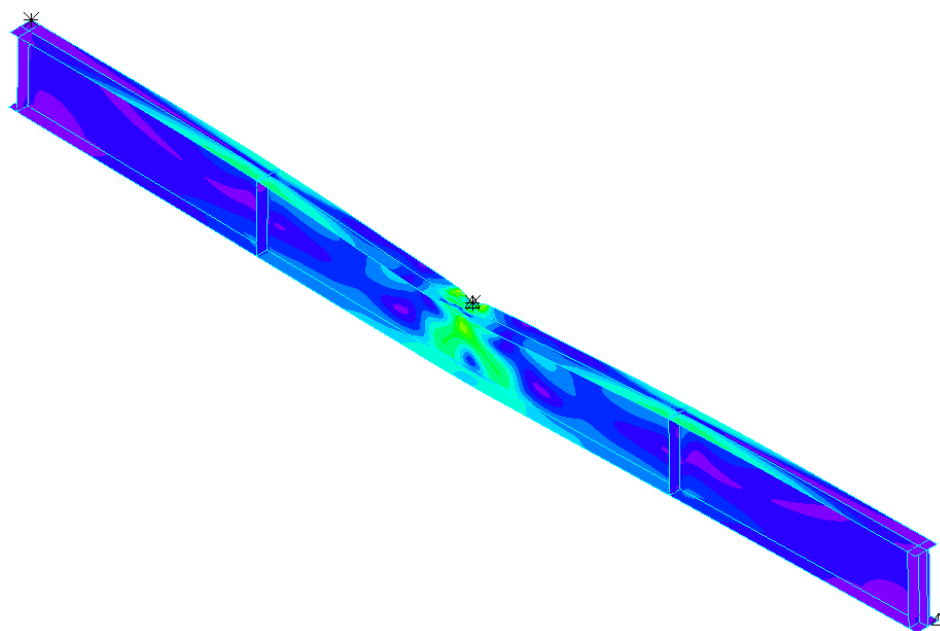




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών



Σχεδιασμός Μεταλλικών Κατασκευών βάσει Αναλύσεων Πεπερασμένων Στοιχείων



Διπλωματική Εργασία
ΜΙΧΑΗΛ ΤΣΑΓΚΑΡΑΚΗ

ΕΜΚ ΔΕ 2023 8

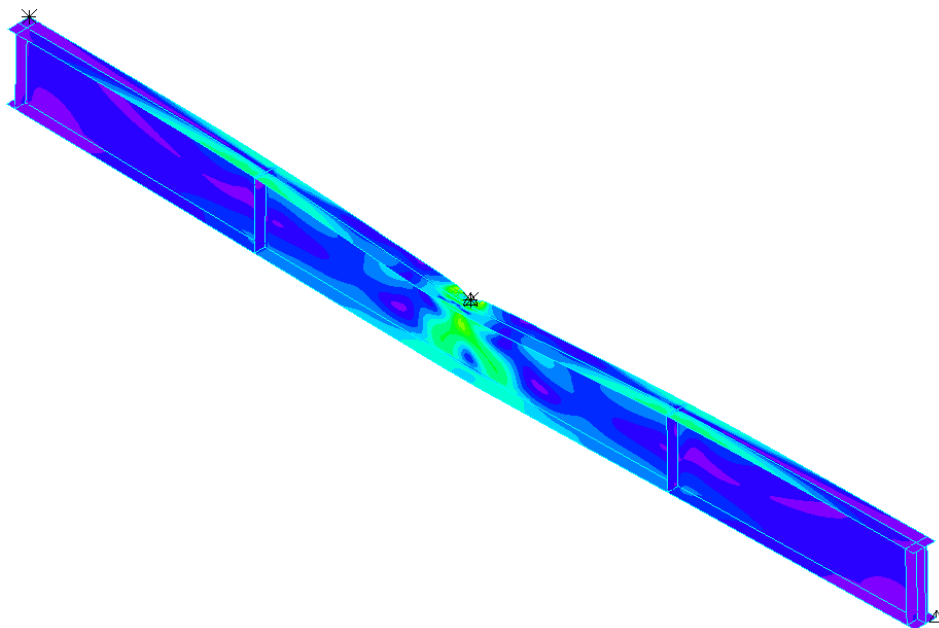
Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Αθήνα, Ιούλιος 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών



Σχεδιασμός Μεταλλικών Κατασκευών βάσει Αναλύσεων Πεπερασμένων Στοιχείων



Διπλωματική Εργασία
ΜΙΧΑΗΛ ΤΣΑΓΚΑΡΑΚΗ

ΕΜΚ ΔΕ 2023 8

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Αθήνα, Ιούλιος 2023

Copyright © Μιχαήλ Τσαγκαράκης, 2023
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 του συγγραφέα. 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 τον συγγραφέα.

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

Copyright © Michail Tsagkarakis, 2023
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).

Μιχαήλ Τσαγκαράκης (2023)

Σχεδιασμός Μεταλλικών Κατασκευών Βάσει Αναλύσεων Πεπερασμένων Στοιχείων

Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2023 8

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Michail Tsagkarakis (2023)

Design of Steel Structures Based on Finite Element Analysis

Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2023 8

Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Ευχαριστίες

Με την περάτωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω πρώτα από όλα τον επιβλέποντα Καθηγητή Χάρη Γαντέ, ο οποίος με εμπιστεύτηκε και μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ και να εμβαθύνω στο κομμάτι των μη γραμμικών αναλύσεων, ενώ παράλληλα μου παρείχε διαρκή και άμεση καθοδήγηση κατά την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών και την Γραμματεία αυτού κα Μπεκιάρη Βασιλεία για την οργάνωση και τις χρήσιμες πληροφορίες που μου παρείχαν. Βάση των παραδειγμάτων εφαρμογής της εργασίας αποτέλεσε η έρευνα της Καθηγήτριας Itsaso Arrayago, η βοήθεια της οποίας ήταν ουσιαστική, επιλύοντας απορίες που γεννήθηκαν.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω οικογένεια και φίλους, για την αγάπη και στήριξη καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου και ιδιαίτερα κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου. Μάνο, Χριστίνα, Στέλιο, Λευτέρη και Μάριε σας ευχαριστώ.

