



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Αντισεισμική Τεχνολογίας

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΜΕ ΜΝΗΜΗ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΥΠΟ ΑΝΑΛΥΚΛΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ



Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία
Ευαγγελία Νεκταρία Παλκάνογλου

Επιβλέπων: Μιχάλης Φραγκιαδάκης, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2018

Copyright © Ευαγγελία Νεκταρία Παλκάνογλου, 2018
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια της Παλκάνογλου Ευαγγελίας-Νεκταρίας. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς την συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων της συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright ©Evangelia-Nektaria Palkanoglou, 2018
All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organisation (L. 5343/1932, art. 202).

Ευαγγελία Νεκταρία Παλκάνογλου (2018)

Εφαρμογές κραμάτων αλουμινίου με μνημη σχήματος σε κατασκευές πολιτικού
μηχανικού υπό ανακυκλική φόρτιση
Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Evangelia-Nektaria Palkanoglou (2018)

Postgraduate Diploma Thesis

Use of shape memory alloys in civil engineering structures subjected to cyclic
loading

Laboratory of Earthquake Engineering, National Technical University of Athens,
Greece

Ευχαριστίες

Η συγγραφή τούτης της διπλωματικής εργασίας ολοκληρώνει ένα όμορφο ταξίδι, το οποίο χαρακτηρίζεται από την περάτωση των μεταπτυχιακών σπουδών μου. Το ταξίδι αυτό αν και μικρό, διήρκησε μόλις ενάμισι χρόνο, μου πρόσφερε πλήθος γνώσεων και εμπειριών και μου χάρισε ένα πολύτιμο εισιτήριο για να κυνηγήσω τα όνειρά μου. Κατά τη διάρκεια αυτού του ταξιδίου, υπήρξαν πολύτιμοι συνοδοιπόροι και συνταξιδιώτες. Αρχικά, οι γονείς και ο αδερφός μου, που στέκονταν δίπλα μου κάθε στιγμή και δεν έπαιναν να πιστεύουν σε εμένα. 'Ενα αγαπημένο πρόσωπο ου ήταν πάντα εδώ, να με στηρίζει, να με βοηθά και να με ενθαρρύνει κάθε στιγμή. Δεν ξεχνάω όμως τον πιο σημαντικό αρωγό, τον κ. Μιχάλη Φραγκιαδάκη, τον επιβλέποντα της εργασίας αυτής. Θα ήθελα, λοιπόν, να τον ευχαριστήσω πολύ για όλη την πολύτιμη βοήθεια που μου έχει προσφέρει μέχρι τώρα όχι μόνον σε επίπεδο διπλωματικής εργασίας. Για το τέλος ευχαριστώ πολύ τους φίλους μου που δίνουν πάντα ένα λόγο να συνεχίσω να αγωνίζομαι.

Ευαγγελία Νεκταρία Παλκάνογλου-Μάρτιος 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΜΕ ΜΝΗΜΗ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΣΕ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΥΠΟ ΑΝΑΛΥΚΛΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ**

ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ-ΝΕΚΤΑΡΙΑ ΠΑΛΚΑΝΟΓΛΟΥ

Επιβλέπων: Μιχάλης Φραγκιαδάκης, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετώνται τα υλικά με μνήμη σχήματος και πιο συγκεκριμένα τα κράματα αλουμινίου που εμφανίζουν αυτή την ιδιότητα. Πέραν της ιδιότητας που φέρουν στο όνομά τους, τα κράματα αυτά εμφανίζουν επιπλέον και υπερελαστικότητα, γεγονός που τα καθιστά ιδιαίτερα δημοφιλή σε πλήθος εφαρμογών Πολιτικού Μηχανικού και όχι μόνο. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, τα κράματα αυτά ενσωματώθηκαν σε δομικά μοντέλα, προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά τους υπό ανακυκλική θερμοκρασιακή φόρτιση. Σκοπός, επομένως, είναι η επαρκής στατική ανάλυση ενός τέτοιου συστήματος, η κατανόηση της συμπεριφοράς του και κυρίων των δομικών μελών του από κράματα με μνήμη σχήματος, καθώς επίσης και η διερεύνηση των παραμέτρων που επηρεάζουν λίγο ή καθοριστικά την απόκρισή του.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη αναφορά στα υλικά με μνήμη σχήματος και ταυτόχρονα καταγράφονται διάφορες εφαρμογές τους σε ποικίλους τομείς, αλλά κυρίως της μηχανικής.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται οι καταστατικοί νόμοι συμπεριφοράς των κραμάτων με μνήμη σχήματος. Γίνεται εκτενής αναφορά στο μαθηματικό και φυσικό υπόβαθρο καθενός εκ των τριών μοντέλων που είναι ευρέων διαδεδομένα, ενώ πραγματοποιήθηκε και μια σχετική σύγκριση μεταξύ τους προκειμένου να καταγραφούν οι διαφοροποιήσεις τους και το πεδίο εφαρμογής καθενός.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης των τριών διαφορετικών μοντέλων που επιλέχθηκαν. Παράλληλα, εισάγοντας το γενικευμένο μοντέλο, γίνεται γενίκευση του αλγορίθμου ανάλυσης συστημάτων με ενεργοποιητές και παρουσιάζεται η βασική έννοια της καμπύλης λειτουργίας συστήματος, η οποία αποτελεί τη βάση για το σχεδιασμό τέτοιων συστημάτων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιείται διερεύνηση των παραμέτρων: αρχική τάση (προένταση), αρχικό μήκος, εμβαδό διατομής και κλίση ενεργοποιητή στην απόκριση του. Επιπλέον, διενεργείται διαδικασία βελτιστοποίησης της θερμοκρασιακής φόρτισης προκειμένου να μειωθεί το σφάλμα του αλγορίθμου επίλυσης.

Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο αναφέρονται συνοπτικά τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα έρευνα, ενώ παρουσιάζονται και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα σχετικά με τα κράματα με μνήμη σχήματος.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES

POSTGRADUATE DIPLOMA THESIS

**USE OF SHAPE MEMORY ALLOYS IN CIVIL ENGINEERING STRUCTURES
SUBJECTED TO CYCLIC LOADING**

Evangelia Nektaria Palkanoglou

Supervisor: Assistant Professor Michalis Fragiadakis

ABSTRACT

In this diploma the shape-memory materials are investigated and, in particular, the aluminium alloys exhibiting this property. In addition to their own name, these alloys also show superelasticity, making them particularly popular in a variety of Civil Engineering applications and beyond. In this diploma thesis, these alloys have been incorporated into structural models to study their behaviour under cyclic temperature loading. The aim is therefore to provide an adequate static analysis of such a system, to understand its behaviour and above all its structural members by shape - memory alloys, as well as to investigate the parameters that have little or decisive influence on its response.

In the first chapter there is a brief reference to the shape-memory materials and at the same time various applications are recorded in various fields, but mainly in engineering.

The second chapter analyses the constitutive laws of alloys with shape memory. Extensive reference is made to the mathematical and physical background of each of the three widely used models, and a relative comparison was made between them to capture their variations and the scope of each.

The third chapter presents the results of the analysis of the three different models selected. At the same time, by introducing the generalized model, the algorithm of system analysis with actuators is generalized and the basic concept

of the system operating curve is presented, which is the basis for the design of such systems.

In the fourth chapter the role of parameters, such as prestressing, initial length, cross sectional area and actuator slope in its response is investigated. In addition, a temperature load optimization process is performed to reduce the error of the resolution algorithm.

The fifth and final chapter summarizes the main findings of the present study, and proposals for further research on shape memory alloys are presented.

Περιεχόμενα

| | |
|---|-----------|
| 1 Εισαγωγή | 1 |
| 1.1 Έξυπνα υλικά | 2 |
| 1.1.1 Έξυπνα υλικά με μνήμη σχήματος..... | 2 |
| 1.2 Εφαρμογές των έξυπνων υλικών με μνήμη σχήματος..... | 3 |
| 1.2.1 Σε κατασκευές Πολιτικού Μηχανικού | 3 |
| 1.2.2 Άλλες εφαρμογές | 4 |
| 2 Καταστατικός Νόμος Συμπεριφοράς Κραμάτων Με Μνήμη Σχήματος | 5 |
| 2.1 Γενικά | 6 |
| 2.2 Θερμομηχανική Συμπεριφορά | 6 |
| 2.2.1 Αλλαγές Φάσης..... | 6 |
| 2.2.2 Χαρακτηριστικές Θερμοκρασίες Αλλαγής Φάσης | 8 |
| 2.2.3 Περιγραφή ενός πλήρη μετασχηματισμού | 9 |
| 2.2.4 Υπερελαστικότητα ή ψευδό-ελαστικότητα | 10 |
| 2.3 Μονοαξονικοί καταστατικοί νόμοι του υλικού..... | 13 |
| 2.3.1 Μοντέλο Tanaka (1986) | 14 |
| 2.3.2 Μοντέλο Liang and Rogers (1990) | 16 |
| 2.3.3 Μοντέλο Brinson (1990)..... | 18 |
| 2.4 Συμπεράσματα | 21 |
| 3 Ανάλυση «Έξυπνων» Κατασκευών Με Ενεργοποιητές Από Κρέματα Με Μνήμη Σχήματος..... | 23 |
| 3.1 Γενικά | 24 |
| 3.2 Αριθμητική προσέγγιση του προβλήματος | 24 |
| 3.2.1 Πρόβολος με έναν ενεργοποιητή στο ελεύθερο άκρο..... | 25 |
| 3.2.1.1 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά μοντέλου | 25 |
| 3.2.1.2 Αρχικές Συνθήκες | 27 |
| 3.2.1.3 Φόρτιση..... | 27 |
| 3.2.1.4 Αποτελέσματα ανάλυσης συστήματος | 29 |
| 3.2.2 Πρόβολος με δύο ενεργοποιητές στο ελεύθερο άκρο..... | 34 |
| 3.2.2.1 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά μοντέλου | 34 |
| 3.2.2.2 Αρχικές Συνθήκες | 35 |
| 3.2.2.3 Φόρτιση..... | 36 |
| 3.2.2.4 Αποτελέσματα ανάλυσης συστήματος | 37 |
| 3.2.3 Γενικευμένο μοντέλο με 4 ενεργοποιητές..... | 42 |
| 3.2.3.1 Γενίκευση αλγορίθμου επίλυσης | 43 |
| 3.2.3.2 Καμπύλη λειτουργίας «έξυπνου συστήματος»..... | 46 |

| | |
|--|-----------|
| 3.2.3.3 Υπολογισμός σημείων λειτουργίας | 49 |
| 4 Παραμετρική Διερεύνηση Συστημάτων Με Ενεργοποιητές Από Κράματα Με Μνήμη Σχήματος..... | 53 |
| 4.1 Γενικά..... | 54 |
| 4.2 Αρχική Τάση (Προένταση)..... | 54 |
| 4.3 Αρχικό Μήκος ενεργοποιητή | 56 |
| 4.4 Βελτιστοποίηση Θερμοκρασιακής φόρτισης..... | 57 |
| 4.4.1 Γενετικοί Αλγόριθμοι | 57 |
| 4.4.1.1 Γενικά Στοιχεία | 57 |
| 4.4.1.2 Πως Λειτουργούν | 59 |
| 4.4.1.3 Τρόπος Υλοποίησης του Αλγορίθμου..... | 60 |
| 4.4.2 Εφαρμογή γενετικού αλγόριθμου για ελαχιστοποίηση του σφάλματος του αλγορίθμου | |
| 61 | |
| 5 Συμπεράσματα | 65 |
| 5.1 Γενικά συμπεράσματα | 66 |
| 5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα | 67 |

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Έξυπνα υλικά

Ο όρος «έξυπνα υλικά» περιγράφει ένα ευρύ φάσμα υλικών, τα οποία έχουν την ικανότητα να μεταβάλλουν τη συμπεριφορά τους ή ορισμένα χαρακτηριστικά τους (σχήμα, ιδιοσυχνότητα, συντελεστής απόσβεσης δονήσεων κτλ.) με δεδομένο και ελεγχόμενο τρόπο, μέσω μιας διέγερσης. Ως διέγερση θα μπορούσε να νοηθεί η αλλαγή θερμοκρασίας, η διαφορά δυναμικού, η αλλαγή του PH του περιβάλλοντος, η ύπαρξη ή μη μαγνητικού πεδίου κ.α.

1.1.1 Έξυπνα υλικά με μνήμη σχήματος

Μια σπουδαία κατηγορία των έξυπνων υλικών είναι εκείνα που έχουν την ικανότητα να «θυμούνται» το αρχικό σχήμα τους και κατά συνέπεια να επιστρέψουν σε αυτό, όταν υποστούν το κατάλληλο εξωτερικό ερεύθισμα, όπως π.χ. αύξηση της θερμοκρασίας.

Η συμπεριφορά μνήμης σχήματος παρατηρήθηκε για πρώτη φορά σε ένα δείγμα καδμίου-χρυσού (AuCd) από τους Chang και Read το 1932. Αυτός ο μετασχηματισμός του σχήματος αργότερα παρατηρήθηκε σε ορείχαλκο (brass) το 1938, καθώς επίσης και σε μια δοκό από AuCd το 1951. Δεν ήταν μέχρι το 1962 που ένα πλήρες φαινόμενο μνήμης σχήματος παρατηρήθηκε σε μια σειρά από κράματα νικελίου-τιτανίου από τους Buehler, Gilfrich και Wiley. Αυτό το κράμα μνήμης σχήματος (SMA), καλείται τώρα Nitinol (NiTi) και είναι το πιο γνωστό εμπορικά μεταλλικό υλικό με μνήμη σχήματος. Αυτό το κράμα επιδεικνύει όχι μόνον εξαιρετικά χαρακτηριστικά μνήμης σχήματος, αλλά μπορεί επίσης να έχει μεταβλητή θερμοκρασία μετασχηματισμού αλλάζοντας τη χημεία ή τη σύνθεσή του. Υπάρχει συνεχής έρευνα αφιερωμένη στην εξεύρεση νέων κραμάτων που παρουσιάζουν το φαινόμενο μνήμης σχήματος. Τα διπλώματα ευρεσιτεχνίας τα τελευταία χρόνια έχουν δείξει τέτοια κράματα όπως ο χαλκός, ο ψευδάργυρος και το αλουμίνιο σε συνδυασμό με μικρότερες ποσότητες νικελίου και τιτανίου. Τέλος, υπάρχουν πολυμερή, κεραμικά, τζέλ, υβρίδια και σύνθετα υλικά που εμφανίζουν μνήμη σχήματος, αλλά δεν αποτελούν μέρος της παρούσας έρευνας.

1.2 Εφαρμογές των έξυπνων υλικών με μνήμη σχήματος

1.2.1 Σε κατασκευές Πολιτικού Μηχανικού

Η μνήμη σχήματος σε συνδυασμό με ιδιότητες όπως η υπερελαστικότητα, η αντοχή σε κόπωση και η ικανότητα απόσβεσης, καθιστούν τα υλικά αυτά αναπόσπαστο τμήμα των «έξυπνων κατασκευών». Με τον όρο «έξυπνες κατασκευές» καλούνται τα συστήματα, τα οποία έχουν την ικανότητα να προσαρμόζουν αυτόματα ένα ή περισσότερα χαρακτηριστικά τους, ανάλογα με τα εξωτερικά αίτια, με αποτέλεσμα την εξασφάλιση της ασφάλειας αλλά και της λειτουργικότητάς σε βάθος του χρόνου ζωής τους. Τα υλικά με μνήμη σχήματος καλούνται λοιπόν να παίξουν το ρόλο αισθητήρων ή ενεργοποιητών, με στόχο την παρακολούθηση και την αυτόματη προσαρμογή της κατασκευής στις αλλαγές του περιβάλλοντος.

Η χρήση τους σε κόμβους δοκού-υποστυλώματος, ως καλώδια σε καλωδιωτές κατασκευές και ράβδους οπλισμού σε κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα ή ακόμα και στα πλαίσια της σεισμικής μόνωσης, εκμεταλλεύεται την ικανότητα απόσβεσής τους. Αποτελούν, λοιπόν, άριστο σύστημα παθητικής απόσβεσης.

Η ικανότητα μνήμης σχήματος που διαθέτουν τα καθιστά κατάλληλα για την χρήση τους ως τένοντες σε κατασκευές που πρόκειται να υποστούν προένταση. Η προένταση τους θα εφαρμοστεί μέσω αλλαγών της θερμοκρασίας και όχι με μηχανικά μέσα όπως στον απλό χαλύβδινο τένοντα. Έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις κατασκευών που έχουν υποστεί μεγάλες παραμένουσες παραμορφώσεις, κυρίως από σεισμό, με στόχο την αναίρεσή τους. Συγκεκριμένα, ενταφιάστηκαν εντός της κατασκευής με τη μορφή ελκυστήρα ή καλωδίου και με κατάλληλη θέρμανση επανέφεραν την κατασκευή στο αρχικό της σχήμα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της εφαρμογής αποτελεί ο ναός του Αγίου Φραγκίσκου στην Ασίζη της Ιταλίας.

Τέλος, η ηλεκτρική τους αντίσταση, η οποία μάλιστα εξαρτάται άμεσα από τις ανηγμένες παραμορφώσεις, είναι βασικής σημασίας όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν ως αισθητήρες σε κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα.

1.2.2 Άλλες εφαρμογές

Τα υλικά με μνήμη σχήματος έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί σε ιατρικές εφαρμογές, ως τεχνητά μέλη, ορθοδοντικές συσκευές και ορθοπεδικά εμφυτεύματα, στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας, χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό (κυρίως από Ευρωπαίους κατασκευαστές) ως επενεργητές για τον έλεγχο ρευστών μετάδοσης. Στον τομέα της αεροπορικής βιομηχανίας, έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές μελέτες για την ενσωμάτωση στη δομή των πτερυγίων αεροσκαφών (υπερηχητικών κυρίως) καλωδίων, κατασκευασμένα από κράματα με μνήμη σχήματος, με στόχο τον έλεγχο της αεροδυναμικής απόδοσης. Τα πτερύγια θα πρέπει να είναι στιβαρά, ώστε να παρέχουν πλήρη έλεγχο της πτήσης, αλλά και ελαστικά προκειμένου να αλλάζει εύκολα το σχέδιο πτήσης. Αντίστοιχες προσπάθειες έχουν λάβει χώρα για τον έλεγχο της απόδοσης ιπτάμενων δελφινιών καθώς και των επιφανειών ελέγχου υποβρυχίων. Η δυνατότητα κατασκευής εξαρτημάτων μικρού βάρους και όγκου σε συνδυασμό με αξιοσημείωτες ιδιότητες υλικών καθιστούν τα υλικά με μνήμη σχήματος βασική κατηγορία υλικών και για τον τομέα της διαστημικής. Χαρακτηριστική εφαρμογή τους σε κινητήρα, οποίος ενεργοποιείται με SMA καλώδιο για τον προσανατολισμό των ηλιακών συλλεκτών δορυφόρου. Τέλος, σκελετοί γυαλιών όρασης και κεραίες κινητών τηλεφώνων αποτελούν καθημερινά παραδείγματα χρήσης υλικών SMA. Οι κεραίες κινητών τηλεφώνων, που παλαιότερα κατασκευάζονταν από ανοξείδωτο χάλυβα, πλέον κατασκευάζονται παγκοσμίως από υπερελαστικό κράμα NiTi, εξαιτίας της υψηλής αντίστασης σε μόνιμη κάμψη και καταστροφή λόγω ατυχήματος. Ομοίως με την κατασκευή υπερελαστικών γυαλιών όρασης, συχνά χρησιμοποιείται κατεργασία εν ψυχρώ προκειμένου να ενισχυθεί η υπερελαστικότητα σε χαμηλές θερμοκρασίες

2 ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΜΕ ΜΝΗΜΗ ΣΧΗΜΑΤΟΣ

2.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια διεξοδική αναφορά στις καταστατικές σχέσεις που διέπουν την συμπεριφορά των κραμάτων με μνήμη σχήματος και ειδικότερα του NiTi. Πλήθος καταστατικών σχέσεων έχει δημιουργηθεί προκειμένου να εξηγηθεί επαρκώς και με ακρίβεια. Μερικές από αυτές βασίζονται στη μικρομηχανική, ενώ άλλες σε συνδυασμό μίκρο- και μακρομηχανικής, στατιστικής μηχανικής ή ακόμα και κινητικών μεθόδων. Η ανάπτυξη ολοένα και πιο σύγχρονων αριθμητικών μεθόδων, όπως τα πεπερασμένα στοιχεία, είχε ως αποτέλεσμα να επιδιώκονται μοντέλα που να είναι συνυφασμένα με τη Μηχανική του Συνεχούς Μέσου. Πλεονέκτημα των μοντέλων αυτών είναι ότι χρησιμοποιούν ως παραμέτρους μεγέθη γνωστά στον μηχανικό και όχι φυσικά μεγέθη, που δεν μπορούν εύκολα να ποσοτικοποιηθούν. Τέλος, η εφαρμογή τους αφορά μόνον οιωνεί στατικές φορτίσεις..

