεί να προκαλέσουν επιφανειακή αποφλοίωση σε ένα τεχνικό έργο είναι (Anderberg, 1997):

- υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία
- πυκνό υδρογονανθρακωμένο σκυρόδεμα (High-performance concrete, HPC)
- θλιπτικές τάσεις λόγω υπερκειμένων ή προέντασης
- απότομη αύξηση της θερμοκρασίας
- σημαντική ανομοιομορφία στην κατανομή θερμοκρασίας
- λεπτή διατομή
- υψηλή συγκέντρωση οπλισμού

2.6.2.4 Εκρηκτική αποφλοίωση

Πρόκειται για τον πλέον συνηθισμένο τρόπο αποφλοίωσης (Αγγελόπουλος & Γιόκαρης, 2005), ο οποίος αναπτύσσεται παρακάτω λεπτομερώς.

2.6.3 Εκρηκτική Αποφλοίωση

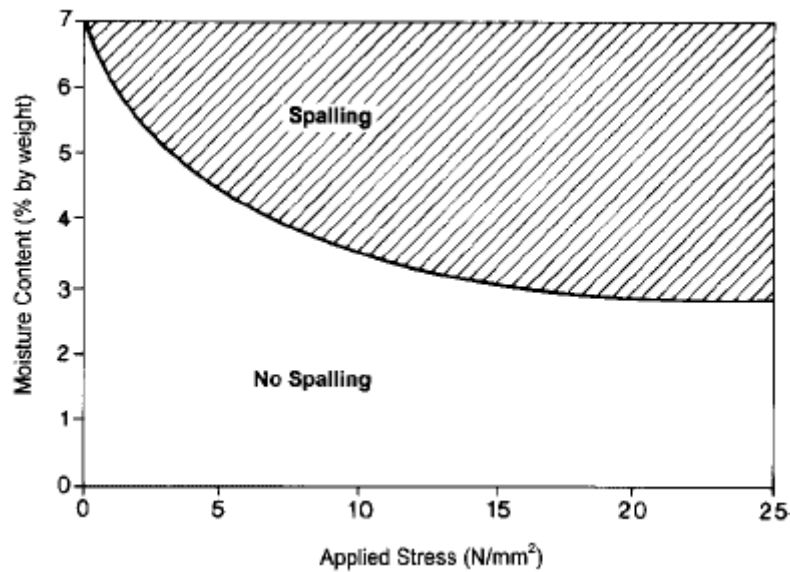
Η επίπτωση της αποφλοίωσης σε μία κατασκευή από σκυρόδεμα μπορεί να καταστήσει το σχεδιασμό πυρασφάλειας ανακριβές. Είναι, επομένως, σημαντικό: α) η καλύτερη κατανόηση των θεμελιωδών μηχανισμών που ευθύνονται για την εκρηκτική αποφλοίωση του σκυροδέματος, β) η ανάπτυξη ενός ρεαλιστικού μοντέλου πρόβλεψης, γ) η βελτιστοποίηση, ως προς το κόστος και την

αποτελεσματικότητα, των μεθόδων για την εξάλειψη των μεθόδων, για την εξάλειψη της εκρηκτικής αποφλοίωσης (explosive spalling) στην πράξη.

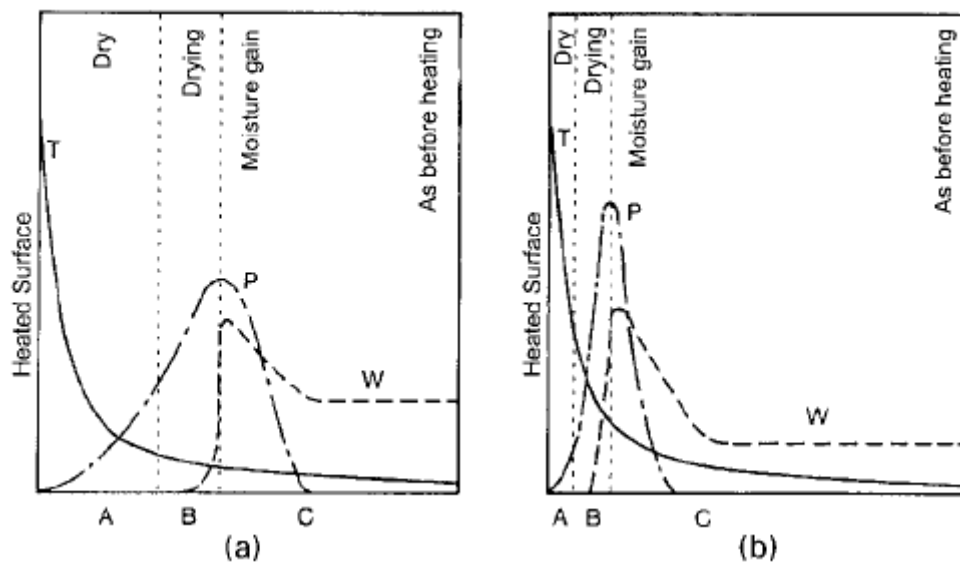
2.6.3.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την εκρηκτική αποφλοίωση

Πολλοί υλικοί (π.χ. διαπερατότητα, βαθμός κορεσμού, μέγεθος και είδος αδρανών, παρουσία ρωγμών και σπλισμού), γεωμετρικοί (π.χ. σχήμα και μέγεθος του τμήματος) και περιβαλλοντικοί (π.χ. ρυθμός και είδος θέρμανσης, φορτίο) παράγοντες έχουν προσδιοριστεί, πειραματικά, ότι επηρεάζουν την αποφλοίωση του σκυροδέματος.

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν από τον Khouiry (2000) χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή νομογραφημάτων για τον εντοπισμό των ζωνών του θρυμματισμού (Εικόνα 2.6). Αναφορικά, οι παράγοντες που επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό την αποφλοίωση, είναι α) ο ρυθμός θέρμανσης (ιδιαίτερα αν υπερβαίνει τους 3 °C/min), β) η διαπερατότητα του υλικού, ο βαθμός κορεσμού των πόρων (ιδιαίτερα αν η υγρασία υπερβαίνει το 2-3% του συνολικού βάρους του σκυροδέματος), η παρουσία σπλισμού και το μέγεθος του εξωτερικού φορτίου. Χαμηλής διαπερατότητας, υψηλής απόδοσης σκυρόδεμα (High-performance concrete, HPC) είναι πιθανότερο να αποφλοιωθεί εκρηκτικά και να παρουσιάσει πολλαπλή αποφλοίωση σε σχέση με το άοπλο σκυρόδεμα, παρά την υψηλότερη εφελκυστική αντοχή που προσφέρει. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι οι πιέσεις των πόρων μεγιστοποιούνται κατά τη θέρμανση (Εικόνα 2.7), λόγω της χαμηλής διαπερατότητας του υλικού. Επίσης, το μέγιστο της πίεσης των πόρων, επιτυγχάνεται κοντά στην επιφάνεια του σκυροδέματος υψηλής απόδοσης (HPC), γεγονός που εξηγεί γιατί οι τομείς λεπτότερου σκυροδέματος, HPC, αποφλοιώνονται επανειλημμένα σε φωτιά (Khouiry, 2000).



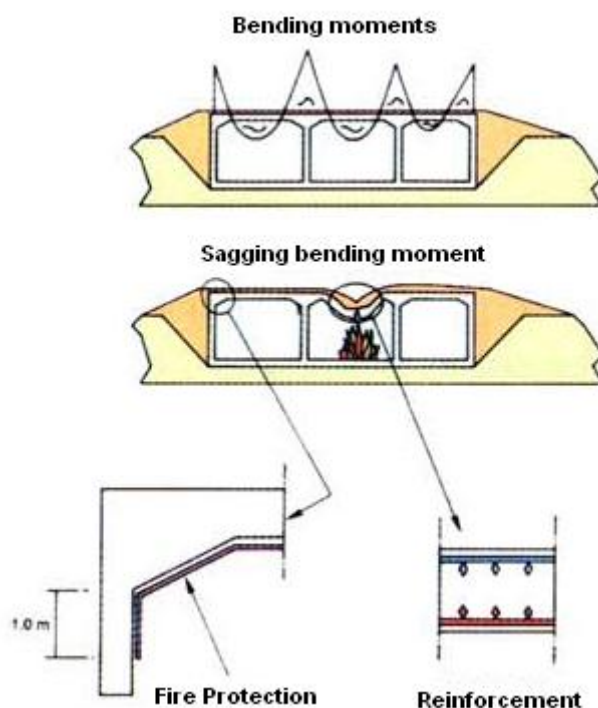
Εικόνα 2.6. Εμπειρικός φάκελος φάσεων εκρηκτικής αποφλοίωσης για άοπλο σκυρόδεμα, συναρτήσει περιεχόμενης υγρασίας και υπαρχουσών τάσεων (Khoury, 2000).



Εικόνα 2.7. Συνιστώσες της θερμοκρασίας (T), της πίεσης των πόρων (P), και της υγρασίας (W) σε άοπλο (a) και υψηλής απόδοσης (HPC) (b) σκυρόδεμα κατά τη διάρκεια της θέρμανσης από μη στεγανοποιημένη επιφάνεια (Khoury, 2000).

Η γεωμετρία της σήραγγας μπορεί να επηρεάσει την επίπτωση που μπορεί να έχει η πυρκαγιά στην υποστήριξή της. Ορθογώνιας διατομής σήραγγες που διανοίχτηκαν με τη Μέθοδο Ανοιχτού Ορύγματος (Cut and Cover) υποστηριζόμενες από οπλισμένο σκυρόδεμα, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως κατασκευές οι οποίες καταπονούνται από εντάσεις λόγω κάμψης. Κατά συνέπεια, η φωτιά σε μια τέτοια κατασκευή θα προκαλέσει αποφλοίωση σκυροδέματος (spalling) στην εσωτερική επιφάνεια αλλά και σοβαρή μείωση την καμπτικής αντοχής του στοιχείου επηρεάζοντας σοβαρά τη ευστάθεια της κατασκευής (Εικόνα 2.8).

Οι σήραγγες κυκλικής διατομής συμπεριφέρονται διαφορετικά από τις ορθογωνικές, καθώς καταπονούνται με θλιπτικές τάσεις κατά μήκος του θόλου τους. Κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς οι τάσεις στον θόλο αυξάνονται εξαιτίας της εμποδιζόμενης διαστολής που αναπτύσσεται κοντά στ θερμαινόμενη επιφάνεια. Η καταπόνηση των σηράγγων κυκλικής διατομής αυξάνει την πιθανότητα της εκδήλωσης του συγκεκριμένου φαινομένου (Αγγελόπουλος & Γιόκαρης, 2005).



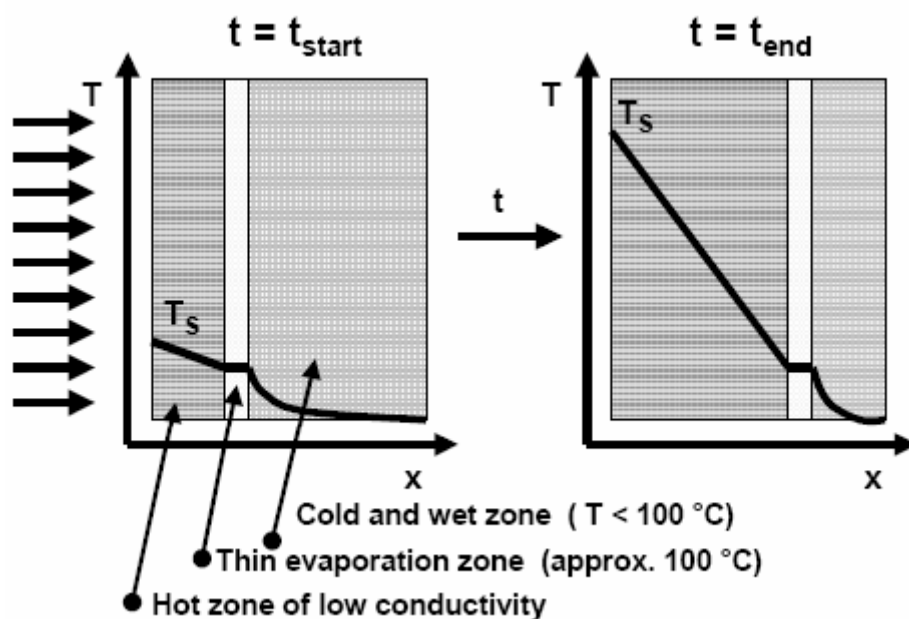
Εικόνα 2.8. Καμπτική αστοχία λόγω πυρκαγιάς σε ορθογωνική σήραγγα και μέτρα παθητικής υποστήριξης (Αγγελόπουλος & Γιόκαρης, 2005)

2.6.3.2 Μηχανισμοί της εκρηκτικής αποφλοίωσης

α. Πίεση των πόρων

Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την αποφλοίωση λόγω πίεσεως των πόρων (pore pressure spalling) είναι η διαπερατότητα του σκυροδέματος, το αρχικό επίπεδο κορεσμού των πόρων και ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας. Η τιμή της πίεσης πόρων στο υπό θέρμανση σκυρόδεμα είναι δύσκολο να προβλεφθεί με ακρίβεια. Η πλειοψηφία των μοντέλων που υπάρχουν για τον υπολογισμό αυτής της τιμής δίνουν τιμές πίεσης πόρων μικρότερες από την τιμή της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος. Άρα ο μηχανισμός αυτός, από μόνος του, δεν οδηγεί σε αποφλοίωση. Ένα «μέτωπο εξάτμισης» διαπερνά τη διατομή από την επιφάνεια της υποστήριξης προς το εσωτερικό της. Το ελεύθερο νερό εξατμίζεται στη ζώνη που δημιουργείται από το μέτωπο εξάτμισης. Ένα

μέρος του μεταφέρεται στην επιφάνεια της διατομής και το υπόλοιπο εισχωρεί σε βαθύτερα και ψυχρότερα σημεία της διατομής όπου ψύχεται και συμπυκνώνεται (Εικόνα 2.9 και Εικόνα 2.10). Ακόμη ένα αποτέλεσμα του μηχανισμού αυτού είναι η δημιουργία μιας εξωτερικής στοιβάδας υγρασίας στο μέτωπο εξάτμισης, η οποία με τη σειρά της οδηγεί σε μια έκρηξη ατμού.



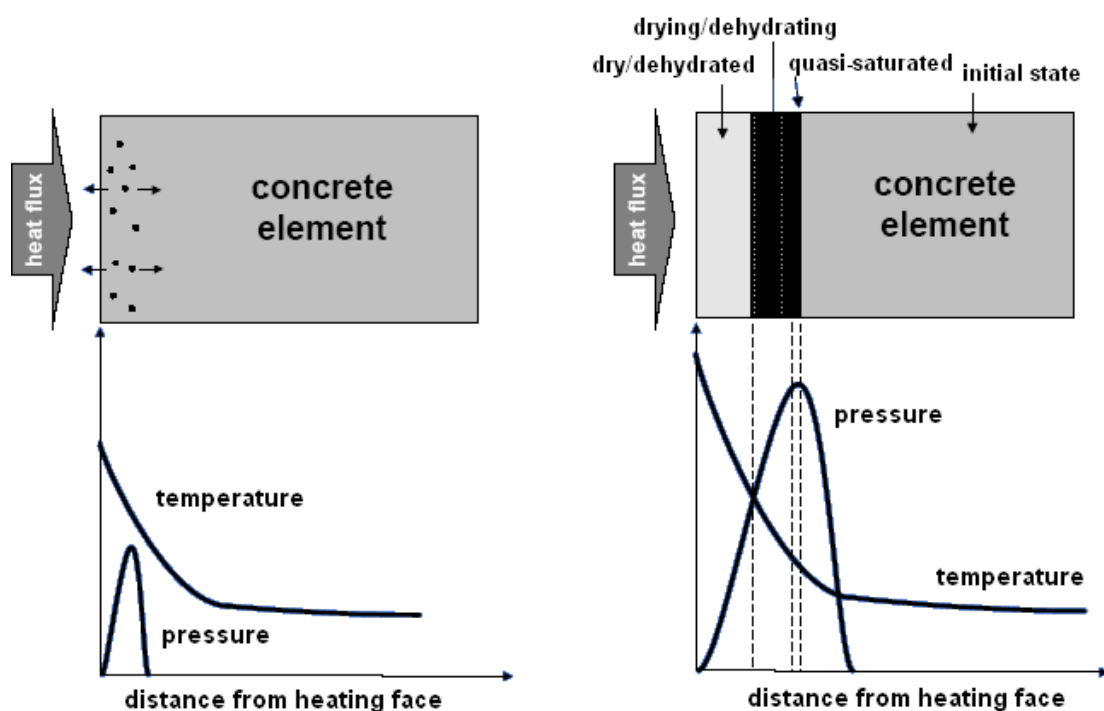
Εικόνα 2.9. Μοντέλο ενός τμήματος επένδυσης (protection layer) κατά τη θέρμανση (Αγγελόπουλος & Γιόκαρης, 2005)

β. Θερμικές εφελκυστικές τάσεις

Όταν το σκυρόδεμα υποστεί γρήγορη αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να παρουσιάσει εκρηκτική αποφλοίωση (thermal stress spalling). Αυτό οφείλεται σε υπερβολικές θερμικές τάσεις οι οποίες δημιουργούνται εξαιτίας της απότομης αύξησης της θερμοκρασίας. Καθώς το σκυρόδεμα θερμαίνεται αναπτύσσονται θλιπτικές τάσεις κοντά στην εξωτερική επιφάνεια λόγω περιορισμού θερμικής διαστολής και εφελκυστικές τάσεις στα ενδότερα του σκυροδέματος όπου επικρατούν χαμηλότερες θερμοκρασίες. Οι θλιπτικές τάσεις στην εξωτερική επιφάνεια είναι δυνατό να αυξηθούν λόγω πιθανής εξωτερικής φόρτισης. Το φαινόμενο αποφλοίωσης λόγω αποκλειστικά θερμικών τάσεων, είναι σπάνιο καθώς οι κατασκευές οι οποίες φορτίζονται σε τέτοιο επίπεδο, ώστε η φόρτιση να πλησιάζει την τιμή της αντοχής του σκυροδέματος είναι ελάχιστες.

γ. Συνδυασμός των ανωτέρω

Στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων, το φαινόμενο της αποφλοίωσης λαμβάνει χώρα υπό τη συνδυασμένη δράση της πίεσης των πόρων, των θλιπτικών τάσεων (λόγω θερμικών τάσεων και εξωτερικά φορτία) που δρουν στην επιφάνεια του σκυροδέματος, το οποίο εκτίθεται στην πυρκαγιά και την ύπαρξη εσωτερικών ρωγμών. Ρωγμές αναπτύσσονται παράλληλα στην επιφάνεια του σκυροδέματος όταν το άθροισμα των τάσεων υπερβεί την εφελκυστική αντοχή του. Έπειτα παρουσιάζεται ξαφνική έκλυση ενέργειας και βίαιη αστοχία της επιφάνειας. Η αποφλοίωση λόγω της πίεσης των πόρων και αυτή λόγω των θερμικών τάσεων (ή κάθε μία, σε συνδυασμό με το εξωτερικό φορτίο) δρουν σε συνδυασμό ή μόνες τους ανάλογα με το μέγεθος του στοιχείου, τον τύπο του σκυροδέματος και το ποσοστό της περιεχόμενης υγρασίας. Τόσο στο άοπλο όσο και στο υψηλής αντοχής σκυρόδεμα (high-strength concrete) ο κυριότερος παράγοντας από τους δύο, για τη δημιουργία του φαινομένου της αποφλοίωσης, είναι η πίεση των πόρων.



Εικόνα 2.10. Κατανομή θερμοκρασίας, πίεσης πόρων και υγρασίας συναρτήσει της απόστασης από την επιφάνεια θέρμανσης (Αγγελόπουλος & Γιόκαρης, 2005).

Κεφάλαιο 3

Αριθμητική ανάλυση στις σήραγγες

3.1 Εισαγωγή

Η διαδικασία της κατασκευής στοών και σηράγγων εμφανίζεται συνεχώς στην ιστορία του ανθρώπου. Η πρώτη εφαρμογή μαθηματικών σχέσεων για την κατασκευή σήραγγας μπορεί να σχετίζεται με την κατασκευή της σήραγγας για μεταφορά νερού, μήκους 1036m, στη Σάμο από τον Ευπαλίνο (Αγιουτάντης, 2002).

Η όρυξη σηράγγων, η εκσκαφή πρανών καθώς και η κατασκευή διαφόρων τεχνικών έργων μπορεί να προκαλέσει σημαντικές αλλαγές στο εντατικό πεδίο των περιβαλλόντων πετρωμάτων. Για την κατανόηση των φαινομένων που σχετίζονται με τη δημιουργία των έργων αυτών, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των δυνάμεων, τάσεων, μετατοπίσεων, καθώς και ανηγμένων παραμορφώσεων σε φυσικά υλικά κάτω από δεδομένες συνθήκες.

Οι πρώτες εφαρμογές των αριθμητικών μεθόδων σε γεωμηχανικά προβλήματα εμφανίστηκαν αμέσως μετά την ανάπτυξη της αντίστοιχης μεθοδολογίας σε άλλα εφαρμοσμένα πεδία, όπως στις κατασκευές τεχνικών έργων, στη ρευστομηχανική, κλπ. Τα τελευταία χρόνια, ιδιαίτερα με την αλματώδη ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων, η χρήση αριθμητικών μεθόδων βρίσκει ολοένα και περισσότερες εφαρμογές σε προβλήματα ευστάθειας και ελέγχου της συμπεριφοράς των μηχανικών.

Η χρήση αριθμητικών μεθόδων μπορεί να αποτελέσει ένα σημαντικό εργαλείο για το μηχανικό αφενός μεν κατά τη φάση του σχεδιασμού, αφετέρου δε κατά τη φάση της εκτελέσεως ενός έργου, με την προϋπόθεση ότι εφαρμόζεται σωστά, δηλαδή λαμβάνονται υπόψη κατά περίπτωση οι δυνατότητες και οι περιορισμοί της κάθε μεθόδου. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι καμία από τις ανωτέρω μεθόδους δεν θεωρείται κατάλληλη για την επίλυση του συνόλου των δυνατών προβλημάτων. Κάθε μέθοδος παρουσιάζει θετικά και αρνητικά στοιχεία ως προς την επίλυση ενός συγκεκριμένου προβλήματος. Έτσι πολλές φορές, είναι απαραίτητος ο συνδυασμός ή η σύγκριση περισσότερων της μιας μεθόδου, για την επίτευξη του καλύτερου δυνατού αποτελέσματος.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η αριθμητική επίλυση των καταστατικών εξισώσεων ενός προβλήματος με καθορισμένες συνοριακές συνθήκες έχει μια και μοναδική λύση. Πρέπει, όμως, σε κάθε περίπτωση να γίνεται μια ανάλυση ευαισθησίας (ή σταθερότητας) της μεθόδου, ούτως ώστε να εξασφαλίζεται ότι για μικρές

διακυμάνσεις των παραμέτρων ή / και συννοριακών συνθηκών του προβλήματος δεν προκύπτουν μεγάλες διακυμάνσεις των υπολογιζόμενων μεγεθών.

Κάθε μέθοδος έχει ορισμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, όσον αφορά στην εφαρμογή της σε συγκεκριμένο πρόβλημα, γι' αυτό και δεν διακρίνεται μια βέλτιστη μέθοδος, η οποία να παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε όλα τα προβλήματα ανάλυσης της εντατικής κατάστασης φυσικών σχηματισμών. Χαρακτηριστικά αναφέρονται μερικές από τις αριθμητικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων (Αγιουτάντης, 2002):

- η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (finite element method),
- η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (finite difference method),
- η μέθοδος των συννοριακών στοιχείων (boundary element method)
- η μέθοδος των διακριτών (ή διακεκριμένων) στοιχείων (distinct element method)
- υβριδικές μέθοδοι, οι οποίες συνδυάζουν χαρακτηριστικά από δύο ή περισσότερες μεθόδους

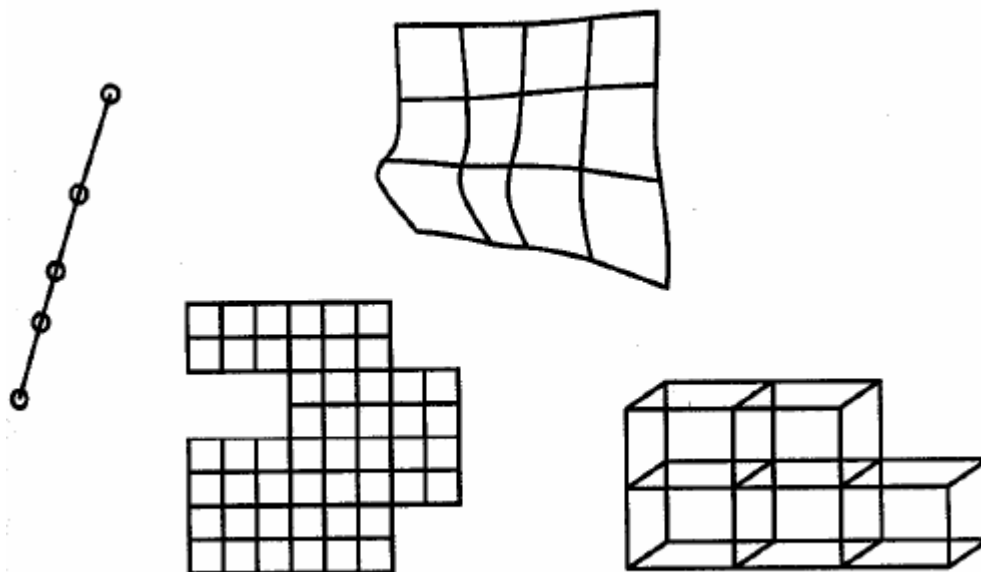
Η παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιεί αποκλειστικά τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

3.2 Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων

3.2.1 Ιστορικά στοιχεία

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια σχετικά νέα τεχνική η οποία πρωτοεμφανίστηκε τη δεκαετία του 1950. Από τότε βρίσκεται σε διαρκή εξέλιξη σε συνδυασμό με τη ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας των υπολογιστών. Σήμερα αποτελεί ένα αρκετά περίπλοκο εργαλείο επίλυσης προβλημάτων σε πολλούς θεωρητικούς ή εφαρμοσμένους επιστημονικούς τομείς.