Acknowledgement

This research has been supported by the ADDOPTML project: "ADDitively Manufactured OPTimized Structures by means of Machine Learning" (No: 101007595) belonging to the Marie Skłodowska-Curie Actions (MSCA) Research and Innovation Staff Exchange (RISE) H2020-MSCA-RISE-2020.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΔΕ 2023 8

**Σχεδιασμός Μεταλλικών Κατασκευών Βάσει Αναλύσεων Πεπερασμένων
Στοιχείων**

Μιχαήλ Τσαγκαράκης

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Καθηγητής Ε.Μ.Π

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Δεδομένης της ραγδαίας υπολογιστικής ανάπτυξης που έχει σημειωθεί τα τελευταία χρόνια, όλο και πιο σύνθετα υπολογιστικά προβλήματα καθίστανται πιο προσεγγίσιμα και ευρέως διαδεδομένα. Ένας τρόπος προσέγγισης τους είναι η χρήση πεπερασμένων στοιχείων, παράλληλα με την χρήση μη γραμμικών αναλύσεων. Με συνδυαστική χρήση αυτών των δύο μεθόδων επιτυγχάνεται ακριβέστερη κατανόηση αλλά και απεικόνιση της απόκρισης ενός φορέα, ενώ ταυτόχρονα γεωμετρικά περίπλοκοι φορείς μπορούν να περιγραφούν επ' ακριβώς.

Οι κανονιστικές απαιτήσεις που υποστηρίζουν τη χρήση των πεπερασμένων στοιχείων και αναλυτικότερα τις μη γραμμικές αναλύσεις, περιγράφονται στα προσχέδια των μερών 1-14 και 1-141 του ΕΚ3. Η παρούσα διπλωματική, της οποίας τον πυρήνα αποτελούν αυτά τα δύο μέρη, παρουσιάζει τον τρόπο χρήσης των πεπερασμένων στοιχείων, ενώ παρέχονται γενικές συστάσεις σχεδιασμού για τα αριθμητικά προσομοιώματα που αφορούν ακόμη και καθημερινά ζητήματα Πολιτικού Μηχανικού. Σημαντική είναι η συμβατότητα τους με τους ισχύοντες κανονισμούς, προκειμένου να μην υπάρχει απόκλιση μεταξύ αποτελεσμάτων ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων και συμβατικών μεθόδων σχεδιασμού.

Βάσει του απώτερου σκοπού χρήσης των αποτελεσμάτων, γίνεται μια σημαντική διάκριση των αναλύσεων, η οποία αφορά τόσο τον τρόπο εφαρμογής των παραμέτρων της ανάλυσης, όσο και τους συμβατούς τύπους αναλύσεων. Οι δυο βασικές κατηγορίες, αφορούν τις αναλύσεις που γίνονται πρώτον για σχεδιασμό φορέων, και δεύτερον για επιβεβαίωση πειραματικών δεδομένων.

Πάνω σε αυτή την διάκριση, βασίστηκαν τέσσερα παραδείγματα εφαρμογής τα οποία αναλύθηκαν με λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων. Στόχος τους, η εφαρμογή και παράλληλα η επιβεβαίωση όλων των κανόνων και συστάσεων των μερών 1-14 και 1-141, και τελικά η σύγκριση των αποτελεσμάτων τους με εδραιωμένες μεθόδους ή και υπάρχουσες έρευνες και πειραματικά δεδομένα. Σε δεύτερη φάση, μέσω των εφαρμοσμένων παραδειγμάτων, αξιολογούνται και οι ίδιες οι συστάσεις των δύο μερών, συγκριτικά με τους υπάρχοντες κανόνες του ΕΚ3.



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



DIPLOMA THESIS
EMK ΔΕ 2023 8

Design of Steel Structures Based on Finite Element Analysis

Michail Tsagkarakis

Supervisor: C. Gantes, Professor, N.T.U.A.

ABSTRACT

Given the rapid development of computing that has occurred in recent years, more and more complex computing problems are becoming more accessible and widespread. One way of approach, is the use of finite elements, alongside the use of non-linear analyses. With the combined use of these two methods, a more accurate understanding and visualization of a System's Response Quantities is achieved, while at the same time, geometrically complex carriers can be accurately described.

The regulatory requirements supporting the use of the finite elements and more specifically non-linear analyses, are described in the drafts of parts 1-14 and 1-141 of EC3. In this thesis, the core of which are the above two parts, presents how to accurately use finite elements models, while providing general design recommendations for numerical simulations that address even on everyday Civil Engineering issues. Their compatibility with current regulations is important, so that there is no discrepancy between finite element analysis results and conventional design methods.

Based on the ultimate purpose of using the results, an important distinction is made between the analyses, which concerns both the way the analysis parameters are applied and the compatible types of analyses. The two main categories, include the analyzes that are done firstly for the design of carriers, and secondly for the confirmation of experimental data.