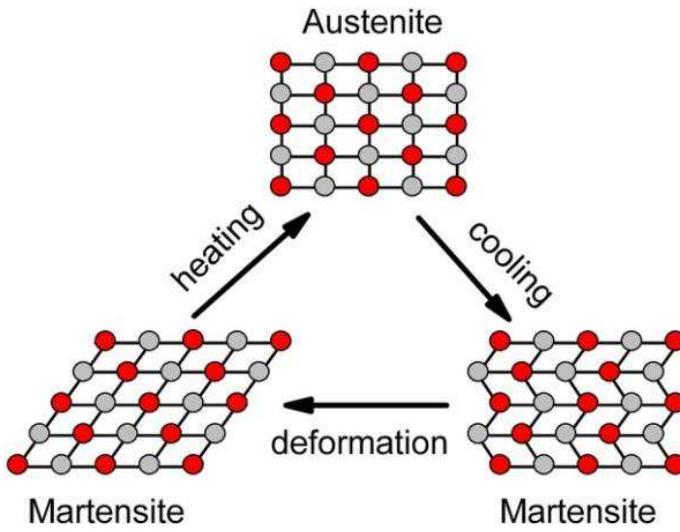
2.2 Θερμομηχανική Συμπεριφορά

2.2.1 Αλλαγές Φάσης

Πριν γίνει η παρουσίαση των μοντέλων συμπεριφοράς των κραμάτων με μνήμη σχήματος, είναι απαραίτητο να κατανοηθεί η μικροσκοπική συμπεριφορά των υλικών αυτών, διότι αυτή είναι ουσιαστικά που τους χαρίζει τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους.

Τα κράματα με μνήμη σχήματος χαρακτηρίζονται από μετασχηματισμούς φάσης στερεάς κατάστασης, δηλαδή τόσο η αρχική (μητρική ή ωστενιτική) (Εικόνα 2.1) όσο και η τελική (παράγωγη ή μαρτενσιτική) είναι στερεές, ανεξάρτητα αν φέρουν διαφορετική κρυσταλλική δομή. Ο ωστενίτης συμπεριφέρεται κυρίως σαν

μέταλλο και εμφανίζει μεγάλο μέτρο ελαστικότητας Ε, σε αντίθεση με τον μαρτενσίτη, ο οποίος έχει συμπεριφορά που μοιάζει περισσότερο με ελαστομερές, δηλαδή με μικρότερη δυσκαμψία και μεγάλο πλατό στο διάγραμμα σ-ε. Ο μετασχηματισμός από τη μητρική κατάσταση (ωστενίτική) πραγματοποιείται, είτε με πτώση της θερμοκρασίας, είτε με αύξηση της τάσης, με αποτέλεσμα να προκύπτει ένας χαρακτηριστικός τύπος μαρτενσίτη, ανάλογα με το αίτιο. Ο μετασχηματισμός σε κάθε περίπτωση είναι μετατοπιστικός, δηλαδή πραγματοποιείται με συνεργατική μετατόπιση των όλων των ατόμων του πλέγματος, έτσι ώστε να διατηρείται πλήρης αντιστοιχία μεταξύ αρχικών και τελικών πλεγματικών θέσεων. Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός είναι μηδιαχυτικός, αφού δεν προϋποθέτει διάχυση για την πραγματοποίησή του και στην ουσία σχηματίζεται με διάτμηση της μητρικής φάσης (ωστενίτη), όταν προέρχεται από αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτός ο μαρτενσίτης ονομάζεται πλακοειδής (twinned martensite) (Εικόνα 2.1). Ωστόσο, όταν αυξάνεται η τάση προκύπτει ο βελονοειδής μαρτενσίτης (de-twinned martensite) (Εικόνα 2.1), ο οποίος διαφέρει από τον πλακοειδή, ως προς τον επιναπροσανατολισμό της κρυσταλλική του δομή, χάρη στον οποίο εμφανίζεται το φαινόμενο της μνήμης σχήματος. Αναλυτικότερα, χάρη στις μετατοπίσεις ατόμων του συγκεκριμένου κρυσταλλικού πλέγματος, είναι δυνατή η αναίρεση της παραμένουσας παραμόρφωσης και άρα της επιστροφής στο αρχικό σχήμα, μέσω ενός αντίστροφου μετασχηματισμού. Είναι προφανές, ότι το μέγεθος της μέγιστης παραμόρφωσης που μπορεί να αναιρεθεί συσχετίζεται εγγενώς, με τη γεωμετρία του κρυσταλλικού πλέγματος και το μέγεθος της διατμητικής παραμόρφωσης, που έχει υποστεί ο μαρτενσίτης μικροσκοπικά, κατά την ψύξη του από την μητρική φάση. Στην πραγματικότητα, οι παραμορφώσεις που μπορούν να αναιρεθούν είναι της τάξης του 8~10%.



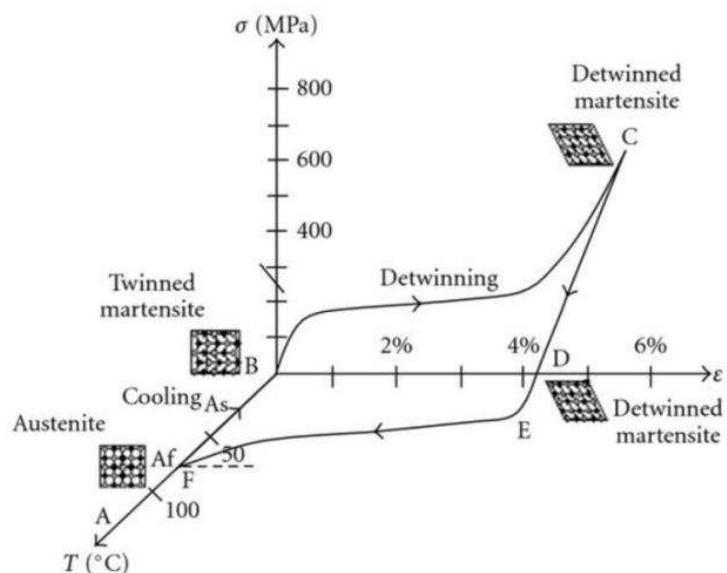
Εικόνα 2.1: Μικροσκοπική περιγραφή του φαινομένου μνήμης σχήματος

2.2.2 Χαρακτηριστικές Θερμοκρασίες Αλλαγής Φάσης

Ένα δοκίμιο από κράμα με μνήμη σχήματος, όντας αφόρτιστο, χαρακτηρίζεται από τις εξής τέσσερις θερμοκρασίες μετάβασης: M_f , M_s , A_s και A_f από την χαμηλότερη στην υψηλότερη. Το αρχικό M αναφέρεται σε μαρτενσιτική (martensitic) και το A σε ωστενιτική (austenitic) φάση, ενώ τα f και s αντιπροσωπεύουν τις τελικές και αρχικές αντίστοιχα της θερμοκρασίες, που απαιτούνται για να πραγματοποιηθεί ο μετασχηματισμός αλλαγής φάσης. Πιο αναλυτικά, όταν η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη από M_f , ο μαρτενσίτης είναι η κυριαρχη φάση του κράματος, ενώ για θερμοκρασίες υψηλότερες από A_f επικρατεί η ωστενιτική φάση. Τέλος, για θερμοκρασίες μεταξύ M_s , A_s και οι δυο φάσεις κυριαρχούν σε διαφορετικό ποσοστό η καθεμία. Τι φάση θα κυριαρχεί κάθε χρονική στιγμή εξαρτάται από θερμοκρασία, το επιβαλλόμενο φορτίο και τη θερμομηχανική ιστορία του υλικού

2.2.3 Περιγραφή ενός πλήρη μετασχηματισμού

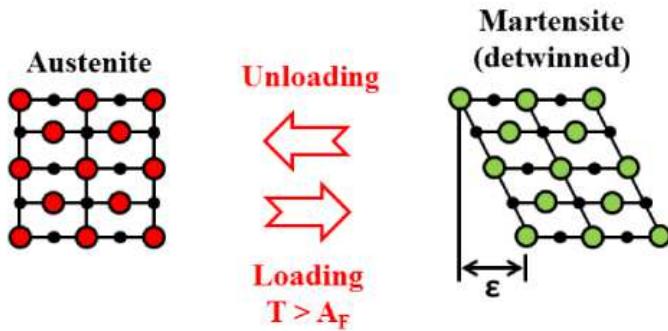
Ξεκινώντας από αρχικές και καταλήγοντας σε τελικές θερμοκρασίες πραγματοποιούνται μαρτενσιτικός ευθύς και ωστενιτικός αντίστροφος μετασχηματισμός. Εάν η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη από την M_f , με αύξηση της τάσης, ο πλακοειδής μαρτενσίτης μετατρέπεται σε βελονοειδή, λόγω επαναπροσανατολισμού του κρυσταλλικού πλέγματος (Εικόνα 2.2). Κατά την αποφόρτιση του πλακοειδή μαρτενσίτη, παρατηρούνται παραμένουσες παραμορφώσεις, οι οποίες μπορούν να αναιρεθούν μόνον αν μετατραπεί σε ωστενίτη. Αυτό επιτυγχάνεται με θέρμανση αγγίζοντας θερμοκρασίες υψηλότερες από A_f (Εικόνα 2.2) και στη συνέχεια με κατάλληλη ψύξη, ώστε να μετατραπεί σε βελονοειδή ξανά.



Εικόνα 2.2: Περιγραφή φαινομένου μνήμης σχήματος μακροσκοπικά

2.2.4 Υπερελαστικότητα ή ψευδό-ελαστικότητα

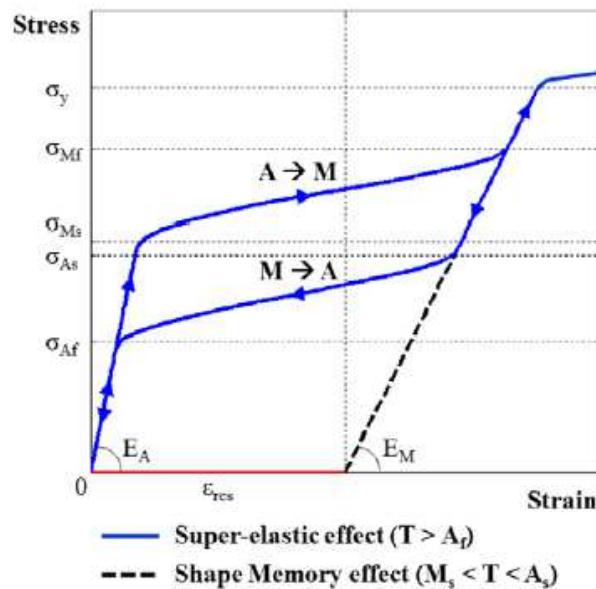
Μια επιπλέον ιδιότητα, πέραν της μνήμης σχήματος, που καθιστά τα κράματα αυτά ιδιαίτερα ενδιαφέροντα, είναι η υπερελαστικότητα (superelasticity). Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται κατά τον μετασχηματισμό του ωστενίτη σε βελονοειδή μαρτενσίτη, εξαιτίας της επιβολής εξωτερικής φόρτισης, σε θερμοκρασία υψηλότερη της A_f (Εικόνα 2.3).



Εικόνα 2.3: Περιγραφή υπερελαστικότητας μικροσκοπικά

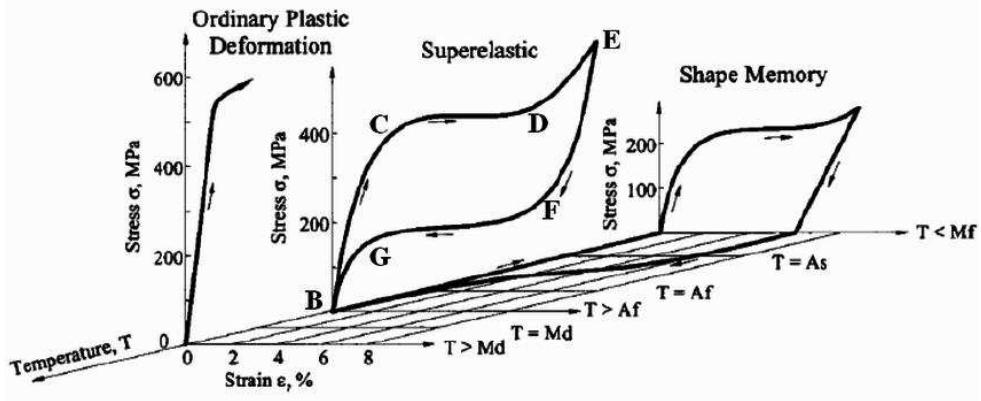
Αρχικά, ο ωστενίτης είναι ελαστικός, ώσπου ζεκινά η διαδικασία μετασχηματισμού σε βελονοειδή μαρτενσίτη, όταν τη τάση ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή. Στη συνέχεια ακολουθεί η ελαστική φόρτιση του μαρτενσίτη, αφού ολοκληρωθεί πρώτα φυσικά ο μετασχηματισμός. Εάν συνεχιστεί η αύξηση του φορτίου, το κράμα οδηγείται στην πλαστικοποίηση. Κατά την αποφόρτιση, ο αντίστροφος μετασχηματισμός ζεκινά, δηλαδή ο βελονοειδής μαρτενσίτης μετατρέπεται σε ωστενίτη, γιατί για σταθερή θερμοκρασία T μεγαλύτερη από A_f , αποτελεί την

πλέον ευσταθή φάση του υλικού. Όλα τα παραπάνω απεικονίζονται στην Εικόνα 2.4.



Εικόνα 2.4: Τυπικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων στην ωστενιτική φάση (υπερελαστικότητα)

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τιμές τάσης του αντίστροφου μετασχηματισμού είναι λίγο χαμηλότερες από αυτές του ευθύ, με αποτέλεσμα την απορρόφηση ενέργειας και την διάρκεια ανακυκλιζόμενης φόρτισης. Όταν η αποφόρτιση ολοκληρωθεί, η παραμένουσα παραμόρφωση είναι σχεδόν μηδενική. Ωστόσο, εάν η θερμοκρασία κατά την οποία πραγματοποιείται η φόρτιση ξεπεράσει μια ορισμένη κρίσιμη τιμή M_d δεν παρατηρείται υπερελαστικότητα και το κράμα εμφανίζει ελαστική-πλαστική συμπεριφορά.



Εικόνα 2.5: Τυπικό διάγραμμα σ-ε-Τ, όπου φαίνονται τα διαγράμματα σ-ε που αντιστοιχούν σε φάση μετασχηματισμού

2.3 Μονοαξονικοί καταστατικοί νόμοι του υλικού

Τα υλικά αυτά, επειδή χρησιμοποιούνται κυρίως στην αντισεισμική τεχνολογία, ως ράβδοι οπλισμού ή καλώδια, τα μοντέλα που έχουν δημιουργηθεί για την περιγραφή της συμπεριφοράς τους και εφαρμόζονται ευρέως σε αριθμητικές αναλύσεις είναι μονοαξονικά. Επιλέχθηκαν να αναλυθούν τρία διαφορετικά μοντέλα, τα οποία αποτελούν τα πιο διαδεδομένα και αποτελεσματικά για την προσομοίωση κραμάτων NiTi. Για καθένα από αυτά, θα γίνεται μια μικρή αναφορά στις σχέσεις που χρησιμοποιούνται για να ενσωματωθεί σε ένα λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων και στη συνέχεια αναλύονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του, ώστε να επιτευχθεί η σωστή εφαρμογή του σε κάθε περίπτωση.

2.3.1 Μοντέλο Tanaka (1986)

Αποτελεί ίσως το πιο διαδεδομένο και ευρέως χρησιμοποιούμενο μονοαξονικό καταστατικό νόμο για κράματα με μνήμη σχήματος. Εφαρμόζοντας τον Δεύτερο Θερμοδυναμικό Νόμο καταλήγει στην παρακάτω καταστατική εξίσωση:

$$(\sigma - \sigma_0) = E(\xi) * (\varepsilon - \varepsilon_0) + \Theta * (T - T_0) + \Omega(\xi) * (\xi - \xi_0) \quad (1)$$

Όπου:

σ : τάση του υλικού για μια δεδομένη χρονική στιγμή

ε : ανηγμένη παραμόρφωση του υλικού για μια δεδομένη χρονική στιγμή

T : θερμοκρασία του υλικού για μια δεδομένη χρονική στιγμή

E : μέτρο ελαστικότητας

Θ : μέτρο θερμοελαστικότητας

Ω : συντελεστής αλλαγής φάσης

ξ : αδιάστατη ποσότητα που εκφράζει τι ποσοστό του υλικού είναι μαρτενσίτης, ισχύει: $0 < \xi < 1$. Η τιμή 1 δηλώνει πως όλο το υλικό είναι σε μαρτενσιτική κατάσταση, ενώ το 0 ότι είναι σε ωστενιτική

Ο δείκτης 0 περιγράφει τα αντίστοιχα μεγέθη στην αρχική κατάσταση.

Η εξίσωση (1) ουσιαστικά εκφράζει ότι η συνολική τάση $(\sigma - \sigma_0)$ είναι άθροισμα τριών διαφορετικών ποσοτήτων: της τάσης λόγω μηχανικού έργου $E(\xi) * (\varepsilon - \varepsilon_0)$, της τάσης λόγω θερμότητας $\Theta * (T - T_0)$ και τέλος της τάσης λόγω αλλαγής κατάστασης $\Omega(\xi) * (\xi - \xi_0)$. Επιπλέον, ισχύει ότι τόσο το μέτρο ελαστικότητας E , όσο και ο συντελεστής αλλαγής φάσης Ω είναι συναρτήσεις του ξ και δίνονται από τις σχέσεις που ακολουθούν:

$$E(\xi) = E_A + (E_M - E_A)\xi \quad (2) \quad \text{και} \quad \Omega(\xi) = \varepsilon_L E(\xi) \quad (3)$$

Όπου:

ε_L : η μέγιστη παραμόρφωση που μπορεί να ανατρέθει με θέρμανση

E_A : μέτρο ελαστικότητας του υλικού στην ωστενιτική κατάσταση

E_M : μέτρο ελαστικότητας του υλικού στην μαρτενσιτική κατάσταση

Ο αδιάστατος μαρτενσιτικός λόγος ξ δίνεται από μια εκθετική εξίσωση που περιέχει την θερμοκρασία T και την τάση σ και η οποία μεταβάλλεται ανάλογα ποιος μετασχηματισμός συντελείται. Συνεπώς:

- Ωστενίτης σε Μαρτενσίτη με ψύξη ή αύξηση της τάσης:

$$\xi(\sigma, T) = 1 - e^{(a_M(M_s - T) + b_M\sigma)} \quad (4)$$

- Μαρτενσίτης σε Ωστενίτη με θέρμανση:

$$\xi(\sigma, T) = e^{(a_A(A_s - T) + b_A\sigma)} \quad (5)$$

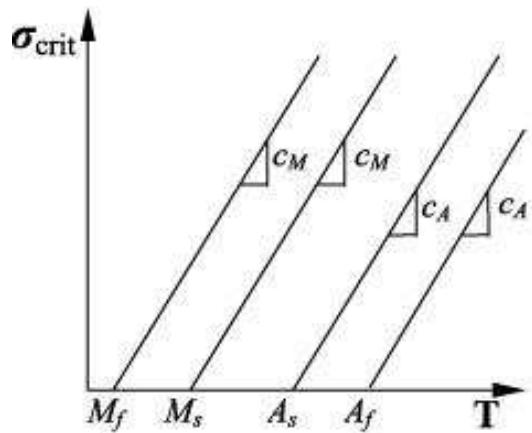
Οι σταθερές που περιέχονται στις σχέσεις (4) και (5) υπολογίζονται ως εξής:

$$\bullet \quad a_A = \frac{\ln(0.01)}{(A_s - A_f)} \quad (6) \quad \text{και} \quad b_A = \frac{a_A}{C_A} \quad (7)$$

$$\bullet \quad a_M = \frac{\ln(0.01)}{(M_s - M_f)} \quad (8) \quad \text{και} \quad b_M = \frac{a_M}{C_M} \quad (9)$$

Οι συντελεστές Θ και Ω , καθώς και οι θερμοκρασίες M_f , M_s , A_s και A_f αποτελούν χαρακτηριστικά του υλικού και επομένως υπολογίζονται πειραματικά και μάλιστα

σε κατάσταση μηδενικής τάσης. Οι παράμετροι C_A και C_M ονομάζονται συντελεστές επιρροής τάσης και στην πραγματικότητα εκφράζουν την εξάρτηση της θερμοκρασίας μετασχηματισμού από την τάση (Διάγραμμα 2.1).



Διάγραμμα 2.1: Διάγραμμα κρίσιμης τάσης-θερμοκρασίας κράματος με μνήμη σχήματος για μοντέλο Tanaka

Σύμφωνα με το διάγραμμα, οι παράμετροι C_A και C_M απεικονίζονται γραφικά ως οι κλίσεις των γραμμών σ - T . Το διάγραμμα αυτό προσδιορίζει την απαιτούμενη τάση και θερμοκρασία, προκειμένου να πραγματοποιηθεί ένας μετασχηματισμός φάσης.