Η ευρύτατη χρήση της μεθόδου από τους μηχανικούς και τους επιστήμονες βασίζεται στην ικανότητα των πεπερασμένων στοιχείων να περιγράφουν και να αναλύουν προβλήματα που είναι εξαιρετικά περίπλοκα και πολλές φορές, αδύνατο να επιλυθούν αναλυτικά. Η αναλυτική επίλυση ενός προβλήματος βασίζεται στην ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου το οποίο μπορεί να αποδώσει τις ζητούμενες μεταβλητές σε οποιοδήποτε σημείο του υπό ανάλυση σώματος. Η επίλυση αυτή μπορεί να γίνει μόνο για ορισμένα υπεραπλουστευμένα μοντέλα. Προβλήματα που αφορούν περίπλοκη γεωμετρία, ιδιότητες και συννοριακές συνθήκες είναι αδύνατον να επιλυθούν με αναλυτικές μεθόδους. Σε αυτή την περίπτωση οι αναλυτές καταφεύγουν στη χρήση αριθμητικών μεθόδων, μια εκ των οποίων είναι και αυτή των πεπερασμένων στοιχείων (Βιόπουλος, 2006).



Εικόνα 3.1. Περιπτώσεις διακριτοποίησης απλών σωμάτων (Αγιουτάντης, 2002).

3.2.2 Διαδικασία της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων

Η διαδικασία που ακολουθείται σε μια ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σε κάποιο λογισμικό πακέτο αποτελείται από τρία στάδια (Βιόπουλος, 2006):

1. Την προεπεξεργασία η οποία αποτελεί το βασικότερο μέρος ορισμού από το χρήστη των παραμέτρων της ανάλυσης. Σε αυτό το στάδιο γίνεται η διακριτοποίηση και η δημιουργία του προς ανάλυση μοντέλου. Εισάγονται οι εξισώσεις που διέπουν τους κόμβους, με την κατάλληλη επιλογή των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν και οι συνοριακές συνθήκες.
2. Την επεξεργασία που αποτελεί το καθαρά μαθηματικό μέρος της μεθόδου και κατά κύριο λόγο εκτελείται από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή με τη βοήθεια του λογισμικού. Σε αυτό το στάδιο πραγματοποιείται ο υπολογισμός των μητρώων και των διανυσμάτων κάθε στοιχείου ξεχωριστά. Στη συνέχεια πραγματοποιείται η σύνδεση των επιμέρους πινάκων και διανυσμάτων ώστε να δημιουργηθούν οι εξισώσεις που περιγράφουν όλο το μοντέλο που πρόκειται να αναλυθεί. Από τις εξισώσεις αυτές δημιουργείται το μητρώο ακαμψίας και τα διανύσματα όλου του μοντέλου. Σε αυτά εισάγονται και οι συνοριακές συνθήκες που επιδρούν στο μοντέλο. Στο τελευταίο μέρος αυτού του σταδίου πραγματοποιείται η επίλυση των εξισώσεων και η εύρεση των άγνωστων μεταβλητών στους κόμβους.
3. Την μετα-επεξεργασία όπου λαμβάνει χώρα η επεξεργασία των αποτελεσμάτων για να παρασταθούν στο μοντέλο οι τάσεις και οι

παραμορφώσεις. Συνήθως αυτές, εκτός από τις αριθμητικές τους τιμές μπορούν να παρασταθούν και γραφικά ώστε να είναι καλύτερα κατανοητές από τον μελετητή.

Στις ενότητες που ακολουθούν γίνεται μια προσπάθεια ανάλυσης των σταδίων που περιγράφηκαν παραπάνω για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

3.2.3 Διακριτοποίηση

Η διακριτοποίηση αποτελεί το πρώτο βήμα στη διαδικασία ανάλυσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Σκοπός της διακριτοποίησης είναι ο διαμερισμός του υπό εξέταση σώματος σε μικρότερα στοιχεία με τέτοιο τρόπο, ώστε η άγνωστη μεταβλητή να εκπροσωπείται με ικανοποιητικό τρόπο στη μάζα αυτού.

Στη διαδικασία της διακριτοποίησης πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή ώστε το μοντέλο που θα δημιουργηθεί να προσφέρει όσο το δυνατόν καλύτερη ακρίβεια, στο μικρότερο δυνατό χρόνο. Πιο συγκεκριμένα, οικονομία πεπερασμένων στοιχείων, άρα και του χρόνου ανάλυσης, μπορεί να επιτευχθεί από τη χρήση απλοποιημένης γεωμετρίας και την παρουσία συμμετρίας σε ένα μοντέλο.

Όλα τα σώματα και οι κατασκευές στην πραγματικότητα αποτελούνται από τρεις διαστάσεις. Πολλές φορές όμως, για λόγους απλότητας και ευκολίας, προβλήματα τριών διαστάσεων ανάγονται στο επίπεδο με μικρή μείωση της ακρίβειας της ανάλυσης. Αν η γεωμετρία και τα φορτία που ασκούνται σε κάποιο σώμα μπορούν να παρασταθούν σε ένα επίπεδο τότε το πρόβλημα μπορεί να μοντελοποιηθεί σε δύο διαστάσεις. Τέτοιου είδους σώματα είναι αυτά που διαθέτουν μια μεγάλη διάσταση σε σχέση με τις άλλες και σε αυτή τη διάσταση η γεωμετρία και τα φορτία που ασκούνται σε αυτή δεν μεταβάλλονται σημαντικά. Η ανάλυση αυτών μπορεί να γίνει με τη μοντελοποίηση με θεώρηση επίπεδης τάσης ή επίπεδης παραμόρφωσης.

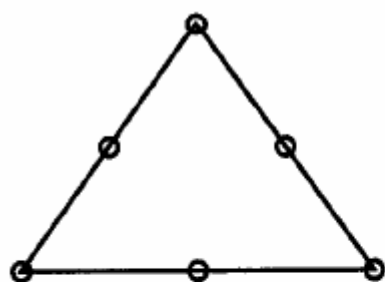
Εκτός από τη γεωμετρική απλοποίηση που μπορεί να πραγματοποιηθεί σε κάποιο σώμα που μελετάται, υπάρχει και η απλοποίηση λόγω συμμετρίας. Υπάρχουν κυρίως τέσσερα είδη συμμετρίας που συναντώνται στα προβλήματα μηχανικής: η αξονική, η επίπεδη, η κυκλική και η επαναλαμβανόμενη. Αν η γεωμετρία του σώματος και οι εξωτερικοί παράγοντες όπως είναι τα φορτία που δέχεται το σώμα παρουσιάζουν κάποιο από τα παραπάνω είδη συμμετρίας, μπορεί να αναλυθεί μέρος του σώματος που παρουσιάζει συμμετρία και όχι ολόκληρο. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στις συνοριακές συνθήκες που επιβάλλονται στο

μέρος του σώματος που αναλύεται ώστε πραγματικά να αντικατοπτρίζεται η συμμετρία του σώματος (Βιόπουλος, 2006).

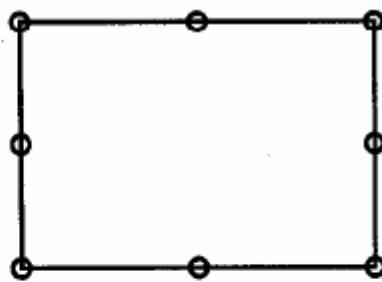
3.2.4 Είδη στοιχείων

Απαραίτητο στοιχείο για την εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων είναι όπως προαναφέρθηκε, η διακριτοποίηση, ή η διαίρεση του μέσου σε στοιχεία (elements) ή τμήματα με τη βοήθεια ιδεατών γραμμών ή επιφανειών. Τα στοιχεία αυτά αποτελούν από δύο ή περισσότερους κόμβους, οι οποίοι συνδέονται με καμπύλα ή ευθύγραμμα τμήματα. Οι κορυφές των στοιχείων ορίζουν τους κόμβους του πλέγματος ή κάνναβου διακριτοποίησης του προβλήματος.

Χαρακτηριστικές μορφές στοιχείων είναι τα μονοδιάστατα ή γραμμικά, τα τριγωνικά και ορθογωνικά ή γενικότερα τετραπλευρικά (quadrilateral) σε δύο διαστάσεις (σχήμα 4.2) και τα πυραμιδοειδή και πρισματικά (τρισδιάστατα). Οι απλούστερες μορφές στοιχείων είναι αυτές που χαρακτηρίζονται από το ότι ο αριθμός των κόμβων των στοιχείων είναι ίσος με τον αριθμό των πλευρών όπως για παράδειγμα τριγωνικά και τρικομβικά στοιχεία, τετραπλευρικά και τετρακομβικά (επίπεδα) στοιχεία, πυραμιδοειδή και τετρακομβικά (στερεά) στοιχεία, κλπ. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις, όπου ένα στοιχείο περιγράφεται από παραπάνω κόμβους και προκύπτουν τριγωνικά εξακομβικά στοιχεία, τετραπλευρικά και οκτακομβικά (επίπεδα) στοιχεία κλπ (Βιόπουλος, 2006).



τριγωνικό - εξακομβικό



ορθογωνικό - οκτακομβικό



γραμμικό - τρικομβικό

Εικόνα 3.2. Είδη στοιχείων (Αγιουτάντης, 2002)

3.2.5 Διαίρεση του πεδίου

Ένας από τους πλέον σημαντικούς παράγοντες για την επιτυχή προσομοίωση της συμπεριφοράς ενός σώματος με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, είναι η κατάλληλη διαίρεση του. Η διαδικασία διαίρεσης του σώματος (πεδίου) σε επιμέρους τμήματα (στοιχεία) περιλαμβάνει τις ακόλουθες παραμέτρους (Βιόπουλος, 2006):

- την επιλογή της γεωμετρικής μορφής του στοιχείου
- την επιλογή του αριθμού των κόμβων του στοιχείου
- την επιλογή της πυκνότητας του καννάβου

Η συνήθης πρακτική όσον αφορά στην επιλογή των διαστάσεων και της μορφής των στοιχείων είναι ότι χρησιμοποιούνται μικρότερα στοιχεία εκεί που αναμένονται μεγάλες μεταβολές των υπολογιζόμενων μεταβλητών.

Για παράδειγμα, στην ανάλυση σε δύο διαστάσεις, συνηθέστερα είναι τα τριγωνικά ή τετραπλευρικά στοιχεία με τρεις και τέσσερις κόμβους αντίστοιχα. Είναι δυνατόν, ανάλογα με τις απαιτήσεις του προβλήματος να αυξηθούν οι κόμβοι σε ένα στοιχείο και να χρησιμοποιηθούν τετραπλευρικά στοιχεία με οκτώ κόμβους.

Η διαίρεση του πεδίου γίνεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε το μέγεθος των στοιχείων να είναι μικρό στα σημεία όπου απαιτείται μεγάλη ακρίβεια στους υπολογισμούς, ή εκεί που αναμένεται έντονη μεταβολή του ζητούμενου μεγέθους, ενώ το μέγεθος των στοιχείων είναι μεγαλύτερο στις υπόλοιπες περιοχές του πεδίου.

3.2.6 Συνοριακές συνθήκες

Μετά την διαίρεση του χωρίου σε υποπεδία και την δημιουργία των καταστατικών εξισώσεων που τα διέπουν, προσαρτώνται στο μοντέλο που έχει κατασκευαστεί οι αρχικές και συνοριακές συνθήκες (boundary conditions). Η εισαγωγή των αρχικών και συνοριακών συνθηκών είναι απαραίτητη για την επίλυση του προβλήματος πεδίου.

Εάν σε ένα πρόβλημα απαιτούνται και αρχικές και συνοριακές συνθήκες, το πρόβλημα χαρακτηρίζεται ως πρόβλημα αρχικών συνοριακών τιμών.

Αντίθετα, αν δεν υπάρχει χρονοεξαρτώμενος όρος στη διαφορική εξίσωση, τότε απαιτούνται μόνο συνοριακές συνθήκες και το πρόβλημα είναι συνοριακών τιμών.

Σκοπός της εφαρμογής των συνοριακών συνθηκών είναι καταρχήν να αποδοθεί τουλάχιστον ένας τύπος καταπόνησης (μηχανική, θερμοκρασιακή, ακουστική, ηλεκτρομαγνητική, μαγνητοστατική, ροϊκή, διαχυτική κ.α.) στο μοντέλο που έχει κατασκευαστεί, και κατά δεύτερον να επιβληθούν περιοριστικές δυνάμεις, ώστε να κρατηθεί το μοντέλο σε ισορροπία. Η αξιοποίηση της συμμετρίας καθίσταται σημαντική διότι δύναται να λυθεί το μισό πρόβλημα, αντί όλου, έτσι ώστε να μειωθεί κατά το ήμισυ οι πράξεις και του χρόνου επίλυσης του προβλήματος.

Η φόρτιση του διαιρεμένου πεδίου, που αντιπροσωπεύει το υλικό, δύναται να επιτευχθεί με έναν ή περισσότερους από τους ακόλουθους τρόπους (Βιόπουλος, 2006):

- επιβολή δυνάμεων πεδίου στην μάζα του στοιχείου (πχ. βαρυτικές δυνάμεις, body forces).
- επιβολή σημειακών δυνάμεων στους κόμβους του στοιχείου (κομβικές δυνάμεις, nodal forces).
- επιβολή κατανεμημένων δυνάμεων στις πλευρές του στοιχείου (επιφανειακές δυνάμεις, traction forces).
- επιβολή μετατοπίσεων στους κόμβους του στοιχείου.

Οι βαρυτικές δυνάμεις εφαρμόζονται σε περιπτώσεις βραχομάζας, υπόγειων ανοιγμάτων και λοιπών προβλημάτων γεωμηχανικής. Από την άλλη, οι κομβικές δυνάμεις εφαρμόζονται σε μοντέλα υλικών όπου η φόρτιση είναι σημειακή. Οι δυνάμεις επιφάνειας έχουν εφαρμογή σε δοκίμια υλικών ή όπου αλλού δεν μπορούν να εφαρμοστούν οι προαναφερθέντες τρόποι φόρτισης.

Η επιβολή μετατοπίσεων στους συνοριακούς κόμβους εφαρμόζεται όταν υπάρχει ενδεδειγμένη συμμετρία στο μοντέλο, όπου κατά την περίπτωση αυτή οι μετατοπίσεις είναι μηδενικές στην διάσταση που είναι κάθετη στο σύνορο. Εφόσον δηλαδή υπάρχει συμμετρία του μοντέλου ως προς τον άξονα y , τότε, επάνω στο σύνορο η μετατόπιση ως προς την διάσταση x θα είναι μηδενική ($dx=0$) και αντιστρόφως. Η αξιοποίηση της συμμετρίας, όπως προαναφέρθηκε, και η κατάλληλη χρήση συνοριακών συνθηκών, δύναται να μειώσει σε σημαντικό βαθμό τον αριθμό των στοιχείων, κατά συνέπεια και των κόμβων στο χωρίο, με αποτέλεσμα να μειωθεί αισθητά και ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος.

Στην περίπτωση κατά την οποία φορτίζεται ένα σώμα και όλοι του οι κόμβοι είναι ελεύθεροι να κινηθούν, τότε δεν υφίσταται παραμόρφωση, αλλά απλή μετακίνηση (ή στροφή). Σε αυτή την περίπτωση δεν είναι δυνατή η επίλυση του προβλήματος, διότι το φαινόμενο δεν υπακούει στην ίδια καταστατική εξίσωση (Αγιουτάντης, 2002).

3.3 Μετάδοση θερμότητας

Ως θερμότητα ορίζεται η μορφή ενέργειας που μεταδίδεται μέσα από το όριο ενός θερμοδυναμικού συστήματος συγκεκριμένης θερμοκρασίας προς ένα άλλο σύστημα – ή στο περιβάλλον – που βρίσκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία, λόγω ακριβώς αυτής της διαφοράς θερμοκρασίας των δύο συστημάτων (Νικολός, 2007).

Η θερμότητα μεταδίδεται πάντα από σύστημα υψηλότερης προς σύστημα χαμηλότερης θερμοκρασίας. Η μοναδική αιτία αυτής της μεταφοράς ενέργειας είναι η διαφορά θερμοκρασίας. Πρέπει να σημειωθεί ότι το ίδιο το σύστημα δεν περιέχει θερμότητα. Η θερμότητα μπορεί να οριστεί μόνο στα όρια του συστήματος, κατά τη διαδικασία της μεταφοράς της από ένα σύστημα σε ένα άλλο και για όσο χρόνο διαρκεί η μεταφορά.

Για παράδειγμα, είναι γνωστό, αν τοποθετηθεί ένα κομμάτι θερμού μετάλλου σε κρύο νερό, το κομμάτι του μετάλλου ψύχεται, ενώ το νερό θερμαίνεται, έως ότου και τα δύο αποκτήσουν την ίδια θερμοκρασία. Η εξίσωση της θερμοκρασίας μεταξύ των δυο σωμάτων διαφορετική θερμοκρασίας οφείλεται στη ροή θερμότητας από το θερμό σώμα προς το ψυχρό. Η θερμότητα εμφανίζεται στα όρια των συστημάτων μέχρι να επέλθει θερμοκρασιακή ισορροπία στα δύο συστήματα.

Μετάδοση θερμότητας, είναι η μεταφορά ενέργειας λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς (Νικολός, 2007).

Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί μηχανισμοί με τους οποίους πραγματοποιείται αυτή η μεταφορά ενέργειας.

3.3.1 Μετάδοση ενέργειας λόγω αγωγής (conduction)

Πρόκειται για τη μετάδοση ενέργειας από στοιχειώδη σωματίδια χαμηλότερης ενέργειας, δια της μεταξύ τους αλληλεπίδρασης.

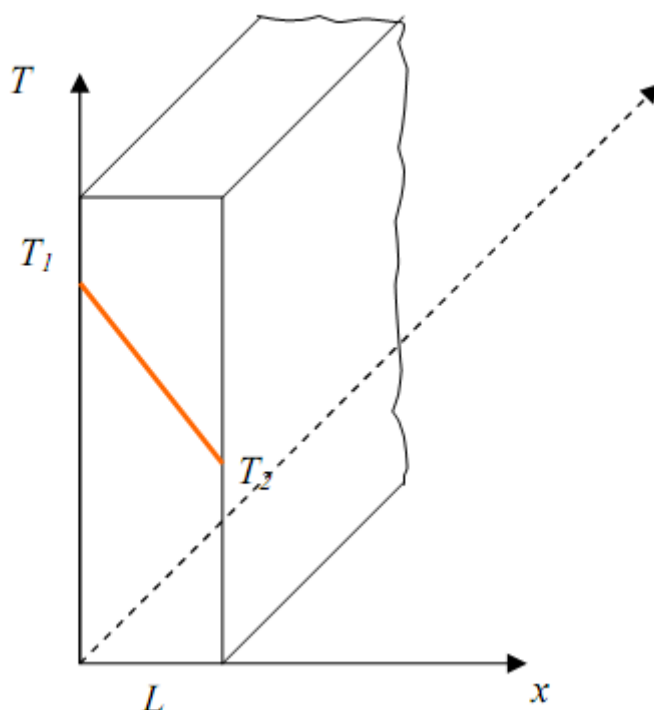
Για παράδειγμα, ας θεωρηθεί ένα αέριο το οποίο μακροσκοπικά βρίσκεται σε ακινησία, το οποίο βρίσκεται μεταξύ δύο επιφανειών διαφορετικής θερμοκρασίας. Η υψηλότερη θερμοκρασία σε κάποιο σημείο του αερίου συνδέεται με υψηλότερη ενέργεια των σωματιδίων του αερίου λόγω τυχαίας κίνησης, λόγω εσωτερικής περιστροφής και λόγω ταλάντωσης των ατόμων του κάθε μορίου του αερίου. Τα σωματίδια σε επαφή με την θερμότερη επιφάνεια διαθέτουν υψηλότερη ενέργεια, την οποία μεταδίδουν στα γειτονικά τους σωματίδια χαμηλότερης ενέργειας μέσω των μεταξύ τους συγκρούσεων. Έτσι στην περίπτωση παρουσίας θερμοκρασιακή κλίσης στο εσωτερικό του αερίου υπάρχει μετάδοση ενέργειας από την περιοχή της υψηλότερης θερμοκρασίας προς την περιοχή της χαμηλότερης θερμοκρασίας, μέσω

ακριβώς των συγκρούσεων των μορίων. Η μετάδοση αυτή της ενέργειας μέσω των τυχαίων συγκρούσεων των μορίων ονομάζεται διάχυση (diffusion) ενέργειας.

Η μετάδοση θερμότητας με αγωγή μακροσκοπικά περιγράφεται (μονοδιάστατα) από το νόμο του Fourier. Ας θεωρηθεί επίπεδο σώμα σταθερού πάχους L με τις άλλες δύο διαστάσεις του να εκτείνονται στο άπειρο (Νικολός, 2007). Αν επικρατεί σε μία πλευρά του θερμοκρασία T_1 και στην άλλη πλευρά του θερμοκρασία T_2 , μικρότερη της T_1 , ενώ η κλίση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του είναι σταθερή (γραμμική μεταβολή της θερμοκρασίας), τότε ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας κατά τη x διεύθυνση (κάθετα στο επίπεδο του σώματος) ανά μονάδα επιφάνειας, δίνεται από τον τύπο:

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx}$$

Το ανωτέρω μέγεθος ονομάζεται πυκνότητα ροής θερμότητας ή πυκνότητα θερμοροής (heat flux), ενώ η μονάδα μέτρησής του στο S.I. είναι W/m^2 . Εκφράζει τη θερμική ενέργεια που διέρχεται από μοναδιαία επιφάνεια στη μονάδα του χρόνου, λόγω της θερμοκρασιακής κλίσης σε διεύθυνση κάθετη στην εν λόγω επιφάνεια. Το αρνητικό πρόσημο στη σχέση οφείλεται στο γεγονός ότι η μετάδοση θερμότητας πραγματοποιείται από υψηλότερες προς χαμηλότερες θερμοκρασίες.



Εικόνα 3.3. Μονοδιάστατη μετάδοση θερμότητας με αγωγή σε σώμα πάχους L κατά τη x διεύθυνση και απείρων διαστάσεων στις υπόλοιπες διευθύνσεις (Νικολός, 2007).

Ο συντελεστής k στη σχέση ονομάζεται συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (thermal conductivity) και οι μονάδες μέτρησης στο S.I. είναι $W/(m.K)$. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας εξαρτάται από το υλικό στο οποίο εφαρμόζεται η θερμοκρασιακή κλίση, ενώ μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία (Νικολός, 2007).

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, που θεωρήθηκε σταθερή θερμοκρασιακή κλίση στο εσωτερικό το σώματος, η ανωτέρω σχέση γίνεται:

$$q_x'' = -k \frac{T_2 - T_1}{L} = k \frac{\Delta T}{L}$$

Ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης θερμότητας μέσα από την επιφάνεια, προκύπτει πολλαπλασιάζοντας με το εμβαδό A της επιφάνειας, δηλαδή:

$$q_x = q_x'' A = kA \frac{\Delta T}{L}$$

Στην καθημερινή ζωή υπάρχουν πολλά φαινόμενα τα οποία συνδέονται με τη μετάδοση θερμότητας με αγωγή, όπως η απώλεια θερμότητας από το εσωτερικό του σπιτιού προς το εξωτερικό περιβάλλον το χειμώνα, μέσα από τους τοίχους και τα παράθυρα, η μετάδοση θερμότητας από το μάτι της κουζίνας προς το μαγειρικό σκεύος κ.α. (Νικολός, 2007).

3.3.2 Μετάδοση ενέργειας λόγω συναγωγής (convection)

Η συναγωγή (ή επαγωγή) αναφέρεται στη μετάδοση θερμότητας σε κινούμενα ρευστά. Στην περίπτωση αυτή συνυπάρχουν δύο μηχανισμοί μετάδοσης ενέργειας. Ο πρώτος είναι η διάχυση ενέργειας μέσω των σωματιδιακών αλληλεπιδράσεων, όπως και στην περίπτωση της αγωγής, ενώ ο δεύτερος μηχανισμός συνδέεται με τη μακροσκοπική κίνηση του ρευστού. Κατά τη μακροσκοπική κίνηση του ρευστού τα στοιχειώδη σωματίδια που απαρτίζουν τα στοιχεία του ρευστού, μεταφέρουν μαζί με τη μάζα τους και τη θερμική ενέργεια που σχετίζεται με τη τυχαία μεταφορική κίνησή τους, της εσωτερική περιστροφή τους και την ταλάντωσή τους. Έτσι η συνολική μετάδοση θερμικής ενέργειας είναι το άθροισμα της μετάδοσης λόγω συγκρούσεων (διάχυση) και της μετάδοσης λόγω της μεταφοράς της θερμικής ενέργειας των σωματιδίων μέσω της μακροσκοπικής κίνησης του ρευστού (Νικολός, 2007).

Η κύρια περιοχή εφαρμογής της μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή είναι η μετάδοση από στερεή επιφάνεια προς κινούμενο ρευστό σε επαφή με την επιφάνεια, ή το αντίθετο. Είναι αποδεδειγμένο, από τη μηχανική των ρευστών, ότι

στη περιοχή επαφής του ρευστού με στερεή επιφάνεια αναπτύσσεται το λεγόμενο οριακό στρώμα ταχύτητα, ως αποτέλεσμα της δράσης των δυνάμεων συνεκτικότητας στο εσωτερικό του ρευστού. Στο οριακό στρώμα εμφανίζεται ομαλή μετάβαση από τη ταχύτητα της ροής μακριά από το τοίχωμα (ταχύτητα ελεύθερης ροής) στη μηδενική ταχύτητα στην επιφάνεια του ακίνητου τοιχώματος. Στην περίπτωση κινούμενης επιφάνειας, η ταχύτητα της ροής επάνω στην επιφάνεια ισούται με την ταχύτητα της επιφάνειας. Το πάχος του οριακού στρώματος αυξάνεται κατάντη της ροής.

Στην περίπτωση διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ της στερεής επιφάνειας και του ρευστού εμφανίζεται και το λεγόμενο θερμικό οριακό στρώμα (thermal boundary layer), του οποίου το πάχος μπορεί να είναι ίσο, μικρότερο ή μεγαλύτερο από αυτό του υδραυλικού οριακού στρώματος. Εντός του θερμικού οριακού στρώματος εμφανίζεται ομαλή μεταβολή της θερμοκρασίας από τη θερμοκρασία της στερεής επιφάνειας T_s έως τη θερμοκρασία της κύριας ροής T_0 . Στην περίπτωση που η πρώτη είναι μεγαλύτερη της δεύτερης, η ροή θερμότητας πραγματοποιείται από τη θερμή επιφάνεια στο θερμότερο ρευστό.

Η ροή που προκαλεί τη συναγωγή θερμότητας μπορεί να οφείλεται σε εξωτερικούς παράγοντες ή στην ίδια τη μετάδοση θερμότητας. Έτσι, στην περίπτωση των σωμάτων κεντρικής θέρμανσης ενός σπιτιού, ο θερμαινόμενος (αρχικά μόνο με αγωγή) ακίνητος αέρας, λόγω μείωσης της πυκνότητάς του, ανέρχεται, προκαλώντας φυσική κυκλοφορία στο εσωτερικό του δωματίου. Η φυσική αυτή κυκλοφορία δίνει την αναγκαία μεταφορική κίνηση για την εμφάνιση συναγωγής μεταξύ του θερμαντικού σώματος και του αέρα. Ο μηχανισμός της συναγωγής είναι πολύ εντονότερος από τον αντίστοιχο της αγωγής. Στην περίπτωση αυτή, το φαινόμενο ονομάζεται συναγωγή με φυσική κυκλοφορία (Νικολός, 2007).