On this discretization, four application examples were based, which were all analyzed with finite element software. Their goal is to implement, and at the same time, confirm all the rules and recommendations of parts 1-14 and 1-141, and finally to compare their results with established methods or existing research and experimental data. In a second phase, through the applied examples, the recommendations of the two parts themselves, are evaluated, compared to the existing rules of EC3.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	1
1.1	Στόχος Αναλύσεων Πεπερασμένων Στοιχείων	1
1.2	Κανονισμοί Αναλύσεων Πεπερασμένων Στοιχείων – EN 1993-1-14/1-141	2
2	ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	3
2.1	Γενικές απαιτήσεις χρήσης πεπερασμένων στοιχείων	3
2.2	Ιδιότητες γεωμετρίας προσομοιώματος	4
2.2.1	Γενικές οδηγίες γεωμετρίας και διακριτοποίησης φορέα	4
2.2.2	Προσομοίωση με στοιχεία δοκού	6
2.2.3	Προσομοίωση με επιφανειακά στοιχεία	7
2.2.4	Προσομοίωση με συμπαγή στοιχεία	7
2.2.5	Συνδυασμός στοιχείων	8
2.3	Στηρίξεις και φόρτιση προσομοιώματος	8
2.3.1	Ορισμός στηρίξεων	8
2.3.2	Ορισμός φορτίσεων	9
2.4	Προσομοίωση Υλικών	10
2.4.1	Γενικές απαιτήσεις	10
2.4.2	Νόμος υλικών θερμής έλασης	11
2.4.3	Νόμος υλικών ψυχρής έλασης	12
2.4.4	Προχωρημένα μοντέλα υλικού	14
2.5	Ενσωμάτωση ατελειών φορέα	15
2.5.1	Τύποι ατελειών	15
2.5.2	Γεωμετρικές ατέλειες	18
2.5.3	Παραμένουσες τάσεις	18
2.5.4	Ισοδύναμες γεωμετρικές ατέλειες	21
2.5.5	Συνδυασμός ατελειών	25
3	ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ	27
3.1	Γενικές απαιτήσεις ανάλυσης	27
3.2	Τύποι αναλύσεων	29
3.2.1	Γραμμική Ανάλυση (LA)	29
3.2.2	Γραμμική ανάλυση λυγισμού (LBA)	29
3.2.3	Ανάλυση με μη γραμμικότητα υλικού (MNA)	30
3.2.4	Ανάλυση με μη γραμμικότητα Γεωμετρίας (GNA)	30
3.2.5	Ανάλυση με μη γραμμικότητα Γεωμετρίας και Υλικού (GMNA)	30
3.2.6	Ανάλυση με μη γραμμικότητα Γεωμετρίας και αρχικές ατέλειες (GNIA)	30
3.2.7	Ανάλυση με μη γραμμικότητα Γεωμετρίας και Υλικού με αρχικές ατέλειες (GMNIA)	31
3.2.8	Σύγκριση αποτελεσμάτων διαφόρων αναλύσεων	31

3.3	Θερμική ανάλυση	32
4	ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΚΥΡΩΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ	33
4.1	Εισαγωγή.....	33
4.2	Βήματα διαδικασίας επιβεβαίωσης.....	35
4.3	Επικύρωση αποτελεσμάτων	36
5	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ.....	39
5.1	Οριακή Κατάσταση Αστοχίας.....	39
5.1.1	Γενικά	39
5.1.2	Έλεγχος τάσεων	39
5.1.3	Έλεγχος πλαστικής αντοχής.....	40
5.1.4	Έλεγχος αντοχής έναντι λυγισμού	41
	A. Σχεδιασμός μέσω LA ή MNA σε συνδυασμό με LBA.....	41
	B. Σχεδιασμός μέσω GNIA σε συνδυασμό με LBA.....	42
	C. Σχεδιασμός μέσω GNIA σε συνδυασμό με αντίσταση διατομής	42
	D. Σχεδιασμός μέσω GMNIA	42
5.1.5	Μέθοδος αξιολόγησης αναλύσεων με μη γραμμικότητα υλικού.....	43
5.2	Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας	44
5.3	Οριακή Κατάσταση Κόπωσης.....	45
6	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ	47
6.1	Γενικά.....	47
6.2	Παράδειγμα Σύγκρισης – Κοντό υποστύλωμα διατομής RHS σε θλίψη.....	48
6.2.1	Γενικές πληροφορίες παραδείγματος	48
6.2.2	Περιγραφή προβλήματος.....	48
6.2.3	Πειραματικά δεδομένα.....	48
6.2.4	Ανάπτυξη αριθμητικού προσομοιώματος.....	49
6.2.5	Συνοριακές συνθήκες και φόρτιση φορέα	50
6.2.6	Νόμος υλικού	51
6.2.7	Αρχικές ατέλειες.....	52
6.2.8	Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων.....	53
6.3	Παράδειγμα Σύγκρισης – Πλευρικός λυγισμός συγκολλητής διατομής.....	55
6.3.1	Γενικές πληροφορίες παραδείγματος	55
6.3.2	Περιγραφή προβλήματος.....	56
6.3.3	Πειραματικά δεδομένα.....	56
6.3.4	Ανάπτυξη αριθμητικού προσομοιώματος.....	57
6.3.5	Συνοριακές συνθήκες και φόρτιση φορέα	58
6.3.6	Νόμος υλικού	58
6.3.7	Αρχικές ατέλειες.....	59
6.3.8	Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων.....	61
6.4	Παράδειγμα Σχεδιασμού – Αντοχή πλαισίου, πρώτη παραδοχή	62

6.4.1	Γενικές πληροφορίες παραδείγματος	62
6.4.2	Περιγραφή προβλήματος.....	62
6.4.3	Ανάπτυξη αριθμητικού προσομοιώματος.....	63
6.4.4	Συνοριακές συνθήκες και φόρτιση φορέα	64
6.4.5	Νόμος υλικού	64
6.4.6	Αρχικές ατέλειες.....	64
6.4.7	Αξιολόγηση αριθμητικών αποτελεσμάτων	66
	Α. Επιρροή κατεύθυνσης (πρόσημου) του συνδυασμού ατελειών.....	66
	Β. Επιρροή τύπου ατέλειας στον συνδυασμό	68
	C. Τελικά συμπεράσματα.....	69
6.5	Παράδειγμα Σχεδιασμού – Αντοχή πλαισίου, δεύτερη παραδοχή.....	71
6.5.1	Γενικές πληροφορίες παραδείγματος	71
6.5.2	Περιγραφή προβλήματος.....	71
6.5.3	Ανάπτυξη αριθμητικού προσομοιώματος.....	72
6.5.4	Συνοριακές συνθήκες και φόρτιση φορέα	73
6.5.5	Νόμος υλικού	73
6.5.6	Αρχικές ατέλειες.....	73
6.5.7	Αξιολόγηση αριθμητικών αποτελεσμάτων	75
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	77
8	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	78

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

1.1 Στόχος Αναλύσεων Πεπερασμένων Στοιχείων

Τα τελευταία χρόνια, ο κλάδος της τεχνολογίας σημειώνει ραγδαία ανάπτυξη, με αποτέλεσμα σύνθετα υπολογιστικά προβλήματα, να είναι πλέον σαφώς πιο προσεγγίσιμα και ευρέως διαδεδομένα. Ένα από αυτά, είναι και οι αναλύσεις με χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Η μέθοδος αυτή, αποτελεί μια αριθμητική μέθοδο (χρήση H/Y), για την εύρεση λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων. Συνήθως, εφαρμόζεται σε σύνθετους φορείς, στους οποίους τόσο η καταπόνηση όσο και η γεωμετρία είναι μη συμβατικές.