2.3.2 Μοντέλο Liang and Rogers (1990)

Το μοντέλο αυτό βασίζεται στο μοντέλο Tanaka για την εξαγωγή της καταστατικής σχέσης. Ωστόσο, χρησιμοποιούνται συνημιτονικές εξισώσεις τάσης και θερμοκρασίας για τον υπολογισμό του μαρτενσιτικού λόγου ξ . Συνεπώς, ισχύουν οι σχέσεις:

- Ωστενίτης σε Μαρτενσίτη με ψύξη ή αύξηση της τάσης:

$$\xi(\sigma, T) = \frac{1-\xi_0}{2} \cos[a_M(T-M_f)+b_M\sigma] + \frac{1+\xi_0}{2} \quad (10)$$

- Μαρτενσίτης σε Ωστενίτη με θέρμανση:

$$\xi(\sigma, T) = \frac{\xi_0}{2} \cos[a_A(T-A_s)+b_A\sigma] + \frac{\xi_0}{2} \quad (11)$$

Οι σταθερές που περιέχονται στις σχέσεις (10) και (11) υπολογίζονται ως εξής:

$$\bullet \quad a_A = \frac{\pi}{(A_s - A_f)} \quad (12) \quad \text{και} \quad b_A = -\frac{a_A}{C_A} \quad (13)$$

$$\bullet \quad a_M = \frac{\pi}{(M_s - M_f)} \quad (14) \quad \text{και} \quad b_M = -\frac{a_M}{C_M} \quad (15)$$

Επειδή οι εξισώσεις (10) και (11) περιέχουν συνημιτονικές συναρτήσεις το όρισμα τους θα πρέπει να λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 και π. Συνεπώς, μια αλλαγή φάσης πραγματοποιείται όταν η θερμοκρασία βρίσκεται εντός του εύρους μετασχηματισμού ή η τάση βρίσκεται στο αντίστοιχο εύρος τάσης μετασχηματισμού. Επομένως, ισχύουν οι παρακάτω ανισότητες:

- Ωστενίτης σε Μαρτενσίτη με ψύξη ή αύξηση της τάσης:

$$M_f < T < M_s \quad \text{και} \quad C_M(T - M_f) - \frac{\pi}{|b_M|} \leq \sigma \leq C_M = M(T - M_f) \quad (16)$$

(16)

- Μαρτενσίτης σε Ωστενίτη με θέρμανση:

$$A_s < T < A_f \quad \text{και} \quad C_A(T - A_f) - \frac{\pi}{|b_A|} \leq \sigma \leq C_A = M(T - A_s) \quad (17)$$

Ωστόσο, ένα βασικό μειονέκτημα του μοντέλου αυτού είναι ότι περιγράφει μόνο τον μετασχηματισμό ωστενίτη σε μαρτενσίτη λόγω τάσης, δηλαδή τον μετασχηματισμό στον οποίο οφείλεται η υπερελαστικότητα. Αντίθετα, η μετατροπή από μαρτενσίτη που έχει προέλθει από ωστενίτη λόγω αύξηση τάσης (stress-induced), σε μαρτενσίτη που έχει προέλθει από ωστενίτη λόγω μείωσης θερμοκρασίας (temperature-induced), δεν λαμβάνεται υπόψη. Συνεπώς, το φαινόμενο της μνήμης σχήματος σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, που οφείλεται σε αυτήν ακριβώς την μετατροπή δεν εξηγείται επαρκώς. Η σημειωθεί πως το ίδιο μειονέκτημα εμφανίζει και το μοντέλο Tanaka, καθώς αποτελεί τη βάση για το παρόν μοντέλο

2.3.3 Μοντέλο Brinson (1990)

Το μοντέλο αυτό επινοήθηκε προκειμένου να ληφθεί υπόψη ο μετασχηματισμός από τον ένα είδος μαρτενσίτη στο άλλο. Για τον σκοπό αυτό, στο παρόν μοντέλο ο μαρτενσιτικός λόγος ξ λαμβάνεται ως άθροισμα δυο ξεχωριστών ποσοτήτων: ξ_s που αναφέρεται στο μαρτενσίτη λόγω τάσης και ξ_T που αναφέρεται στο μαρτενσίτη λόγω θερμοκρασίας. Δηλαδή ισχύει: $\xi = \xi_s + \xi_T$

Η καταστατική σχέση αρχικά γράφεται:

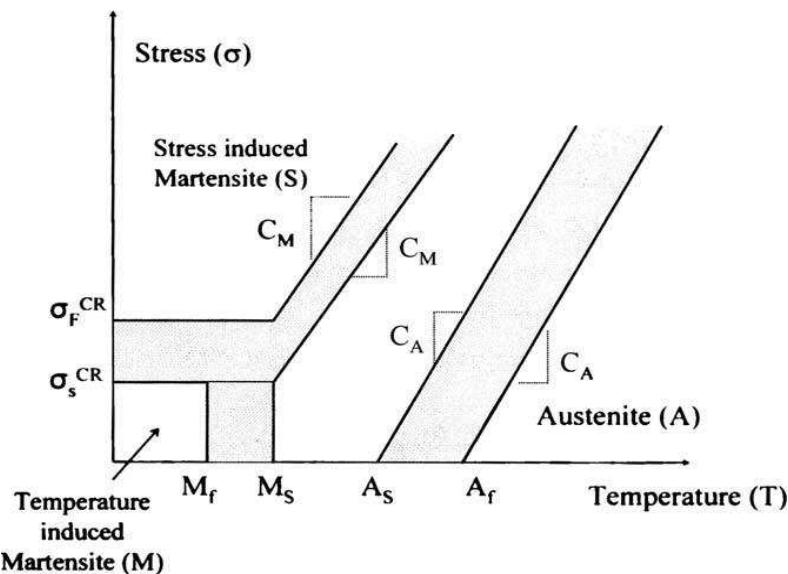
$$\sigma - \sigma_0 = E(\xi)\varepsilon - E(\xi_0)\varepsilon_0 + \Theta^*(T - T_0) + \Omega(\xi_0)\xi_{s0} + \Omega(\xi)\xi_s \quad (18)$$

Ωστόσο, οι επιστήμονες Brinson και Huang, κατά τη διάρκεια της έρευνάς τους, εφάρμοσαν διαφορετικές περιπτώσεις φόρτισης και αποφόρτισης, ενώ ταυτόχρονα χρησιμοποίησαν ειδικές μαθηματικές τεχνικές και επαναπροσδιορισμό

κάποιων παραμέτρων, έτσι ώστε να μην παραβιάζονται οι αρχικές συνθήκες. Το αποτέλεσμα ήταν να καταλήξουν σε μια απλοποιημένη έκφραση της καταστατικής σχέσης:

$$\sigma - \sigma_0 = E(\xi)(\varepsilon - \varepsilon_L \xi_s) + \Theta^*(T - T_0) \quad (19)$$

Προκειμένου να ενσωματωθεί το φαινόμενο μνήμης σχήματος σε θερμοκρασίες χαμηλότερες της M_s , οι εξισώσεις αλλαγής φάσης (16) και (17) του μοντέλου Liang και Rogers μετασχηματίζονται κατάλληλα, ώστε να περιγράφονται επαρκώς οι νέες παράμετροι ξ_s και ξ_t . Εποπτικά, οι διαφορές των δύο μοντέλων φαίνονται στο διάγραμμα που ακολουθεί (Διάγραμμα 2.2), ενώ οι εξισώσεις που περιγράφουν τις αλλαγές φάσης στο παρόν μοντέλο ακολουθούν στη συνέχεια.



Διάγραμμα 2.2: Διάγραμμα κρίσιμης τάσης-θερμοκρασίας κράματος με μνήμη σχήματος για μοντέλο Brinson και Huang

- Ωστενίτης σε Μαρτενσίτη με ψύξη ή αύξηση της τάσης:

$$\text{Ισχύει: } T > M_s \text{ & } \sigma_s^{(cr)} + C_M(T - M_s) < \sigma < \sigma_f^{(cr)} + C_M(T - M_s)$$

$$\xi_s = \frac{1-\xi_{s0}}{2} \cos \left\{ \frac{\pi}{\sigma_s^{cr} - \sigma_f^{cr}} \left[\sigma - \sigma_f^{cr} - C_M(T - M_s) \right] \right\} + \frac{1+\xi_{s0}}{2} \quad (20)$$

και

$$\xi_T = \xi_{T0} - \frac{\xi_{T0}}{1-\xi_{s0}} (\xi_s - \xi_{s0}) \quad (21)$$

- Πλακοειδής Μαρτενσίτης σε βελονοειδή Μαρτενσίτη:

$$\text{Ισχύει: } T < M_s \text{ & } \sigma_s^{(cr)} < \sigma < \sigma_f^{(cr)}$$

$$\xi_s = \frac{1-\xi_{s0}}{2} \cos \left[\frac{\pi}{\sigma_s^{cr} - \sigma_f^{cr}} \left(\left[\sigma - \sigma_f^{cr} \right] \right) \right] + \frac{1+\xi_{s0}}{2} \quad (22)$$

και

$$\xi_T = \xi_{T0} - \frac{\xi_{T0}}{1-\xi_{s0}} (\xi_s - \xi_{s0}) + \Delta \tau_E \quad (23)$$

Όπου:

$$\Delta\tau_E = \frac{1-\xi_{T0}}{2} \cos \left[a_M(T-M_f) \right] + \frac{1+\xi_{s0}}{2} \quad \text{για } M_f < T < M_s$$

Αλλιώς

$$\Delta\tau_E = 0$$

- Μαρτενσίτης σε Ωστενίτη:

Ισχύει: $T > A_s$ & $C_A(T - A_f) < \sigma < C_A(T - A_s)$

$$\xi = \frac{\xi_0}{2} \left\{ \cos \left[a_A \left(T - A_s - \frac{\sigma}{C_A} \right) \right] + 1 \right\} \quad (24)$$

$$\xi_s = \xi_{s0} - \frac{\xi_{s0}}{\xi_0} (\xi_0 - \xi) \quad (25)$$

$$\xi_T = \xi_{T0} - \frac{\xi_{T0}}{\xi_0} (\xi_0 - \xi) \quad (26)$$

2.4 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο μια εκτενής αναφορά στη συμπεριφορά και στους καταστατικούς νόμους των κραμάτων με μνήμη σχήματος παρουσιάστηκε. Η παρουσίαση αυτή εστίασε κυρίως σε μονοαξονικούς καταστατικούς νόμους, αφού αποτελούν τους πιο διαδεδομένους και ευρέως χρησιμοποιούμενους για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς κραμάτων με μνήμη σχήματος. Βασίζονται στη λογική ότι η μετάβαση από την ωστενιτική στη μαρτενσιτική φάση και αντίστροφα επηρεάζεται καθοριστικά από την θερμοκρασία. Έτσι, λοιπόν,

ορίζεται ο μαρτενσιτικός λόγος ξ, οποίος θεωρείται μια εσωτερική παράμετρος, υπολογίζεται δηλαδή μέσω εξισώσεων, οι οποίες εξαρτώνται από την θερμοκρασία και την ανηγμένη παραμόρφωση. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα δυο είδη μαρτενσίτη και η μετάβαση από το ένα στο άλλο λαμβάνονται υπόψη μόνο στο μοντέλο Brinson, ωστόσο και τα τρία μοντέλα λαμβάνουν υπόψη την διαφορετική συμπεριφορά του υλικού σε εφελκυσμό και θλίψη.

Τα πιο σύγχρονα μοντέλα, ωστόσο, στοχεύουν στην κατανόηση της συμπεριφοράς του υλικού υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Αναλυτικότερα, η κρυσταλλική δομή του κράματος ευθύνεται για την ύπαρξη παραμενουσών παραμορφώσεων, που οδηγούν σε βρόχους υστέρησης κατά την ανακύκληση. Συνεπώς, τα μοντέλα αυτά λαμβάνουν εκθετικούς νόμους για την περιγραφή αλλαγών φάσης και μεταφράζουν τις παραμένουσες παραμορφώσεις σε παραμένων μαρτενσιτικό λόγο ξ, υπονοώντας ότι κατά την ανακύκληση μέρος του υλικού παραμένει σε διαφορετική φάση από την πλειονότητα αυτού.

Τέλος, στόχος είναι η τελειοποίηση μοντέλων που λαμβάνουν υπόψη άλλη μια σπουδαία αλλαγή φάσης του κράματος, τη λεγόμενη R-phase, στην οποία οφείλεται η μη συστηματική συμπεριφορά του κράματος κατά πως έχει προβλεφθεί από το μοντέλο. Ενώ, γίνεται και προσπάθεια δημιουργίας διαχονικών μοντέλων, προκειμένου να ταυτοποιηθούν τυχόν αλληλεπιδράσεις που πιθανόν να συμβαίνουν.

3 ΑΝΑΛΥΣΗ «ΕΞΥΠΝΩΝ» ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΤΕΣ ΑΠΟ ΚΡΑΜΑΤΑ ΜΕ ΜΝΗΜΗ ΣΧΗΜΑΤΟΣ

3.1 Γενικά

Ένα «έξυπνο» σύστημα χαρακτηρίζεται από την ικανότητά του να μεταβάλλει ένα ή περισσότερα χαρακτηριστικά του, προκειμένου να προσαρμόζεται επαρκώς στις αλλαγές του περιβάλλοντος του. Επομένως, μια «έξυπνη» κατασκευή θα μπορούσε να μεταβάλλει τα χαρακτηριστικά της, προκειμένου να αντέχει αλλαγές στη φόρτιση, στη χρήση της ή και ακόμα καταστάσεις αστοχίας που δεν είχαν προβλεφθεί στο σχεδιασμό της. Αυτό, λοιπόν, το γεγονός την καθιστά ιδιαίτερη και αναγκαία για πλήθος τεχνολογικών εφαρμογών που αναπτύσσονται, όπως για παράδειγμα αντισεισμικές εφαρμογές, μηχανολογικές, ιατρικές και άλλες. Σε αυτό το κεφάλαιο λοιπόν, θα αναπτυχθεί μια αριθμητική μέθοδος προκειμένου αρχικά να κατανοηθεί και στη συνέχεια να σχεδιαστεί και να λειτουργήσει επαρκώς μια τέτοια κατασκευή. Παράλληλα, θα γίνει διερεύνηση, προκειμένου να καταγραφούν τα μεγέθη αυτά που επηρεάζουν σε μέγιστο βαθμό την απόκριση και αντοχή του συστήματος. Τέλος, θα ακολουθήσει μια βελτιστοποίηση της φόρτισης, ώστε να βρεθεί ο σωστός τρόπος φόρτισή τους για μέγιστη απόδοση. Ωστόσο, τα δυο τελευταία θέματα θα μας απασχολήσουν στο Κεφάλαιο 4 που ακολουθεί, καθώς η κατανόηση της φύσης του προβλήματος είναι απαραίτητη.

3.2 Αριθμητική προσέγγιση του προβλήματος

Δημιουργήθηκε με τη βοήθεια της γλώσσας προγραμματισμού Matlab, ένας αλγόριθμος που περιγράφει τον καταστατικό νόμο του υλικού. Αυτός στη συνέχεια ενσωματώθηκε στον αλγόριθμο του προβλήματος. Αναλυτικότερα, επιλέγεται ως σύστημα ένας πρόβολος, οποίος φέρει αρχικά έναν, δύο και τέλος τέσσερις ενεργοποιητές στο ελεύθερο άκρο του. Οι ενεργοποιητές υλοποιούνται ως ράβδοι δικτυώματος, κατασκευασμένα από κράματα με μνημη σχήματος. Το σύστημα φορτίζεται θερμοκρασιακά, δηλαδή με θέρμανση και ψύξη των ραβδών,

συνεπώς για κάθε νέα τιμής της θερμοκρασίας, μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας αναζητείται η νέα θέση ισορροπίας του συστήματος. Κατά τη διάρκεια του κύκλου φόρτισης οι ράβδοι παραμορφώνονται σύμφωνα με το καταστατικό τους νόμο, ενώ παράλληλα εκδηλώνουν την ιδιότητα της μνήμης σχήματος. Αυτό μεταφράζεται ως ασκούμενη παραμόρφωση στη δοκό, με αποτέλεσμα την μετατόπιση της προς τα πάνω ή προς τα κάτω αντίστοιχα. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τρία διαφορετικά παραδείγματα, όσα δηλαδή αντιστοιχούν στις διαφορετικές περιπτώσεις που διερευνήθηκαν, ανάλογα με το πλήθος των ενεργοποιητών. Για κάθε τέτοιο παράδειγμα θα παρουσιαστούν διαγράμματα τάσεων, παραμορφώσεων αλλά και δυνάμεων, που αναλύουν τόσο την συμπεριφορά της ράβδου, όσο και του συστήματος προκειμένου ο αναγνώστης να έχει μια σφαιρική αντίληψη του προβλήματος και των αποτελεσμάτων.

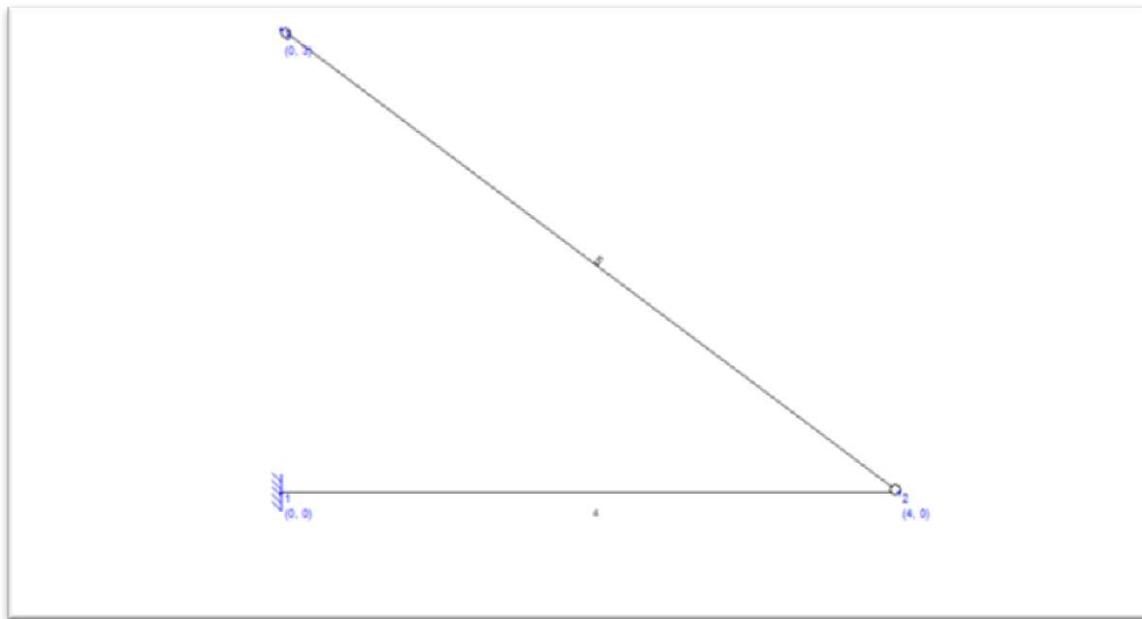
3.2.1 Πρόβολος με έναν ενεργοποιητή στο ελεύθερο άκρο

3.2.1.1 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά μοντέλου

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συστήματος φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 3.1), ενώ το μοντέλο απεικονίζεται στην Εικόνα 3.1.

Πίνακας 3.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μοντέλου

| | |
|--------------------------------|------------------------|
| Μήκος δοκού (m) | 4 |
| Διατομή δοκού (m^2) | $334 \cdot 10^{-4}$ |
| Ροπή Αδράνειας δοκού (m^8) | $359100 \cdot 10^{-8}$ |
| Κλίση ράβδου | 3/5 |
| Μήκος ράβδου (m) | 5 |
| Εμβαδό ράβδου (m^2) | 0.1 |



Εικόνα 3.1: Σχηματική απεικόνιση συστήματος προβόλου-καλωδίου

3.2.1.2 Αρχικές Συνθήκες

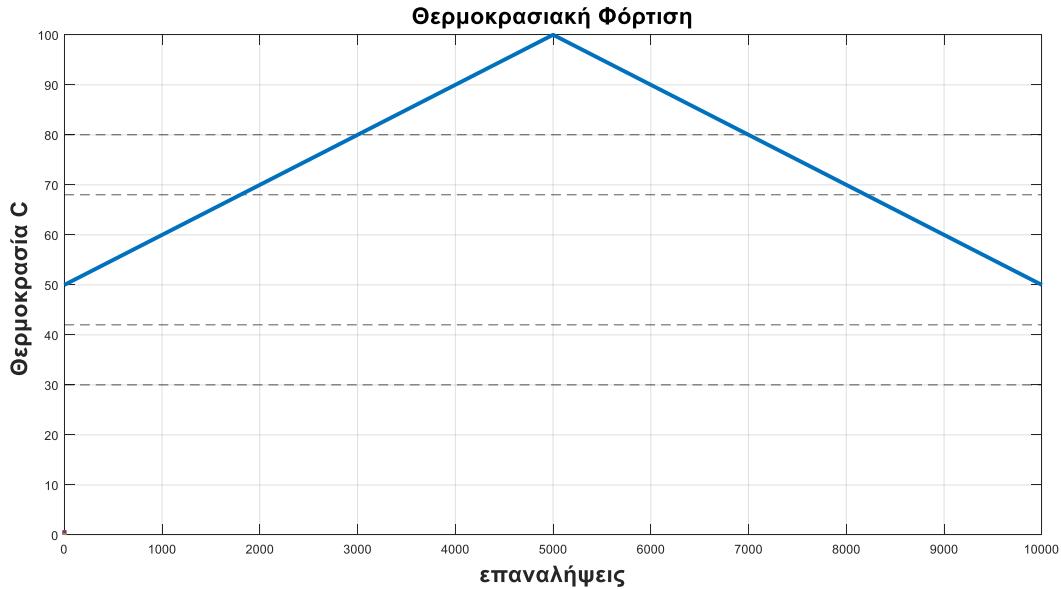
Ο αλγόριθμος που περιγράφει τον καταστατικό νόμο του υλικού της ράβδου, απαιτεί την ύπαρξη ορισμένων αρχικών συνθηκών. Οι αρχικές συνθήκες, λοιπόν, που επιλέχθηκαν αναγράφονται στον Πίνακα 3.2

Πίνακας 3.2: Αρχικές συνθήκες συστήματος

| | |
|--|---------|
| Αρχική παραμόρφωση (ε_0) | 0.0485 |
| Αρχική τάση (σ_0) (MPa) | 53 |
| Αρχικός μαρτενσιτικός λόγος ξ | 1 |
| Αρχική θερμοκρασία (T_0) (ο C) | 50 |
| Αρχική παραμόρφωση δοκού (ε_0) (m) | -7*10-3 |

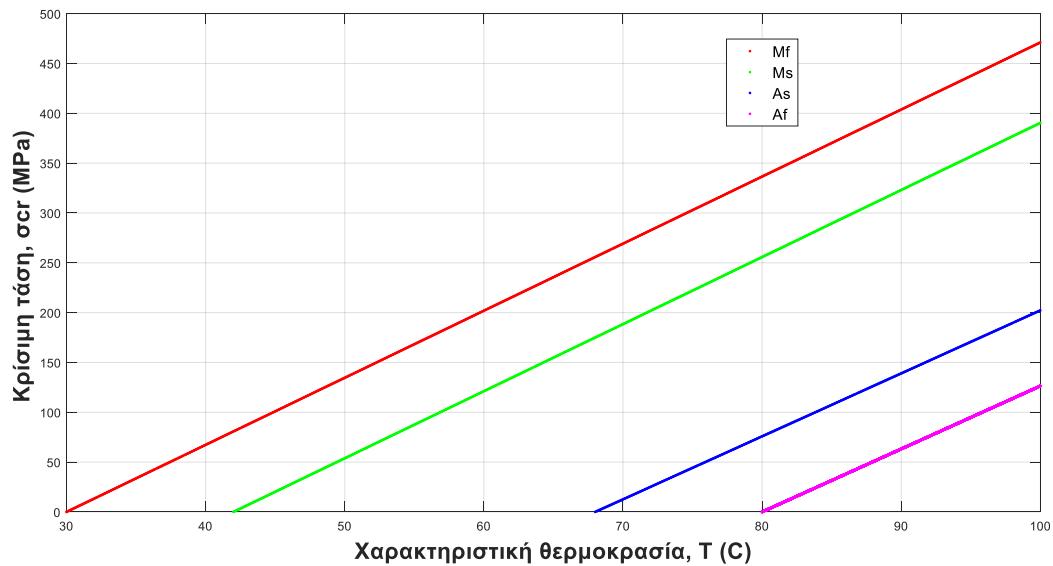
3.2.1.3 Φόρτιση

Η φόρτιση, όπως έχει ήδη αναφερθεί, συνίσταται στην επιβολή θερμοκρασίας. Συγκεκριμένα, το καλώδιο υποβάλλεται στον θερμοκρασιακό κύκλο φόρτισης-αποφόρτισης που φαίνεται στο Διάγραμμα 3.1. Αρχικά, λοιπόν, η θερμοκρασία της ράβδου αυξάνεται γραμμικά από τους 50°C στους 100°C, ενώ στη συνέχεια και πάλι γραμμικά αποφορτίζει και επιστρέφει στην αρχική της τιμή.