Στην περίπτωση που η ροή του ρευστού συντηρείται από εξωτερικό αίτιο (π.χ. μια αντλία ή ένας ανεμιστήρας) τότε παρουσιάζεται μετάδοση θερμότητας με εξαναγκασμένη κυκλοφορία. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η ψύξη μιας θερμής επιφάνειας με τη χρήση ανεμιστήρα. Συνήθως μαζί με την εξαναγκασμένη κυκλοφορία συνυπάρχει και φυσική κυκλοφορία λόγω των δυνάμεων από τη μεταβολή των πυκνοτήτων.

Συνήθως η συναλλαγή θερμότητας με συναγωγή αναφέρεται στην εσωτερική θερμική ενέργεια, η οποία συνδέεται με τη θερμική του κίνηση. Υπάρχουν, όμως, περιπτώσεις όπου η μετάδοση θερμότητας συνοδεύεται από αλλαγή φάσης, δηλαδή περιλαμβάνει και τη λανθάνουσα θερμότητα αλλαγής φάσης. Παράδειγμα της συγκεκριμένης περίπτωσης είναι η μετάδοση θερμότητας προς το ρευστό από τις φυσαλίδες ατμού που ανέρχονται προς την επιφάνεια, σε δοχείο με νερό που βράζει. Αυτές προκαλούν ισχυρή κίνηση εντός του ρευστού, με αποτέλεσμα να

εντείνεται η συναγωγή. Η μετάδοση θερμότητας με συναγωγή όταν υπάρχει και αλλαγή φάσης είναι πολύ εντονότερη από την απλή περίπτωση της συναγωγής (Νικολός, 2007).

Το φαινόμενο της συναγωγής εξαρτάται από τη ροή του ρευστού (και τα χαρακτηριστικά της) και από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του ρευστού και της στερεής επιφάνειας. Μια γενική σχέση που περιγράφει τη μετάδοση θερμότητας με συναγωγή είναι ο νόμος του Newton για τη συναγωγή, ο οποίο δίνει την πυκνότητα ροής θερμότητας:

$$q_x'' = h(T_s - T_0)$$

Ο συντελεστής h ονομάζεται συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή και δίνεται σε W/m^2K , στο S.I. Η τιμή του εξαρτάται από το είδος της ροής, τη μορφή της επιφάνειας και τα θερμοδυναμικά και ρευστομηχανικά χαρακτηριστικά του ρευστού. Ο προσδιορισμός του συνήθως απαιτεί καλή γνώση ρευστομηχανικής, ενώ για τυπικές ροές η τιμή του βρίσκεται από πίνακες και διαγράμματα.

Ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης θερμότητας μέσα από την επιφάνεια, προκύπτει πολλαπλασιάζοντας με το εμβαδό A της επιφάνειας, δηλαδή:

$$q_x = q_x'' A = Ah(T_s - T_0)$$

3.3.3 Μετάδοση ενέργειας με ακτινοβολία (thermal radiation)

Κάθε σώμα (στερεό, υγρό ή αέριο), το οποίο βρίσκεται σε θερμοκρασία διαφορετική από $0^\circ K$, εκπέμπει θερμική ακτινοβολία. Η ακτινοβολία (σε μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων – φωτονίων) δημιουργείται με αλλαγές στην ενεργειακή κατάσταση των ηλεκτρονίων των ατόμων του σώματος. Σε αντίθεση με τους δύο προηγούμενους μηχανισμούς, η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία δεν απαιτεί την ύπαρξη ύλης, αλλά μπορεί να πραγματοποιείται εν κενώ (Νικολός, 2007).

Η ακτινοβολία που εξέρχεται από την εξωτερική επιφάνεια ενός σώματος, παράγεται στο εσωτερικό του και ο ρυθμός με τον οποίο η ενέργεια εξέρχεται από μοναδιαίο εμβαδόν την επιφάνειας καλείται πυκνότητα εκπεμπόμενη ακτινοβολίας E_b , ενώ η μέγιστη τιμή της E_b δίνεται από το νόμο Stefan – Boltzman ως:

$$E_b = \sigma \cdot T_s^4$$

Όπου:

- T_s , απόλυτη θερμοκρασία της επιφάνειας σε °K, και
- σ , η σταθερά των Stefan – Boltzman ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} / \text{m}^2 \text{K}^4$)

Η επιφάνεια που εκλύει τη μέγιστη αυτή ισχύ ακτινοβολίας ονομάζεται μέλαν σώμα (black body). Σε μια πραγματική επιφάνεια η ακτινοβολούσα ισχύς είναι, προφανώς, μικρότερη για την ίδια θερμοκρασία και δίνεται από τον τύπο:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4$$

όπου: ε , η ικανότητα εκπομπής (emissivity) της επιφάνειας, με τιμές μεταξύ 0 και 1. Η τιμή της εξαρτάται από το υλικό και τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας και δείχνει πόσο προσεγγίζει η συγκεκριμένη επιφάνεια το μέλαν σώμα.

Εκτός από την εκπομπή ακτινοβολίας από μια επιφάνεια, γίνεται και πρόσπτωση ακτινοβολίας, η οποία παράγεται εκτός της επιφάνειας. Αν G η πυκνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας), τότε ένα τμήμα της μπορεί να απορροφηθεί από το σώμα, αυξάνοντας την εσωτερική του ενέργεια, ένα τμήμα μπορεί να ανακλαστεί, ενώ το υπόλοιπο τμήμα μπορεί να διαπεράσει το σώμα, εάν αυτό είναι ημιδιαφανές (Νικολός, 2007).

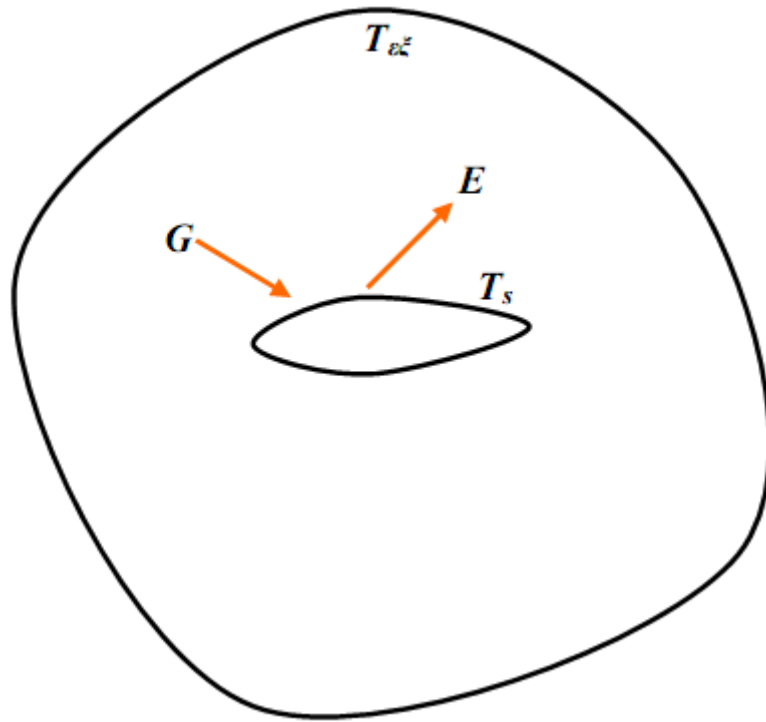
Το ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που απορροφάται από το σώμα περιγράφεται με την απορροφητικότητα α , οπότε ισχύει:

$$G_{\text{απορρ}} = \alpha \cdot G$$

Προφανώς, η απορροφητικότητα παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 1. Η απορροφητικότητα της επιφάνειας δεν εξαρτάται μόνο από την επιφάνεια αλλά και από το είδος της ακτινοβολίας. Η ίδια επιφάνεια μπορεί να έχει διαφορετική απορροφητικότητα σε ακτινοβολίες διαφορετικού μήκους κύματος. Μόνο η απορροφώμενη ακτινοβολία μεταβάλλει την εσωτερική ενέργεια του σώματος, ενώ η ανακλώμενη και η ακτινοβολία που διαπερνά το σώμα δεν έχουν καμία επίδραση σε αυτή.

Μια ειδική περίπτωση της μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία αφορά στην περίπτωση μιας μικρής επιφάνειας η οποία περικλείεται ολοκληρωτικά από μια αρκετά μεγαλύτερη επιφάνεια, η οποία βρίσκεται σε διαφορετική, σταθερή, θερμοκρασία $T_{\text{εξ}}$. Μια τέτοια περίπτωση επιφάνειας είναι τα τοιχώματα ενός φούρνου. Στην περίπτωση αυτή η προσπίπτουσα ακτινοβολία στη μικρή εσωτερική επιφάνεια θερμοκρασίας T_s μπορεί να προσεγγιστεί από την ακτινοβολία που παράγει ένα μέλαν σώμα θερμοκρασίας $T_{\text{εξ}}$, δηλαδή:

$$G = \sigma \cdot T_{\text{εξ}}^4$$



Εικόνα 3.4. Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία μεταξύ δύο επιφανειών, όπου η μια περικλείει την άλλη. Οι δύο επιφάνειες βρίσκονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες (Νικολός, 2007).

Στην ειδική περίπτωση κατά την οποία υποτίθεται ότι η μικρή επιφάνεια είναι μια γκρίζα επιφάνεια, θα ισχύει:

$$\alpha = \varepsilon$$

Η καθαρή ισχύς ανά μονάδα επιφανείας που εξέρχεται από την μικρή εσωτερική επιφάνεια εμβαδού A θα δίνεται:

$$q_{rad}'' = \frac{q_{rad}}{A} = \varepsilon \cdot E_b - \alpha \cdot G = \varepsilon \cdot E_b - \varepsilon \cdot G = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_{\varepsilon\xi}^4)$$

Η παραπάνω σχέση δίνει την καθαρή ισχύ που απελευθερώνεται από την επιφάνεια ως αποτέλεσμα της ισχύος που απορροφάται και της ισχύος που εκλύεται, λόγω της υπάρχουσας διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ της εσωτερικής και της περικλείουσας επιφανείας (Νικολός, 2007).

Η θερμική ισχύς που ακτινοβολείται συχνά εκφράζεται σε μορφή αντίστοιχη με αυτή που μεταδίδεται με συναγωγή, δηλαδή:

$$q_{rad} = h_{rad} \cdot A \cdot (T_s - T_{\varepsilon\xi})$$

όπου: h_{rad} , ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία, ο οποίος δίνεται από:

$$h_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s + T_{\varepsilon}^{\infty}) \cdot (T_s^2 + T_{\varepsilon}^{\infty 2})$$

Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία μεταβάλλεται αισθητά με τη θερμοκρασία. Πρακτικά σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις, γραμμικοποίηση της σχέσης δίνει τη μεταδιδόμενη με ακτινοβολία ισχύ, στην περιοχή των θερμοκρασιών της μικρής εσωτερικής και της περικλείουσας επιφάνειας. Η ανωτέρω μοντελοποίηση είναι χρήσιμη σε περίπτωση που εμφανίζεται ταυτόχρονη μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία και συναγωγή (Νικολός, 2007).

3.4 Εξισώσεις θερμότητας

Η παρούσα διπλωματική εργασία, ασχολείται αποκλειστικά με τη θερμομηχανική εξομοίωση υπόγειου ανοίγματος σε λογισμικό Ανάλυσης Πεπερασμένων Στοιχείων.

Η προσομοίωση / επίλυση ενός συζευγμένου (coupled) προβλήματος συνήθως περιλαμβάνει μια σταδιακή διαδικασία, κατά την επίλυση της οποίας κάθε μεμονωμένο πρόβλημα προσεγγίζεται με τη σειρά του σε κάθε βήμα επίλυσης χρησιμοποιώντας δεδομένα του προηγούμενου βήματος. Στην περίπτωση μιας θερμομηχανικής εξομοίωσης, το θερμικό μέρος του προβλήματος επιλύεται πρώτα ακολουθούμενο από την επίλυση του μηχανικού προβλήματος.

Θερμικές τάσεις αναπτύσσονται γενικά μόνο όταν εξαλειφθούν οι θερμικές παραμορφώσεις. Σε απλές δοκούς υποστήριξης, η γραμμική διακύμανση της θερμοκρασίας σε βάθος των μελών, δεν θα αναπτύξει θερμικές τάσεις εκτός αν οριστούν αξονικοί περιορισμοί. Παρόμοιες θερμοκρασιακές καταστάσεις σε συνεχείς κατασκευές θα οδηγήσει στην ανάπτυξη θερμικών τάσεων, ροπών και δυνάμεων στήριξης. Μη-γραμμική θερμοκρασιακή κατανομή οδηγεί σε ανάπτυξη τάσεων όλων των ειδών. Για τις περισσότερες κατασκευές, χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες παραδοχές, για την απλούστευση της ανάλυσης:

- το υλικό είναι ομοιογενές και ισότροπο
- η δυσκαμψία του υλικού είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασίας
- το υλικό χαρακτηρίζεται από γραμμική σχέση τάσης-παραμόρφωσης και θερμοκρασίας-καταπόνησης. Οπότε, οι θερμικές τάσεις μπορούν, να θεωρηθούν ανεξάρτητες από το τασικό φορτίο και λοιπές επιβαλλόμενες φορτίσεις.
- οι επίπεδες διατομές παραμένουν επίπεδες, μετά από κάμψη

- οι διαμήκεις και εγκάρσιες θερμικές αποκρίσεις της δομής (στην ελαστική περίπτωση) μπορούν να υπολογιστούν ανεξάρτητα και τα αποτελέσματα να υπερτεθούν.

Σε συνεχείς δομές, εκτός ειδικών περιπτώσεων, μη ομογενοποιημένες περιοχές θερμοκρασίας, προκαλούν, συνήθως, θερμικές τάσεις. Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, χρησιμοποιείται πολύ συχνά για την αντιμετώπιση του προβλήματος.

Σε περίπτωση γραμμικής θερμο-ελαστικότητας ο τανυστής τάσης σχετίζεται με τον τανυστή ανηγμένης παραμόρφωσης καθώς επίσης και με μια θερμική ιδιότητα όπως φαίνεται στην παρακάτω σχέση:

$$\sigma_{ij} = 2G \left[\varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} \left(\varepsilon_{kk} - \frac{1+\nu}{\nu} a(T-T_0) \right) \delta_{ij} \right]$$

Όπου:

- $T-T_0$, η διαφορά της θερμοκρασίας T από την αρχική θερμοκρασία T_0 , στην οποία οι τάσεις και παραμορφώσεις είναι μηδενικές.
- ε_{ij} , ο τανυστής ανηγμένης παραμόρφωσης
- G , το μέτρο ελαστικότητας σε διάτμηση,
- ν , ο λόγος του Poisson,
- a , ο συντελεστής θερμικής διαστολής, και
- δ_{ij} , ο μοναδιαίος πίνακας

Παρόλο που ο συντελεστής θερμικής διαστολής εξαρτάται από την καταπόνηση, σε αυτή την πρώτη προσέγγιση θεωρείται σταθερός. Οπότε, σε ένα ισότροπο υλικό η περιγραφή της θερμοκρασιακής κατανομής για ένα σώμα το οποίο θερμαίνεται, δίνεται από της εξίσωση που περιγράφει το πρώτο θερμοδυναμικό αξίωμα:

$$k \nabla^2 T = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \dot{Q}(x, y, z, t)$$

Όπου:

- k , η θερμική αγωγιμότητα,
- C_p , η ειδική θερμότητα του υλικού, και
- $\dot{Q}$, ο ρυθμός ροής θερμότητας ανά μονάδα όγκου στο υλικό

Ο συντελεστής θερμικής διαστολής α του σκυροδέματος, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως τον τύπο των αδρανών, την αναλογία των υλικών, τη θερμοκρασία καθώς και το κατά πόσο αφήνεται το σκυρόδεμα αφήνεται να στεγνώσει κατά τη θέρμανση. Η επιρροή των χονδρόκοκκων αδρανών φαίνεται να είναι εντονότερη από αυτή των λεπτόκοκκων. Εργαστηριακά πειράματα έχουν δείξει ότι ο συντελεστής δεν μεταβάλλεται μέχρι τη θερμοκρασία των 250 °C. Σε γενικές γραμμές ο συντελεστής βρίσκεται μεταξύ των τιμών 6×10^{-6} (λεπτόκοκκα ασβεστολιθικά αδρανή) και 13×10^{-6} (ασβεστολιθικό χαλίκι) ανά °C, για θερμοκρασίες μικρότερες των 250 °C.

Ο Πίνακας 3.1 παρουσιάζει τη μείωση της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας του σκυροδέματος (τύπου Portland, χαλαζιακά αδρανή) μετά από ψύξη σε διάφορες υψηλές θερμοκρασίες.

Θερμοκρασία (°C)	20	200	300	400	500	600	800
Αντοχή (%)	100	80	70	60	40	20	10
Μέτρο Ελαστικότητας (%)	100	60	50	40	30	10	5

Πίνακας 3.1. Μείωση αντοχής και μέτρου ελαστικότητας σκυροδέματος (Hetnarski, 1996)

Το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb εμφανίζεται να είναι το πλέον κατάλληλο κριτήριο περιγραφής σκυροδέματος. Το κριτήριο Mohr-Coulomb εκφράζεται από τη σχέση:

$$|\tau| = c - \sigma \tan \varphi$$

Όπου:

- τ , οι διατμητική τάση,
- σ , η ορθή τάση,
- c , η συνοχή του υλικού, και
- φ , η γωνία εσωτερικής τριβής του υλικού

Η παραπάνω εξίσωση είναι γνωστή ως «εξίσωση του Coulomb» και αναπαριστάται γραφικά ως μια ευθεία γραμμή (η πλέον απλή μορφή του φακέλου του Mohr). Ο γραμμικός αυτός φάκελος, παρέχει μια καλή προσέγγιση της αστοχίας των εύθραυστων και όλκιμων υλικών, όπως το σκυρόδεμα, σε μέση καταπόνηση. Πρέπει να σημειωθεί, ότι η δυνατότητα εφαρμογής του κριτηρίου αστοχίας Hoek-Brown σε εφαρμογές σκυροδέματος, είναι υπό διερεύνηση.

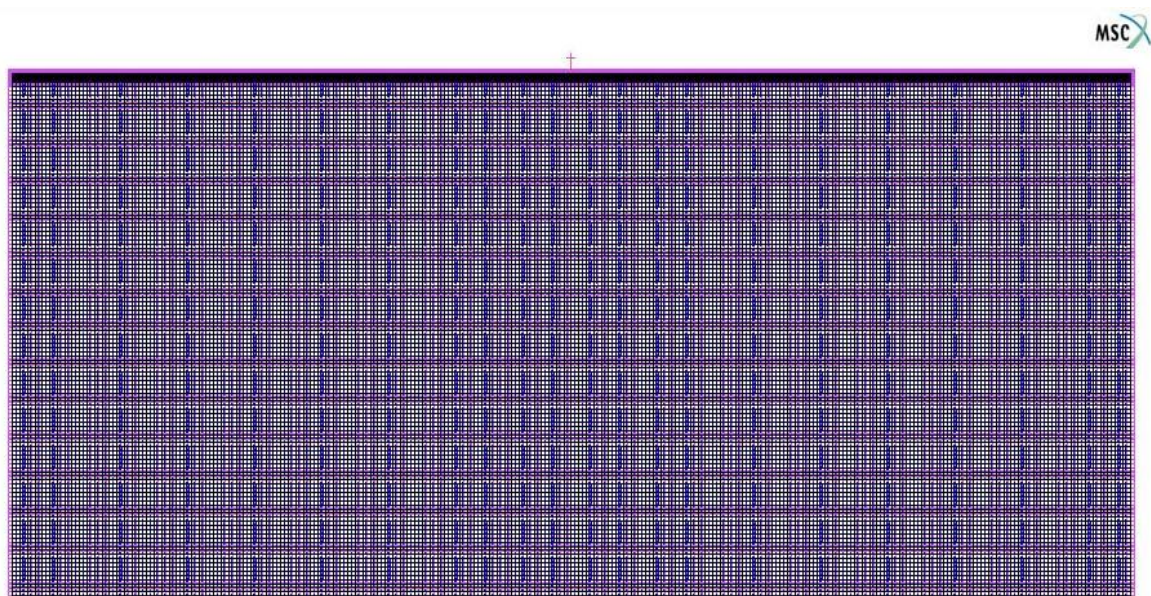
Κεφάλαιο 4

Αριθμητικά μοντέλα

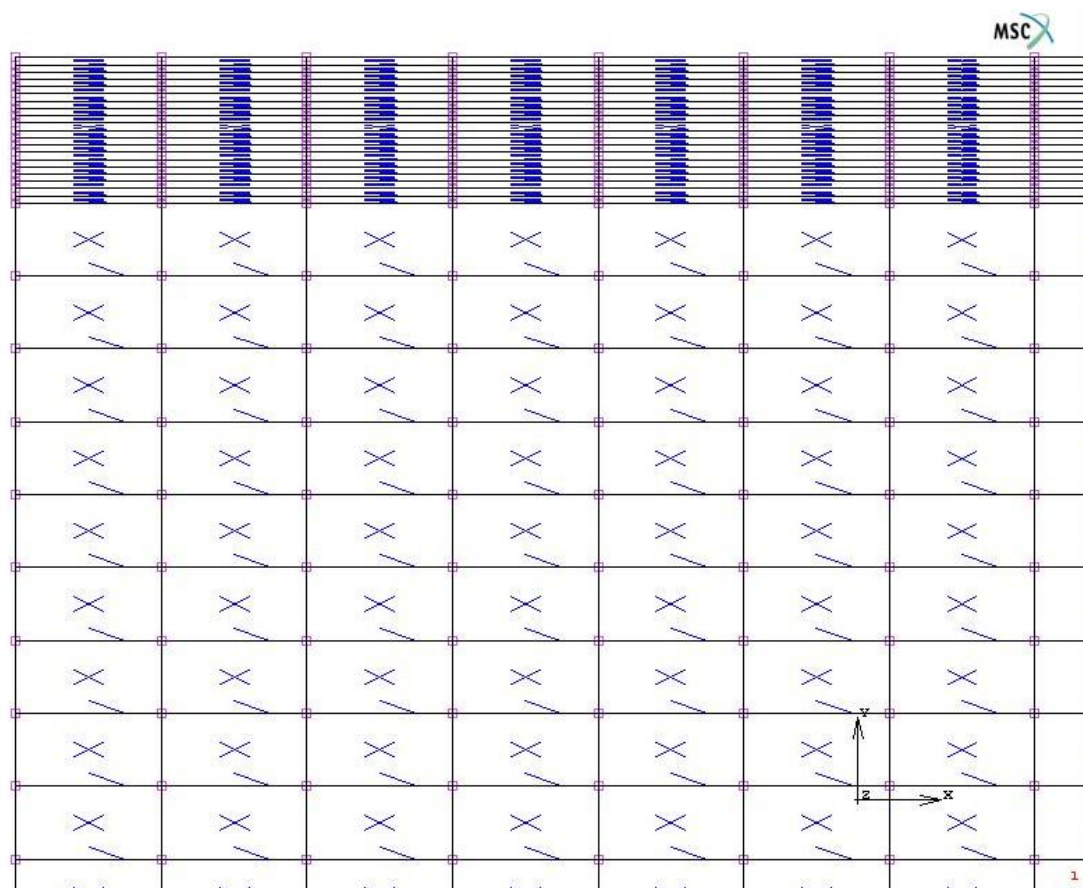
4.1 Απλό ορθογωνικό μοντέλο

Προτού μοντελοποιηθεί η σήραγγα, που είναι και το θέμα της τρέχουσας διπλωματικής εργασίας, θεωρήθηκε σκόπιμο να κατασκευαστεί ένα απλό ορθογωνικό μοντέλο δύο διαστάσεων, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για τη βαθμονόμηση και την επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων και συνοριακών συνθηκών του μοντέλου της σήραγγας.

Το μοντέλο σχεδιάστηκε ορθογωνικό, με μήκος 30 m και πλάτος 12.6 m, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.1. Στην Εικόνα 4.2, διακρίνεται το ανώτερο τμήμα του ορθογωνικού μοντέλου.



Εικόνα 4.1. Η διακριτοποίηση του απλού μοντέλου



Εικόνα 4.2. Τμήμα διακριτοποίησης του ανώτερου τμήματος του μοντέλου

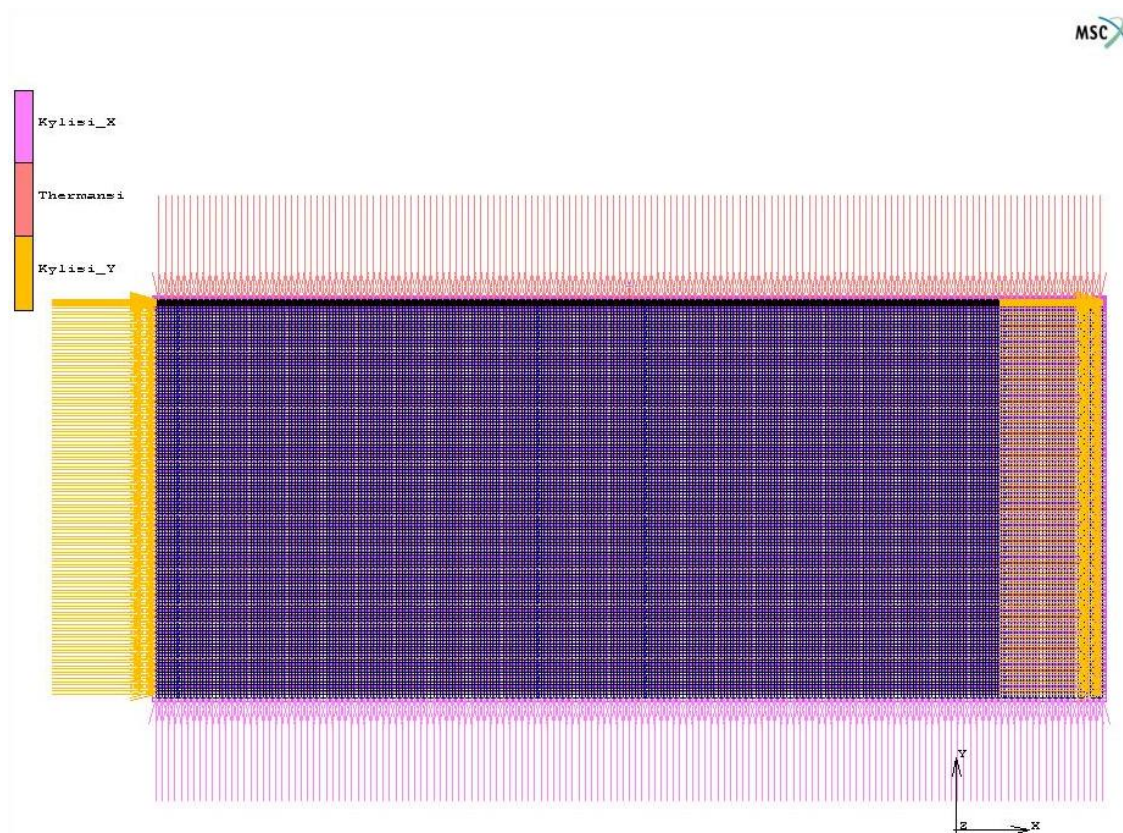
Ως ιδιότητες του υλικού χρησιμοποιήθηκαν αυτές του σκυροδέματος και φαίνονται στον Πίνακα 4.1.