Οι αναλύσεις βάσει πεπερασμένων στοιχείων, υπερτερούν όσον αφορά την πρόβλεψη της απόκρισης ενός συστήματος (μορφή αστοχίας, φορτίο κατάρρευσης κ.α.), καθώς βασικό τους πλεονέκτημα, είναι η δυνατότητα προσομοίωσης μη γραμμικών παραμέτρων (π.χ. μη γραμμικό υλικό, μη γραμμική γεωμετρία, αρχικές ατέλειες). Κάποιες από τις βασικές εφαρμογές αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων περιγράφονται παρακάτω:

- Εξ ολοκλήρου ανάλυση κατασκευών.
Πρόβλεψη της απόκρισης μιας ολόκληρης κατασκευής και σχεδιασμός αυτής, έναντι φορτίων ανέμου, σεισμού κ.α.
- Σχεδιασμός έναντι κόπωσης.
Παρέχεται η δυνατότητα προσομοίωσης ανακυκλιζόμενων φορτίων, καθώς και η πρόβλεψη αστοχίας λόγω κόπωσης μέλους ή κατασκευής.
- Ανάλυση Λυγισμού.
Καθορίζεται επακριβώς το σχήμα των ιδιομορφών λυγισμού, καθώς και το κρίσιμο φορτίο υπό το οποίο προκαλείται αστοχία έναντι λυγισμού.
- Ανάλυση συγκολλήσεων.
Προσομοίωση της συγκόλλησης και πρόβλεψη παραμενουσών τάσεων και παραμορφώσεων.

Οι αναλύσεις με χρήση πεπερασμένων στοιχείων αποτελούν ένα ισχυρό υπολογιστικό μέσο για τους μηχανικούς, καθώς παρέχουν ακριβέστερη κατανόηση της απόκρισης των υπό εξέταση φορέων, ενώ παράλληλα παρέχουν όλες τις απαραίτητες πληροφορίες, προκειμένου να εξασφαλιστούν τα κριτήρια ασφαλείας που τίθενται από τους κανονισμούς. Οι σύγχρονοι Ευρωκώδικες, επιτρέπουν την αξιοποίηση

των πεπερασμένων στοιχείων σε περίπλοκες κατασκευές, με στόχο τον έλεγχο και τον σχεδιασμό τους, βάσει των υπάρχουσών αρχών.

1.2 Κανονισμοί Αναλύσεων Πεπερασμένων Στοιχείων – EN 1993-1-14/1-141

Οι απαιτήσεις για τον έλεγχο και τον σχεδιασμό των μεταλλικών κατασκευών καλύπτονται από τους Ευρωκώδικες, και πιο συγκεκριμένα από το μέρος 3 (EN 1993). Το μέρος 3, υποδιαιρείται σε 7 επιπλέον μέρη, εκ των οποίων το 1^ο (EN 1993-1) είναι αυτό που θα μας απασχολήσει κατά κύριο λόγο, καθώς τμήμα αυτού είναι υπεύθυνο για τις βασικές αρχές σχεδιασμού και ελέγχου μεταλλικών κατασκευών με την βοήθεια πεπερασμένων στοιχείων (§EN 1993-1-14). Το συγκεκριμένο κείμενο, δεν έχει ενταχθεί ακόμη στους Ευρωκώδικες, αφού προς το παρόν είναι προσχέδιο, το οποίο έχει κατατεθεί στις αρμόδιες επιτροπές προς ψήφιση, αλλά και διόρθωση. Η τελική εναρμόνιση του κειμένου στους Ευρωκώδικες, θα γίνει μελλοντικά, με την ανακοίνωση της 3^{ης} γενιάς Ευρωκωδίκων. Ταυτόχρονα με το μέρος 1-14, εισάγεται και το μέρος 1-141, το οποίο εμπεριέχει πληροφορίες και επεξηγήσεις για το επιστημονικό υπόβαθρο του 1-14.

Τα δύο αυτά κείμενα παρέχουν αναλυτικά τις απαραίτητες αρχές και απαιτήσεις για την χρήση αριθμητικών προσομοιωμάτων για τον σχεδιασμό μεταλλικών κατασκευών, συγκεκριμένα για έλεγχο σε Οριακή Κατάσταση Αστοχίας και Λειτουργικότητας (ΟΚΑ και ΟΚΛ) καθώς και σε κόπωση. Μέρος του νέου κανονισμού, αποτελούν τμήματα άλλων κειμένων του ΕΚ3 (π.χ. EN 1993-1-5, EN 1993-1-6), τα οποία συγκεντρώνονται και παρουσιάζονται συνολικά. Στα προτεινόμενα νέα μέρη, τα προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων, περιγράφονται σε μεγαλύτερο βάθος συγκριτικά με προηγούμενους κανονισμούς. Παράλληλα εξετάζεται ο σχεδιασμός των κατασκευών με πιο περίπλοκο τρόπο, καθώς εισάγονται νέες ορολογίες και νέοι κανόνες σχεδιασμού και ανάλυσης, γεγονός που δικαιολογεί την απαίτηση για ένταξη του μέρους 1-141 όπου δίνονται σημαντικές επεξηγήσεις. Βασικός στόχος των κειμένων 1-14 και 1-141 πέραν των τεκμηριωμένων πληροφοριών, είναι να δώσουν την απαραίτητη καθοδήγηση όσον αφορά την προσομοίωση των φορέων. Αυτό επιτυγχάνεται παρέχοντας πλήρεις και αξιολογημένες αναλύσεις, καθώς και τα αποτελέσματα αυτών, από συγκεκριμένα παραδείγματα εφαρμογής, ακολουθώντας τους νέους κανονισμούς.