Διάγραμμα 3.1: Θερμοκρασιακός κύκλος φόρτισης-αποφόρτισης

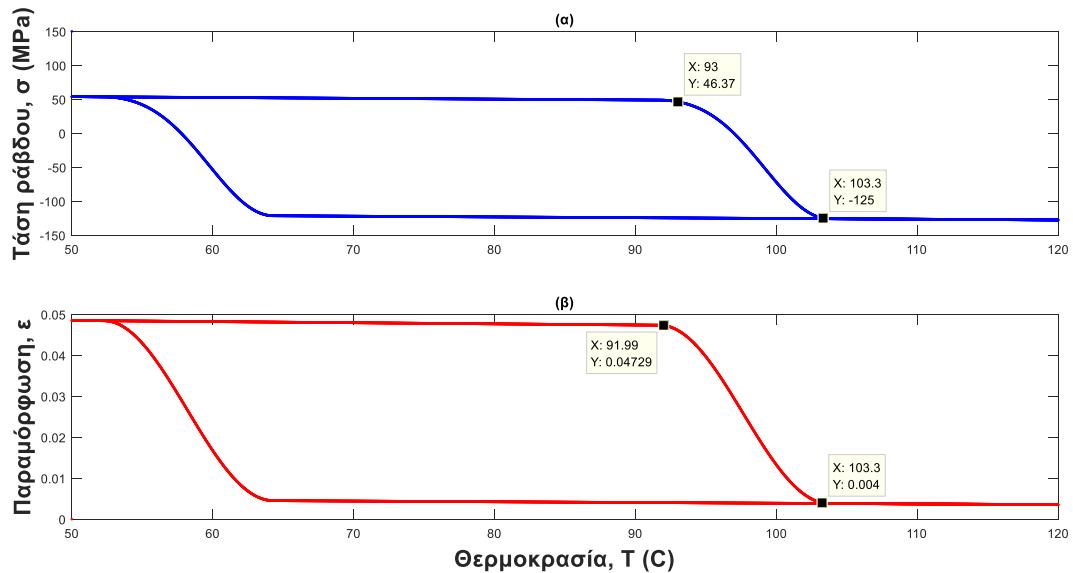
Οι διακεκομμένες γραμμές στο παρακάτω διάγραμμα αντιστοιχούν στις χαρακτηριστικές θερμοκρασίες του συγκεκριμένου υλικού: M_f , M_s , A_s και A_f , όπως αυτές έχουν προσδιοριστεί πειραματικά για μηδενική τάση. Συνεπώς, αφού $T > M_s$, και συγχρόνως $\sigma = 53 \text{ MPa}$, όπως αποδεικνύεται από τις καμπύλες χαρακτηριστικής θερμοκρασίας-κρίσιμης τάσης (Διάγραμμα 3.2), το υλικό βρίσκεται αριστερά της κόκκινης καμπύλης και άρα είναι σε αμιγώς μαρτενσιτική κατάσταση. Επομένως, $\xi = 1$, όπως άλλωστε έχει επιλεγεί στις αρχικές συνθήκες.



Διάγραμμα 3.2: Καμπύλες χαρακτηριστικής θερμοκρασίας-κρίσιμης τάσης

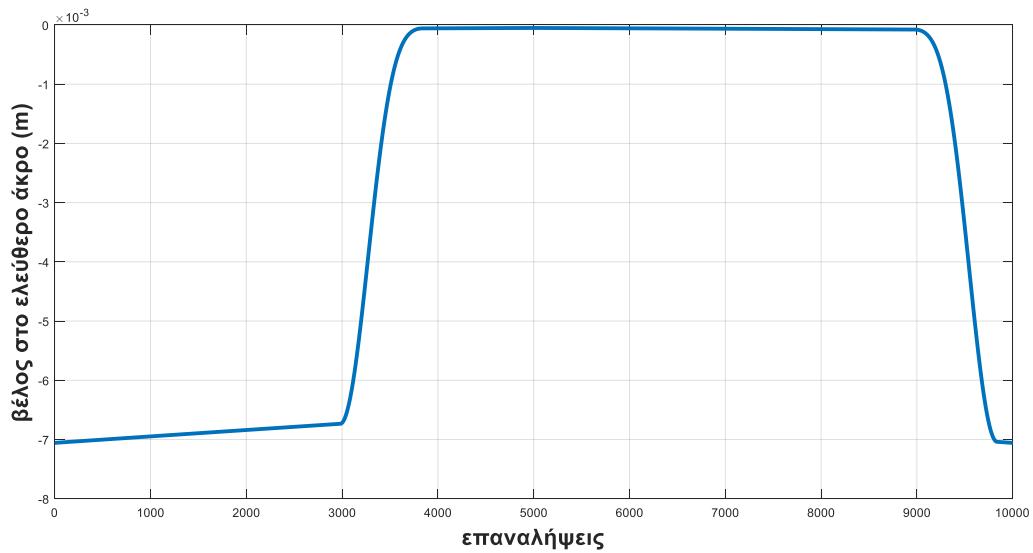
3.2.1.4 Αποτελέσματα ανάλυσης συστήματος

Η απόκριση του συστήματος κατά τη διάρκεια ενός πλήρους κύκλου θερμοκρασιακής φόρτισης, φαίνεται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Διάγραμμα 3.3: (a) Διάγραμμα τάσης-θερμοκρασίας και (b) παραμόρφωσης-θερμοκρασίας για τη ράβδο

Όπως προκύπτει από το παραπάνω διάγραμμα, τόσο η τάση της ράβδου όσο και η ανηγμένη παραμόρφωσή της εμφανίζουν μη γραμμική σχέση με τη θερμοκρασία. Η αρχική τάση μειώνεται με πολύ αργό ρυθμό (ανεπαίσθητη αρνητική κλίση του διαγράμματος 3.3(a)), ώσπου παρατηρείται η απότομη πτώση της για θερμοκρασία $T_1=92^\circ\text{C}$. Η θερμοκρασία αυτή, σε συνδυασμό με την τάση του υλικού την παρούσα στιγμή $\sigma_1=47.78\text{ MPa}$, υποδεικνύει ότι το υλικό έχει αρχίσει την αλλαγή φάσης του από μαρτενσιτική σε ωστενιτική κατάσταση. Η αλλαγή αυτή αντικατοπτρίζεται στο διάγραμμα με την απότομη αλλαγή της κλίσης της καμπύλης και ολοκληρώνεται σε θερμοκρασία $T_2 = 103^\circ\text{C}$ και τάση $\sigma_2=-125\text{ MPa}$. Στην πραγματικότητα, δηλαδή μεταβάλλεται η εντατική κατάσταση της ράβδου και από εφελκυστική καθίσταται θλιπτική. Η αρχική παραμόρφωση της ράβδου μειώνεται και αυτή με τη σειρά της με πολύ αργό ρυθμό, καθώς μειώνεται η τάση. Ωστόσο, η απότομη μείωση του μήκους της ράβδου εμφανίζεται, όταν η κλίση του διαγράμματος T-ε γίνεται έντονη, γεγονός που σηματοδοτεί την αλλαγή φάσης του υλικού και την εμφάνιση του φαινομένου της μνήμης σχήματος. Η ράβδος, δηλαδή, επανέρχεται στο αρχικό της σχήμα (αυτό που θα είχε πριν συνδεθεί με τη δοκό και παραμορφωθεί λόγω του βάρους αυτής). Επειδή, όμως η ράβδος είναι συνδεδεμένη με τη δοκό και άρα δεν μπορεί να παραμορφωθεί ελεύθερα, καθώς επιθυμεί να επανέλθει στο αρχικό της σχήμα, ασκεί στη δοκό λόγω δράσης-αντίδρασης μια δύναμη ίσου μέτρου και αντίθετης φοράς, με αποτέλεσμα η δοκός να μετακινείται προς τα πάνω, αναιρώντας το βέλος της (Διάγραμμα 3.4).

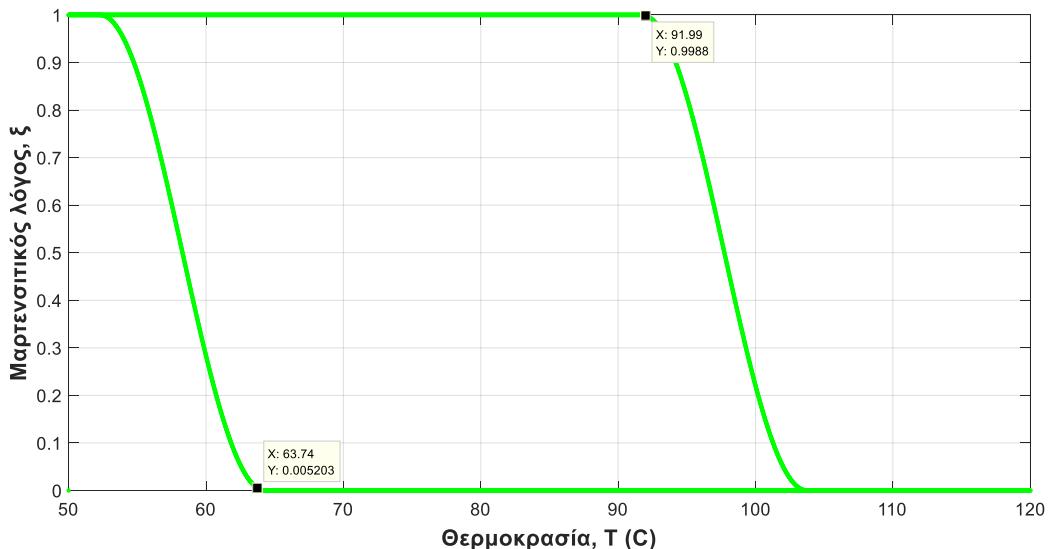


Διάγραμμα 3.4: Μεταβολή του βέλους στο ελεύθερο άκρο κατά τη διάρκεια της φόρτισης

Κατά την αποφόρτιση, δηλαδή καθώς μειώνεται η θερμοκρασία της ράβδου, η διαδικασία είναι αντίστροφη. Η τάση και η παραμόρφωση αυξάνονται με μικρό ρυθμό, ώσπου όταν στο διάγραμμα σημειωθεί η απότομη αλλαγή κλίσης, σηματοδοτείται η αλλαγή φάσης από ωστενιτική σε μαρτενσιτική κατάσταση. Τώρα, η ποσότητα Δε είναι θετική, γεγονός που μεταφράζεται σε αύξηση του μήκους της ράβδου. Επομένως, κατά αναλογία με αυτά που παρουσιάστηκαν παραπάνω, η δοκός δέχεται μια δύναμη από τη ράβδο που την ωθεί να μετακινηθεί προς τα κάτω και άρα επιστρέφει στη θέση ισορροπίας που κατείχε πριν ξεκινήσει ο κύκλος φόρτισης (Διάγραμμα 3.4).

Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης και το γεγονός ότι ο μετασχηματισμός δεν είναι συμμετρικός, δηλαδή απαιτείται περισσότερη θέρμανση, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η αλλαγή φάσης από μαρτενσιτική σε ωστενιτική κατάσταση, από ότι χρειάζεται να αφαιρεθεί για να πραγματοποιηθεί ο αντίστροφος μετασχηματισμός.

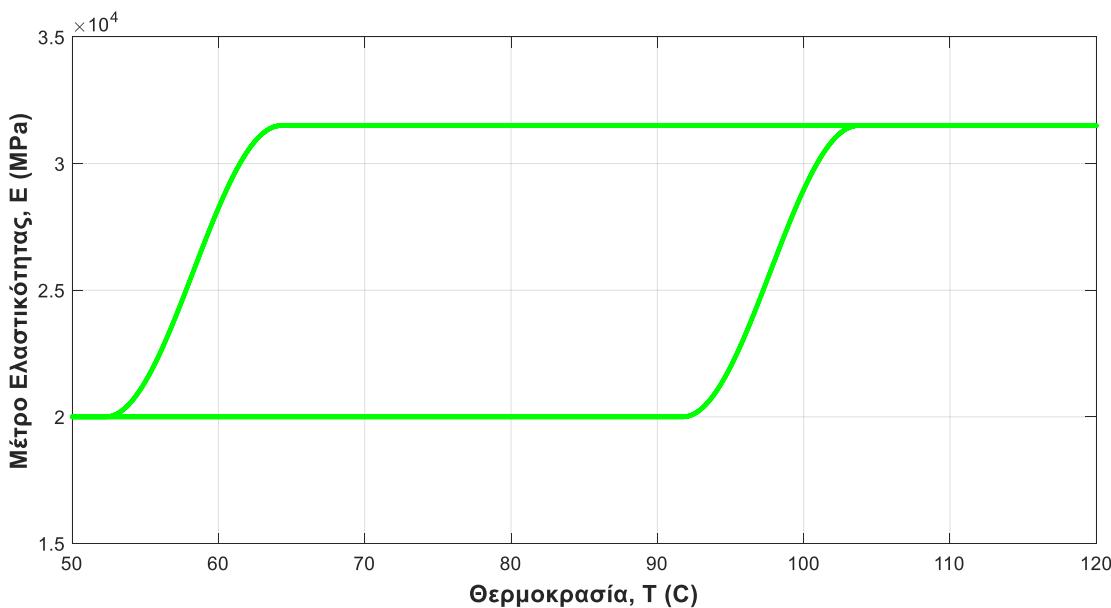
Όλα τα παραπάνω σχετικά με την αλλαγές φάσης κατά τη διάρκεια του κύκλου φόρτισης, αποδεικνύονται και με το Διάγραμμα 3.5, το οποίο περιγράφει την μεταβολή του μαρτενσιτικού λόγου ξ σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία.



Διάγραμμα 3.5: Διάγραμμα μεταβολής μαρτενσιτικού λόγου ξ με τη θερμοκρασία

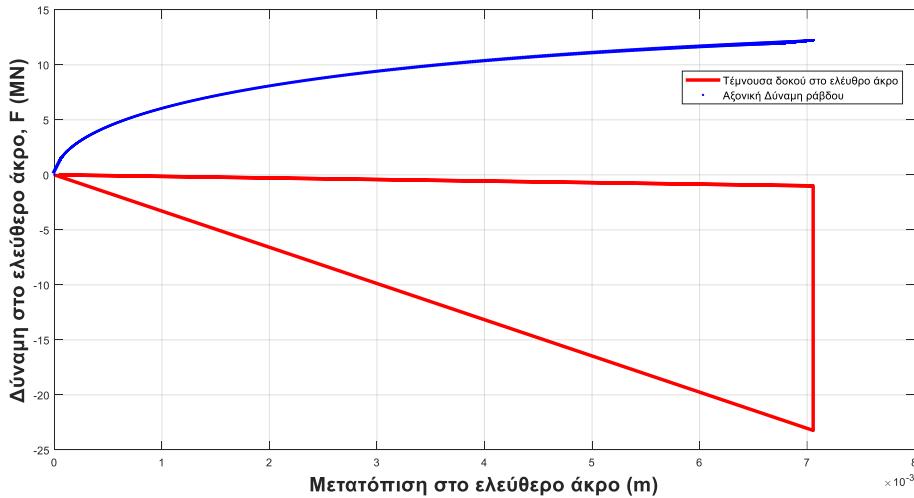
Όπως φαίνεται, ο λόγος ξ μεταβάλλεται από 1 σε 0 και αντίστροφα, στις τιμές θερμοκρασίας που αναφέρθηκαν παραπάνω και οι οποίες σηματοδοτούν τις δύο αλλαγές φάσης που συνέβησαν κατά τη διάρκεια της φόρτισης.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης και το Διάγραμμα 3.6, στο οποίο φαίνεται η μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας του υλικού σε συνάρτηση με την θερμοκρασία. Όπως διακρίνεται, το μέτρο ελαστικότητας έχει μεγαλύτερη τιμή στις υψηλές θερμοκρασίες, στην ωστενιτική δηλαδή κατάσταση και μικρότερη στις χαμηλές ή αλλιώς στην μαρτενσιτική κατάσταση.



Διάγραμμα 3.6: Μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας Ε σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία T

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης και το Διάγραμμα 3.7 που ακολουθεί, όπου φαίνεται η μεταβολή της αξονική δύναμης της ράβδου αλλά και της τέμνουσας δοκού της σε συνάρτηση με την κατακόρυφη μετακίνηση στο ελεύθερο άκρο.



Διάγραμμα 3.7: Διάγραμμα αξονικής δύναμης ράβδου και τέμνουσας δύναμης δοκού στο ελεύθερο άκρο σε συνάρτηση με την μετακίνηση στην ίδια θέση

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα η σχέση $F-u$ για την ράβδο είναι έντονα μη γραμμική, γεγονός που οφείλεται σε μη γραμμικότητα υλικού μέσω του καταστατικού νόμου. Η δύναμη της ράβδου ακολουθεί τον ίδιο δρόμο για φόρτιση και αποφόρτιση. Παράλληλα παρατηρούμε την έντονη αλλαγή κλίση στην καμπύλη τη δύναμης της δοκού, η οποία σηματοδοτεί φυσικά την αλλαγή φάσης. Η τέμνουσα της δοκού ξεκινά από μηδενική τιμή, αφού το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας και λαμβάνει μέγιστη τιμή, όταν εκδηλώνεται η μνήμη σχήματος και αναιρείται το βέλος της δοκού. Στη συνέχεια, καθώς η θερμοκρασία μειώνεται η τέμνουσα μειώνεται και αυτή με τη σειρά της, ώσπου αποκτά τελικά μηδενική τιμή, όταν το σύστημα επιστρέφει ξανά στην αρχική θέση ισορροπίας του. Αξίζει να αναφερθεί ότι το διάγραμμα λαμβάνει ως θέση με μηδενική μετατόπιση την αρχική θέση ισορροπίας, στην οποία η δοκός είναι ήδη παραμορφωμένη και μάλιστα κατά $u=-7 \cdot 10^{-3}$, συνεπώς όταν φαίνεται ότι η μέγιστη μετατόπισή της είναι θετική και μάλιστα $\Delta u=7 \cdot 10^{-3}$, καταλαβαίνουμε ότι το βέλος της δοκού έχει αναιρεθεί.

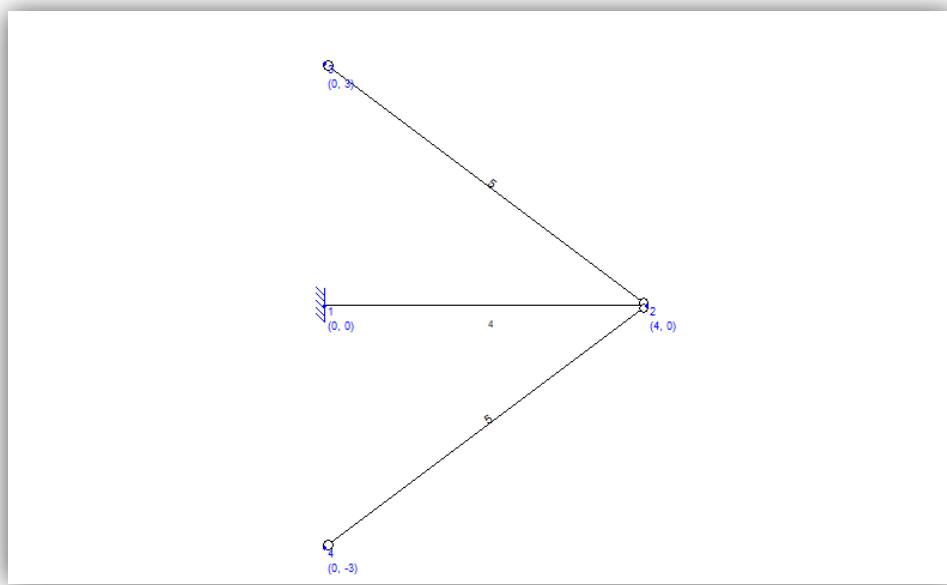
3.2.2 Πρόβολος με δύο ενεργοποιητές στο ελεύθερο άκρο

3.2.2.1 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά μοντέλου

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του νέου συστήματος με τους ενεργοποιητές φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 3.3), ενώ το μοντέλο απεικονίζεται στην Εικόνα 3.2. Ως ράβδος 1 ορίζεται η πάνω ράβδος και ως ράβδος 2 η κάτω ράβδος.