Μηχανικές ιδιότητες			Θερμικές ιδιότητες		
Πυκνότητα ρ (kg/m^3)	Μέτρο ελαστικότητας E (GPa)	Λόγος Poisson ν	Συντελεστής θερμικής διαστολής α ($1/^\circ C$)	Θερμική αγωγιμότητα k ($kcal/s \cdot m \cdot ^\circ C$)	Ειδική θερμότητα C_p ($kcal/kg \cdot ^\circ C$)
2300	30	0.2	12×10^{-6}	4.06×10^{-4}	0.18

Πίνακας 4.1. Μηχανικές και θερμικές ιδιότητες του υλικού (engineeringtoolbox.com)

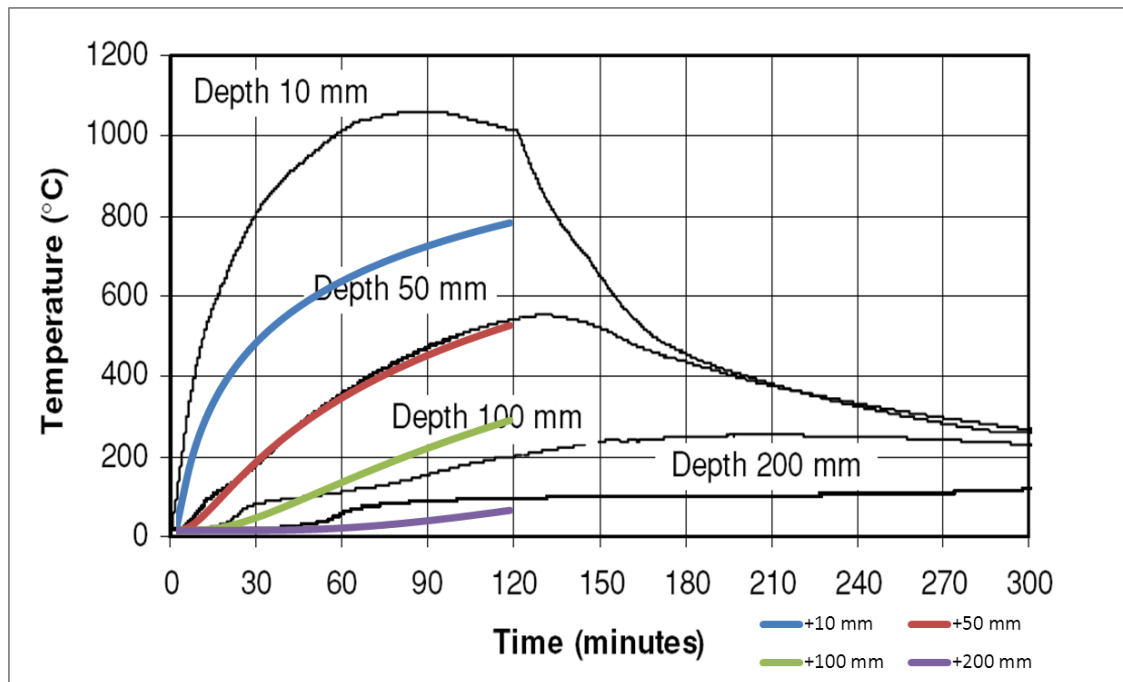
Το μοντέλο διακριτοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τετραγωνικά στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης (four-node plane strain quadrilateral elements, Type 3). Από τη διακριτοποίηση προέκυψαν 21600 στοιχεία και 21895 κόμβοι. Οι συνοριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν έχουν ως εξής: κυλίσεις κατά τη διεύθυνση του οριζόντιου άξονα (x) στη βάση του μοντέλου, κυλίσεις κατά τη διεύθυνση του κατακόρυφου άξονα (y) αριστερά και δεξιά του μοντέλου. Η θέρμανση επιτεύχθηκε με την επιβολή θερμικής μεμβράνης στις ακμές (thermal edge film) του ανώτερου τμήματος του μοντέλου. Η συνοριακή συνθήκη περιγράφει θέρμανση μέχρι τους $1350^\circ C$. Η αρχική θερμοκρασία, τέθηκε στους $20^\circ C$ και

χρονική διάρκεια της θέρμανσης ορίστηκε για 2 ώρες. Στην Εικόνα 4.3, διακρίνονται οι συνοριακές συνθήκες που αναλύονται παραπάνω.

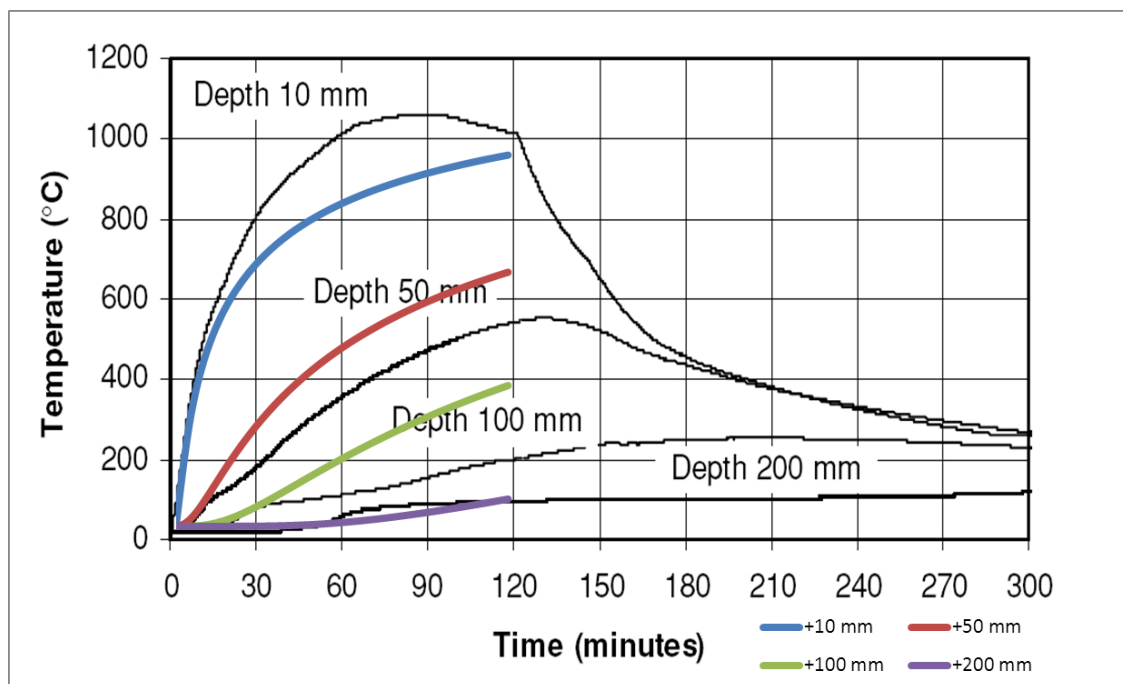


Εικόνα 4.3. Οι θερμομηχανικές συνοριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν στο απλοποιημένο μοντέλο

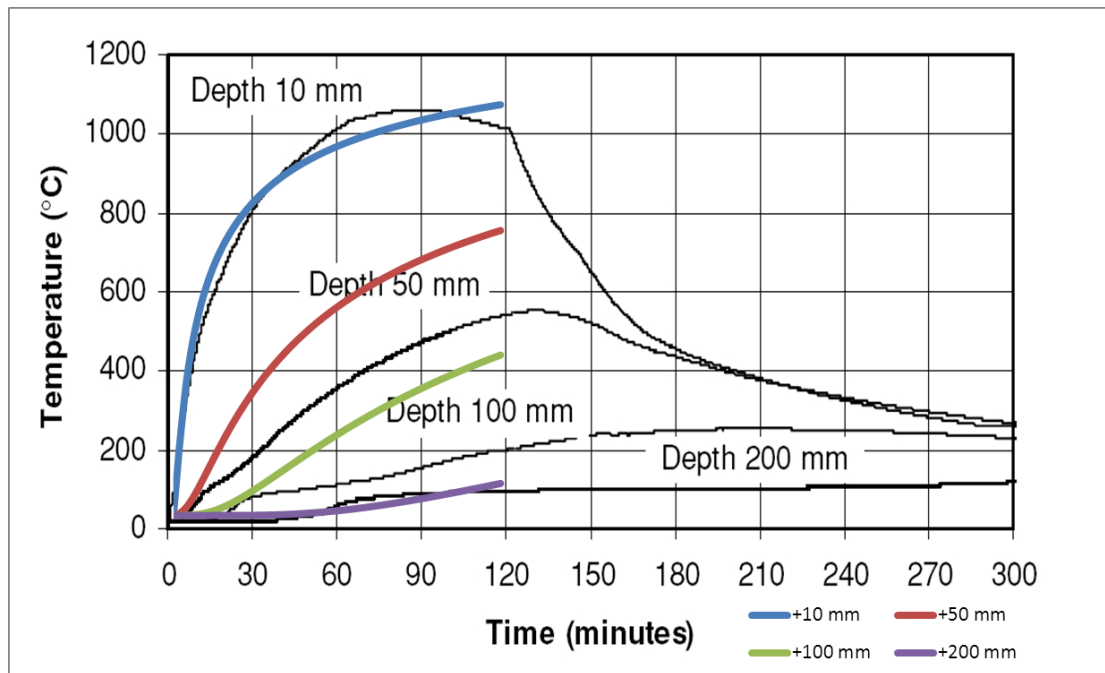
Ο Hatmathy (1985) όρισε ένα ενδεδειγμένο συντελεστή θερμικής διαστολής για το σκυρόδεμα της τάξης των 50 W/m^2 . Το ορθογωνικό μοντέλο επιλύθηκε, ωστόσο, με τρεις διαφορετικούς συντελεστές θερμικής διαστολής, στους 25 , 50 και 75 W/m^2 (ή 0.006 , 0.012 και $0.018 \text{ kcal/s.m}^2.\text{°C}$). Στις Εικόνες 4.4 – 4.6 παρουσιάζονται οι θερμικές αποκρίσεις του απλού ορθογωνικού μοντέλου και συγκεκριμένα της σύγκλισης της κατανομής θερμοκρασίας που έχουν προσδιοριστεί πειραματικά, σε σχέση με τις πρότυπες καμπύλες RWS (Bostrom & Larsen, 2006) σε διαφορετικά βάθη από την επιφάνεια επιβολής της συνοριακής συνθήκης σε συνάρτηση με το χρόνο.



Εικόνα 4.4. Η θερμική απόκριση του απλού μοντέλου σκυροδέματος, για συντελεστή θερμικής διαστολής 25 W/m^2 , συγκρινόμενη με τις πειραματικές καμπύλες RWS (Bostrom & Larsen, 2006) για διάφορα βάθη από τη θερμαινόμενη επιφάνεια.



Εικόνα 4.5. Η θερμική απόκριση του απλού μοντέλου σκυροδέματος, για συντελεστή θερμικής διαστολής 50 W/m^2 , συγκρινόμενη με τις πειραματικές καμπύλες RWS (Bostrom & Larsen, 2006) για διάφορα βάθη από τη θερμαινόμενη επιφάνεια.



Εικόνα 4.6. Η θερμική απόκριση του απλού μοντέλου σκυροδέματος, για συντελεστή θερμικής διαστολής 75 W/m^2 , συγκρινόμενη με τις πειραματικές καμπύλες RWS (Bostrom & Larsen, 2006) για διάφορα βάθη από τη θερμαινόμενη επιφάνεια.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου με συντελεστή θερμικής διαστολής της τάξεως των 50 W/m^2 , προσεγγίζει σημαντικά, κατά μέσο, όρο τις πρότυπες καμπύλες της βιβλιογραφίας (Εικόνα 4.5) σε σχέση με τις υπόλοιπες τιμές που δοκιμάστηκαν, λαμβάνοντας υπόψη ότι η τιμή στην οποία τέθηκε ο συντελεστής θερμικής διαστολής είναι διπλάσια από την προτεινόμενη βιβλιογραφία (Hatmathy, 1985). Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η αριθμητική προσομοίωση του απλού ορθογωνικού μοντέλου, λαμβάνει υπόψη μόνο μεταφορά θερμότητας με συναγωγή, ενώ οι πρότυπες καμπύλες RWS, κατασκευάστηκαν από πειραματικά δεδομένα πραγματικής απόκρισης σκυροδέματος σε περίπτωση πυρκαγιάς, στην οποία λαμβάνουν μέρος και οι τρεις μηχανισμοί μετάδοσης θερμότητας που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 3.3.

4.2 Μοντέλο σήραγγας εγκάρσιας διατομής

Στη συνέχεια, μοντελοποιήθηκε μία δισδιάστατη εγκάρσια διατομή σήραγγας, στο λογισμικό MSC.Marc Mentat 2005r3.

Οι συνολικές διαστάσεις του μοντέλου ορίστηκαν σε $10\text{m} \times 10\text{m}$. Σε περιπτώσεις μοντελοποίησης σήραγγας, όπως η συγκεκριμένη, η οριζόντια έκταση που σχεδιάζεται το μοντέλο, πρέπει να είναι τουλάχιστον τριπλάσια από την αντίστοιχη του ανοίγματος. Στην προκειμένη περίπτωση, το άνοιγμα και ο σχεδιασμός του μοντέλου τέθηκαν ίσα με 5 m , για λόγους απλοποίησης και οικονομίας χρόνου επίλυσης. Η ακτίνα του ανοίγματος 5 m , ενώ η επένδυση του

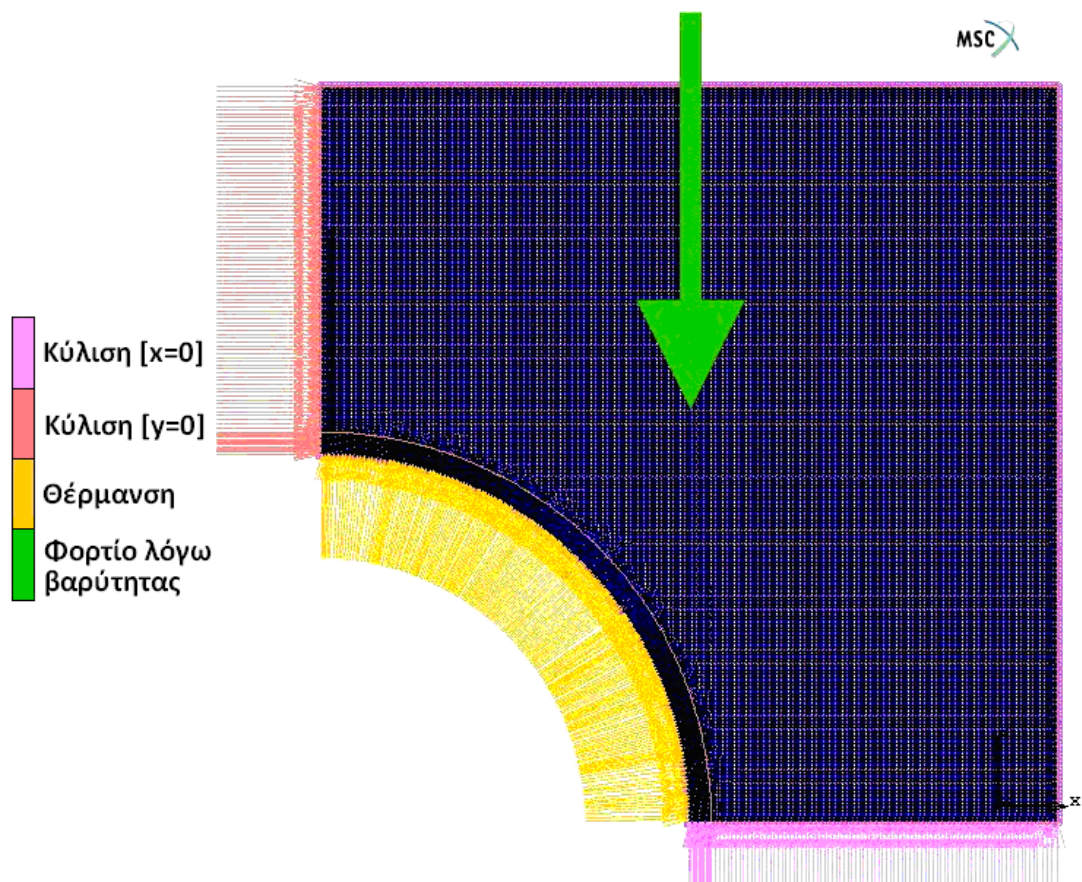
σκυροδέματος είχε πάχος 30 cm. Σε όλο το περιβάλλον υλικό δόθηκαν ιδιότητες ασβεστολιθικού πετρώματος. Η μοντελοποίηση έγινε, χρησιμοποιώντας τετραγωνικά στοιχεία επίπεδης παραμόρφωσης (four-node plane strain quadrilateral elements, Type 3). Από τη διακριτοποίηση προέκυψαν 31452 στοιχεία και 31843 κόμβοι, εκ των οποίων 2424 στοιχεία και 2639 κόμβοι ανήκουν στην επένδυση, ενώ 29028 στοιχεία και 29407 κόμβοι ανήκουν στο πέτρωμα. Η διακριτοποίηση έγινε σε συμμετρία $\frac{1}{2}$ του συνολικού ανοίγματος λόγω συμμετρίας του μοντέλου και έχει σαν συνέπεια, ταχύτερο σχεδιασμό και επίλυσή του.

Οι συνοριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν (Εικόνα 4.7) έχουν ως εξής:

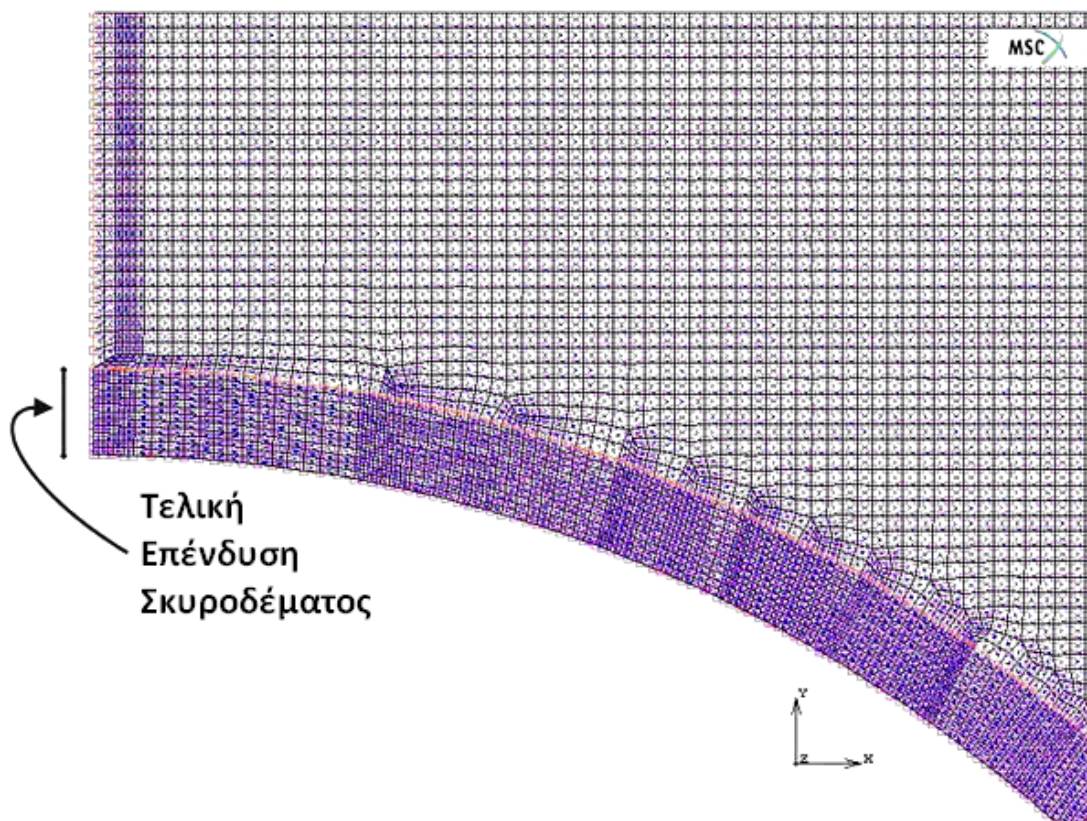
- κύλιση κατά τη διεύθυνση του οριζόντιου άξονα (x) στη βάση του μοντέλου,
- κύλιση κατά τη διεύθυνση του κατακόρυφου άξονα (y) αριστερά του μοντέλου,
- θερμική μεμβράνη περιμετρικά (thermal edge film) της επένδυσης (Η συνοριακή συνθήκη περιγράφει θέρμανση μέχρι τους 1350 °C με συντελεστή μετάδοσης της θερμότητας h ίσο με 50 W/m² (ή 0.012 kcal/s.m².°C)), και
- φορτίο λόγω βαρύτητας, σε όλα τα στοιχεία του μοντέλου ίση με 9.81 m/s².

Στην Εικόνα 4.8 φαίνεται μια λεπτομέρεια της διακριτοποίησης, στην οποία διακρίνεται η τελική επένδυση του σκυροδέματος σε μια περιοχή κοντά στη στέψη της σήραγγας καθώς και η διακριτοποίηση στην ευρύτερη περιοχή.

Κατά τη διάρκεια μιας πραγματικής πυρκαγιάς, λαμβάνουν χώρα και οι τρεις μηχανισμοί μετάδοσης θερμότητας (αγωγή, συναγωγή, ακτινοβολία). Για λόγους απλοποίησης, η συνοριακή συνθήκη που περιγράφει τη θέρμανση περιέχει μόνο το μηχανισμό της συναγωγής.



Εικόνα 4.7. Οι θερμομηχανικές συνοριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν στη σήραγγα



Εικόνα 4.8. Η στέψη της σήραγγας. Διακρίνεται η επένδυση του σκυροδέματος καθώς και τα υπερκείμενα.

Η αρχική θερμοκρασία ορίστηκε στους 20 °C και η χρονική διάρκεια της θέρμανσης, στις 2 ώρες. Το μοντέλο επιλύθηκε αριθμητικά πρώτα θεωρώντας το υλικό του σκυροδέματος ως ελαστικό, ομογενές και ισότροπο και στη συνέχεια ως ελαστοπλαστικό, ομογενές και ισότροπο με το κριτήριο αστοχίας του Mohr-Coulomb.

Αναφέρονται από διάφορους ερευνητές διαφορετικές ομάδες ιδιοτήτων πετρώματος και σκυροδέματος, δύο εκ των οποίων, οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενοι παρατίθενται στους Πίνακες 4.2 και 4.3.

Κρίθηκε προτιμότερο να μοντελοποιηθούν τα υλικά που περιγράφει ο Πίνακας 4.2, καθώς εμφάνιζαν συνηθέστερη εφαρμογή σε σχέση με τα υλικά που εξετάζουν οι Serafim και Pereira (Πίνακας 4.3). Κρίθηκε σκόπιμο η αντικατάσταση της τιμής του συντελεστή θερμικής διαστολής του σκυροδέματος, λόγω μη ικανοποιητικής προσέγγισης της πραγματικής τιμής και χρησιμοποιήθηκε η προσέγγιση κατά Hetnarski (Hetnarski, 1996).

	Σκυρόδεμα	Πέτρωμα
Πυκνότητα P (kg/m^3)	2300	2710
Μέτρο ελαστικότητας E (GPa)	30	20
Λόγος του Poisson v	0.2	0.3
Συνοχή c (MPa)	9.97	-
Γωνία εσωτερικής τριβής φ (deg)	37	-
Συντελεστής θερμικής διαστολής A ($1/^\circ C$)	12×10^{-6}	8×10^{-6}
Θερμική αγωγιμότητα K ($kcal/s \cdot m \cdot ^\circ C$)	4.06×10^{-4}	3.18×10^{-4}
Ειδική θερμότητα C_p ($kcal/kg \cdot ^\circ C$)	0.18	0.2

Πίνακας 4.2. Μηχανικές και θερμικές ιδιότητες σκυροδέματος και ασβεστολίθου (engineeringtoolbox.com)

	Σκυρόδεμα	Πέτρωμα
Πυκνότητα P (kg/m^3)	2550	2600
Μέτρο ελαστικότητας E (GPa)	23	20.3
Λόγος του Poisson ν	0.25	0.28
Συνοχή c (MPa)	8	0.31
Γωνία εσωτερικής τριβής φ (deg)	26	30
Συντελεστής θερμικής διαστολής A ($1/^\circ C$)	6.64×10^{-6}	6.64×10^{-6}
Θερμική αγωγιμότητα K ($kcal/s \cdot m \cdot ^\circ C$)	6.28×10^{-4}	6.28×10^{-4}
Ειδική θερμότητα C_p ($kcal/kg \cdot ^\circ C$)	0.17	0.17

Πίνακας 4.3. Μηχανικές και θερμικές ιδιότητες σκυροδέματος και βιοτιτικού γρανίτη κατά Serafim και Pereira (Chung, 2006)

4.2.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης ελαστικού μοντέλου

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα που προήλθαν από την επίλυση του ελαστικού μοντέλου ως καμπύλες ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης.