Τα προτεινόμενα έγγραφα, αποσκοπούν στην ευρύτερη κατανόηση της χρήσης των πεπερασμένων στοιχείων αλλά και το υπόβαθρο αυτών. Συνοψίζοντας τα ερευνητικά αποτελέσματα που αποτελούν την βάση των υφιστάμενων κανονισμών, στόχος των νέων τμημάτων είναι αρχικά να αποτελέσουν αφετηρία για περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη, ενώ παράλληλα δίνουν γενικές συστάσεις σχεδιασμού για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών αριθμητικών προσομοιωμάτων, τα οποία σχετίζονται με καθημερινά ζητήματα Πολιτικού Μηχανικού. Κρίνεται σημαντικό να σημειωθεί, πως εφόσον οι νέοι κανονισμοί προορίζονται για ευρεία χρήση, δηλαδή και σε απλά παραδείγματα, οι κανόνες που προτάσσονται για τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων, θα πρέπει να συμβαδίζουν απόλυτα με τους υπάρχοντες κανόνες σχεδιασμού. Έτσι, όταν ένας φορέας σχεδιάζεται με τις συμβατικές μεθόδους, και ταυτόχρονα με πεπερασμένα στοιχεία, θα πρέπει να μην υπάρχει σημαντική απόκλιση των αποτελεσμάτων.

Διευκρινίζεται ότι αντικείμενο της παρούσας εργασίας, είναι η καταγραφή των σημαντικότερων εκ των προαναφερθέντων αρχών σχεδιασμού, και όχι η πλήρης και εις βάθος παρουσίαση των νέων μερών του Ευρωκώδικα 3.

2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

2.1 Γενικές απαιτήσεις χρήσης πεπερασμένων στοιχείων

Όπως προαναφέρθηκε, ο σχεδιασμός μεταλλικών κατασκευών βάσει πεπερασμένων στοιχείων θα πρέπει να είναι σε πλήρη εναρμόνιση με τις αρχές και απαιτήσεις ασφάλειας, λειτουργικότητας και αντοχής των κατασκευών, που παρέχονται από τους κανονισμούς EN 1990 και EN 1991. Παράλληλα, πρέπει να ακολουθούν τις ειδικές απαιτήσεις για σχεδιασμό μεταλλικών κατασκευών που αναγράφονται σε σχετικά σημεία του κανονισμού EN 1993-1. Έτσι, το επίπεδο ασφαλείας και αξιοπιστίας των υφιστάμενων κατασκευών δεν τροποποιείται. Αντιθέτως, μέσω των νέων κανονισμών περί χρήσης πεπερασμένων στοιχείων, επιδιώκεται η διασφάλιση και η επιβεβαίωση των υπαρχουσών απαιτήσεων.

Αναλόγως τον απώτερο σκοπό χρήσης αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικά «επίπεδα» προσομοίωσης και διαφορετικές μέθοδοι ανάλυσης. Επομένως, αν πρόκειται για απλά καθημερινά ζητήματα ή για έρευνα και ανάπτυξη, η προσέγγιση της ανάλυσης των πεπερασμένων στοιχείων θα διαφέρει. Έτσι, οι κανόνες σχεδιασμού διαχωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

1. Αριθμητικοί υπολογισμοί για σχεδιασμό (numerical design calculation)
2. Αριθμητικά προσομοιώματα (numerical simulation)

Πρέπει να σημειωθεί, πως οι παραπάνω μέθοδοι, θα πρέπει να αναγνωρίζονται ως διαφορετικές και ταυτόχρονα να αντιμετωπίζονται διαφορετικά. Οι απαιτήσεις σχεδιασμού διαφέρουν και συνδέονται άμεσα με τις μεθόδους και τον σκοπό της κάθε ανάλυσης, επομένως η κατανόηση των διαφορών είναι ένα κρίσιμο σημείο για την σωστή εφαρμογή των κανόνων.

Όσον αφορά την πρώτη μέθοδο, υποδιαιρείται σε δύο κατηγορίες, βασισμένες στον τύπο της ανάλυσης που χρησιμοποιείται καθώς και τα αποτελέσματα αυτής. Έτσι, οι κανόνες σχεδιασμού διαχωρίζονται όταν πραγματοποιείται:

- 1.1 Ανάλυση που απαιτεί πρόσθετους ελέγχους σχεδιασμού
- 1.2 Απευθείας έλεγχος αντίστασης.

Στην πρώτη περίπτωση, οι τύποι αναλύσεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι οι:

- Γραμμική Ανάλυση (Linear Analysis, LA)
- Γραμμική Ανάλυση λυγισμού (Linearized Buckling Analysis, LBA)
- Ανάλυση με μη γραμμικότητα Γεωμετρίας (Geometrically Nonlinear Analysis, GNA)

- Ανάλυση με μη γραμμικότητα Γεωμετρίας και αρχικές ατέλειες (Geometrically Nonlinear Imperfection Analysis, GNIA)
- Ανάλυση με μη γραμμικότητα υλικού (Materially Nonlinear Analysis, MNA)

Τα αποτελέσματα των παραπάνω αναλύσεων εκφράζουν διάφορες ποσότητες απόκρισης του συστήματος (π.χ. εσωτερικά εντατικά μεγέθη, μετατοπίσεις, κρίσιμοι συντελεστές φορτίου, τάσεις κ.α.), τα οποία θα χρησιμοποιηθούν μετέπειτα στον στατικό σχεδιασμό της υπό εξέτασης κατασκευής.