Πίνακας 3.3: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μοντέλου

| | |
|--------------------------------|------------------------|
| Μήκος δοκού (m) | 4 |
| Διατομή δοκού (m^2) | $334 \cdot 10^{-4}$ |
| Ροπή Αδράνειας δοκού (m^8) | $359100 \cdot 10^{-8}$ |
| Κλίση ράβδου | 3/5 |
| Μήκος ράβδου (m) | 5 |
| Εμβαδό ράβδου (m^2) | 0.1 |



Εικόνα 3.2: Σχηματική απεικόνιση συστήματος προβόλου-καλωδίου

3.2.2.2 Αρχικές Συνθήκες

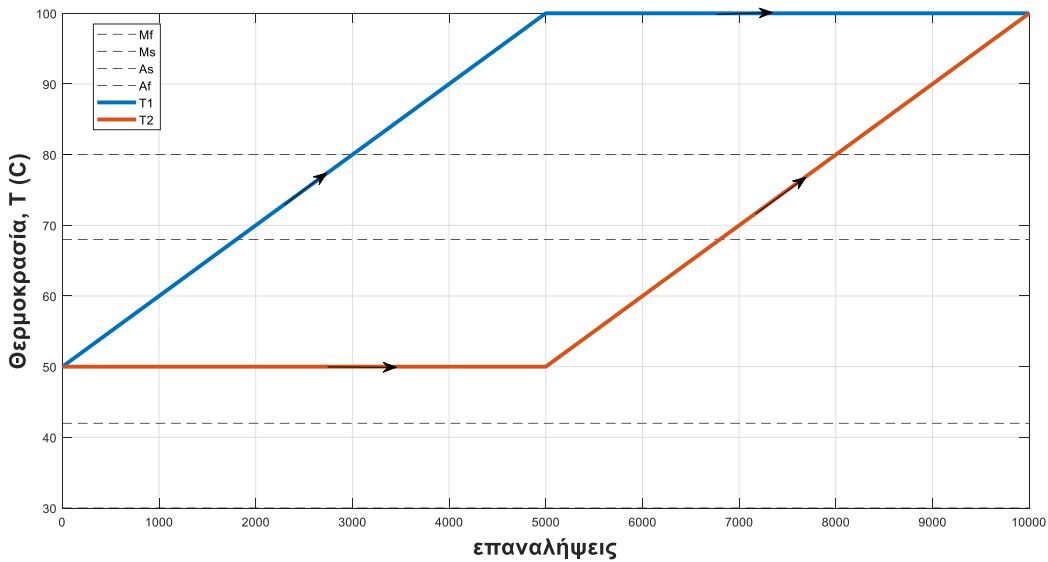
Ο αλγόριθμος που περιγράφει τον καταστατικό νόμο του υλικού των ράβδων, απαιτεί την ύπαρξη ορισμένων αρχικών συνθηκών. Οι αρχικές συνθήκες, λοιπόν, που επιλέχθηκαν αναγράφονται στον Πίνακα 3.4.

Πίνακας 3.4: Αρχικές συνθήκες συστήματος

| | |
|---|--------------------|
| Αρχική παραμόρφωση (ε_0) | 0.0485 |
| Αρχική τάση (σ_0) (MPa) | 53 |
| Αρχικός μαρτενσιτικός λόγος ξ | 1 |
| Αρχική θερμοκρασία (T_0) (°C) | 50 |
| Αρχική παραμόρφωση δοκού (α_0) (m) | $-7 \cdot 10^{-3}$ |

3.2.2.3 Φόρτιση

Η φόρτιση, όπως έχει ήδη αναφερθεί, συνισταται στην επιβολή θερμοκρασίας. Συγκεκριμένα, οι ράβδοι υποβάλλονται στον θερμοκρασιακό κύκλο που φαίνεται στο Διάγραμμα 3.8. Ο κύκλος φόρτισης διαφέρει από το προηγούμενο παράδειγμα ως εξής: αρχικά, η θερμοκρασία της πάνω ράβδου αυξάνεται γραμμικά από τους 50°C στους 100°C, ενώ της δεύτερης διατηρείται σταθερή στους 50°C. Στη συνέχεια παραμένει σταθερή της πρώτης στους 100°C και αυξάνει γραμμικά η θερμοκρασία της δεύτερης με τον ίδιο νόμο, ώστε στο τέλος η θερμοκρασία και των δυο ράβδων να έχει ίδια τιμή.



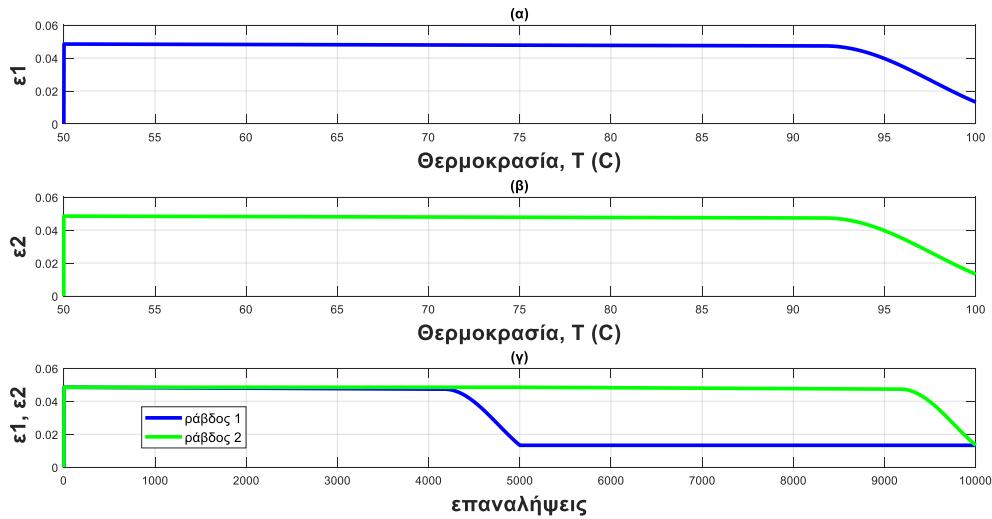
Διάγραμμα 3.8: Θερμοκρασιακός κύκλος φόρτισης-αποφόρτισης για κάθε ράβδο

Όσα αναφέρθηκαν στο προηγούμενο παράδειγμα, σχετικά με την κατάσταση του υλικού πριν την εκκίνηση του κύκλου φόρτισης, ισχύουν και εδώ αφού και οι δυο ράβδοι έχουν ίδιες αρχικές συνθήκες θερμοκρασίας και τάσης με την ράβδο του προηγούμενο μοντέλου. Συνεπώς, οι δύο ράβδοι βρίσκονται σε μαρτενσιτική κατάσταση.

3.2.2.4 Αποτελέσματα ανάλυσης συστήματος

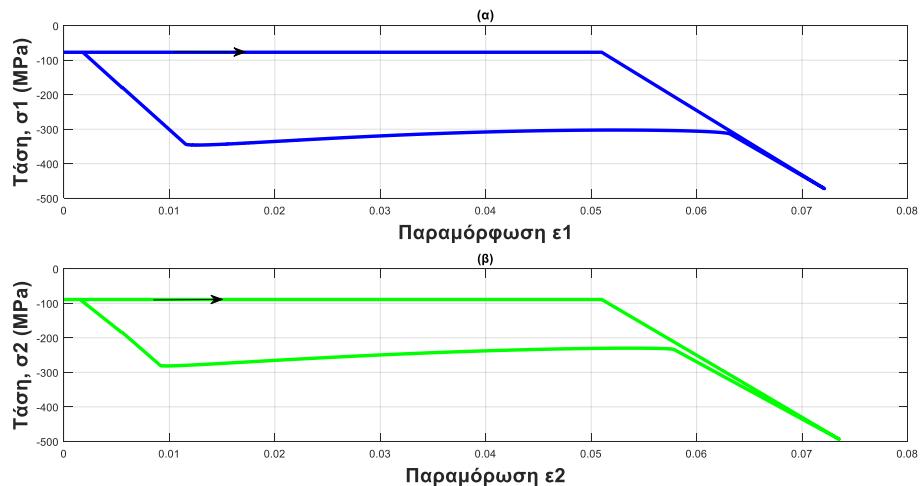
Στα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνεται η απόκριση του συστήματος κατά τη διάρκεια ενός πλήρους κύκλου φόρτισης. Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 3.9, η παραμόρφωση της ράβδου 1 μειώνεται, καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται και σημειώνει έντονη μείωση, όταν η θερμοκρασία αγγίζει την χαρακτηριστική τιμή για την αλλαγή φάσης. Τότε η ράβδος 1 εμφανίζει μνήμη σχήματος. Παράλληλα,, η ράβδος 2 έχει σταθερή θερμοκρασία, όσο η ράβδος 1 θερμαίνεται, όμως η ράβδος 1 βραχύνεται και άρα η δοκός μετακινείται προς πάνω, με αποτέλεσμα η ράβδος 2 να εμφανίζει θετική παραμόρφωση. Ακριβώς αντίστοιχη συμπεριφορά παρατηρείται, όταν διατηρείται η θερμοκρασία της ράβδου 1 σταθερή και

μεταβάλλεται της ράβδου 2, με τη μόνη διαφορά ότι τώρα η δοκός κινείται προς τα κάτω.



Διάγραμμα 3.9: Κατανομή της παραμόρφωσης συναρτήσει της θερμοκρασίας (α) για τη ράβδο 1 (β) για τη ράβδο 2 και (γ) μεταβολή της παραμόρφωσης των ράβδων κατά τη διάρκεια της φόρτισης

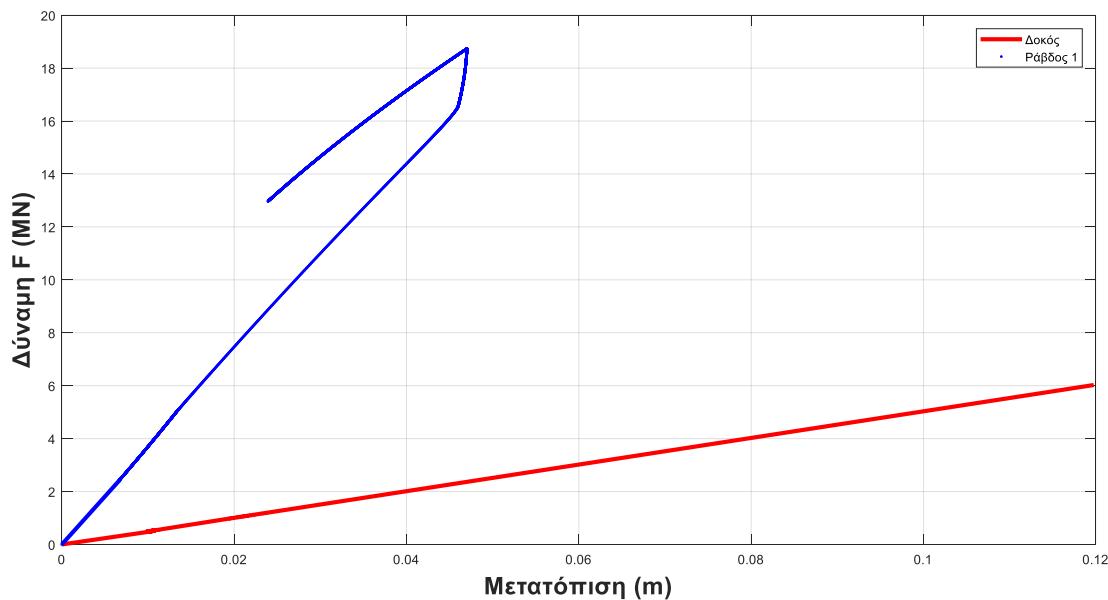
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον εμφανίζει επίσης το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για την κάθε ράβδο (Διάγραμμα 3.10)



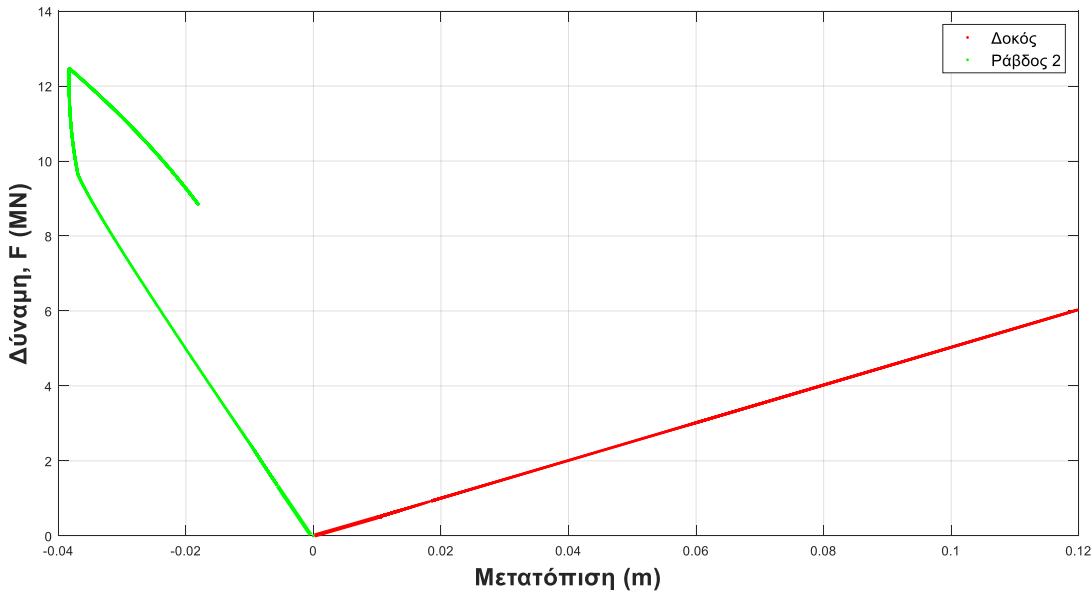
Διάγραμμα 3.10: Διάγραμμα σ-ε για την (α) ράβδο 1 και (β) για τη ράβδο 2

Όπως, διακρίνεται η μορφή των διαγραμμάτων είναι τυπική και αναμενόμενη για κράματα με μνήμη σχήματος. Οι δύο ράβδοι εμφανίζουν όμοια συμπεριφορά όταν θερμαίνονται, ωστόσο η διαφορά των διαγραμμάτων έγκειται στο γεγονός ότι βρόχος υστέρησης της πρώτης ράβδου είναι μεγαλύτερος από την δεύτερη, γεγονός που οφείλεται στο ότι η ράβδος 1 έχει σταθερή θερμοκρασία όταν το υλικό της είναι στην ωστενιτική κατάσταση. Αξίζει να σημειωθεί ότι όταν η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή, οι τάσεις αυξάνονται αναλογικά με τις παραμορφώσεις με αναλογία ίση με το μέτρο ελαστικότητας της ωστενιτικής κατάστασης (γραμμικός κλάδος των διαγραμμάτων (3.10 (α) και (β)).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται διαγράμματα απόκρισης του συστήματος, όπου απεικονίζονται δυνάμεις και μετατοπίσεις τόσο των ράβδων όσο και της δοκού.

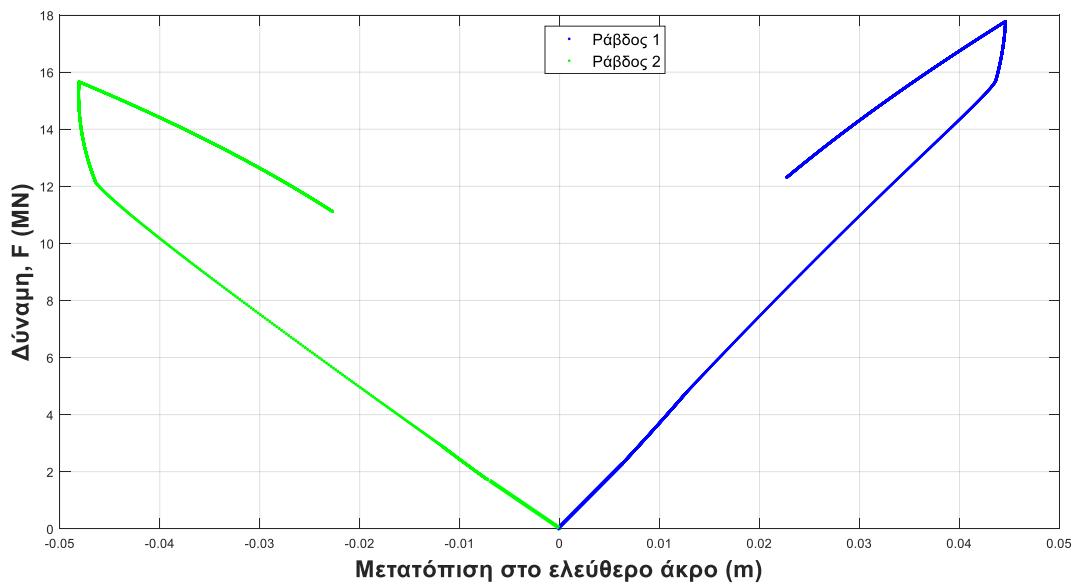


Διάγραμμα 3.11: Δύναμη ράβδου 1 και δοκού συναρτήσει της κατακόρυφης μετατόπισης στο ελεύθερο άκρο

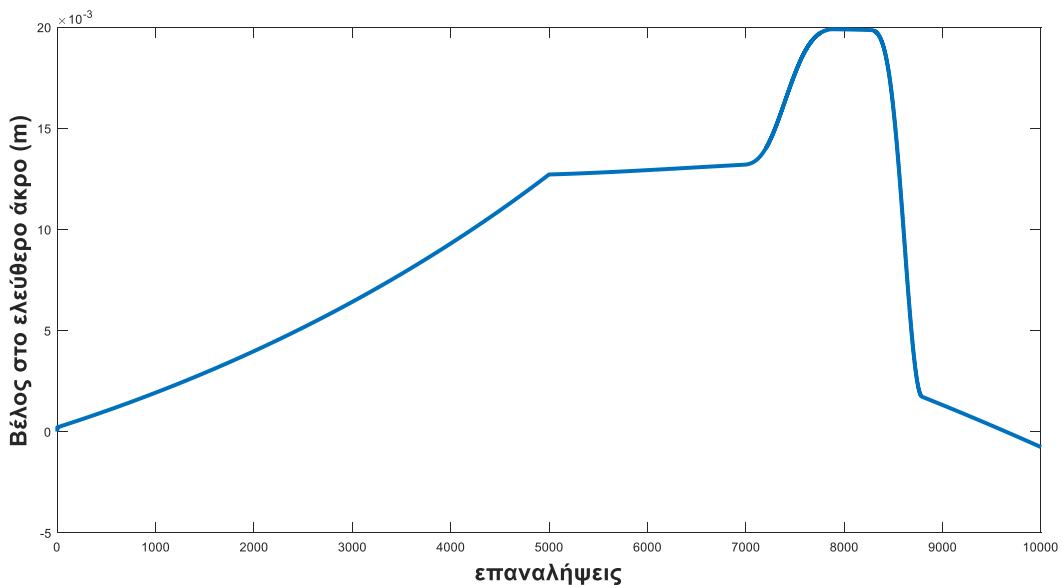


Διάγραμμα 3.12: Δύναμη ράβδου 2 και δοκού συναρτήσει της κατακόρυφης μετατόπισης στο ελεύθερο άκρο

Τα διαγράμματα F-U και για τα δύο SMA εμφανίζουν έντονα μη γραμμική μορφή, γεγονός αναμενόμενο λόγω της μη γραμμικής καταστατικής σχέσης του υλικού. Όπως φαίνεται, η δύναμη αυξάνει και λαμβάνει την μέγιστη τιμή της που αντιστοιχεί στο σημείο διακλάδωσης, όταν και η θερμοκρασία είναι μέγιστη. Στη συνέχεια όταν η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή, οι τιμές της δύναμης βρίσκονται πάνω στον δευτερεύοντα κλάδο που είναι γραμμικός. Να αναφερθεί, επίσης, ότι η δοκός εμφανίζει ελαστική συμπεριφορά, αφού στην ουσία οι ράβδοι είναι εκείνες που την μετακινούν. Τέλος, οι δυνάμεις των δύο ράβδων είναι αντίρροπες, αφού συμπεριφέρονται κατά κάποιον τρόπο ανταγωνιστικά. Μάλιστα η δύναμη της ράβδου 1 εμφανίζει μεγαλύτερη μέγιστη τιμή, διότι κατά την μετακίνηση της δοκού προς τα πάνω, αντιστέκονται δύο δυνάμεις η φόρτιση της δοκού σε συνδυασμό με την δύναμη που ασκεί η ράβδος 2 (Διάγραμμα 3.11).