Η ισοδύναμη τάση κάθε κόμβου περιγράφεται από τον τύπο (Equivalent Stress, ceric.net):

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \sigma_y - \sigma_y \sigma_z - \sigma_z \sigma_x + 3(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2)}$$

όπου:

- $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ οι κύριες συνιστώσες του τανυστή τάσης

- $\sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}$, οι διατμητικές συνιστώσες του τανυστή τάσης

ενώ η ισοδύναμη ανηγμένη παραμόρφωση (Equivalent Stress, ceric.net):

$$\varepsilon_e = \sqrt{\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + \varepsilon_z^2 - \varepsilon_x \varepsilon_y - \varepsilon_y \varepsilon_z - \varepsilon_z \varepsilon_x + 0.75(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2)}$$

όπου:

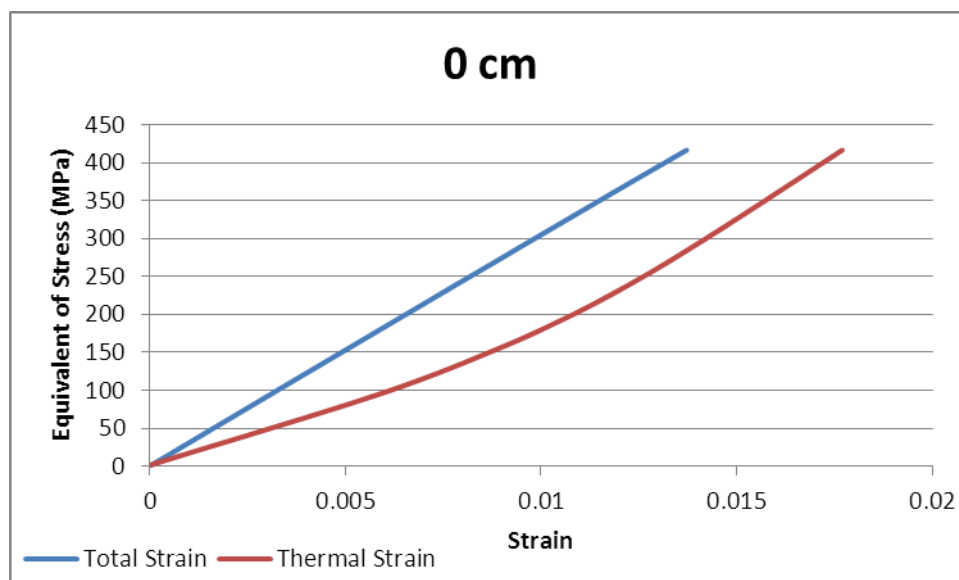
- $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ οι κύριες συνιστώσες του τανυστή παραμόρφωσης
- $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$, οι διατμητικές παραμορφώσεις

Η σχέση που συνδέει τις διατμητικές παραμορφώσεις με τις διατμητικές συνιστώσες του τανυστή παραμόρφωσης είναι: $\gamma = 2\varepsilon$.

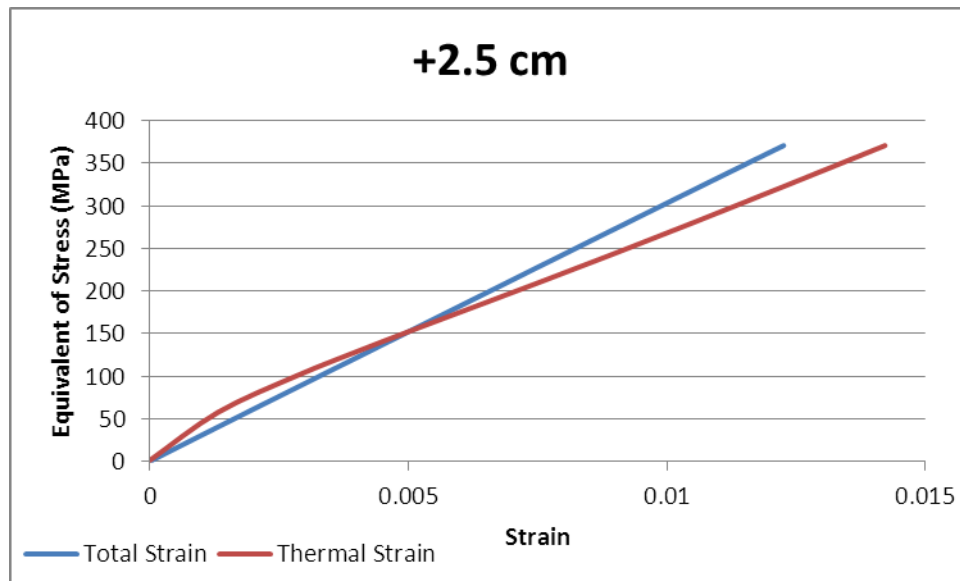
4.2.1.1 Στον οριζόντιο άξονα συμμετρίας της σήραγγας

Στα διαγράμματα 4.9 – 4.14 παρουσιάζονται καμπύλες ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε διάφορα βάθη από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στο κατώτατο σημείο του μοντέλου.

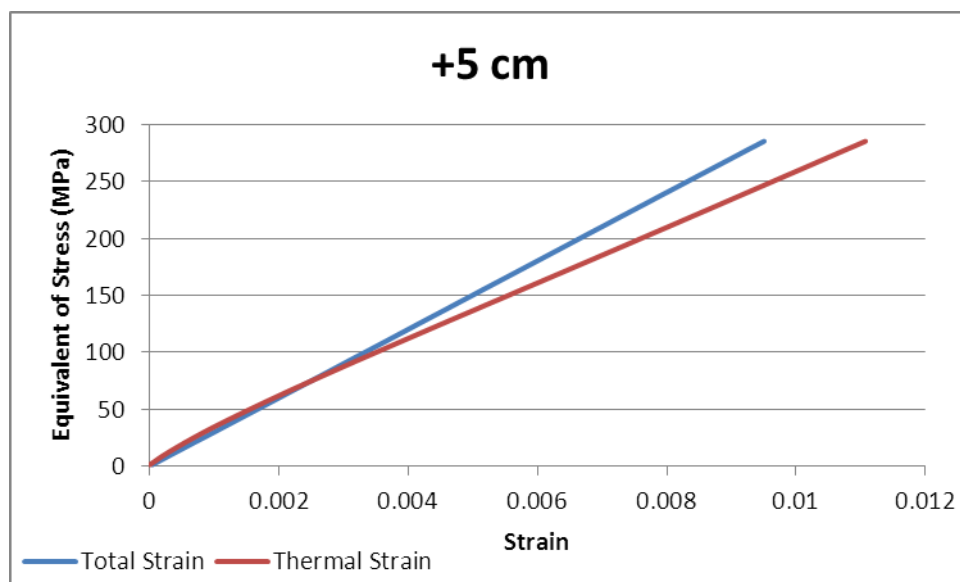
Η θέση 0 αναφέρεται στην ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, η θέση +2.5 αναφέρεται σε βάθος 2.5 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, η θέση +5 αναφέρεται σε βάθος 5 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, κ.ο.κ.



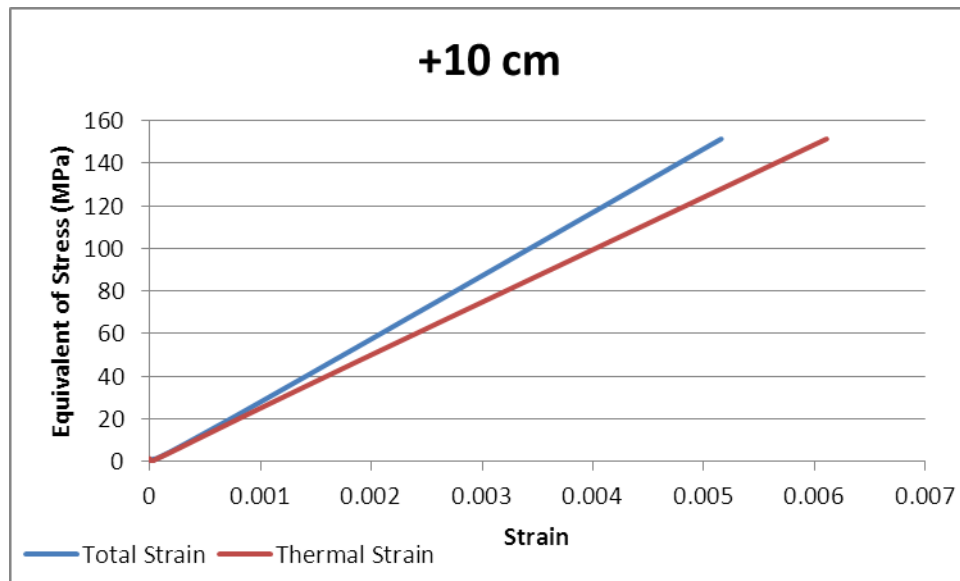
Εικόνα 4.9. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης στην ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στον οριζόντιο άξονα συμμετρίας.



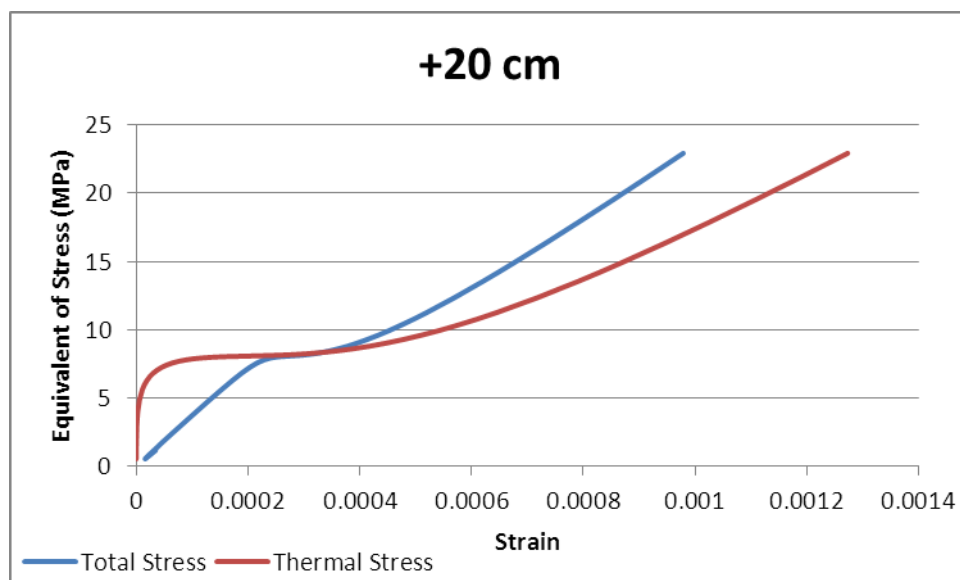
Εικόνα 4.10. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 2.5 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στον οριζόντιο άξονα συμμετρίας.



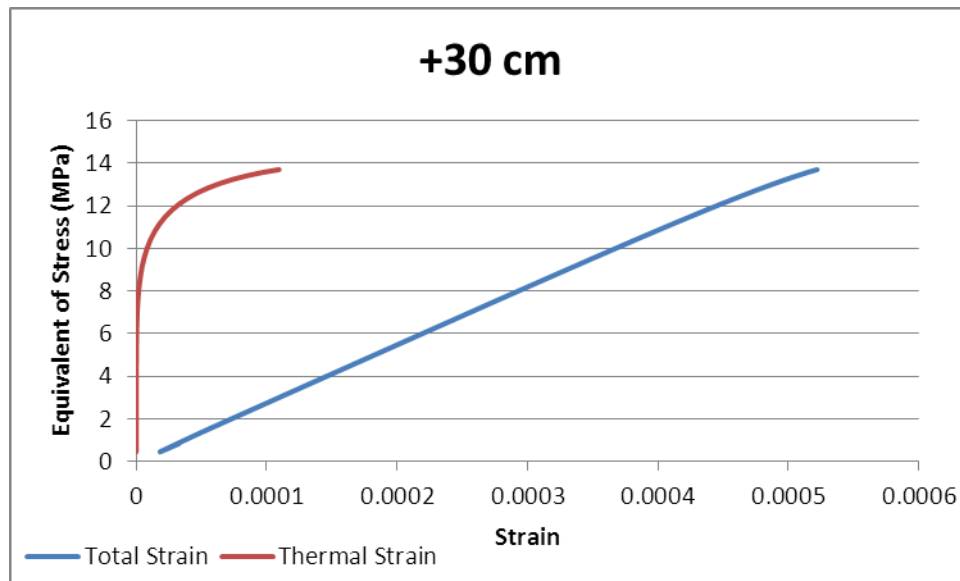
Εικόνα 4.11. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 5 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στον οριζόντιο άξονα συμμετρίας.



Εικόνα 4.12. Διάγραμμα τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 10 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στον οριζόντιο άξονα συμμετρίας.



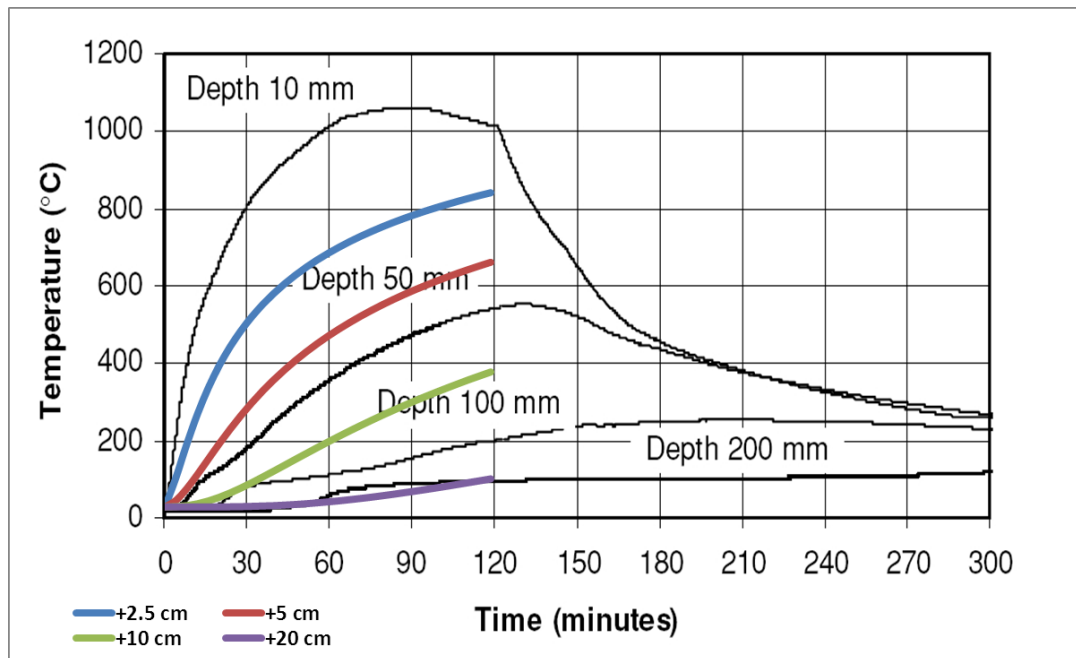
Εικόνα 4.13. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 20 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στον οριζόντιο άξονα συμμετρίας.



Εικόνα 4.14. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 30 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στον οριζόντιο άξονα συμμετρίας.

Στην Εικόνα 4.15 φαίνεται το διάγραμμα θερμοκρασίας – χρόνου στο οποίο παρουσιάζεται η θερμική απόκριση του μοντέλου της επένδυσης της σήραγγας σε σχέση με τις πειραματικές καμπύλες RWS. Σημειώνεται ότι παρόμοια διαγράμματα παρουσιάστηκαν προηγουμένως και αναφερόταν στο απλό ορθογωνικό μοντέλο βαθμονόμησης του μοντέλου της επένδυσης.

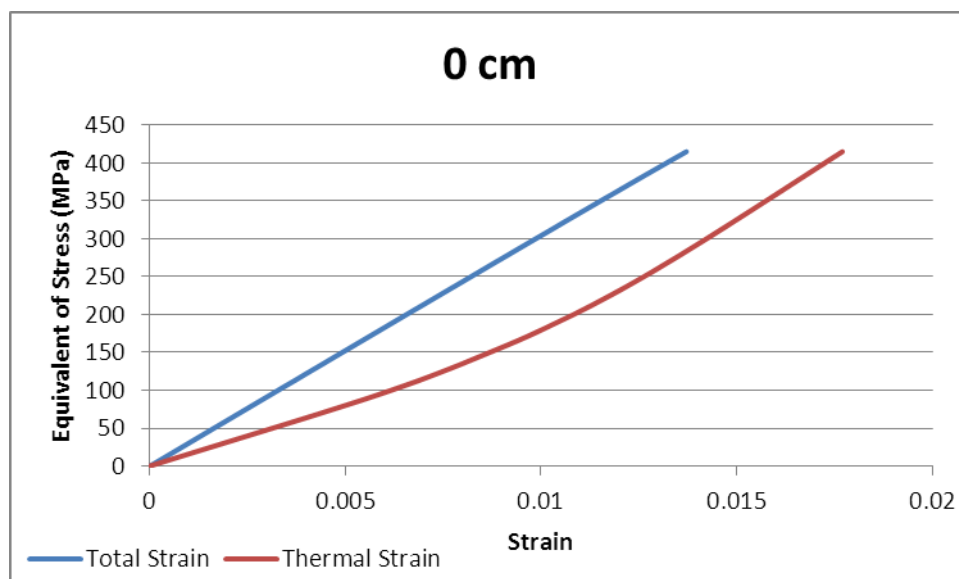
Παρατηρείται ότι οι καμπύλες ταυτίζονται με τις αντίστοιχες καμπύλες βαθμονόμησης (Εικόνα 4.6) για τα βάθη +5, +10 και +20 cm, ενώ παρουσιάζεται μείωση της θερμοκρασίας, της τάξης των 80 °C, για βάθος +2.5 cm.



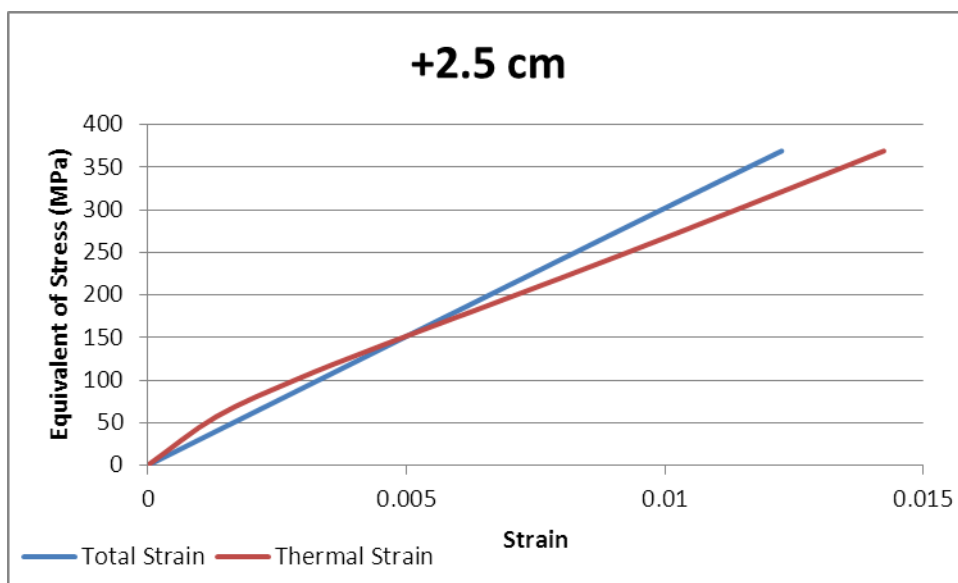
Εικόνα 4.15. Η θερμική απόκριση το ελαστικού μοντέλου της επένδυσης, συγκρινόμενη με τις πειραματικές καμπύλες RWS (Bostrom & Larsen, 2006) για διάφορα βάθη από τη θερμαινόμενη επιφάνεια, στη βάση της σήραγγας.

4.2.1.2 Σε γωνία 45° από τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας της σήραγγας

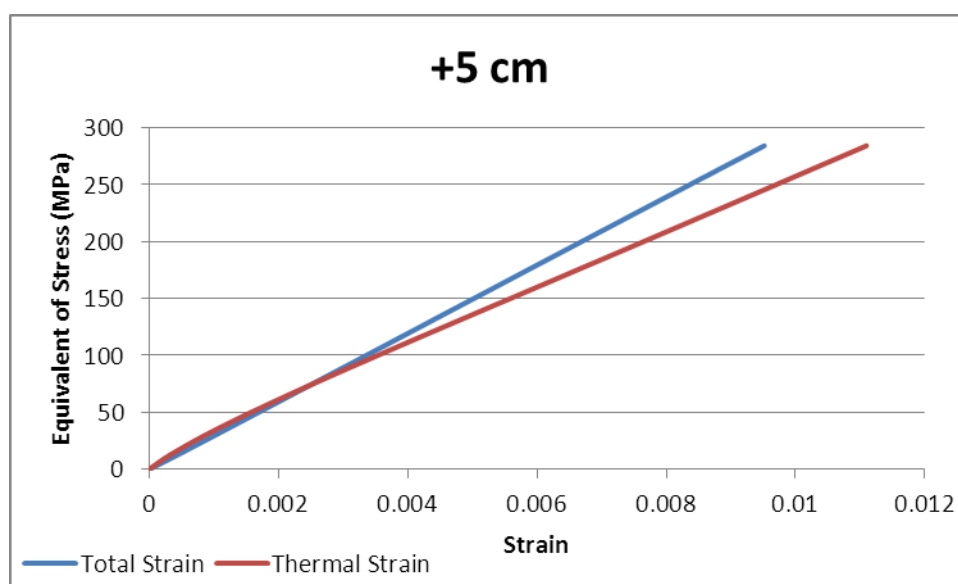
Στις Εικόνες 4.16 – 4.21 παρουσιάζονται καμπύλες ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε διάφορα βάθη από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, σε γωνία 45° από τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας της σήραγγας.



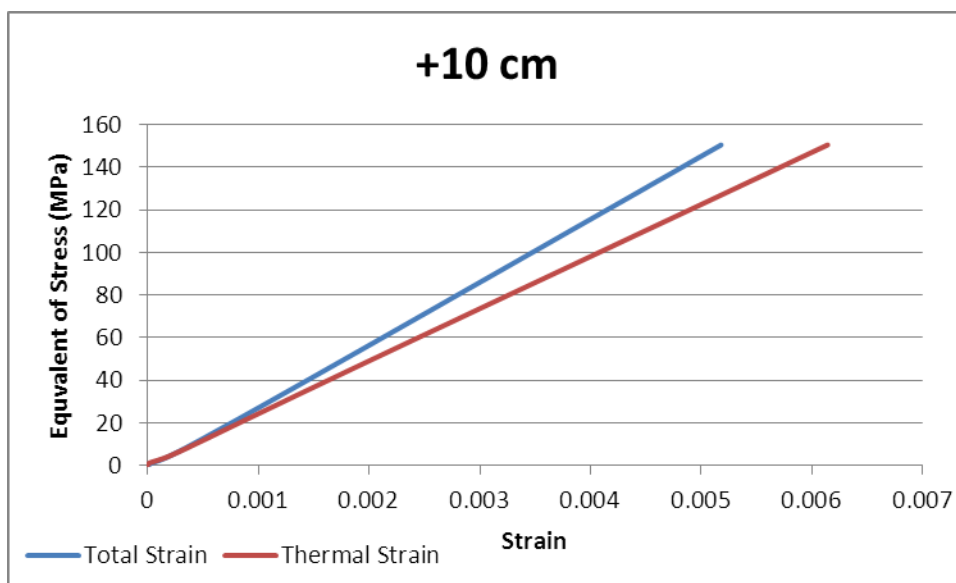
Εικόνα 4.16. Διάγραμμα τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης στην ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, σε γωνία 45° από τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας της σήραγγας.



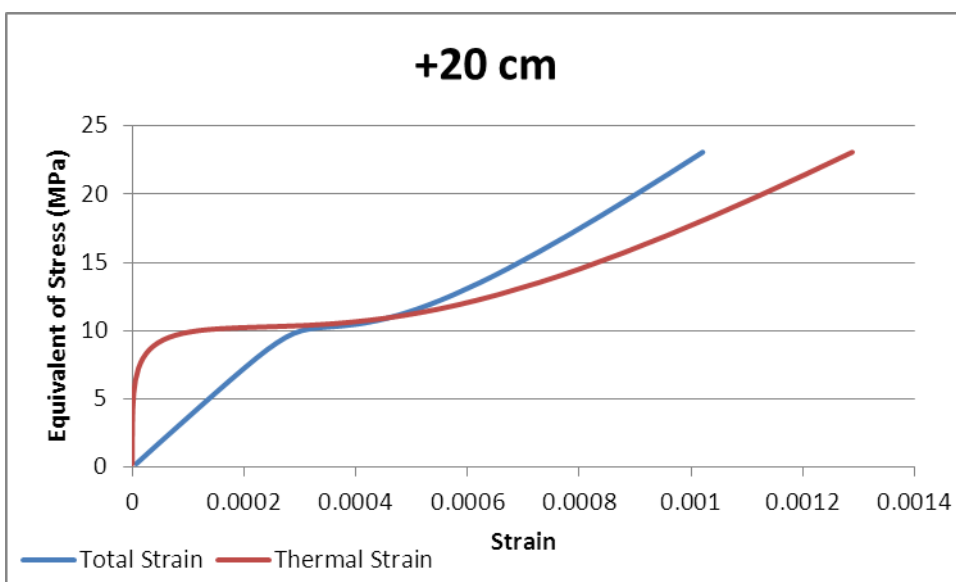
Εικόνα 4.17. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 2.5 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, σε γωνία 45° από τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας της σήραγγας.



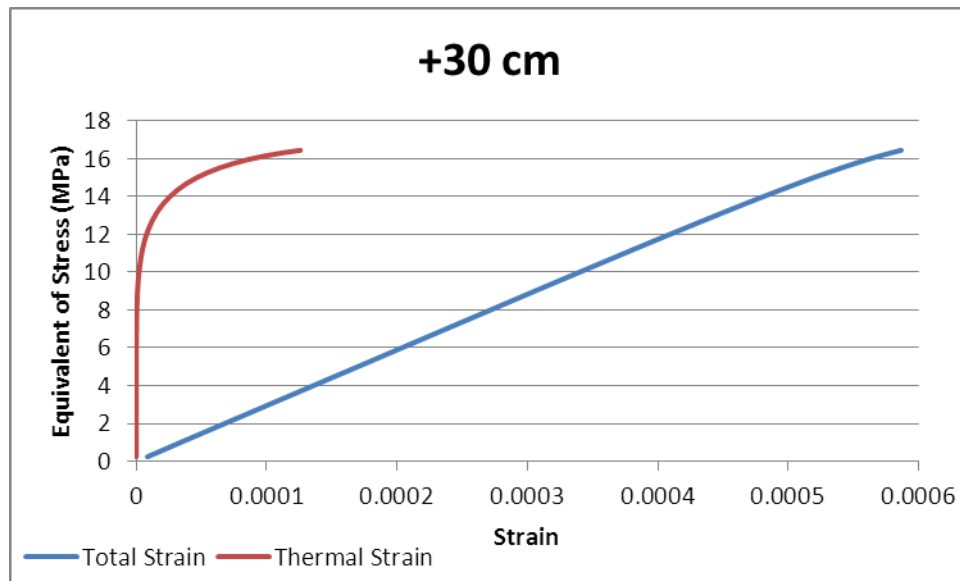
Εικόνα 4.18. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 5 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, σε γωνία 45° από τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας της σήραγγας.



Εικόνα 4.19. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 10 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, σε γωνία 45° από τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας της σήραγγας.