Αντιθέτως, όταν πρόκειται για απευθείας έλεγχο αντίστασης, οι πιθανοί τύποι αναλύσεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι:

- Ανάλυση με μη γραμμικότητα υλικού (Materially Nonlinear Analysis, MNA)
(εφαρμόζεται μόνο εφόσον τα φαινόμενα 2^{ας} τάξης και οι αρχικές ατέλειες, δεν επηρεάζουν την μη γραμμική συμπεριφορά και την αντίσταση της κατασκευής)
- Ανάλυση με μη γραμμικότητα Γεωμετρίας και Υλικού (Geometrically and Material Nonlinear Analysis, GMNA)
- Ανάλυση με μη γραμμικότητα Γεωμετρίας και Υλικού με αρχικές ατέλειες (Geometrically and Material Nonlinear Imperfection Analysis, GMNIA)

Όπως υποδεικνύει και ο τίτλος της κατηγορίας, τα αποτελέσματα που εξάγονται παρέχουν πληροφορίες για την τελική αντίσταση του φορέα (ultimate resistance). Παρατηρείται πως οι δύο παραπάνω κατηγορίες διαφέρουν α) στην εφαρμογή γεωμετρίας και τις ιδιότητες υλικών, β) στα αποτελέσματα της ανάλυσης, γ) στην επιβεβαίωση και την επαλήθευση των αποτελεσμάτων, δ) στην απαίτηση ή όχι για περαιτέρω αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, ε) στον τρόπο αξιολόγησης της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων.

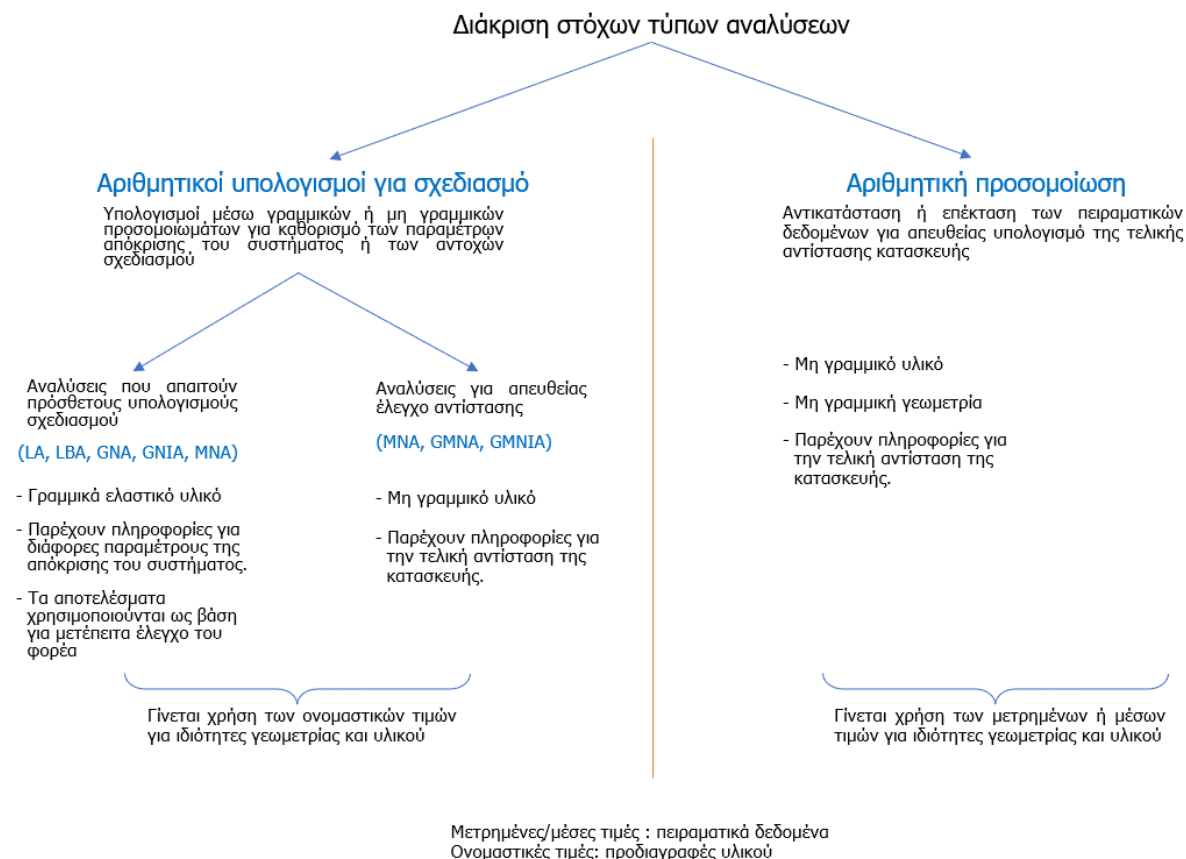
Σημαντική παρατήρηση στην παραπάνω διάκριση, είναι ο τύπος υλικού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις δύο μεθόδους. Όσον αφορά τις αναλύσεις που απαιτούν μετέπειτα έλεγχο, γίνεται αποκλειστική χρήση γραμμικά ελαστικού υλικού. Αντιθέτως, κατά την εύρεση της αντίστασης της κατασκευής με απευθείας μεθόδους, γίνεται χρήση μη γραμμικών αναλύσεων, με ελαστο-πλαστικό νόμο υλικού. Επιπλέον, στις γενικότερες κατηγορίες μεθόδων αναλύσεων, για αριθμητικούς υπολογισμούς που αποσκοπούν στον σχεδιασμό, χρησιμοποιούνται οι ονομαστικές τιμές για τις ιδιότητες γεωμετρίας και υλικού (λαμβάνονται από τις επίσημες προδιαγραφές του υλικού), ενώ στα αριθμητικά προσομοιώματα χρησιμοποιούνται πειραματικά δεδομένα (μετρημένες/μέσες τιμές). Όλα τα παραπάνω, συνοψίζονται στο Σχήμα 2-1.

Οι παραπάνω τύποι αναλύσεων, καθώς και τα χαρακτηριστικά τους, περιγράφονται εκτενέστερα στο Κεφάλαιο 3, §3.2.