Διάγραμμα 3.13: Μεταβολή της δύναμης των ράβδων 1 και 2 συναρτήσει της κατακόρυφης μετατόπισης του ελεύθερου άκρου

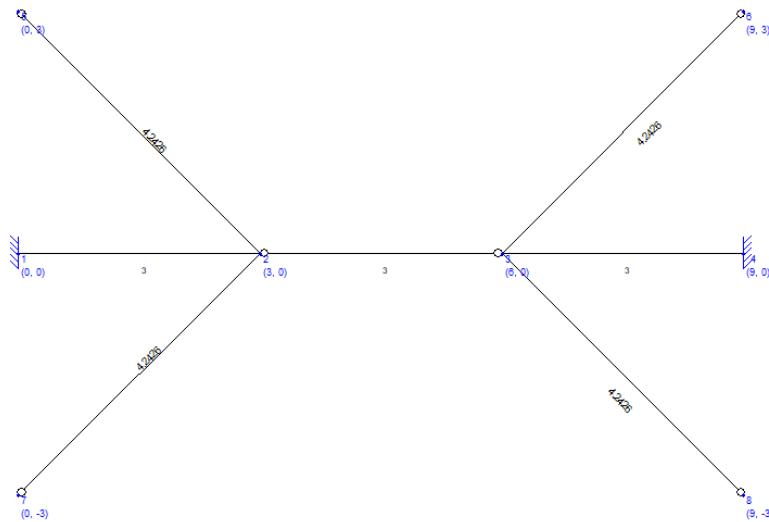


Διάγραμμα 3.14: Μεταβολή του βέλους της δοκού στο ελεύθερο άκρο κατά την διάρκεια της φόρτισης

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 3.14, δοκός μετακινείται προς τα πάνω, χάρη στη θέρμανση και εμφάνιση μνήμης σχήματος της ράβδου 1, εμφανίζοντας μέγιστη παραμόρφωση U_y ίση με $20 \cdot 10^{-3}$. Στη συνέχεια, είναι η ράβδος 2, η οποία θερμαινόμενη, βραχύνεται και εμφανίζει μνήμη σχήματος, αναγκάζοντας τη δοκό να επιστρέψει στην αρχική θέση ισορροπίας της, κατά την ολοκλήρωση του κύκλου φόρτισης.

3.2.3 Γενικευμένο μοντέλο με 4 ενεργοποιητές

Η παρουσίαση των δύο προηγουμένων παραδειγμάτων στοχεύει στην κατανόηση της συμπεριφοράς ενός συστήματος με ενεργοποιητές, ωστόσο είναι απαραίτητη η γενικευση του προβλήματος για περισσότερους από δύο ενεργοποιητές. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για τον σκοπό αυτό φαίνεται στην Εικόνα 3.3. Επομένως, στην παράγραφο που θα ακολουθήσει, θα παρουσιαστεί εκτενώς ο γενικευμένος αλγόριθμος επίλυσης ενός οποιουδήποτε συστήματος με n ενεργοποιητές, όπου $n > 2$.



Εικόνα 3.3: Γενικευμένο μοντέλο με τέσσερις ενεργοποιητές

3.2.3.1 Γενίκευση αλγορίθμου επίλυσης

Η πορεία του αλγορίθμου επίλυσης συνοψίζεται στα παρακάτω στάδια:

- Στάδιο 1^o:

Υπολογίζεται το μητρώο στιβαρότητας για όλη την κατασκευή στο καθολικό σύστημα αξόνων, συμπεριλαμβανομένων και των ράβδων-ενεργοποιητών.

- Στάδιο 2^o:

Ορίζεται το μητρώο $C_0 = \{\varepsilon_0, \sigma_0, T_0, \xi_0, E_0\}$, το οποίο είναι στην ουσία το μητρώο των αρχικών συνθηκών όλων των ράβδων. Αν όλες οι ράβδοι έχουν ίδιες αρχικές συνθήκες το μητρώο είναι διαστάσεων 1x5 αλλιώς είναι 1x1, όπου η το πλήθος των ράβδων, εάν κάθε ράβδος εμφανίζει διαφορετικές αρχικές συνθήκες.

- Στάδιο 3^o:

Ορίζονται επιπλέον τα μητρώα C_1, C_2, \dots, C_n , όσα δηλαδή και το πλήθος των ράβδων από κράμα με μνήμη σχήματος. Τα μητρώα αυτά έχουν διαστάσεις 1x5 και η τυπική μορφή τους για m-ιοστό στοιχείο θα είναι:

$$C_m = \{\varepsilon_m, \sigma_m, T_m, \xi_m, E_m\}$$

Όπου τα $\varepsilon_m, \sigma_m, T_m, \xi_m, E_m$ είναι μητρώα στήλες με τόσες γραμμές όσα τα βήματα του αλγορίθμου που επιθυμώ να επιλύσω.

- Στάδιο 4^o:

Στην i-επανάληψη:

Για δεδομένο T_i, σ_i για το m-ιοστό στοιχείο (τα οποία λαμβάνονται από την i-στήλη του μητρώου C_m)

1) Επιλύονται ο καταστατικός νόμος του υλικού και υπολογίζονται η ανηγμένη παραμόρφωση $\varepsilon_m^{(i)}$.

2) Υπολογίζονται η αξονική μετατόπιση $U_{sma(m)}^{(i)} = C_m(i,1) * (L_{sma} - L_{new(m)}^{(i)})$, όπου: $C(i,1)$: στοιχείο του μητρώου C_m , το οποίο αντιστοιχεί στην $\varepsilon_m^{(i)}$

$$\text{Και } L_{new(m)}^{(i)} = (1 + \Delta \varepsilon_m^{(i)}) * L_{new(m)}^{(i-1)}$$

3) Στη συνέχεια η οριζόντια και κατακόρυφη παραμόρφωση της δοκού στη θέση σύνδεση με την m -ιοστή ράβδο, μέσω της σχέσης:

$$U_{beam}^{(i)} = \begin{bmatrix} U_x^{(i)} \\ U_y^{(i)} \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^m \left\{ \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} \bullet U_{SMA(j)}^{(i)} \right\}, \text{ όπου } m: \text{ ο αριθμός των ράβδων που συντρέχουν την ίδια θέση}$$

4) Υπολογίζεται ο συντελεστής $l^{(i)} = \frac{U_x^{(i)}}{U_y^{(i)}}$ και ώστε να ασκηθούν στη δοκό δυνάμεις $F_x^{(i)}$ και $F_y^{(i)}$ με αναλογία $l^{(i)}$. Ορίζεται έτσι το μητρώο: $F^{(i)} = \begin{bmatrix} F_x^{(i)} \\ F_y^{(i)} \\ 0 \end{bmatrix}$

,όπου τα μητρώα $F_x^{(i)}$ και $F_y^{(i)}$ είναι διάστασης $2mx1$ και περιέχουν τις οριζόντιες και κατακόρυφες δυνάμεις σε κάθε θέση σύνδεσης ράβδου και δοκού, λόγω των ράβδων.

5) Οι μετακινήσεις της δοκού λόγω των παραπάνω δυνάμεων θα υπολογιστούν με την μέθοδο της άμεσης ακαμψίας:

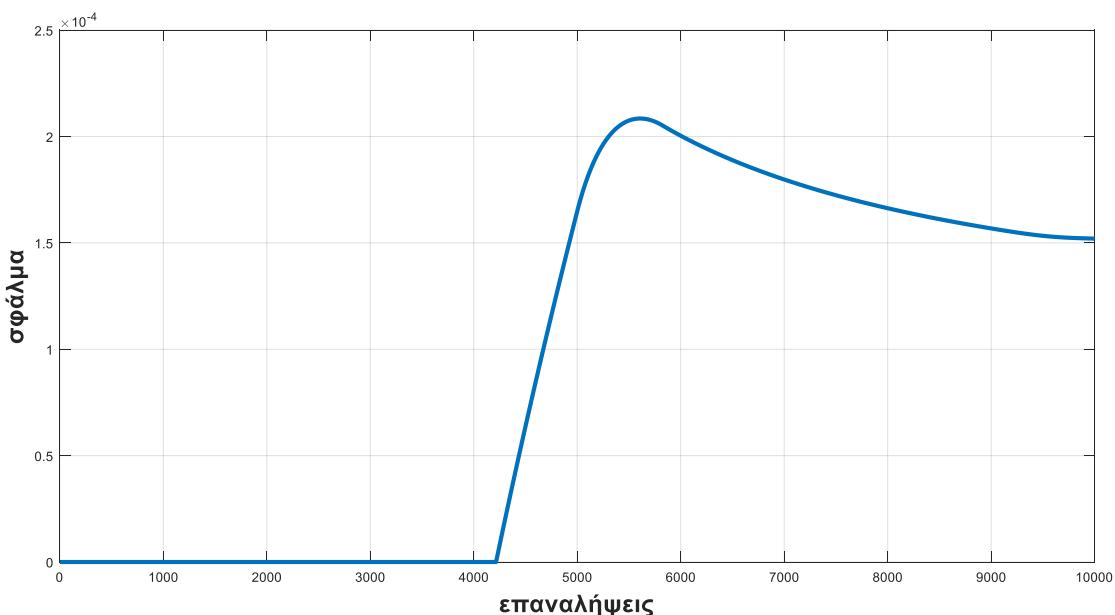
$$U'_{beam}^{(i)} = \begin{bmatrix} U_x'^{(i)} \\ U_y'^{(i)} \end{bmatrix} = K^{-1} \bullet F^{(i)}$$

6) Υπολογισμός των συντελεστών: $b_x^{(i)} = \frac{U_x^{(i)}}{U_x^{(i)'}}$ και $b_y^{(i)} = \frac{U_y^{(i)}}{U_y^{(i)'}}$, οπότε και

ορίζεται το μητρώο $b^{(i)}$, το οποίο είναι διάστασης $2mx1$, διότι περιέχει τα $b_x^{(i)}$ και $b_y^{(i)}$ σε κάθε θέση σύνδεσης ράβδου με τη δοκό.

7) Υπολογίζονται τελικά τα πραγματικά εντατικά μεγέθη της δοκού, λόγω της έντασης που τις προσδίδουν οι ράβδοι μέσω της σχέσης: $F_{real}^{(i)} = F^{(i)} \bullet (b^{(i)})^T$

8) Ο έλεγχος της σύγκλισης: $error_{(i)} = \frac{\|U_{real}^{(i)} - U^{(i)}\|}{\|U^{(i)}\|}$, όπου: $U_{real}^{(i)} = K^{-1} \bullet F_{real}^{(i)}$

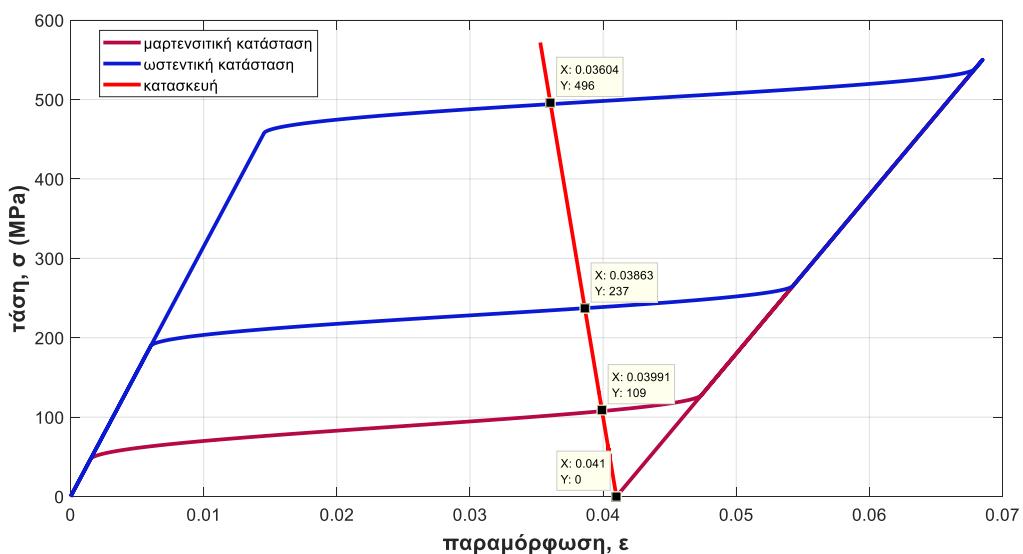


Διάγραμμα 3.15: Μεταβολή του σφάλματος συναρτήσει των επαναλήψεων του αλγορίθμου

Όπως προκύπτει από το Διάγραμμα 3.15, ο αλγόριθμος είναι έγκυρος και οδηγεί σε ασφαλή αποτελέσματα. Το σφάλμα μεγιστοποιείται λαμβάνοντας τιμή περίπου 2%_o και τελικά ο αλγόριθμος συγκλίνει με τελικό σφάλμα περίπου 1.2%_o.

3.2.3.2 Καμπύλη λειτουργίας «έξυπνου συστήματος»

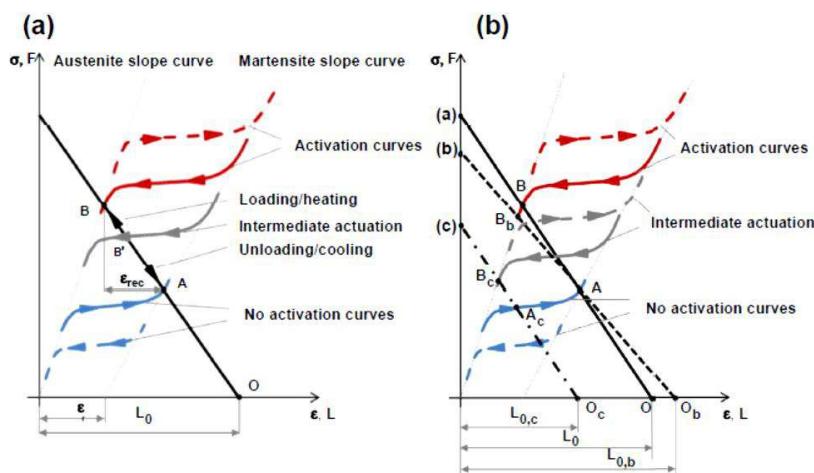
Ένα πολύ χρήσιμο αντικείμενο στην μελέτη, ανάλυση και σχεδιασμό συστημάτων με ενεργοποιητές είναι το λεγόμενο επίπεδο δύναμης-μετακίνησης ή τάσης παραμόρφωσης, ανάλογα με τα μεγέθη που απεικονίζονται. Στο επίπεδο αυτό, αναπαρίστανται η καμπύλη λειτουργίας για την ωστενιτική φάση (για μια συγκεκριμένη θερμοκρασία, για την οποία συμβαίνει ενεργοποίηση), αντίστοιχη για την μαρτενσιτική φάση (για μια συγκεκριμένη θερμοκρασία για την οποία δεν υπάρχει ενεργοποίηση) και τέλος η καμπύλη της κατασκευής. Για το σχεδιασμό της τελευταίας, η κατασκευή προσομοιώνεται ως γραμμικό ελατήριο και η δυσκαμψία της λαμβάνεται ως ο λόγος της δύναμης που ασκεί σε αυτήν ο ενεργοποιητής προς την προβολή στον άξονα της της μετατόπισης που αυτή προκαλεί. Ένα τέτοιο επίπεδο φαίνεται στο διάγραμμα 3.16 που ακολουθεί.



Διάγραμμα 3.16: Καμπύλες λειτουργίας τάσης-παραμόρφωσης

Η δυσκαμψία της κατασκευής απεικονίζεται αρνητική, διότι οι μετατοπίσεις των ενεργοποιητών είναι αντίρροπες από αυτές της κατασκευής.

Η επιλογή γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς για την κατασκευή δεν επηρεάζει τον γενικό αλγόριθμο επίλυσης, ο οποίος είναι μη γραμμικός από τη φύση του λόγω μη γραμμικότητας υλικού, αλλά εξυπηρετεί τον υπολογισμό των σημείων λειτουργίας.



Διάγραμμα 3.17: Καμπύλες λειτουργίας σ-ε

Τα σημεία λειτουργίας θεωρούνται σημαντικά, καθώς συμβάλουν στην κατανόηση της απόκρισης του ενεργοποιητή. Το σημείο τομής με τον άξονα X (σημείο O), εκφράζει την αρχική ανηγμένη παραμόρφωση ϵ_0 (ή αρχικό μήκος L_0) του ενεργοποιητή πριν αυτός ενσωματωθεί στην κατασκευή. Το σημείο τομής με την μαρτενσιτική καμπύλη σ-ε (σημείο A), αντιστοιχεί στο σημείο ισορροπίας του συστήματος, αφού τοποθετήθηκε σε αυτό ο ενεργοποιητής. Η κατάσταση ισορροπίας δημιουργεί τάση στον ενεργοποιητή, η οποία είναι απαραίτητη κατά την ψύξη (φάση απενεργοποίησης), προκειμένου να αναιρεθεί όλη η παραμόρφωση. Αντίθετα, η θέρμανση του υλικού του ενεργοποιητή, οδηγεί σε μετακίνηση πάνω στην καμπύλη της κατασκευής. Στην ουσία θα μπορούσαμε να

φανταστούμε πλήθος καμπύλων (καμπύλες γκρι χρώματος –Διάγραμμα 3.17(α)), τις οποίες συναντούμε κατά την ανοδική αυτή πορεία και οι οποίες αντιστοιχούν σε καταστάσεις ισορροπίας σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από αυτή της πλήρους ενεργοποίησης. Η διαδικασία της θέρμανσης οδηγεί σε αναίρεση της παραμόρφωσης, η οποία φαίνεται ως η διαφορά των τετμημένων των σημείων A και B', μέχρι να επιτευχθεί η θερμοκρασία την πλήρους ενεργοποίησης που αντιστοιχεί στη δεδομένη τάση του ενεργοποιητή (σημείο B), όπου και πραγματοποιείται η πλήρης αναίρεση. Η περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας επιφέρει την τομή της καμπύλης της κατασκευής με τον ωστενιτικό κλάδο. Συνεπώς, η διαφορά των τετμημένων των σημείων A και B αντιστοιχεί την μέγιστη εκμετάλλευση του κράματος με μνήμη σχήματος για την δεδομένη κατασκευή, για τις παρούσες συνθήκες φόρτισης και στηρίξεις.

Παράλληλα, εξάγονται και κάποια χρήσιμα συμπεράσματα, σχετικά με την δυσκαμψία της κατασκευής, όπως αυτή συγκρίνεται με τον ενεργοποιητή. Αναλυτικότερα, τρεις διαφορετικές καταστάσεις ισορροπίας απεικονίζονται στον διάγραμμα 3.17(β): Η πρώτη κατάσταση ισορροπίας στην αριστερή πλευρά του διαγράμματος (a), η δεύτερη, η οποία χαρακτηρίζεται από χαμηλότερη δυσκαμψία κατασκευής, αλλά όμοιο φορτίο προέντασης (A_b (b)) και η τρίτη, η οποία εμφανίζει ίδια δυσκαμψία με την πρώτη αλλά διαφορετικό φορτίο προέντασης (A_c (c)). Για την περίπτωση χαμηλότερης δυσκαμψίας, η μέγιστη παραμόρφωσης που θα μπορεί να αναιρεθεί για όμοια θερμοκρασία ενεργοποίησης είναι μεγαλύτερη (σημείο B_b), ενώ η τάση που απαιτείται είναι μικρότερη από την περίπτωση (a). Αντίθετα, η πιο εύκαμπτη κατασκευή συνεπάγεται μεγαλύτερη αρχική παραμόρφωση ενεργοποιητή $L_{0,b}$ για τον ενεργοποιητή με την μεγαλύτερη προένταση (σημείο A). Ωστόσο, για την περίπτωση μεγαλύτερης δυσκαμψίας κατασκευής, η θερμοκρασία πλήρους ενεργοποίησης αυξάνεται, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3.17 (β). Αντιθέτως,

μικρότερη δυσκαμψία κατασκευής απαιτεί και χαμηλότερη θερμοκρασία ενεργοποίησης. Τέλος, για την περίπτωση κατασκευής με χαμηλότερο επίπεδο προέντασης (σημείο A_c), τόσο η μέγιστη παραμόρφωση που μπορεί να αναιρεθεί όσο και η τάση που αναπτύσσεται στον ενεργοποιητή είναι μικρότερες. Τέλος, η αρχική επιμήκυνση πριν την ενσωμάτωση στην κατασκευή είναι μικρότερη, όπως αποδεικνύεται από το σημείο O_c , ενώ παράλληλα και η θερμοκρασία που απαιτείται για πλήρη ενεργοποίηση είναι χαμηλότερη (σημείο B_c - γκρι κλάδος).

3.2.3.3 Υπολογισμός σημείων λειτουργίας

Τα σημεία λειτουργίας μπορούν να προσδιοριστούν και αναλυτικά, εκτός από την γραφική αναζήτησή του που πραγματοποιήθηκε στην προηγούμενη ενότητα. Για την αναλυτική προσέγγισή τους απαιτείται η γνώση της δυσκαμψίας K^* της κατασκευής, ως ο λόγος που αναφέρθηκε προηγουμένως.

Για τον υπολογισμό των σημείων Ο,Α και Β, οι εξισώσεις για τον γραμμικό κλάδο της ωστενιτικής και μαρτενσιτικής φάσης, καθώς της δοκού απαιτούνται. Γενικά, μπορούν να γραφτούν τόσο σε όρους δύναμης-μετατόπισης όσο και σε τάσης-παραμόρφωσης. Αν και οι δυο τρόποι γραφής θεωρούνται ισοδύναμοι, σε περιπτώσεις που η γεωμετρία του συστήματος δεν ανάγεται άμεσα σε ένα μονοδιάστατο στοιχείο, π.χ. ελατήριο, η πρώτη προσέγγιση θα μπορούσε να θεωρηθεί ευκολότερη.