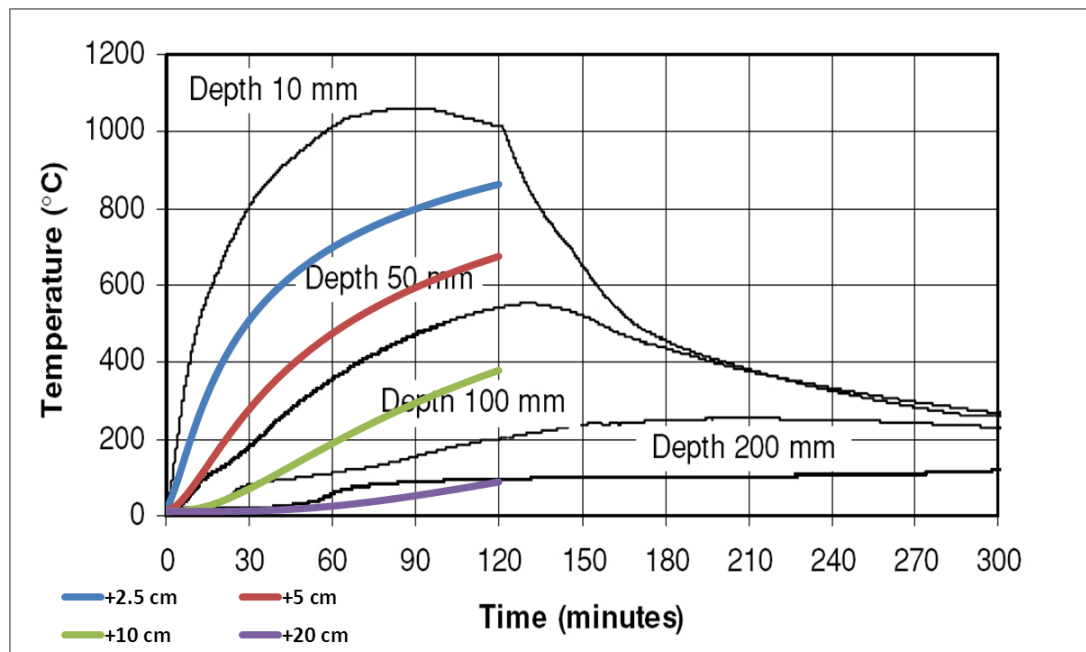
Εικόνα 4.20. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 15 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, σε γωνία 45° από τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας της σήραγγας.



Εικόνα 4.21. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 30 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, σε γωνία 45° από τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας της σήραγγας.

Στην Εικόνα 4.22 φαίνεται το διάγραμμα θερμοκρασίας – χρόνου στο οποίο παρουσιάζεται η θερμική απόκριση του μοντέλου της επένδυσης της σήραγγας σε σχέση με τις πειραματικές καμπύλες RWS.

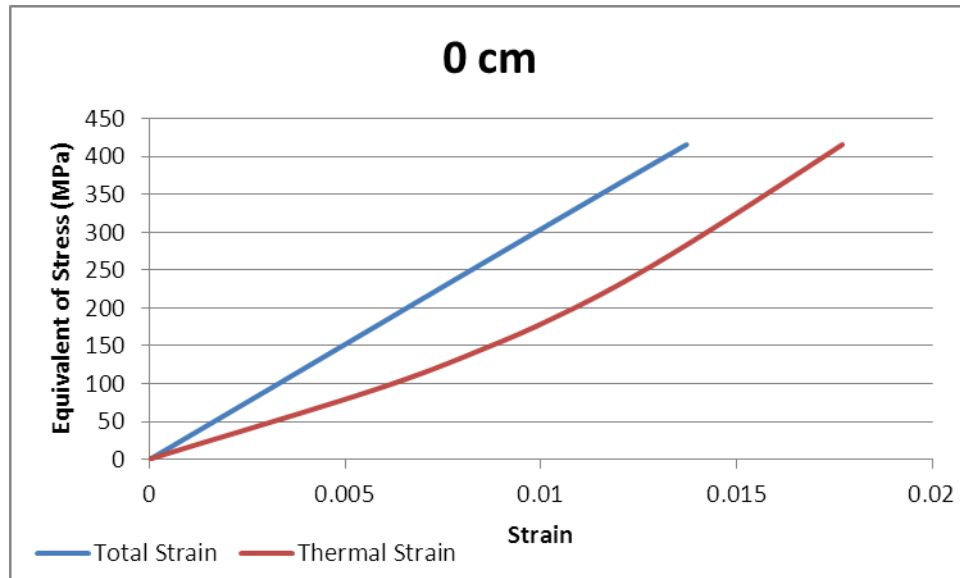
Παρατηρείται ότι οι καμπύλες ταυτίζονται με τις αντίστοιχες καμπύλες βαθμονόμησης (Εικόνα 4.6) για τα βάθη +5, +10 και +20 cm, ενώ παρουσιάζεται μείωση της θερμοκρασίας, της τάξης των 40 °C, για βάθος +2.5 cm.



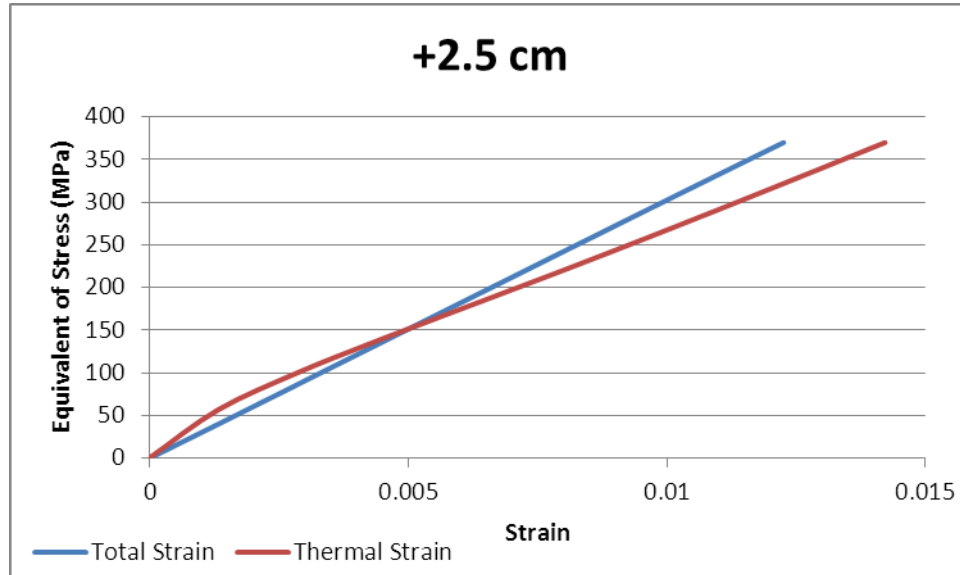
Εικόνα 4.22. Η θερμική απόκριση το ελαστικού μοντέλου της επένδυσης, συγκρινόμενη με τις πειραματικές καμπύλες RWS (Bostrom & Larsen, 2006) για διάφορα βάθη από τη θερμαινόμενη επιφάνεια, σε γωνία 45° από τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας της σήραγγας.

4.2.1.3 Στη στέψη της σήραγγας

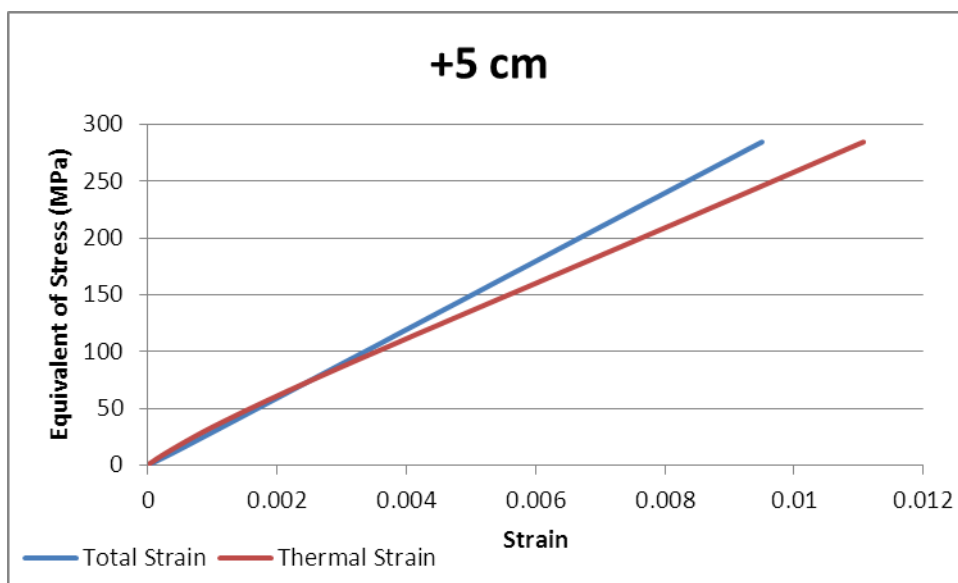
Στις Εικόνες 4.23 – 4.28 παρουσιάζονται καμπύλες ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε διάφορα βάθη από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στο ανώτερο σημείο του κυκλικού ανοίγματος.



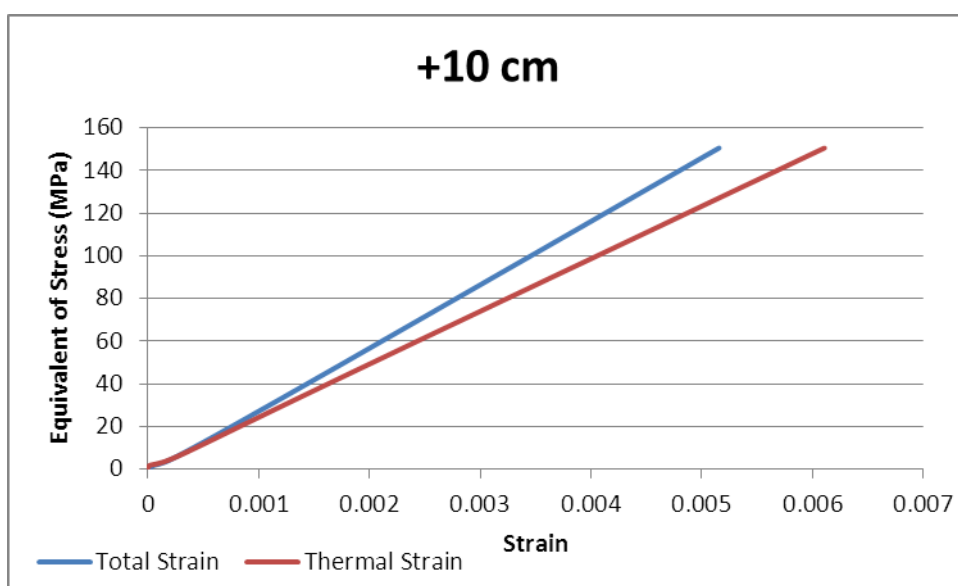
Εικόνα 4.23. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης στην ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στη στέψη της σήραγγας.



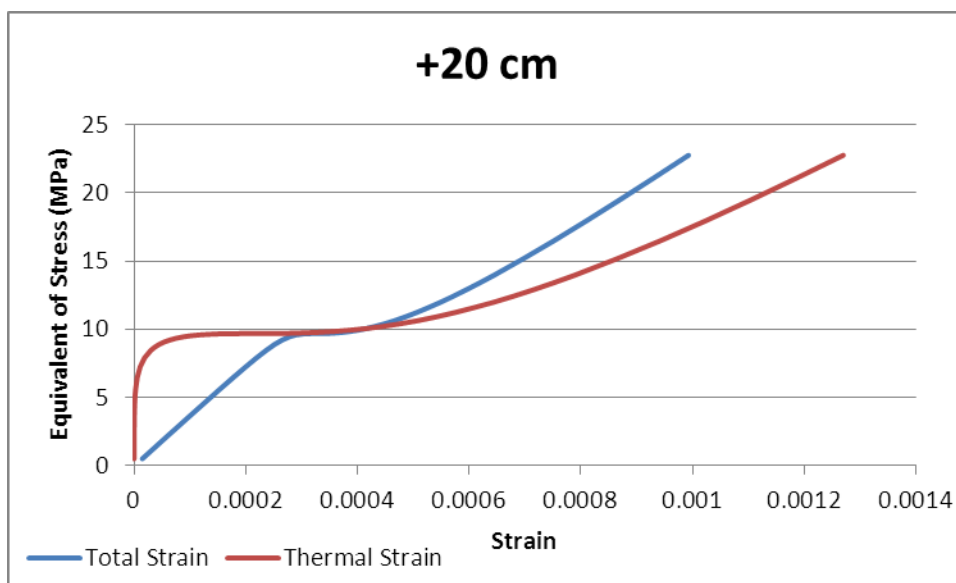
Εικόνα 4.24. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 2.5 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στη στέψη της σήραγγας.



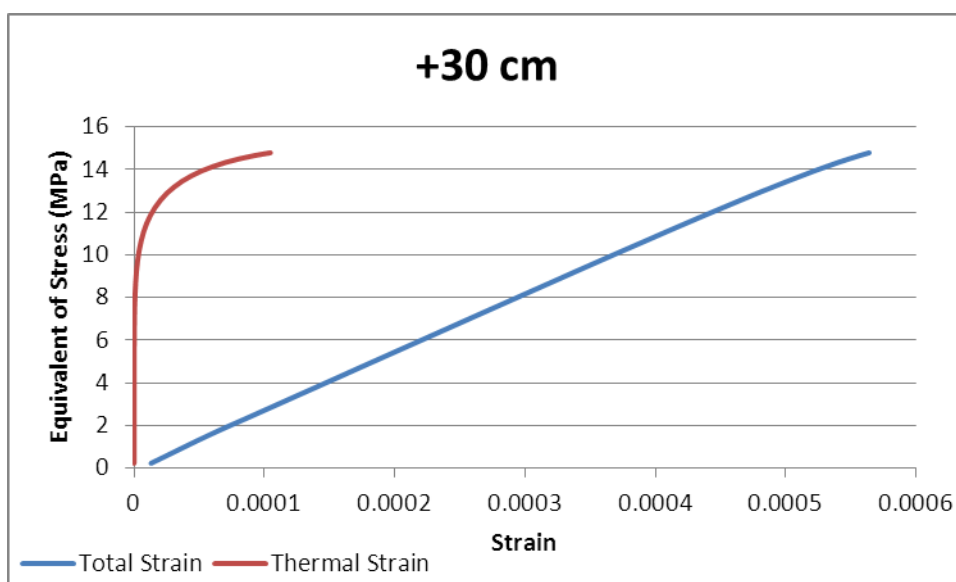
Εικόνα 4.25. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 5 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στη στέψη της σήραγγας.



Εικόνα 4.26. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 10 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στη στέψη της σήραγγας.



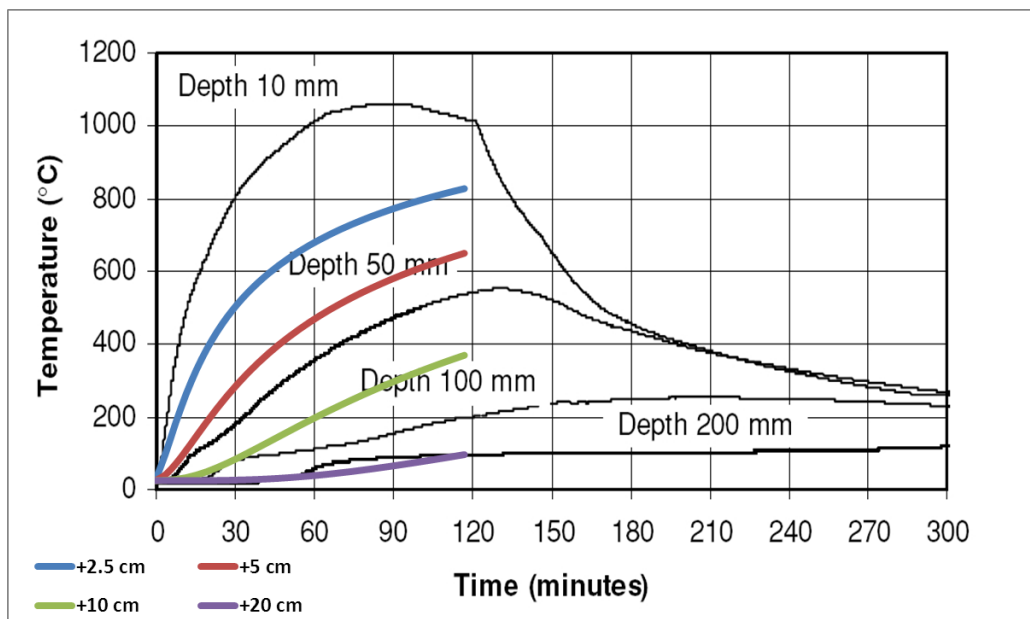
Εικόνα 4.27. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 20 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στη στέψη της σήραγγας.



Εικόνα 4.28. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 30 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στη στέψη της σήραγγας.

Στην Εικόνα 4.29 φαίνεται το διάγραμμα θερμοκρασίας – χρόνου στο οποίο παρουσιάζεται η θερμική απόκριση του μοντέλου της επένδυσης της σήραγγας σε σχέση με τις πειραματικές καμπύλες RWS.

Παρατηρείται ότι οι καμπύλες ταυτίζονται με τις αντίστοιχες καμπύλες βαθμονόμησης (Εικόνα 4.6) για τα βάθη +10 και +20 cm, ενώ παρουσιάζεται μείωση της θερμοκρασίας, της τάξης των 100 °C για βάθος +2.5 cm και της τάξης των 50 °C για βάθος +5 cm.



Εικόνα 4.29. Η θερμική απόκριση το ελαστικού μοντέλου της επένδυσης, συγκρινόμενη με τις πειραματικές καμπύλες RWS (Bostrom & Larsen, 2006) για διάφορα βάθη από τη θερμαινόμενη επιφάνεια, στη στέψη της σήραγγας.

4.2.1.4 Συζήτηση αποτελεσμάτων

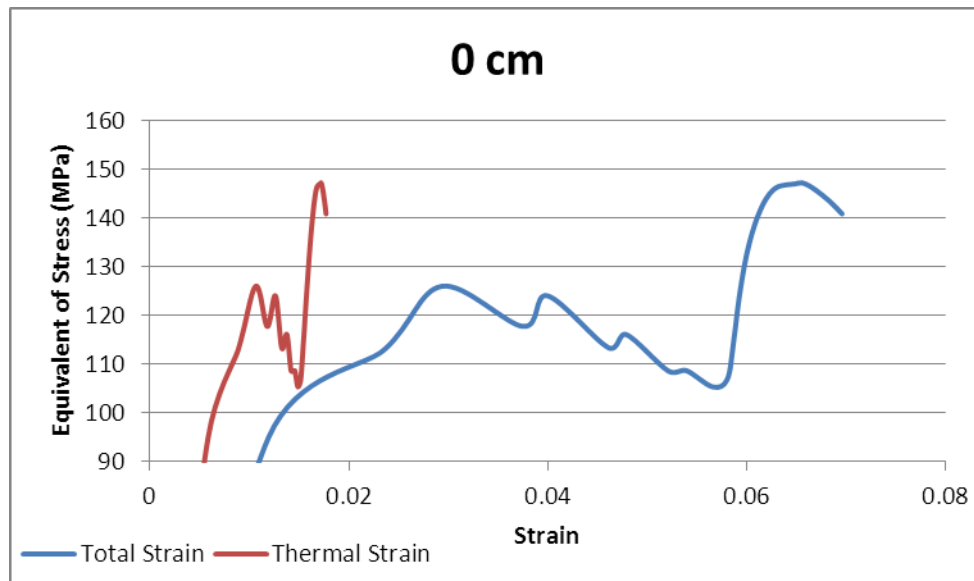
Παρατηρείται ότι οι ισοδύναμες τάσεις ξεκινούν από 400 MPa στην ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης και μειώνεται μέχρι την τιμή των 15 MPa, σε βάθος 30 cm από την επιφάνεια.

Οι ανηγμένες παραμορφώσεις παρουσιάζουν μια διακύμανση από 0.015 στην ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης και παρουσιάζει μειωτική τάση μέχρι περίπου την τιμή 0.0005, σε βάθος 30 cm από την επιφάνεια.

4.2.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης ελαστοπλαστικού μοντέλου

4.2.2.1 Στον οριζόντιο άξονα συμμετρίας της σήραγγας

Στις Εικόνες 4.30 – 4.35 παρουσιάζονται καμπύλες ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε διάφορα βάθη από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στο κατώτερο σημείο του κυκλικού ανοίγματος.

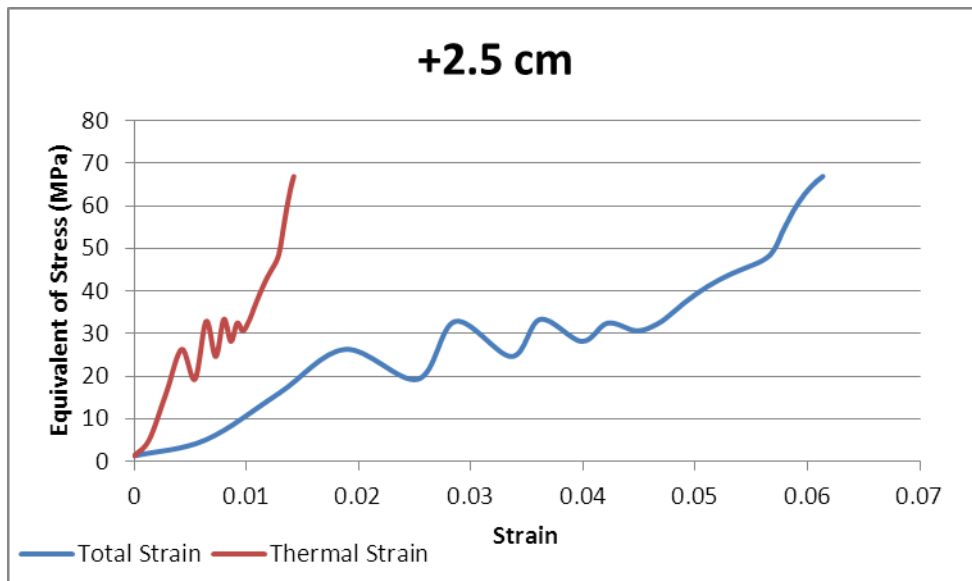


Εικόνα 4.30. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης στην ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στον οριζόντιο άξονα συμμετρίας.

Στο διάγραμμα παρατηρούνται διακυμάνσεις στις καμπύλες των τάσεων. Αυτό οφείλεται σε μη ικανοποιητική σύγκλιση της αναλυτικής μεθόδου Newton – Raphson ή σε αναπροσαρμογή τάσεων σε κάθε βήμα επίλυσης. Δοκιμάστηκαν διάφορες τιμές επαναλήψεων (recycles) μέχρι να επιτευχθεί μια ικανοποιητική σύγκλιση αλλά δεν παρουσιάστηκε διαφορά στις τιμές των αποτελεσμάτων.

Παρατηρείται, ως αναμενόταν, ότι η ολική παραμόρφωση είναι μεγαλύτερη από τις θερμική.

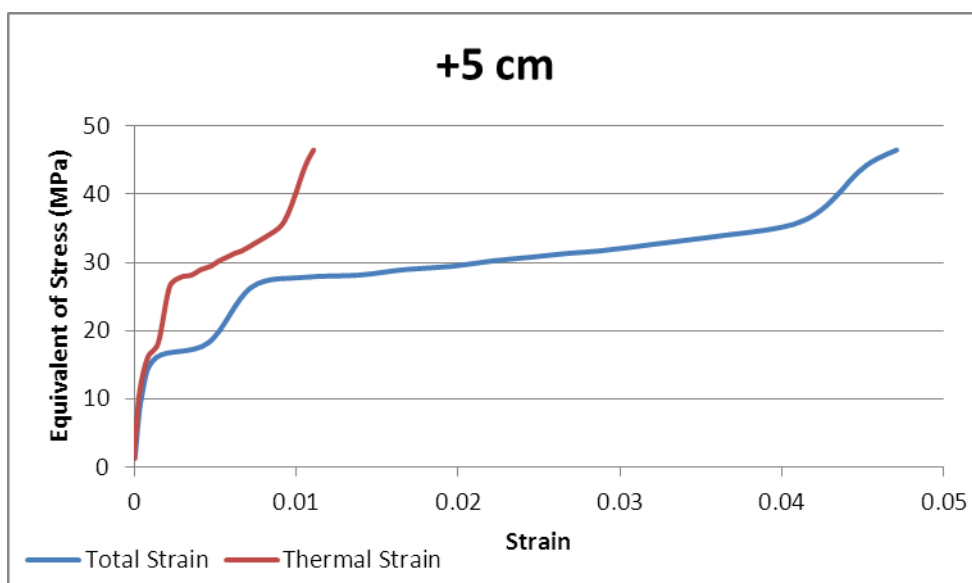
Οι μεγάλες τιμές των τάσεων, επιβεβαιώνουν το φαινόμενο της αποφλοιώσης στην ελεύθερη επιφάνεια του σκυροδέματος.



Εικόνα 4.31. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 2.5 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στον οριζόντιο άξονα συμμετρίας.

Ομοίως, οι διακυμάνσεις και σε αυτό το διάγραμμα οφείλονται σε μη ικανοποιητική σύγκλιση ή σε αναπροσαρμογή τάσεων.

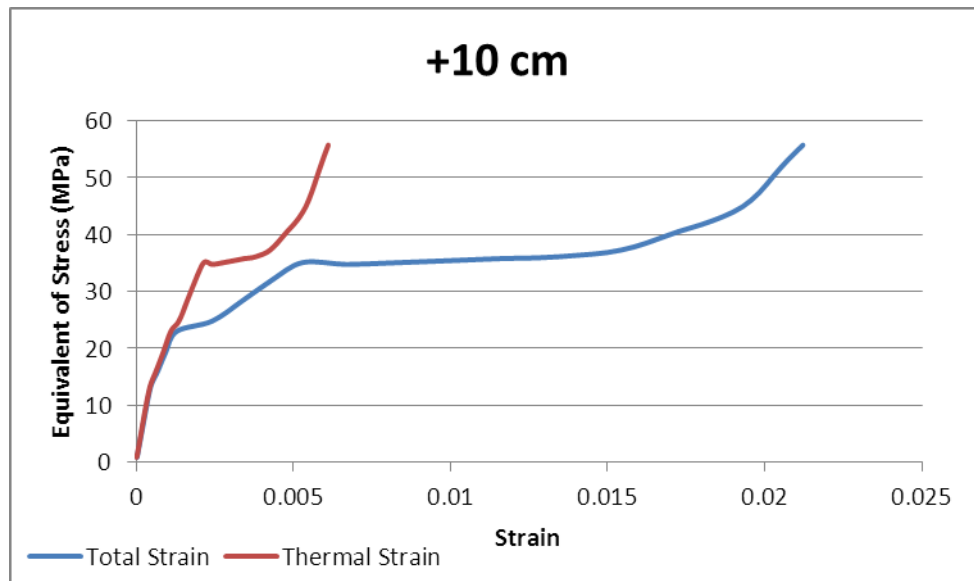
Και σε αυτό το βάθος, παρατηρούνται αυξημένες τιμές τάσεων, οι οποίες προδίδουν αστοχία του σκυροδέματος, μέσω του φαινομένου της αποφλοίσωσης.