2.2 Ιδιότητες γεωμετρίας προσομοιώματος

2.2.1 Γενικές οδηγίες γεωμετρίας και διακριτοποίησης φορέα

Η επιλογή του είδους πεπερασμένου στοιχείου (στοιχείο δοκού, επιφανειακό, πλάκας ή όγκου) κρίνεται καθοριστικής σημασίας, καθώς, πρωταρχικός σκοπός πρέπει να είναι η κατά το δυνατόν ακριβής αναπαράσταση της απόκρισης του φορέα. Έτσι, το προσομοίωμα μπορεί να περιγράφει είτε τμήμα της κατασκευής για λεπτομερέστερη αναπαράσταση, ή και ολόκληρη την κατασκευή. Είναι σαφές, πως εάν επιλεγθεί η προσομοίωση μέρους του φορέα, οι συνοριακές συνθήκες του μοντέλου, πρέπει να αντικατοπτρίζουν αξιόπιστα τις εσωτερικές δυνάμεις που προκύπτουν από την συνολική κατασκευή. Η επιλογή του είδους πεπερασμένου στοιχείου, πέρα από την γεωμετρία, επηρεάζει σημαντικά και άλλες παραμέτρους. Έτσι, θα πρέπει να σχετίζεται και να είναι συμβατό με τον επιλεγμένο τύπο ανάλυσης (γραμμική ή μη γραμμική), καθώς και την αναπαράσταση του νόμου του υλικού (γραμμικό ή μη γραμμικό).



Σχήμα 2-1: Σύνοψη πληροφοριών διαφορετικών μεθόδων σχεδιασμού.

Άμεσα συνδεδεμένη με την γεωμετρία του προσομοιώματος και την απόκριση του συστήματος, είναι η διακριτοποίηση του φορέα στο στάδιο της μοντελοποίησης. Το επιλεγόμενο πλέγμα, ουσιαστικά αποτελεί τον συνδετικό κρίκο μεταξύ φυσικού συστήματος και αριθμητικού προσομοιώματος. Επομένως, αποτελεί ζωτικής σημασίας η εναρμόνιση της διακριτοποίησης του μοντέλου με τον σκοπό της ανάλυσης. Αυτό, σημαίνει πως θα πρέπει να ελεγχθούν ο τρόπος αστοχίας και οι ποσότητες απόκρισης του συστήματος, και κατά πόσο αυτά μπορούν να αποτυπωθούν με ακρίβεια από το προσομοίωμα. Επιπλέον, θα πρέπει να υπάρχει άμεση συσχέτιση μεταξύ πυκνότητας πλέγματος και τρόπου κατάρρευσης του φορέα, καθώς έτσι δίνεται η δυνατότητα πρόβλεψης τοπικών λυγισμών. Προκειμένου να εξασφαλιστεί υψηλότερη ακρίβεια, σε περιοχές με έντονη μεταβολή της γεωμετρίας, περιοχές συγκέντρωσης ή υψηλών τάσεων, και σε περιοχές που αναμένεται να επέλθει αστοχία, θα πρέπει να γίνεται επαναπροσδιορισμός της διακριτοποίησης του φορέα, και να εφαρμόζεται ένα πιο πυκνό πλέγμα. Όμως, αυτή η μεταβολή δεν θα πρέπει να είναι απότομη, επομένως απαιτείται η σταδιακή και ομαλή μετάβαση της διακριτοποίησης από αραιό σε πυκνότερο πλέγμα. Σημειώνεται, πως σε εξαιρετικές περιπτώσεις, η ακρίβεια της επιλεγόμενης διακριτοποίησης θα πρέπει να αποδεικνύεται μέσω αναλύσεων σύγκλισης, το οποίο αποτελεί και μέρος της διαδικασίας επαλήθευσης του προσομοιώματος. Όπως αναφέρεται και από τον κανονισμό (EN 1993-1-141 §5.1.1(4)), είναι δύσκολο και περίπλοκο να δοθούν συστάσεις για εκτέλεση ακριβούς διακριτοποίησης, όμως είναι εφικτό να παρουσιαστούν πιθανά σφάλματα τα οποία υποδεικνύουν ανεπαρκή διακριτοποίηση. Οι βασικές κατηγορίες σφαλμάτων είναι:

- Σφάλμα κατά την εισαγωγή
- Σφάλμα κατά την διακριτοποίηση
- Σφάλμα στην γεωμετρία

Στην φάση ερμηνείας των αποτελεσμάτων των πεπερασμένων στοιχείων, θα πρέπει να παρουσιάζονται τα πιθανά σφάλματα εισαγωγής παραμέτρων κατά την προ-επεξεργασία του προσομοιώματος. Αυτά, μπορούν να σχετίζονται άμεσα είτε με το σχήμα των στοιχείων ή και με τυχόν σχετικές διαφορές στα

μεγέθη τους. Όσον αφορά τα σφάλματα κατά την διακριτοποίηση, εξαρτώνται από την επιλεγμένη πυκνότητα του πλέγματος, και επιλύονται άμεσα με την εισαγωγή πυκνότερου πλέγματος. Τέτοιου τύπου σφάλματα, θα πρέπει να ελαχιστοποιούνται καθώς είναι καθοριστικής σημασίας για την ακρίβεια του προσομοιώματος. Τέλος, σφάλματα στην γεωμετρία του φορέα, επέρχονται όταν αυτός δεν μπορεί να περιγραφεί αποτελεσματικά από την επιλεγμένη διακριτοποίηση του. Πιο συγκεκριμένα, τέτοια σφάλματα κρίνονται σημαντικά, σε περιοχές όπου μικρή μεταβολή της γεωμετρίας οδηγεί σε δυσανάλογες μεταβολές των αποτελεσμάτων (π.χ. προσομοίωση γωνιών διατομών ψυχρής έλασης, προσομοίωση οπών, κ.α.). Τα γεωμετρικά σφάλματα μπορούν να ελέγχονται εφαρμόζοντας κριτική σκέψη στα αποτελέσματα, και παράλληλα δοκιμάζοντας διαφορετικές πυκνότητες διακριτοποίησης του φορέα. Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως οι τρόποι επαναπροσδιορισμού της διακριτοποίησης, οι οποίοι είναι αποδεκτοί στα πλαίσια των κανονισμών, είναι οι παρακάτω (EN 1993-1-141 §5.1.1(4)):