- Εξίσωση γραμμικού κλάδου ωστενιτικής φάσης σ-ε:

$$\sigma = E_a * \epsilon \quad (3.1)$$

και σε όρους δύναμης-μετακίνησης:

$$F = \frac{E_a A_{SMA}}{L_{SMA}} x \quad (3.2)$$

- Εξίσωση γραμμικού κλάδου ωστενιτικής φάσης σ-ε:

$$\sigma = E_m * (\varepsilon - \varepsilon_r) \quad (3.3)$$

και σε όρους δύναμης-μετακίνησης:

$$F = \frac{E_m A_{SMA}}{L_{SMA}} (x - x_r) \quad (3.4)$$

- Εξίσωση κατασκευής

$$\sigma = -\hat{K} \frac{L_{SMA}}{A_{SMA}} \left(\varepsilon - \frac{L_0 - L_{SMA}}{L_{SMA}} \right) \quad (3.5)$$

και σε όρους δύναμης-μετακίνησης:

$$F = -\hat{K} (x - L_0) \quad (3.6)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τη θέση καθενός από τα σημεία που αναφέρθηκαν σε συνδυασμό και με την εξίσωση κάθε καμπύλης, υπολογίζονται τα σημεία λειτουργίας και καταγράφονται στον πίνακα που ακολουθεί. (Πίνακας 3.5)

Πίνακας 3.5: Σημεία λειτουργίας

| Σημείο | ε | σ | F | u |
|--------|---|---|--|---|
| O | $\frac{L_0 - L_{SMA}}{L_{SMA}}$ | 0 | L_0 | 0 |
| A | $\varepsilon_r + \frac{\sigma_{pl}}{E_m}$ | σ_{pl} | $\left(\varepsilon_r + \frac{\sigma_{pl}}{E_m} \right) L_{SMA}$ | $\sigma_{pl} A_{SMA}$ |
| B | $\frac{\hat{K}L_0}{\hat{K}L_{SMA} + E_a A_{SMA}}$ | $\frac{\hat{K}L_0 E_a}{\hat{K}L_{SMA} + E_a A_{SMA}}$ | $\frac{\hat{K}L_0 L_{SMA}}{\hat{K}L_{SMA} + E_a A_{SMA}}$ | $\frac{\hat{K}L_0 A_{SMA}}{\hat{K}L_{SMA} + E_a A_{SMA}}$ |

Όπου: σ_{pl} : η τιμή της τάσης προέντασης του ενεργοποιητή

$$L_0 : \frac{\sigma_{pl} A_{SMA}}{\hat{K}} L_{SMA} \left(\varepsilon_r + \frac{\sigma_{pl}}{E_m} \right)$$

Τέλος, η μέγιστη παραμόρφωση που μπορεί να αναιρεθεί μέσω θέρμανσης υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$\varepsilon_r + \frac{\sigma_{pl}}{E_m} - \frac{\hat{K}L_0}{[\hat{K}L_{SMA} + E_a A_{SMA}]} \quad (3.7)$$

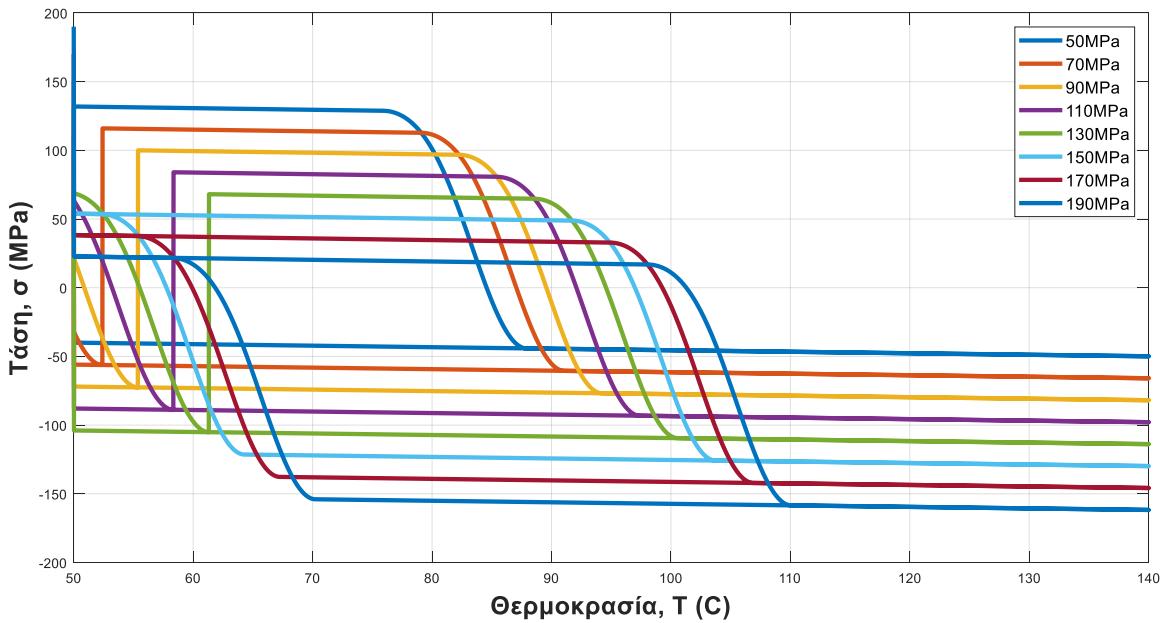
4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΤΕΣ ΑΠΟ ΚΡΑΜΑΤΑ ΜΕ ΜΝΗΜΗ ΣΧΗΜΑΤΟΣ

4.1 Γενικά

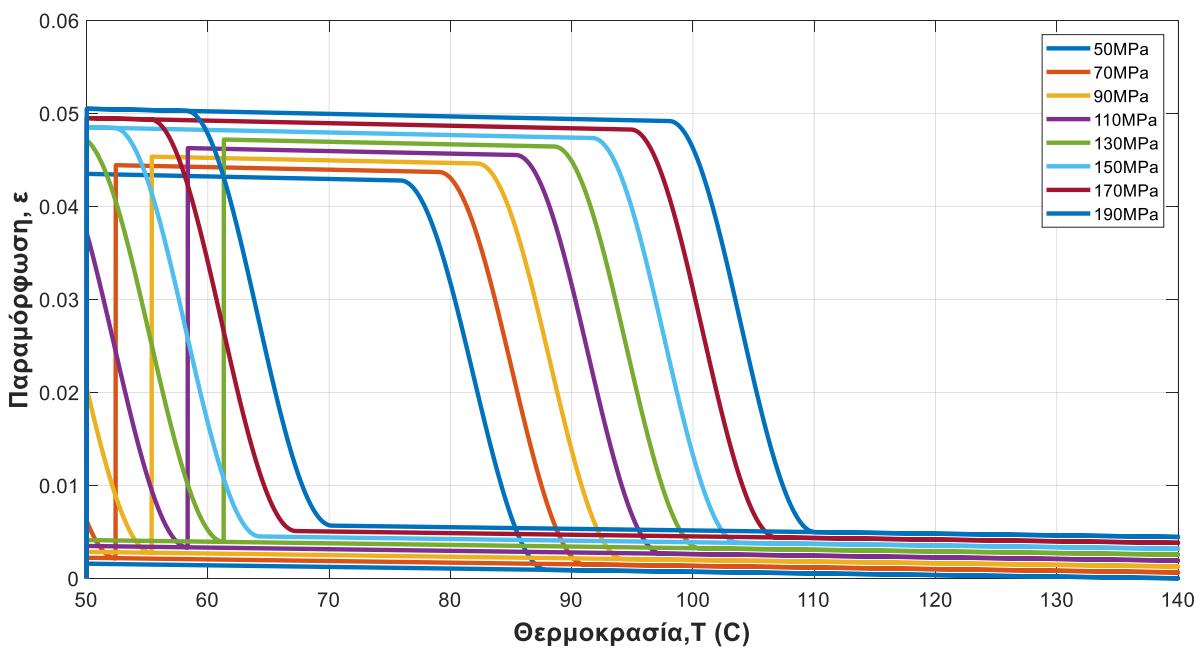
Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια προσπάθεια κατανόησης των παραμέτρων-μεγεθών που επηρεάζουν καθοριστικά την απόκριση ενός συστήματος με ενεργοποιητές και κυρίως την συμπεριφορά του ίδιου του ενεργοποιητή. Τέτοια μεγέθη θα μπορούσε να είναι η αρχική τάση του ενεργοποιητή (προένταση), το μήκος του, το εμβαδό της διατομής του, η αρχική του παραμόρφωση ή ακόμη και ο τρόπος θερμοκρασιακής φόρτισης. Για καθένα από τα μεγέθη αυτά θα γίνει εκτενής παρουσίαση της επιρροής του, ωστόσο για λόγους απλότητας θα χρησιμοποιηθεί τον πλέον απλούστερο μοντέλο, δηλαδή ο πρόβολος με τον έναν ενεργοποιητή στο ελεύθερό του άκρο (Εικόνα 3.1).

4.2 Αρχική Τάση (Προένταση)

Το μοντέλο επιλύεται για διάφορες τιμές προέντασης του ενεργοποιητή και τα αποτελέσματα φαίνονται στα Διαγράμματα 4.1 και 4.2.



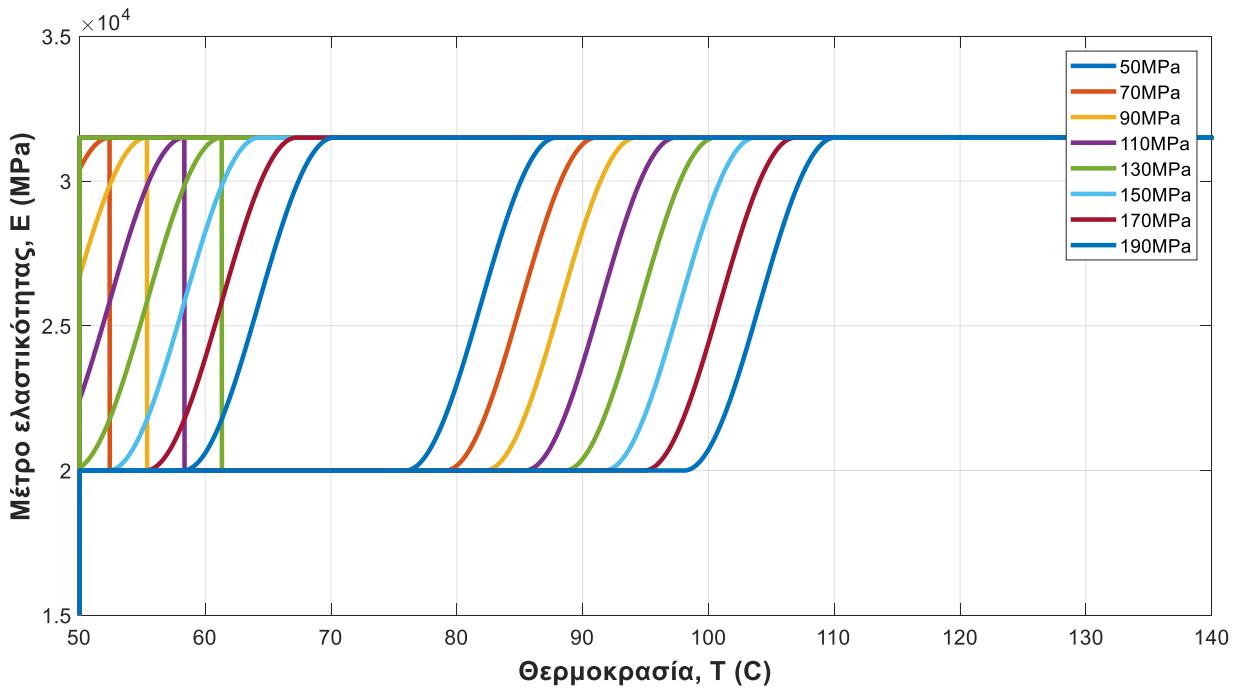
Διάγραμμα 4.1: Μεταβολή τάσης συναρτήσει της θερμοκρασίας για διάφορες τιμές προέντασης



Διάγραμμα 4.2: Μεταβολή παραμόρφωσης συναρτήσει της θερμοκρασίας για διάφορες τιμές προέντασης

Η τιμή της αρχικής τάσης επηρεάζει τη μορφή του βρόχου υστέρησης τόσο της τάσης όσο και της παραμόρφωσης. Αναλυτικότερα, μικρότερη τιμή αρχικής τάσης στον ενεργοποιητή έχει ως αποτέλεσμα, πιο απότομη κλίση του διαγράμματος κατά τον αντίστροφο μετασχηματισμό (κατά την ψύξη δηλαδή), ενώ ταυτόχρονα τόσο ο ευθύς όσο και ο αντίστροφος μετασχηματισμός πραγματοποιούνται σε χαμηλότερη θερμοκρασία (μετακίνηση των καμπύλων προς δεξιά με την αύξηση της θερμοκρασίας). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μικρότερη χαρακτηριστική τάση απαιτεί χαμηλότερη θερμοκρασία μετασχηματισμού σύμφωνα με το διάγραμμα 3.2. Επιπλέον, επηρεάζονται η μέγιστη αναπτυσσόμενη παραμόρφωση και τάση, καθώς όπως είναι αναμενόμενο μεγαλύτερη αρχική τάση, οδηγεί σε αύξηση και των δύο.

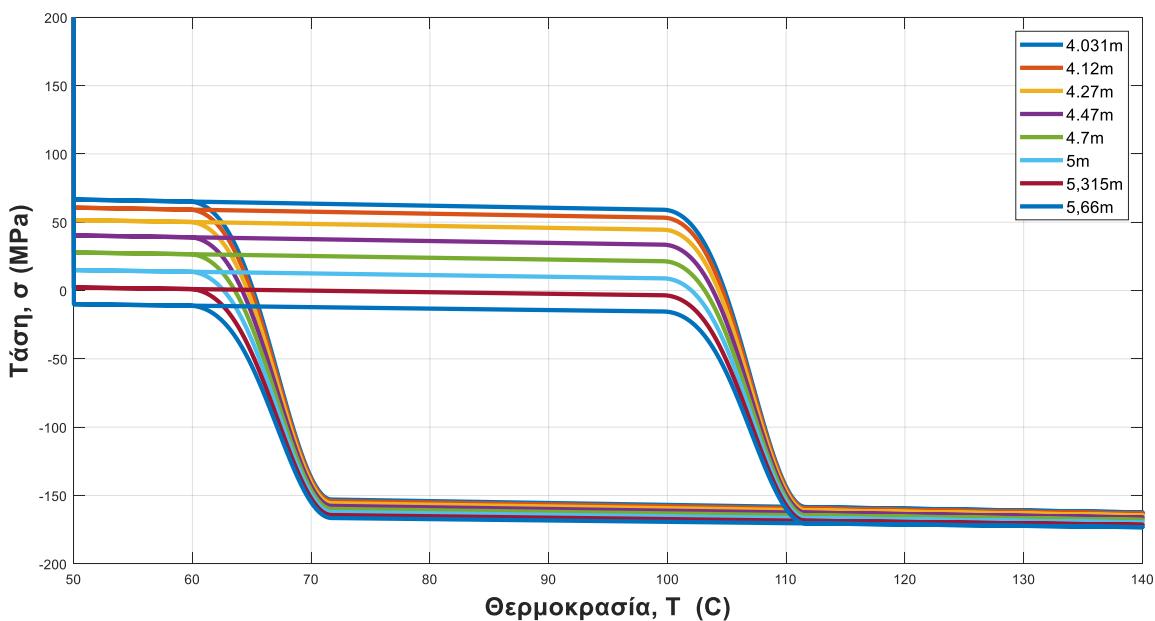
Σχετικά, με το μέτρο ελαστικότητας των δύο φάσεων παρατηρείται ότι η μέγιστη και ελάχιστη τιμή του, δεν επηρεάζονται από την τιμή της αρχικής τάσης, ωστόσο η μεταβολή του εκδηλώνεται σε ολοένα και υψηλότερη θερμοκρασία, καθώς μεγαλώνει η τιμή της αρχικής τάσης (Διάγραμμα 4.3).



Διάγραμμα 4.3: Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας για διάφορες τιμές προέντασης

4.3 Αρχικό Μήκος ενεργοποιητή

Το αρχικό μήκος του ενεργοποιητή σχετίζεται άμεσα με την κλίση του. Όπως προφανώς είναι γνωστό όσο μικρότερη είναι τόσο λιγότερο αποδοτικός καθίσταται ο ενεργοποιητής. Στην παρούσα διερεύνηση επιλύεται το μοντέλο για διάφορες τιμές της κατακόρυφης απόστασης h του ενεργοποιητή από το δεσμευμένο άκρο της δοκού. Όσο μικρότερη είναι η απόσταση h , τόσο μικρότερο μήκος του αλλά και η κλίση του. Αυτό, όπως φαίνεται επηρεάζει την αναπτυσσόμενη τάση, διότι όπως έχει ήδη αναφερθεί η μικρή κλίση καθιστά τον ενεργοποιητή ανενεργό και επομένως απαιτείται η ανάπτυξη μεγαλύτερης τάσης προκειμένου να λειτουργήσει επαρκώς (Διάγραμμα 4.4)



Διάγραμμα 4.4: Μεταβολή τάσης συναρτήσει της θερμοκρασίας για διάφορες τιμές αρχικού μήκους και κλίσης ενεργοποιητή

4.4 Βελτιστοποίηση Θερμοκρασιακής Φόρτισης

Η επιρροή της θερμοκρασίας, ως μορφή φόρτισης αποφασίστηκε να διερευνηθεί, με διαδικασία βελτιστοποίησης. Δηλαδή αναζητείται η τιμή εκκίνησης και τερματισμού της θερμοκρασιακής φόρτισης προκειμένου να έχουμε ελαχιστοποίηση του σφάλματος του αλγορίθμου. Συνεπώς, η βελτιστοποίησης σχετίζεται με την απόδοση του αλγορίθμου. Επειδή το πρόβλημα είναι έντονα μη γραμμικό, επιλέχθηκαν οι γενετικοί αλγόριθμοι, για την επίλυσή του.

4.4.1 Γενετικοί Αλγόριθμοι

4.4.1.1 Γενικά Στοιχεία

Οι Γενετικοί αλγόριθμοι ανήκουν στο κλάδο της επιστήμης υπολογιστών και αποτελούν μια μέθοδο αναζήτησης βέλτιστων λύσεων σε συστήματα που μπορούν να περιγραφούν ως μαθηματικό πρόβλημα. Είναι μια τεχνική

προγραμματισμού που εισήγαγε στα τέλη της δεκαετίας του 1960 ο Τζον Χόλαντ, ερευνητής του Ινστιτούτου της Σάντα Φε (ΗΠΑ). Είναι χρήσιμοι σε προβλήματα που περιέχουν πολλές παραμέτρους/διαστάσεις και δεν υπάρχει αναλυτική μέθοδος που να μπορεί να βρει το βέλτιστο συνδυασμό τιμών για τις μεταβλητές, ώστε το υπό εξέταση σύστημα να αντιδρά με όσο το δυνατόν με το επιθυμητό τρόπο.

Ο τρόπος λειτουργίας των Γενετικών Αλγορίθμων είναι εμπνευσμένος από τη βιολογία. Χρησιμοποιεί την ιδέα της εξέλιξης μέσω γενετικής μετάλλαξης, φυσικής επιλογής και διασταύρωσης. Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι είναι αρκετά απλοί στην υλοποίησή τους. Οι τιμές για τις παραμέτρους του συστήματος πρέπει να κωδικοποιούνται με τρόπο ώστε να αναπαρασταθούν από μια μεταβλητή που περιέχει σειρά χαρακτήρων ή δυαδικών ψηφίων (0/1). Αυτή η μεταβλητή μιμείται το γενετικό κώδικα που υπάρχει στους ζωντανούς οργανισμούς. Αρχικά, ο Γενετικός Αλγόριθμος παράγει πολλαπλά αντίγραφα της μεταβλητής/γεννητικού κώδικα, συνήθως με τυχαίες τιμές, δημιουργώντας ένα πληθυσμό λύσεων. Κάθε λύση (τιμές για τις παραμέτρους του συστήματος) δοκιμάζεται για το πόσο κοντά φέρνει την αντίδραση του συστήματος στην επιθυμητή, μέσω μιας συνάρτησης που δίνει το μέτρο ικανότητας της λύσης και η οποία ονομάζεται συνάρτηση ικανότητας (Σ.Ι.).

Οι λύσεις που βρίσκονται πιο κοντά στην επιθυμητή, σε σχέση με τις άλλες, σύμφωνα με το μέτρο που μας δίνει η Σ.Ι, αναπαράγονται στην επόμενη γενιά λύσεων και λαμβάνουν μια τυχαία μετάλλαξη. Επαναλαμβάνοντας αυτή τη διαδικασία για αρκετές γενιές, οι τυχαίες μεταλλάξεις σε συνδυασμό με την επιβίωση και αναπαραγωγή των γονιδίων/λύσεων που πλησιάζουν καλύτερα το επιθυμητό αποτέλεσμα θα παράγουν ένα γονίδιο/λύση που θα περιέχει τις τιμές για τις παραμέτρους που ικανοποιούν όσο καλύτερα γίνεται την Σ.Ι.