Εικόνα 4.32. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 5 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στον οριζόντιο άξονα συμμετρίας.

Στο συγκεκριμένο διάγραμμα παρατηρείται ότι οι ολική και η θερμική ανηγμένη παραμόρφωση συμπίπτουν μέχρι, περίπου, τα 17 MPa καταπόνησης. Στο διάστημα αυτό παρατηρούνται σχεδόν μηδενικές παραμορφώσεις, γεγονός που μπορεί να οφείλεται σε καμπτική καταπόνηση.

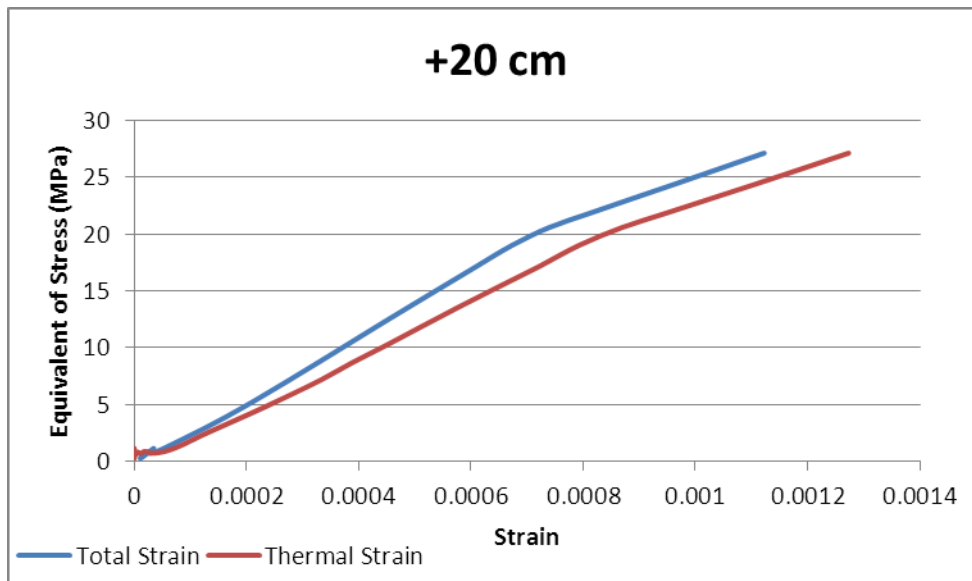
Παρατηρείται επίσης ελάττωση των διακυμάνσεων σε σχέση με μικρότερα βάθη. Αυτό ίσως οφείλεται στην ομαλότερη αύξηση των τάσεων σε σχέση με το χρόνο επιβολής της θερμικής καταπόνησης.



Εικόνα 4.33. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 10 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στον οριζόντιο άξονα συμμετρίας.

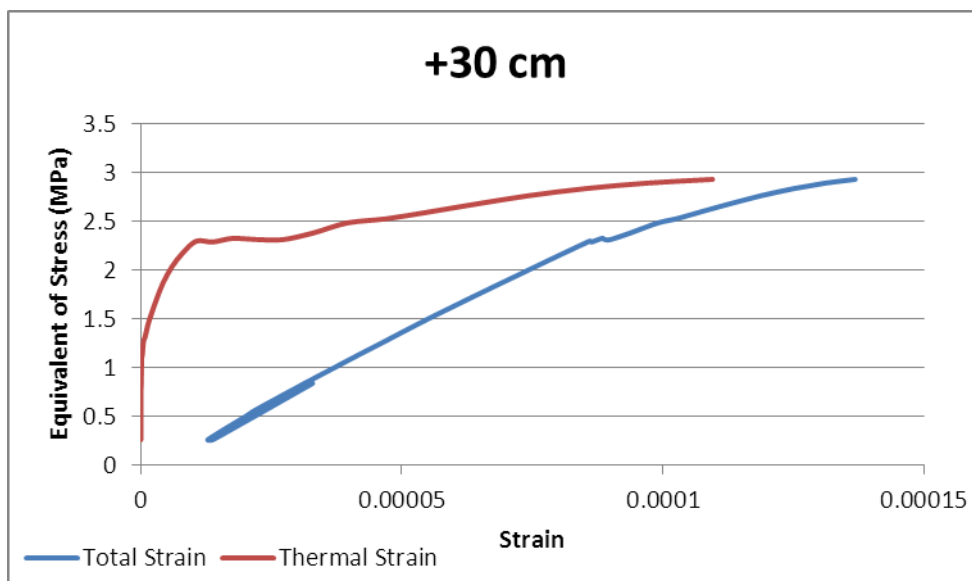
Ομοίως με το προηγούμενο διάγραμμα, οι ολικές και οι θερμικές καταπονήσεις συμπίπτουν μέχρι τα 22 -23 MPa. Στο διάστημα αυτό παρατηρούνται σχεδόν μηδενικές παραμορφώσεις, γεγονός που μπορεί να οφείλεται σε καμπτική καταπόνηση.

Παρατηρούνται και σε αυτό το βάθος τάσεις που ξεπερνούν τα 40 MPa, γεγονός που υποδηλώνει ότι η αστοχία του σκυροδέματος ξεπερνά τα 10 cm.



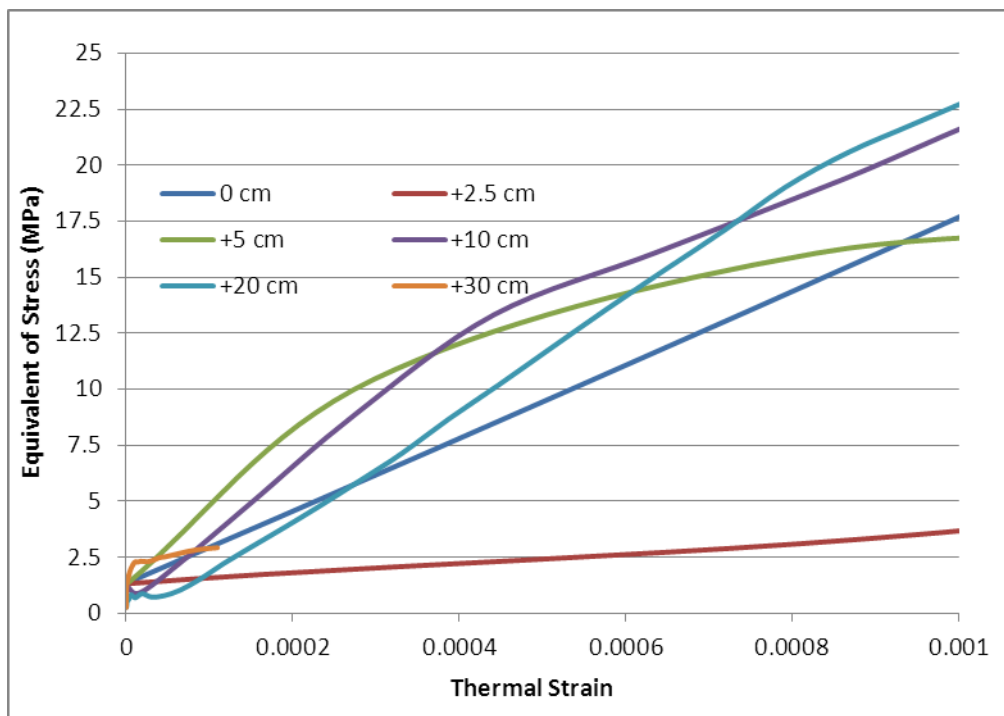
Εικόνα 4.34. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 20 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στον οριζόντιο άξονα συμμετρίας.

Η σχέση τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης στο συγκεκριμένο βάθος είναι σχεδόν γραμμική και οι τιμές των ολικών και θερμικών ανηγμένων παραμορφώσεων παραπλήσιες.



Εικόνα 4.35. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 30 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στον οριζόντιο άξονα συμμετρίας.

Παρατηρείται ότι σε βάθος 30 cm, η αρχική τάση (σε $t=0$ min) που δέχεται το σκυρόδεμα είναι μεγαλύτερη από την τάση που παρατηρείται σε $t_1 = 4$ min. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το φαινόμενο, το οποίο εξηγήθηκε και ανωτέρω, ότι δηλαδή όταν το σκυρόδεμα θερμαίνεται μέχρι ορισμένης θερμοκρασίας, η αρχική του καταπόνηση μπορεί να μειωθεί.

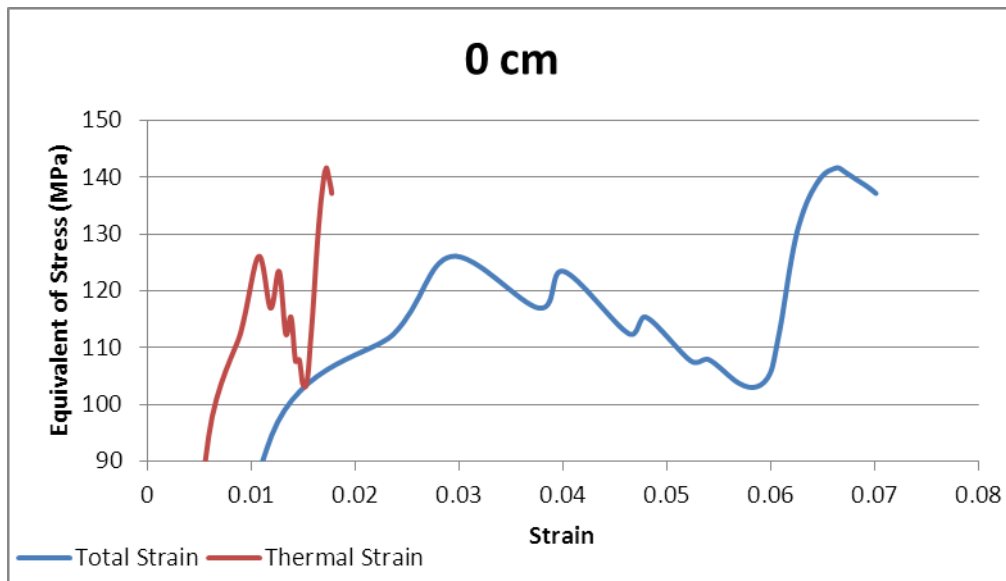


Εικόνα 4.36. Διάγραμμα τάσης – θερμικής ανηγμένης παραμόρφωσης για διάφορα βάθη από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στον οριζόντιο άξονα συμμετρίας.

Στην Εικόνα 4.36, παρατηρούνται συγκεντρωτικά οι τιμές ισοδύναμης τάσης και θερμικής ανηγμένης παραμόρφωσης για διάφορα βάθη, στον οριζόντιο άξονα συμμετρίας της σήραγγας. Παρατηρείται, ότι σε βάθος 30 cm από την ελεύθερη επιφάνεια, συγκριτικά με τα υπόλοιπα βάθη, η τιμές τάσης και θερμικής ανηγμένης παραμόρφωσης είναι κατά πολύ μικρότερες. Σε βάθη 5 cm, 10 cm, 20 cm και επάνω στην ελεύθερη επιφάνεια (0 cm) οι τάσεις και οι θερμικές ανηγμένες παραμορφώσεις αναπτύσσονται, αρχικά, με παρόμοιο τρόπο.

4.2.2.2 Σε γωνία 45° από τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας της σήραγγας

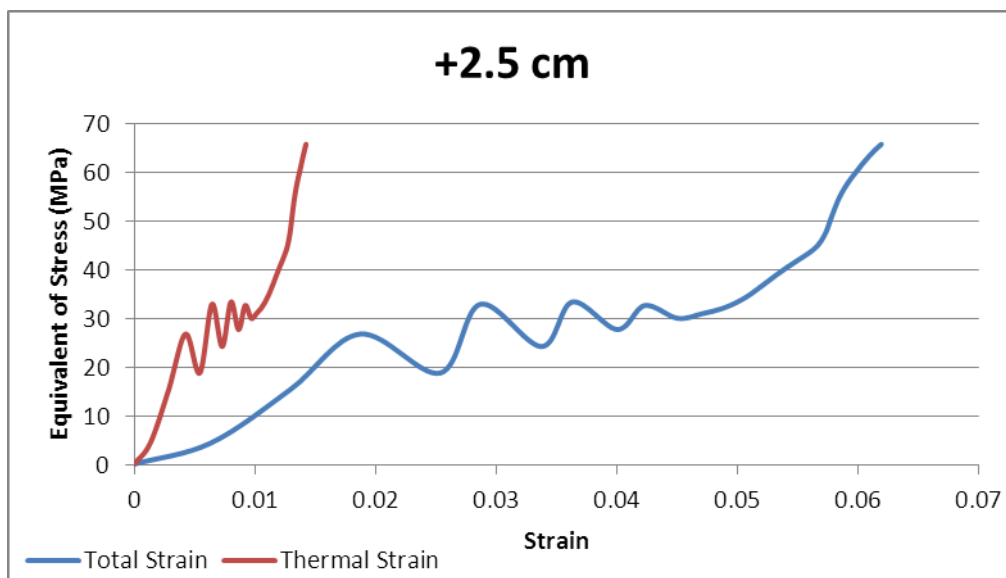
Στις Εικόνες 4.37 – 4.42 παρουσιάζονται καμπύλες ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε διάφορα βάθη από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, σε γωνία 45° από τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας της σήραγγας.



Εικόνα 4.37. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης στην ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, σε γωνία 45° από τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας της σήραγγας.

Όπως και στον οριζόντιο άξονα συμμετρίας της σήραγγας, παρατηρούνται διακυμάνσεις των καμπυλών, οι οποίες μπορεί να οφείλονται σε μη ικανοποιητική σύγκλιση ή σε συνεχή αναπροσαρμογή των τάσεων σε κάθε βήμα επίλυσης.

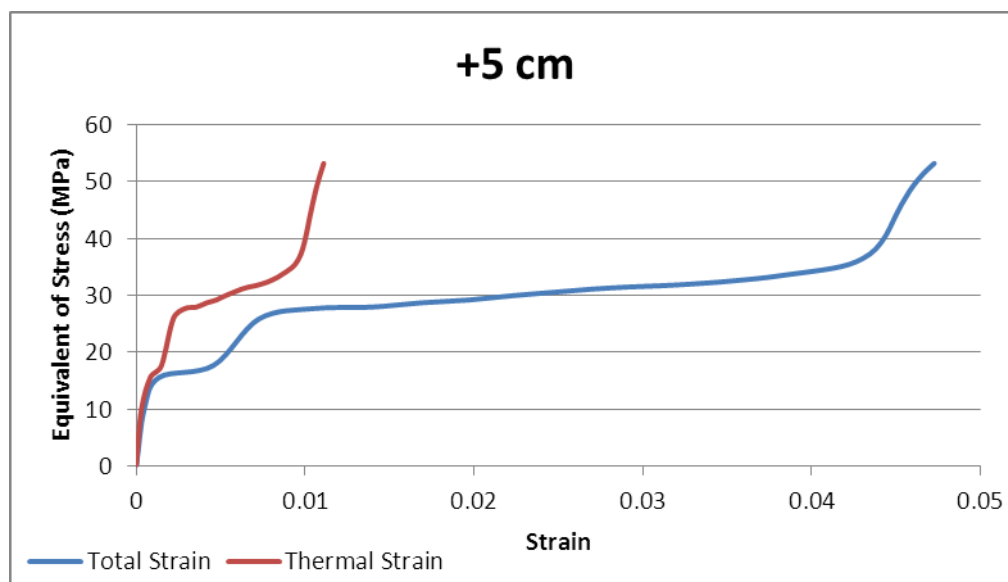
Παρατηρείται, επίσης, ότι και σε αυτή την περίπτωση η ολική ανηγμένη παραμόρφωση είναι πολύ μεγαλύτερη της θερμικής, ενώ οι τάσεις φτάνουν μέχρι τα 140 MPa, πολύ παραπάνω από την τυπική αντοχή του σκυροδέματος, γεγονός που υποδεικνύει ότι η ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης έχει μάλλον αστοχήσει, μέσω του μηχανισμού της αποφλοιώσης.



Εικόνα 4.38. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 2.5 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, σε γωνία 45° από τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας της σήραγγας.

Ομοίως, οι διακυμάνσεις και σε αυτό το διάγραμμα οφείλονται σε ελλιπή σύγκλιση ή σε αναπροσαρμογή τάσεων.

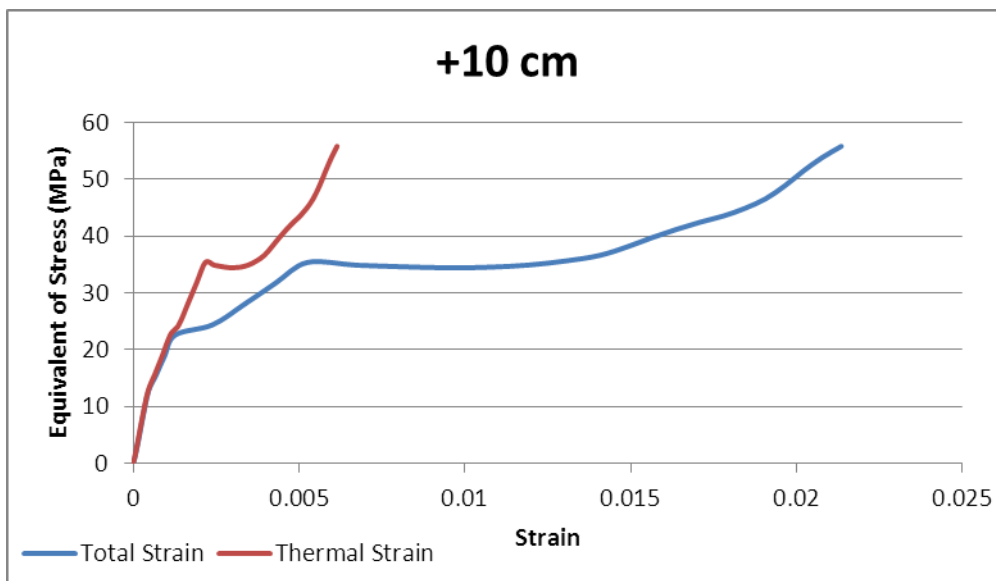
Και σε αυτό το βάθος, παρατηρούνται αυξημένες τιμές τάσεων, οι οποίες υποδεικνύουν πιθανή αστοχία του σκυροδέματος, μέσω του φαινομένου της αποφλοιώσης.



Εικόνα 4.39. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 5 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, σε γωνία 45° από τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας της σήραγγας.

Στο συγκεκριμένο διάγραμμα παρατηρείται ότι οι ολική και η θερμική ανηγμένη παραμόρφωση συμπίπτουν μέχρι, περίπου, τα 17 MPa καταπόνησης. Στο διάστημα αυτό παρατηρούνται σχεδόν μηδενικές παραμορφώσεις, γεγονός που μπορεί να οφείλεται σε καμπτική καταπόνηση.

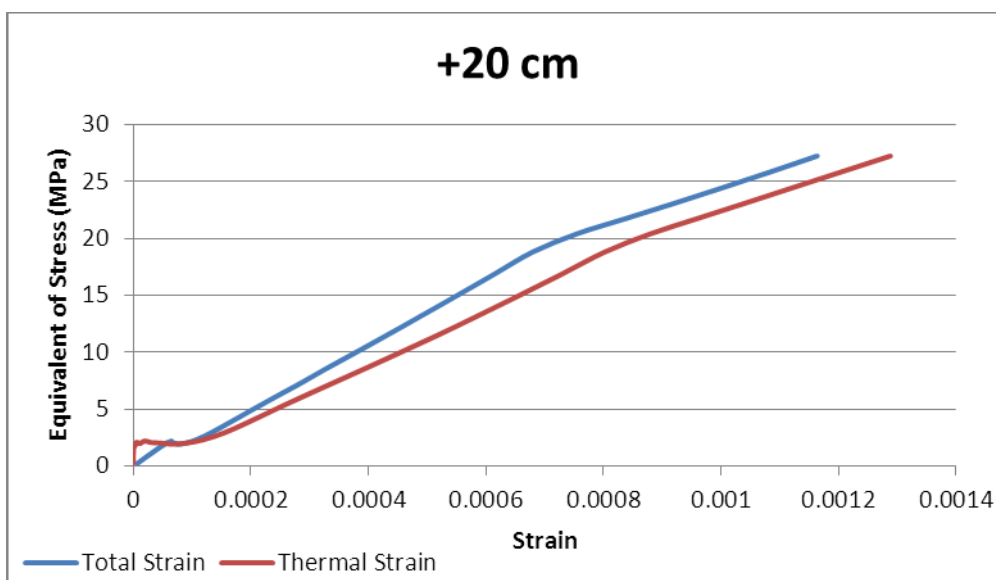
Παρατηρείται επίσης ελάττωση των διακυμάνσεων σε σχέση με μικρότερα βάθη. Αυτό ίσως οφείλεται στην ομαλότερη αύξηση των τάσεων σε σχέση με το χρόνο επιβολής της θερμικής καταπόνησης.



Εικόνα 4.40. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 10 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, σε γωνία 45° από τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας της σήραγγας.

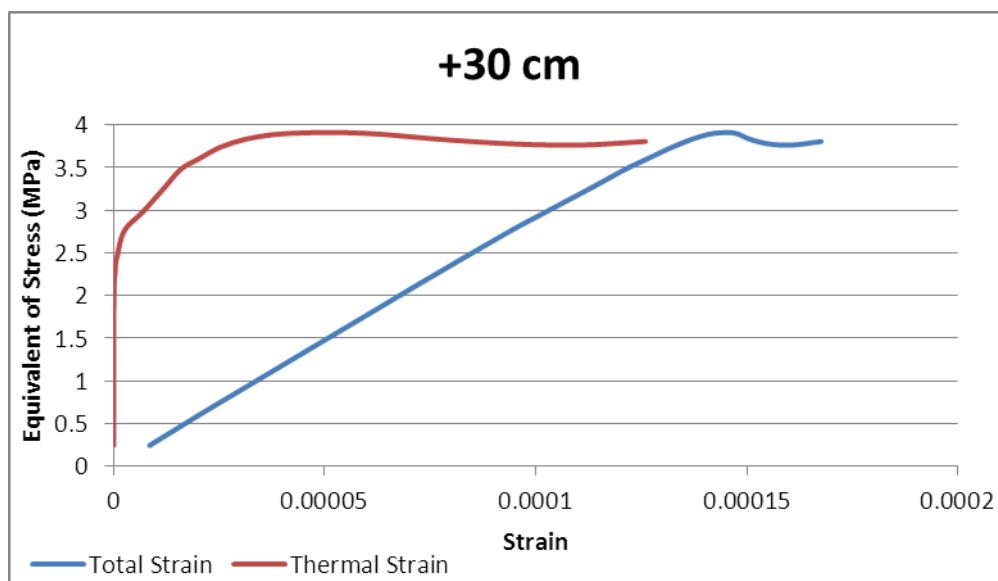
Ομοίως με το προηγούμενο διάγραμμα, οι ολικές και οι θερμικές ανηγμένες καταπονήσεις συμπίπτουν μέχρι τα 22 MPa. Στο διάστημα αυτό παρατηρούνται σχεδόν μηδενικές παραμορφώσεις, γεγονός που μπορεί να οφείλεται σε καμπτική καταπόνηση.

Παρατηρούνται και σε αυτό το βάθος τάσεις που ξεπερνούν τα 40 MPa, γεγονός που καταδεικνύει ότι η αστοχία του σκυροδέματος ξεπερνά τα 10 cm πάχους υποστήριξης.



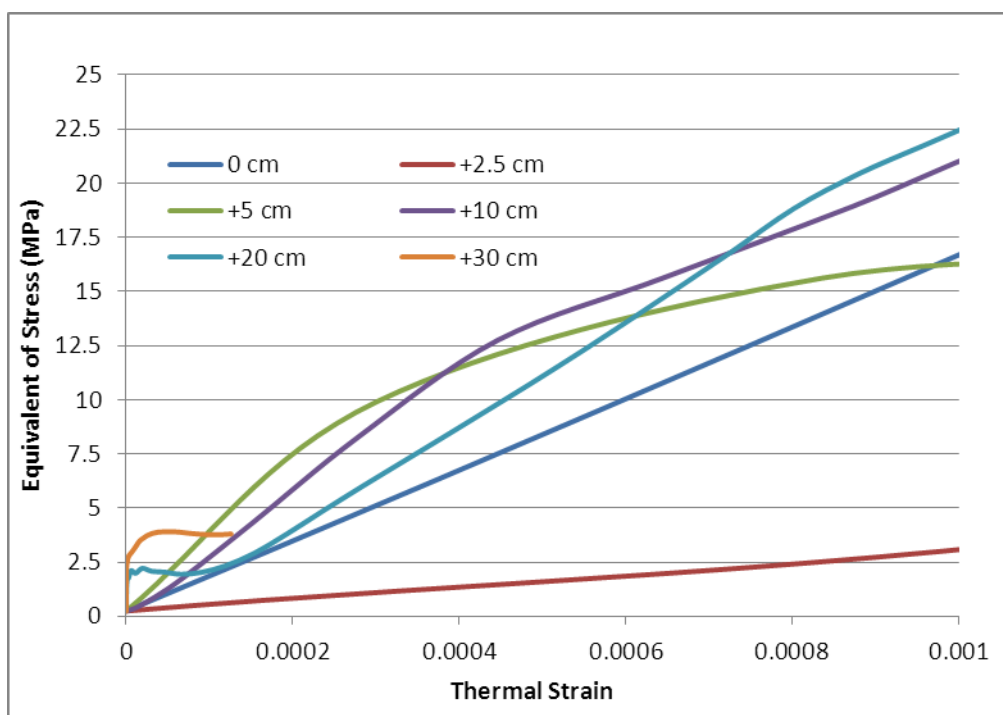
Εικόνα 4.41. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 20 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, σε γωνία 45° από τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας της σήραγγας.

Η σχέση ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης στο συγκεκριμένο βάθος είναι σχεδόν γραμμική και οι τιμές των ολικών και θερμικών ανηγμένων παραμορφώσεων παραπλήσιες.



Εικόνα 4.42. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 30 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, σε γωνία 45° από τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας της σήραγγας.

Παρατηρείται ότι η ολική ανηγμένη παραμόρφωση παρουσιάζει γραμμική κατανομή, ενώ η θερμική καταπόνηση, παρουσιάζει μέγιστο στα 4 MPa, περίπου.