Υπάρχουν διάφορες εκδοχές της παραπάνω διαδικασίας για τους Γ.Α από τις οποίες κάποιες περιλαμβάνουν και τη διασταύρωση (ζευγάρωμα)

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΡΑΜΑΤΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΜΕ ΜΝΗΜΗ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ΚΑΤΣΚΕΥΕΣ ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΥΠΟ ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

γονιδίων/λύσεων ώστε ο αλγόριθμος να φτάσει στο αποτέλεσμα πιο γρήγορα. Καθώς υπάρχει το στοχαστικό (τυχαίο) συστατικό της μετάλλαξης και ζευγαρώματος, κάθε εκτέλεση του Γ.Α μπορεί να συγκλίνει σε διαφορετική λύση και σε διαφορετικό χρόνο. Η απόδοση του Γ.Α εξαρτάται επί το πλείστον από την συνάρτηση ικανότητας και συγκεκριμένα από το κατά πόσο το μέτρο της περιγράφει την βέλτιστη λύση. Οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι ένα πεπερασμένο σύνολο οδηγιών για την εκπλήρωση ενός έργου, το οποίο δεδομένης μιας αρχικής κατάστασης θα οδηγήσει σε μια αναγνωρίσιμη τελική κατάσταση, και το οποίο προσπαθεί να μιμηθεί την διαδικασία της βιολογικής εξέλιξης. Οι γενετικοί αλγόριθμοι προσπαθούν να βρουν τη λύση ενός προβλήματος με το να προσομοιώνουν την εξέλιξη ενός πληθυσμού «λύσεων» του προβλήματος.

4.4.1.2 Πως Λειτουργούν

Ο τρόπος λειτουργίας των Γενετικών Αλγορίθμων είναι εμπνευσμένος από την βιολογία. Χρησιμοποιεί την ιδέα της εξέλιξης μέσω γενετικής μετάλλαξης, φυσικής επιλογής και διασταύρωσης.

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι διατηρούν έναν πληθυσμό πιθανών λύσεων, του προβλήματος που μας ενδιαφέρει, πάνω στον οποίο δουλεύουν, σε αντίθεση με άλλες μεθόδους αναζήτησης που επεξεργάζονται ένα μόνο σημείο του διαστήματος αναζήτησης. Έτσι ένας Γενετικός Αλγόριθμος πραγματοποιεί αναζήτηση σε πολλές κατευθύνσεις και υποστηρίζει καταγραφή και ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ αυτών των κατευθύνσεων. Ο πληθυσμός υφίσταται μια προσομοιωμένη γενετική εξέλιξη χρησιμοποιώντας διάφορους γενετικούς τελεστές όπως η επιλογή, η διασταύρωση και η μετάλλαξη.

Στην πράξη ο αλγόριθμος ξεκινά μ' ένα σύνολο λύσεων - ονομάζονται γονιδιώματα, δανειζόμενες το όνομά τους από τη βιολογία- οι οποίες συνιστούν τον "πληθυσμό". Κατόπιν ζητείται από τον υπολογιστή να δημιουργήσει μια σειρά τυχαίων ανασυνδυασμών και μεταλλάξεων των "γονιδιωμάτων".

Οι πιο ικανές λύσεις για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα συνεχίζουν να εξελίσσονται και ανασυνδυάζονται τυχαία, μέχρις ότου "επιβιώσουν" οι καλύτερες. Συνήθως, όσο περισσότερες γενιές περνούν τόσο καλύτερες λύσεις βρίσκονται, μπορεί όμως ο αλγόριθμος να βρεθεί σε σημείο του πεδίου των λύσεων από όπου και δεν μπορεί να προχωρήσει λόγο του ότι βρίσκεται σε τοπικό μέγιστο. Για το λόγο αυτό έχουν υπάρχουν διαφορετικές εκδοχές του αλγόριθμου ανάλογα με τη μορφή του προβλήματος.

4.4.1.3 Τρόπος Υλοποίησης του Αλγορίθμου

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι είναι αρκετά απλοί στην υλοποίησή τους. Οι τιμές για τις παραμέτρους του συστήματος πρέπει να κωδικοποιούνται με τρόπο ώστε να αναπαρασταθούν από μια μεταβλητή που περιέχει σειρά χαρακτήρων ή δυαδικών ψηφίων (0/1). Αυτή η μεταβλητή μιμείται το γενετικό κώδικα (γονιδίωμα) που υπάρχει στους ζωντανούς οργανισμούς.

Αρχικά, ο Γενετικός Αλγόριθμος παράγει πολλαπλά αντίγραφα της μεταβλητής/γενετικού κώδικα, συνήθως με τυχαίες τιμές, δημιουργώντας ένα πληθυσμό λύσεων. Κάθε λύση (τιμές για τις παραμέτρους του συστήματος) δοκιμάζεται για το πόσο κοντά φέρνει την αντίδραση του συστήματος στην επιθυμητή, μέσω μιας συνάρτησης που δίνει το μέτρο ικανότητας της λύσης και η οποία ονομάζεται συνάρτηση ικανότητας (Σ.Ι).

Οι λύσεις που βρίσκονται πιο κοντά στην επιθυμητή, σε σχέση με τις άλλες, σύμφωνα με το μέτρο που μας δίνει η Σ.Ι, αναπαράγονται στην επόμενη γενιά λύσεων και λαμβάνουν μια τυχαία μετάλλαξη. Επαναλαμβάνοντας αυτή τη διαδικασία για αρκετές γενιές, οι τυχαίες μεταλλάξεις σε συνδυασμό με την επιβίωση και αναπαραγωγή των γονιδιωμάτων/λύσεων που πλησιάζουν καλύτερα το επιθυμητό αποτέλεσμα θα παράγουν ένα γονίδιο/λύση που θα περιέχει τις τιμές για τις παραμέτρους που ικανοποιούν όσο καλύτερα γίνεται την Σ.Ι.

4.4.2 Εφαρμογή γενετικού αλγόριθμου για ελαχιστοποίηση του σφάλματος του αλγορίθμου

Η αναζήτηση αποδοτικότερου τρόπου φόρτισης προς ελαχιστοποίηση του σφάλματος έχει νόημα σε ένα σύστημα με πολλούς ενεργοποιητές. Έτσι για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το γενικευμένο μοντέλο με τις τέσσερις ράβδους (Εικόνα 3.3). Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε η Matlab και το εξειδικευμένο toolbox της, το οποίο παρέχει έτοιμη την επιλογή βελτιστοποίησης με γενετικούς αλγορίθμους.

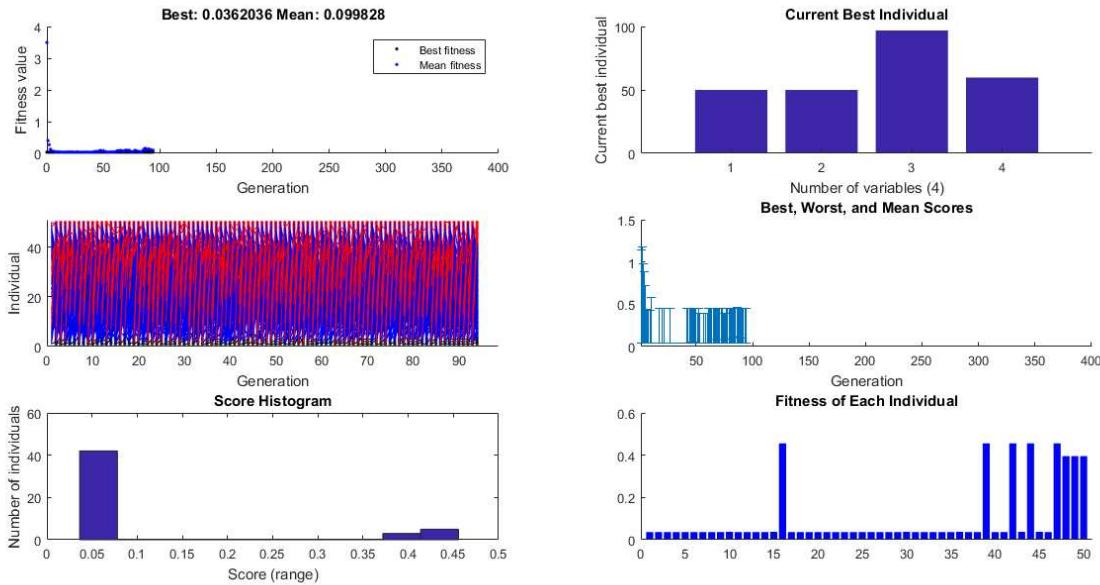
Η διαδικασία βελτιστοποίησης απέδειξε ότι για δεδομένο κράμα με μνήμη σχήματος με πειραματικά υπολογισμένες χαρακτηριστικές θερμοκρασίες, η θερμοκρασία φόρτισης-αποφόρτισης θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ των ορίων M_f και A_f , να ισχύει δηλαδή: $M_f < T < A_f$, προκειμένου το σφάλμα να είναι το ελάχιστο δυνατό.

Η διαδικασία της βελτιστοποίησης πραγματοποιήθηκε για τρία διαφορετικά κράματα με χαρακτηριστικές θερμοκρασίες, που φαίνονται στον πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικές θερμοκρασίες τριών διαφορετικών κραμάτων

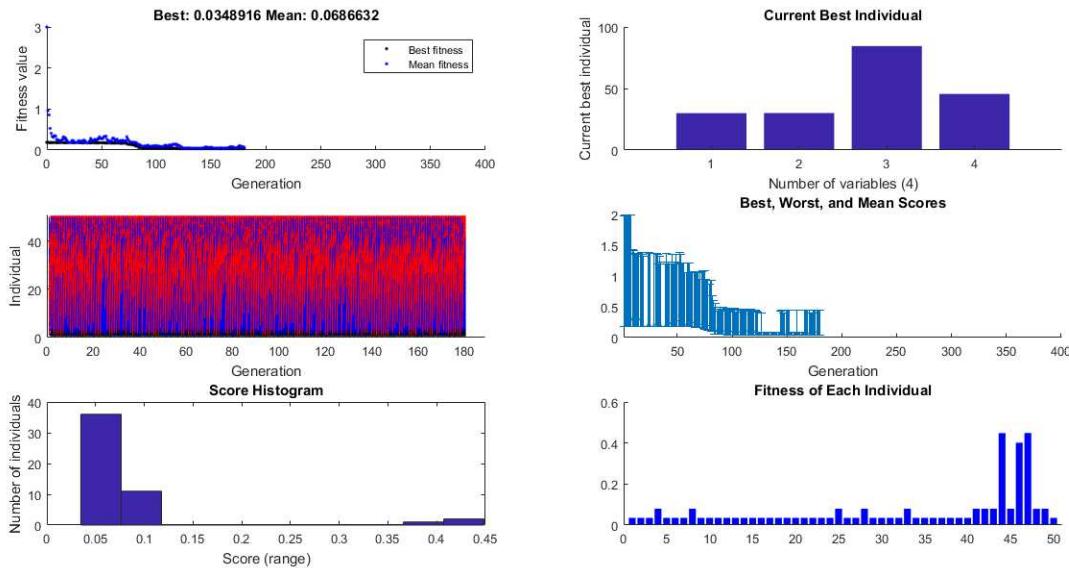
| T(°C) | 10 | 20 | 30 |
|-------|----|------|-------|
| M_f | 30 | 9 | -2.85 |
| M_s | 42 | 18.4 | 5.9 |
| A_s | 68 | 34.5 | 25 |
| A_f | 80 | 49 | 80 |

Τα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης για καθέναν από τους τρεις ενεργοποιητές από διαφορετικό υλικό.

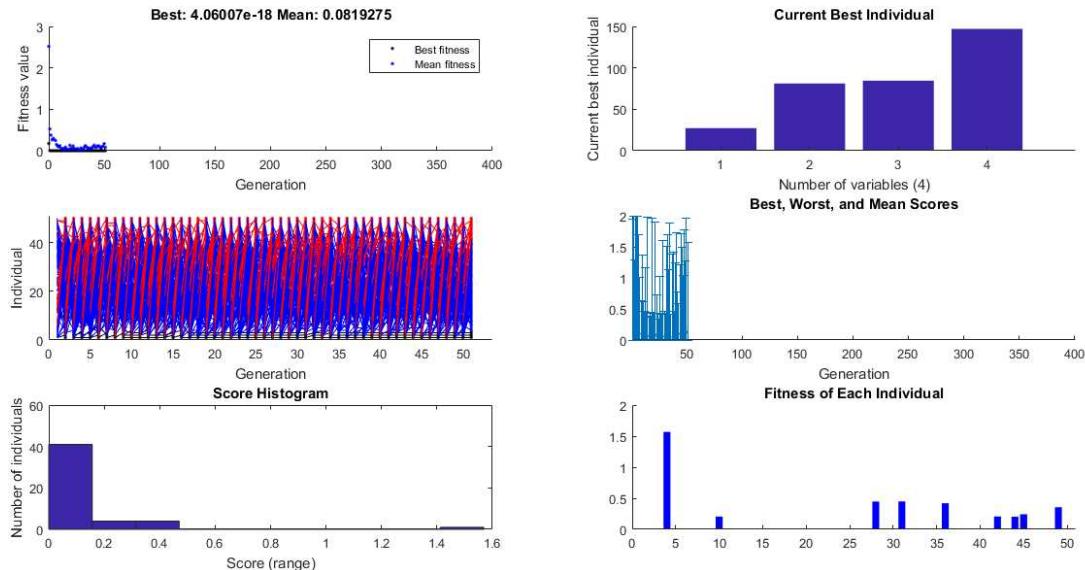


Διάγραμμα 4.5: Διαδικασία βελτιστοποίησης για το πρώτο υλικό

Η διαδικασία για τον πρώτο υλικό, έδωσε ως θερμοκρασίες εκκίνησης και τερματισμού για τους ενεργοποιητές που είναι πάνω (Εικόνα 3.3) 50.013°C και 96.864°C , ενώ για τους ενεργοποιητές που είναι κάτω 50.023°C και 99.807°C , οι οποίες προφανώς και κυμαίνονται στα όρια που αναφέρθηκαν. Τέλος, το σφάλμα είναι της τάξης του 3.6%. Για το δεύτερο υλικό, οι θερμοκρασίες για τις πάνω ράβδους είναι 30.018°C και 50.06°C και για τις κάτω 45.578°C και 84.461°C , ενώ το σφάλμα είναι 3.4% (Διάγραμμα 4.6). Τέλος, για το τρίτο υλικό οι θερμοκρασίες για τις πάνω ράβδους είναι 27.299°C και 81.202°C , ενώ για τις κάτω 34.504°C και 87.038°C και σφάλμα μηδενικό (Διάγραμμα 4.7).



Διάγραμμα 4.6: Διαδικασία βελτιστοποίησης για το δεύτερο υλικό



Διάγραμμα 4.7: Διαδικασία βελτιστοποίησης για το τρίτο υλικό

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 Γενικά συμπεράσματα

Τα κράματα με μνήμη σχήματος εμφανίζουν δυο πολύ σπουδαίες ιδιότητες: την μνήμη σχήματος και την υπερελαστικότητα, γεγονός που τα καθιστά ιδιαίτερα δημοφιλή σε πλήθος εφαρμογών Πολιτικού Μηχανικού και όχι μόνο. Βασικός στόχος, λοιπόν της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η ερμηνεία της απόκρισης τους, κατά την ενσωμάτωσή τους σε ένα δομικό σύστημα όπως αυτό της δοκού και ταυτόχρονα η αναζήτηση των μεγεθών που την επηρεάζουν άλλοτε ελάχιστα ή καθοριστικά. Έτσι λοιπόν δημιουργήθηκε ένας αλγόριθμος επίλυσης του «έξυπνου συστήματος» και στη συνέχεια αυτός εφαρμόστηκε σε τρία διαφορετικά μοντέλα, από το απλούστερο στο συνθετότερο. Τέλος επιλέχθηκε το πλέον απλούστερο προκειμένου να πραγματοποιηθεί η παραμετρική διερεύνηση και το πλέον συνθετότερο για την διαδικασία της βελτιστοποίησης. Τελικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν συνοψίζονται στα ακόλουθα:

1. Ο αλγόριθμος είναι ιδιαίτερα επιτυχής στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς των ενεργοποιητών και το σφάλμα του είναι της τάξης του 2%. Είναι απαραίτητο να αναφερθεί ότι είναι γενικού χαρακτήρα και άρα είναι εύκολο να εφαρμοστεί για μεγάλο πλήθος ενεργοποιητών, καθώς και συνθετότερα δομικά συστήματα, αρκεί ο χρήστης να είναι σε θέση να μορφώσει το μητρώο ακαμψίας.
2. Η θερμοκρασιακή φόρτιση επηρεάζει την ευστάθεια του αλγορίθμου και την τιμή του σφάλματος. Βρέθηκε, λοιπόν, για δεδομένο κράμα με μνήμη σχήματος η θερμοκρασία φόρτισης-αποφόρτισης θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ των ορίων M_f και A_f , να ισχύει δηλαδή: $M_f < T < A_f$. Με αυτό τον τρόπο τον σφάλμα είναι το μικρότερο δυνατό.

3. Η προένταση του ενεργοποιητή επηρεάζει καθοριστικά την αναπτυσσόμενη τάση, παραμόρφωση και μέτρο ελαστικότητάς και κατά τις δυο φάσεις. Συγκεκριμένα, μεγαλύτερη προένταση έχει ως αποτέλεσμα:
- α) Πιο ήπια κλίση του διαγράμματος σ-Τ, Ε-Τ και ε-Τ κατά τον αντίστροφο μετασχηματισμό
 - β) Ο ευθύς μετασχηματισμός να συμβαίνει σε μεγαλύτερη χαρακτηριστική θερμοκρασία, ομοίως και ο αντίστροφος.
 - γ) Η μέγιστη τιμή της τάσης που αναπτύσσει ο ενεργοποιητής να είναι μεγαλύτερη
 - δ) Οι μέγιστες και ελάχιστες του μέτρου ελαστικότητας και της παραμόρφωσης να μην επηρεάζονται
4. Η κλίση του ενεργοποιητή συμβάλει στην απόδοσή του και μάλιστα αποδεικνύεται ότι όσο μικρότερη είναι τόσο μεγαλύτερη η τάση που αναπτύσσεται

5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Τα υλικά με μνήμη σχήματος αποτελούν κεφάλαιο της σύγχρονης έρευνας στον τομέα των υλικών. Συνεπώς θα ήταν σκόπιμο, ο επίλογος αυτή της έρευνας στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, να είναι μερικές προτάσεις έρευνας για μελλοντικούς ερευνητές που θα επιθυμούσαν να ασχοληθούν με το αντικείμενο. Ενδιαφέρον θέμα θα ήταν μια διερεύνηση της θέσης του ενεργοποιητή ως προς την απόδοση του συστήματος και κατόπιν η βελτιστοποίηση της θέση τους. Προτείνεται, επίσης, η δυναμική ανάλυση συστημάτων με ενεργοποιητές, προκειμένου να εξετασθεί τόσο η δυναμική τους απόκριση, όσο και η ικανότητα λειτουργίας τους ως αποσβεστήρες. Ο σχεδιασμός δικτύου καλωδίων από υλικά με μνήμη σχήματος θα μπορούσε να είναι αντικείμενο έρευνας, όπως επίσης και η

διερεύνηση αντοχής και πλαστιμότητα² οπλισμένου σκυροδέματος, το οποίο θα περιέχει εκτός από χάλυβα και ράβδους, κατασκευασμένες από τέτοια κράματα. Ωστόσο, η εύρεση ολοένα και πιο σύγχρονων εφαρμογών των υλικών αυτών, είναι σίγουρα το στοίχημα που καλείται να φέρει σε πέρας ο σύγχρονος ερευνητής, που ασχολείται με τέτοιου είδους υλικά.

6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Kikuaki Tanaka, Shigenori Kobayashi And Yoshio Sato "Thermomechanics of Transformation Pseudoelasticity and Shape Memory Effect in Alloys", International Journal of Plasticity Vol 2 pp59-72, 1986
- [2] Applications of shape memory alloys in civil structures
G. Song, N. Ma, H.-N. Li "Applications of shape memory alloys in civil structures", Elsevier, Engineering Structures 28 (2006) 1266–1274, April 2006
- [3] Jan Van Humbeeck "Non-medical applications of shape memory alloys", Elsevier, Materials Science and Engineering A273–275 (1999) 134–148
- [4] M.G. Castellano & S. Infanti "Seismic protection of monuments by shape memory alloy devices and shock transmitters", Structural Analysis of Historical Constructions - Modena, Lourenço & Roca (eds), 2005
- [5] S. De la Flor, C. Urbina, F. Ferrando "Constitutive model of shape memory alloys: Theoretical formulation and experimental validation", Elsevier, Materials Science and Engineering A 427 (2006) 112–122, April 2006
- [6] Mauro Dolce, Donatello Cardone "Mechanical behavior of shape memory alloys for seismic applications. Austenite NiTi wires subjected to tension", International Journal of Mechanical Sciences 43 (2001) 2657–2677
- [7] Masoud Motavalli, Christoph Czaderski, Andrea Bergamini, Lars Jankec "Shape Memory Alloys For Civil Engineering Structures On The Way From Vision To Reality ", Architecture Civil Engineering Environment, The Silesian University of Technology, April 2006

- [8] Leonardo Lecce, Antonio Concilio "Shape Memory Alloy Engineering Aerospace, Structural and Biomedical Applications", Elsevier (Book)
- [9] S Barbarino, E I Saavedra Flores, R M Ajaj, I Dayyani and M I Friswell "A review on shape memory alloys with applications to morphing aircraft", Smart Mater. Struct. 23 (2014) 063001 (19pp), April 2014
- [10] L. C. Brinson and M. S. Huang "Simplifications and Comparisons of Shape Memory Alloy Constitutive Models", Journal of Intelligent Material Systems and Structures 1996 7: 108
- [11] H. Sayyaadi, M.R. Zakerzadeh, H. Salebi "A comparative analysis of one-dimensional of shape memory alloy constitutive models based on experimental tests", Sharif University Technology
- [12] Paulo Silva Lobo, Jo~ao Almeidaa, Luis Guerreiro,"Shape memory alloys behaviour: A review", 1st International Conference on Structural Integrity, Procedia Engineering 114 (2015) 776 – 783, Elsevier