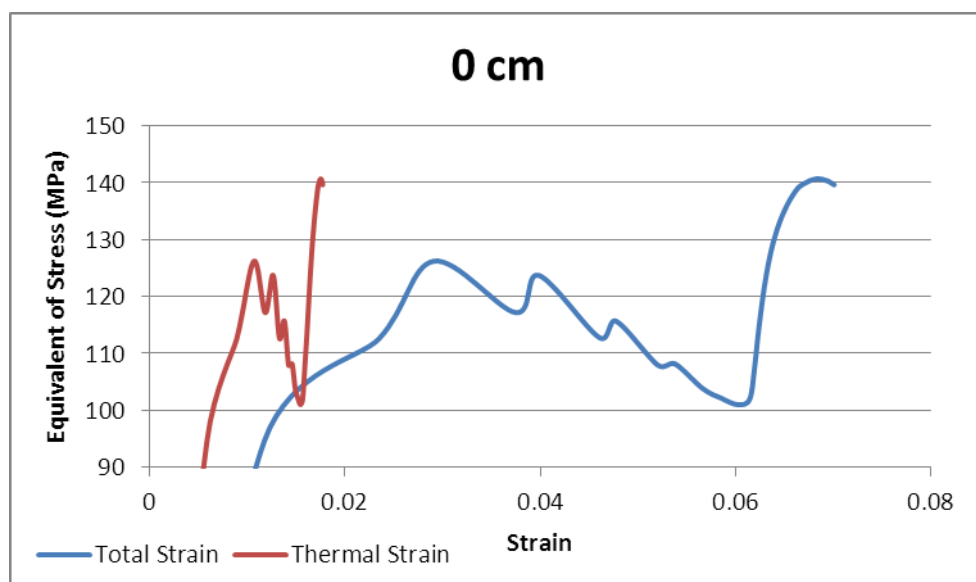


Εικόνα 4.43. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – θερμικής ανηγμένης παραμόρφωσης για διάφορα βάθη από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, σε γωνία 45° από την οριζόντιο.

Στην Εικόνα 4.43, παρατηρούνται συγκεντρωτικά οι τιμές ισοδύναμης τάσης και θερμικής ανηγμένης παραμόρφωσης για διάφορα βάθη, στη βάση της σήραγγας. Παρατηρείται, ότι σε βάθος 30 cm από την ελεύθερη επιφάνεια, συγκριτικά με τα υπόλοιπα βάθη, η τιμές τάσης και θερμικής παραμόρφωσης είναι κατά πολύ μικρότερες. Σε βάθη 5 cm, 10 cm, 20 cm και επάνω στην ελεύθερη επιφάνεια (0 cm) οι τάσεις και οι θερμικές ανηγμένες παραμορφώσεις αναπτύσσονται, αρχικά, με παρόμοιο τρόπο.

4.2.2.3 Στη στέψη της σήραγγας

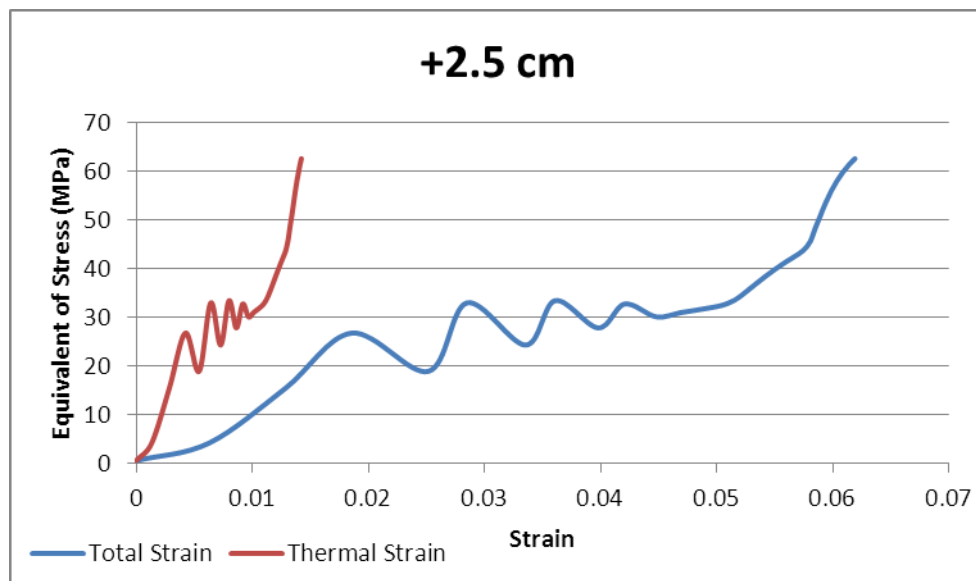
Στις Εικόνες 4.44 – 4.49 παρουσιάζονται καμπύλες ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε διάφορα βάθη από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στο ανώτερο σημείο του κυκλικού ανοίγματος.



Εικόνα 4.44. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης στην ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στη στέψη της σήραγγας.

Όπως και στον οριζόντιο άξονα συμμετρίας της σήραγγας αλλά και σε γωνία 45° από την οριζόντιο, παρατηρούνται διακυμάνσεις των καμπυλών, οι οποίες μπορεί να οφείλονται σε μη ικανοποιητική σύγκλιση ή σε συνεχή αναπροσαρμογή των τάσεων σε κάθε βήμα επίλυσης.

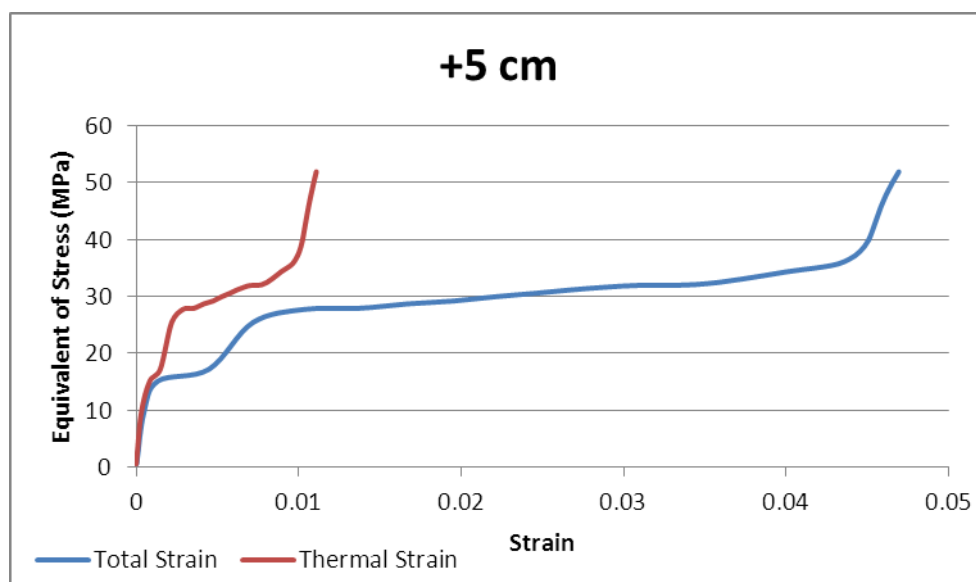
Παρατηρείται, επίσης, ότι και σε αυτή την περίπτωση η ολική ανηγμένη παραμόρφωση είναι πολύ μεγαλύτερη της θερμικής, ενώ οι τάσεις φτάνουν μέχρι τα 140 MPa, πολύ παραπάνω από την τυπική αντοχή του σκυροδέματος, γεγονός που μαρτυρά ότι η ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης έχει αστοχήσει, μέσω του μηχανισμού της αποφλοίωσης.



Εικόνα 4.45. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 2.5 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στη στέψη της σήραγγας.

Ομοίως, οι διακυμάνσεις και στο διάγραμμα της Εικόνας 4.45 οφείλονται σε μη ικανοποιητική σύγκλιση ή σε αναπροσαρμογή τάσεων.

Και σε αυτό το βάθος, παρατηρούνται αυξημένες τιμές τάσεων, οι οποίες καταδεικνύουν πιθανή αστοχία του σκυροδέματος, μέσω του φαινομένου της αποφλοιώσης.

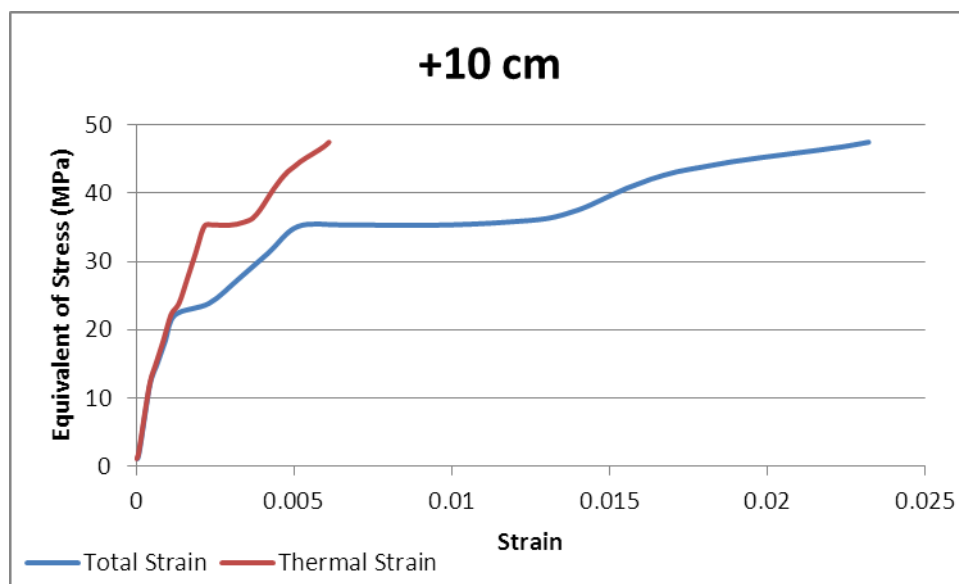


Εικόνα 4.46. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 5 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στη στέψη της σήραγγας.

Στο διάγραμμα της Εικόνας 4.46 παρατηρείται ότι οι ολική και η θερμική ανηγμένη παραμόρφωση συμπίπτουν μέχρι, περίπου, τα 15 MPa καταπόνησης. Στο

διάστημα αυτό παρατηρούνται σχεδόν μηδενικές παραμορφώσεις, γεγονός που μπορεί να οφείλεται σε καμπτική καταπόνηση.

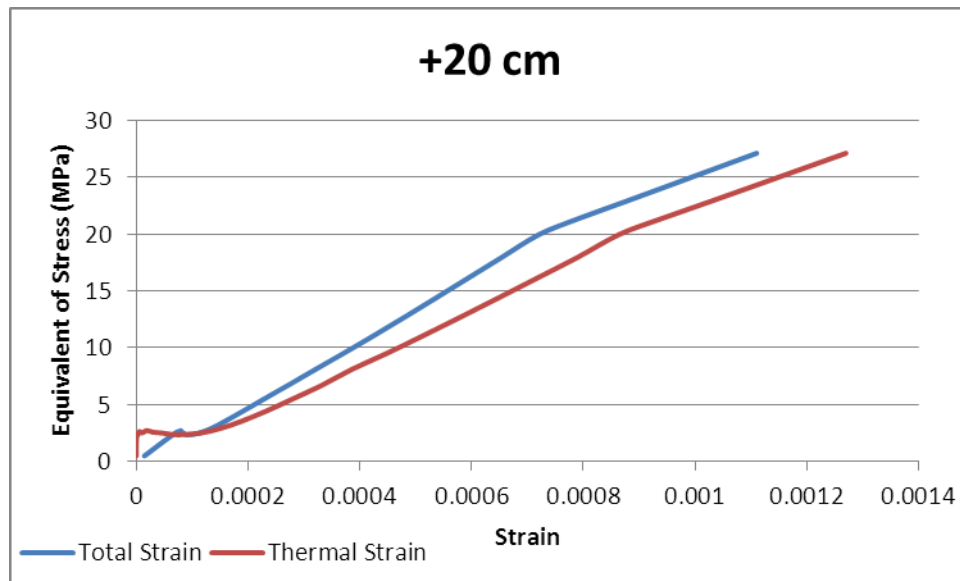
Παρατηρείται επίσης ελάττωση των διακυμάνσεων σε σχέση με μικρότερα βάθη. Αυτό ίσως οφείλεται στην ομαλότερη αύξηση των τάσεων σε σχέση με το χρόνο επιβολής της θερμικής καταπόνησης.



Εικόνα 4.47. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 10 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στη στέψη της σήραγγας.

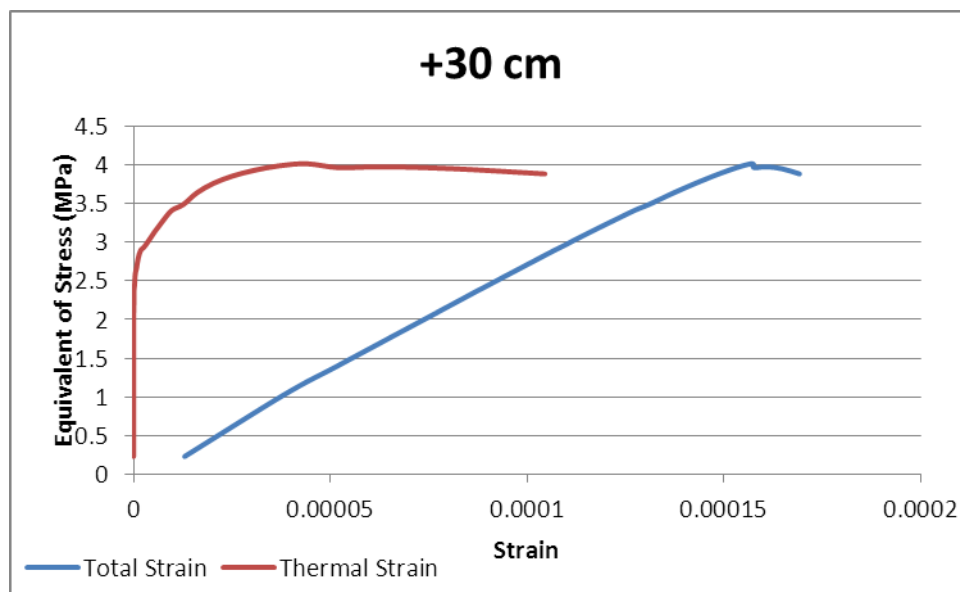
Στο διάγραμμα της Εικόνας 4.47 παρατηρείται ότι οι ολικές και οι θερμικές καταπονήσεις συμπίπτουν μέχρι τα 22 MPa. Στο διάστημα αυτό παρατηρούνται σχεδόν μηδενικές παραμορφώσεις, γεγονός που μπορεί να οφείλεται σε καμπτική καταπόνηση.

Παρατηρούνται και σε αυτό το βάθος τάσεις που ξεπερνούν τα 40 MPa, γεγονός που καταδεικνύει ότι η αστοχία του σκυροδέματος ξεπερνά τα 10 cm.



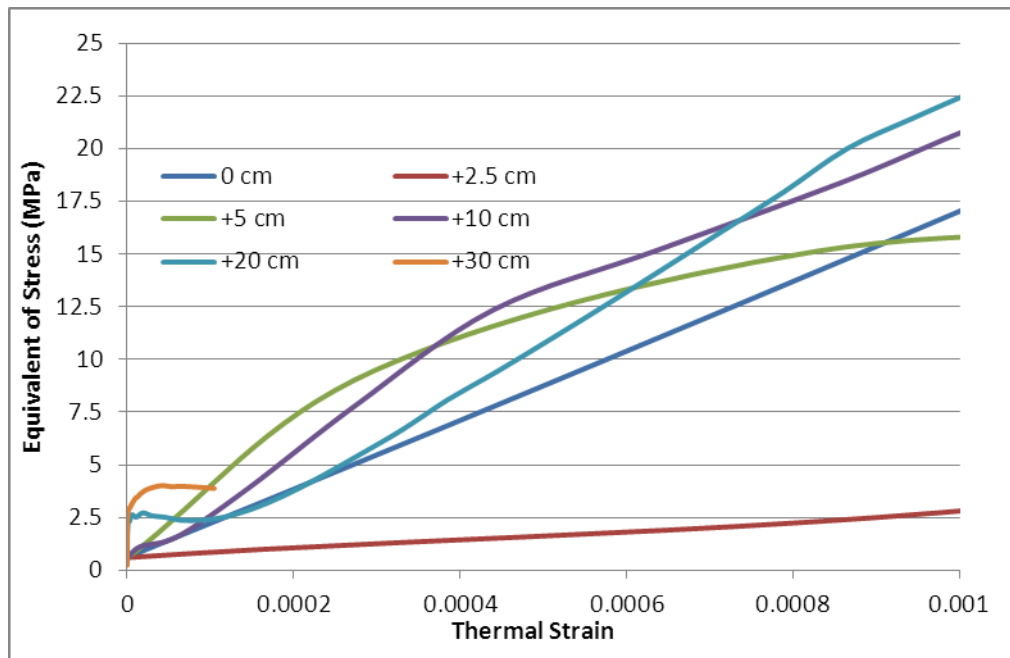
Εικόνα 4.48. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 20 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στη στέψη της σήραγγας.

Η σχέση τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης στο συγκεκριμένο βάθος (20 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης) είναι σχεδόν γραμμική και οι τιμές των ολικών και θερμικών παραμορφώσεων πολύ κοντινές.



Εικόνα 4.49. Διάγραμμα ισοδύναμης τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης σε βάθος 30 cm από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στη στέψη της σήραγγας.

Παρατηρείται ότι η ολική ανηγμένη παραμόρφωση παρουσιάζει γραμμική κατανομή, ενώ η θερμική καταπόνηση, παρουσιάζει μέγιστο στα 4 MPa, περίπου.



Εικόνα 4.50. Διάγραμμα τάσης – θερμικής ανηγμένης παραμόρφωσης για διάφορα βάθη από την ελεύθερη επιφάνεια της επένδυσης, στη στέψη της σήραγγας.

Στην Εικόνα 4.50, παρατηρούνται συγκεντρωτικά οι τιμές ισοδύναμης τάσης και θερμικής ανηγμένης παραμόρφωσης για διάφορα βάθη, στον οριζόντιο άξονα συμμετρίας της σήραγγας. Παρατηρείται, ότι σε βάθος 30 cm από την ελεύθερη επιφάνεια, συγκριτικά με τα υπόλοιπα βάθη, η τιμές τάσης και θερμικής παραμόρφωσης είναι κατά πολύ μικρότερες. Σε βάθη 5 cm, 10 cm, 20 cm και επάνω στην ελεύθερη επιφάνεια (0 cm) οι τάσεις και οι θερμικές ανηγμένες παραμορφώσεις αναπτύσσονται, αρχικά, με παρόμοιο τρόπο.

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα και Προτάσεις

Συνοψίζοντας, κατασκευάστηκαν 2 μοντέλα με το λογισμικό “MARC.Mentat”. Το πρώτο (ορθογωνικό) μοντέλο διακριτοποιήθηκε με ιδιότητες σκυροδέματος και χρησιμοποιήθηκε για τη βαθμονόμηση και την επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων και συνοριακών συνθηκών του μοντέλου της σήραγγας βάσει πρότυπων καμπυλών θερμοκρασίας – χρόνου, που είναι διαθέσιμα από τη βιβλιογραφία.

Στη συνέχεια σχεδιάστηκε το μοντέλο σε συμμετρία $\frac{1}{4}$ μιας σήραγγας διαστάσεων 10 m x 10 m. Το κυκλικό άνοιγμα είχε ακτίνα 5. Περιμετρικά του ανοίγματος και με πάχος 30 cm σχεδιάστηκε η επένδυση με ιδιότητες σκυροδέματος ενώ στα υπόλοιπα στοιχεία αποδόθηκαν ιδιότητες ασβεστολιθικού πετρώματος.

Το μοντέλο της σήραγγας επιλύθηκε πρώτα με ελαστικές παραμέτρους και στη συνέχεια θεωρείται ελαστοπλαστικό κριτήριο αστοχίας κατά Mohr Coulomb για το σκυρόδεμα.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι τα εξής:

- Οι τάσεις αναπτύχθηκαν κατά την επίλυση του ελαστικού μοντέλου είναι της τάξης των 420 MPa, πολύ μεγαλύτερες από τις τυπικές αντοχές του σκυροδέματος.
- Οι τάσεις του ελαστικού μοντέλου είναι κατά πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του ελαστοπλαστικού μοντέλου (120 MPa).
- Η συμπεριφορά του ελαστοπλαστικού μοντέλου είναι περισσότερο αντιπροσωπευτική από εκείνη του ελαστικού, καθώς εισάγονται κριτήρια αστοχίας και επιτρέπουν στο υλικό να ακολουθήσει την περιβάλλουσα αστοχίας από την πιθανή υπέρβαση.
- Στα σημεία που παρατηρείται υπέρβαση της δεδομένης αντοχής του σκυροδέματος, πρόκειται για σημεία που εμφανίζουν πιθανή αστοχία, με το φαινόμενο της εκρηκτικής αποφλοίωσης που περιγράφεται από τη βιβλιογραφία.
- Σε ορισμένα βάθη παρατηρούνται σχεδόν μηδενικές παραμορφώσεις παρόλο που αυξάνεται η τάση. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε ύπαρξη καμπτικών καταπονήσεων στις συγκεκριμένες περιοχές, μιας και σε μετέπειτα χρονικό βήμα οι παραμορφώσεις αυξάνονται απότομα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω συμπεράσματα, προτείνεται:

- η περαιτέρω διερεύνηση της συμπεριφοράς του υπόγειου ανοίγματος σε θερμικές τάσεις, βάσει εκτενέστερης παραμετρικής ανάλυσης της απόκρισης του μοντέλου σε πρότυπες θερμικές καταπονήσεις,
- η περαιτέρω διερεύνηση των μεθόδων σύγκλισης Newton – Raphson και αύξηση των βημάτων επίλυσης που αναφέρονται στη σύγκλιση με σκοπό την εξομάλυνση των καμπυλών,
- η μελέτη της συμπεριφοράς του μοντέλου, με διαφορετικά κριτήρια αστοχίας, πέραν του Mohr – Coulomb,
- η εκτενέστερη βαθμονόμηση βάσει εργαστηριακών ή άλλων δοκιμών θερμικής καταπόνησης σκυροδέματος, με σκοπό την άμεση σύγκριση αποτελεσμάτων,
- η εξέταση επίδρασης μειούμενου μέτρου ελαστικότητας με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

Anderberg, Y. (1997). Spalling Phenomena of HPC and OC. *NIST Workshop on Fire Performance of High Strength Concrete*. Gaithersburg.

Bostrom, L., & Larsen, C. (2006). Concrete for Tunnel Linings Exposed to Severe Fire Exposure. *Fire Technology*, 42, 351-362.

Chung, S. (2006). Thermomechanical Behavior of Rock Masses around Underground LNG Storage Cavern. *ISRM International Symposium: Rock Mechanics in Underground Construction* (pp. 19-28). Singapore: World Scientific Publishing.

European Thematic Network on Fire in Tunnels. (2006). *Fire in Tunnels, General Report*. Brussels: European Community.

Hatmathy, T. Z. (1985). *Fire Safety: Science and Engineering*. Baltimore: ASTM Special Technical Publication 882.

Hertz, K. D. (2003). Limits of spalling of fire-exposed concrete. *Fire Safety Journal*, 38, 103-116.

Hetnarski, R. (1996). *Mechanics and Mathematical Methods, A Series of Handbooks, Second Series: Thermal Stresses Vol.4: Thermal Stresses IV*. Amsterdam: Elsevier Science B.V.

Khoury, G. A. (2000). Effect of fire on concrete and concrete structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2(4), 429-447.

Krause, T. (2006). Design Options and Possibilities, View of a Contractor. *Fire Protection for New And Existing Tunnels*, 291-317.

Nishio, S., Sasaki, T., & Kojima, Y. (2006). Mechanism and Countermeasures of Coarse Aggregate Spalling in Aged Concrete Tunnel Linings. *Quarterly Report Railway Technical Research Institute*, 47(3), 132-137.

Ελληνική Βιβλιογραφία

Αγγελόπουλος, Γ., & Γιόκαρης, Σ. (2005). Επίδραση πυρκαγιάς σε σήραγγα - Μέθοδοι επισκευής και ενίσχυση. 11ο Φοιτητικό Συνέδριο "Επισκευές Κατασκευών", Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 1-28.

Αγιουτάντης, Ζ. (2002). *Στοιχεία Γεωμηχανικής - Μηχανική Πετρωμάτων*. Αθήνα: Εκδόσεις ΙΩΝ.

Βιόπουλος, Π. (2006). *Παραμετρική διερεύνηση εντατικής κατάστασης κατά τη διάνοιξη σήραγγας με τη μέθοδο της προπασσάλωσης οροφής*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.

Νικολός, Ι. Κ. (2007). *Σημειώσεις μαθήματος Μετάδοση Θερμότητας*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.

Παπαδάκη, Ζ. (2010). *Διερεύνηση εφελκυστικής αντοχής ινοπλισμένου σκυροδέματος*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.

Σακκάς, Α., Νομικός, Π., Πάνιας, Δ., & Σοφιανός, Α. (2010). Προστασία Σηράγγων από Πυρκαγιά. *6ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνική & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Τόμος Β* (σσ. 383-389). Βόλος: ΤΕΕ.

Τ.Ε.Ε. & Ε.Μ.Π. (2008). *Πρακτικός Οδηγός για την αποτίμηση φέρουσας ικανότητας και τις δομητικές επισκευές μετά από πυρκαγιά, σε μικρά κτήρια από σκυρόδεμα και από τοιχοποιία*. Αθήνα: Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος & Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο.

Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε, Κ.Ε.Δ.Ε. (2008). Νέος Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμένου Σκυροδέματος. *ΦΕΚ 1416/Β/17-07-2008 και ΦΕΚ 2113/Β/13-10-2008*, σ. 136.

Ιστοσελίδες

1. http://en.wikipedia.org/wiki/1996_Channel_Tunnel_fire
2. http://en.wikipedia.org/wiki/Summit_Tunnel_fire
3. http://en.wikipedia.org/wiki/Gotthard_Road_Tunnel
4. http://en.wikipedia.org/wiki/Tauern_Rail_Tunnel
5. http://en.wikipedia.org/wiki/Kaprun_disaster
6. <http://www.swissinfo.ch/eng/index.html?siteSect=105&sid=880022>
7. <http://news.bbc.co.uk/2/hi/europe/1723406.stm>
8. <http://en.wikipedia.org/wiki/Concrete>
9. <http://www.promat-tunnel.com/en/concrete-spalling-effect-standard-fire-tests.aspx>
10. <http://www.promat-tunnel.com/en/hydrocarbon-hcm-hc-rabt-rws.aspx>
11. <http://www.ceric.net/technology/Downloadvirtual.asp?id=FEA%20KOREA&ref=14&step=1>

Φωτογραφία εξωφύλλου: protectowire.com