- μείωση των διαστάσεων του στοιχείου (συνολική βελτίωση της πυκνότητας του πλέγματος)
- βελτίωση της πυκνότητας του πλέγματος σε περιοχές συγκέντρωσης υψηλών τάσεων
- αύξηση της τάξης των στοιχείων (βαθμός της συνάρτησης σχήματος του στοιχείου)
- καθολική ή τοπική προσαρμοστική (adaptive) βελτίωση του πλέγματος

Όσον αφορά την γεωμετρία μεταλλικών κατασκευών ψυχρής έλασης, θα πρέπει ανεξαρτήτως είδους πεπερασμένου στοιχείου, να προσομοιώνονται με στρογγυλεμένες γωνίες. Έτσι, σε περίπτωση χρήσης στοιχείων δοκού, οι παράμετροι της διατομής πρέπει να καθοριστούν λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των στρογγυλεμένων γωνιών. Αντιθέτως, αν γίνεται χρήση επιφανειακών ή συμπαγών πεπερασμένων στοιχείων, η γεωμετρία της διατομής θα πρέπει να ακολουθεί με ακρίβεια την πραγματική γεωμετρία του φορέα. Εδώ, πρέπει να τονιστεί πως τα αποτελέσματα των αναλύσεων επιφανειακών στοιχείων στις γωνίες ενός φορέα, είναι ευαίσθητα στην πυκνότητα του πλέγματος. Επομένως, πρέπει να ελέγχονται αρκετές πιθανές εκδοχές διακριτοποίησης του φορέα. Τέλος, όπως ορίζει ο ΕΚ3, οι συνδέσεις λεπτότοιχων διατομών ψυχρής έλασης απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή και υψηλή επάρκεια κατά την διεξαγωγή μη γραμμικών αναλύσεων.

Στα επόμενα υποκεφάλαια, θα παρουσιαστούν οι βασικές παραδοχές και απαιτήσεις των κανονισμών ανάλογα με το είδος πεπερασμένου στοιχείου που επιλέγεται για την ανάλυση.

2.2.2 Προσομοίωση με στοιχεία δοκού

Κατά την προσομοίωση με στοιχεία δοκού (beam elements), βασική παραδοχή είναι πως το στοιχείο και η γραμμή που το εκφράζει, θα πρέπει να είναι πανομοιότυπη με τον κεντρικό άξονα της διατομής. Διαφορετικά, αν η γραμμή του συστήματος συντεταγμένων του στοιχείου διαφέρει από τον κεντρικό άξονα, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, είτε ως εκκεντρότητα είτε ως δύναμη που προκαλείται εξ αιτίας αυτής. Παράλληλα, υπάρχει και η δυνατότητα να θεωρηθεί αμελητέα η εκκεντρότητα, εφόσον η επιρροή της είναι μικρή στα αποτελέσματα.

Καθοριστικό ρόλο, στην ομαλή λειτουργία ενός προσομοιώματος με χρήση στοιχείων δοκού, αναλαμβάνει η ερμηνεία της συμπεριφοράς των συνδέσεων μεταξύ δοκών. Οι βαθμοί ελευθερίας του κάθε στοιχείου, θα πρέπει να συμβαδίζουν με όσα άλλα υπάρχει άμεση σύνδεση, καθώς και με τις συνοριακές συνθήκες του προσομοιώματος. Καθ' αυτό τον τρόπο, επιτυγχάνεται η ακριβής και ρεαλιστική αναπαράσταση της συμπεριφοράς του φορέα και των πραγματικών συνδέσεων του. Ιδιαίτερη έμφαση, θα πρέπει να δίνεται και στην δυσκαμψία των συνδέσεων (κύλιση, άρθρωση, μερική πάκτωση, πάκτωση), καθώς μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τις ποσότητες απόκρισης του συστήματος. Στην περίπτωση που γίνεται χρήση μερικής πάκτωσης, αυτή θα πρέπει να πληροί τις προδιαγραφές, όπως αυτές ορίζονται από το μέρος 1-8 του ΕΚ3 (§ΕΝ 1993-1-8). Τέλος, οποιεσδήποτε εκκεντρότητες προκύπτουν από την διαφορετική τοποθέτηση των συνοριακών συνθηκών, σε σχέση με την πραγματική κατασκευή, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όπως περιγράφηκαν παραπάνω.

2.2.3 Προσομοίωση με επιφανειακά στοιχεία

Η βάση για προσομοίωση με επιφανειακά στοιχεία (plate/shell elements), είναι η μοντελοποίηση της μέσης επιφάνειας του στοιχείου ως σημείο αναφοράς του προσομοιώματος. Αφού γίνει η απεικόνιση της μέσης επιφάνειας, έπειτα δίνεται από τον χρήστη το πάχος του στοιχείου, παράλληλα με όλες τις άλλες απαραίτητες ιδιότητες που απαιτούνται για ακριβή αναπαράσταση. Σε περίπτωση αλλαγής γεωμετρίας του φορέα (π.χ. αλλαγή πάχους στοιχείου), μπορούν να προκληθούν εκκεντρότητες στο προσομοίωμα. Αυτές, και εφόσον δεν κρίνονται αμελητέες, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και να ενσωματώνονται στο μοντέλο. Είναι σημαντικό, και ειδικά κατά την χρήση επιφανειακών στοιχείων, να εφαρμόζεται κριτική σκέψη από τον μηχανικό, προκειμένου να αξιολογείται η επιρροή τόσο των εκκεντροτήτων που δημιουργούνται. Σε καθημερινά ζητήματα Πολιτικού Μηχανικού, είναι πιθανό να είναι αμελητέα η επίδραση στην κατανομή των τάσεων εντός του επιφανειακού στοιχείου, αυτό όμως δεν αναιρεί τον απαραίτητο έλεγχο που θα πρέπει να γίνεται.

Σε γενικές γραμμές η προσομοίωση με επιφανειακά στοιχεία, απαιτεί μεγαλύτερη προσοχή από τα υπόλοιπα είδη πεπερασμένων στοιχείων. Αυτό ισχύει καθώς η πληθώρα διαφορετικών λογισμικών, προσφέρει και πληθώρα ερμηνειών των βασικών παραμέτρων του στοιχείου. Δηλαδή, τα χαρακτηριστικά κάθε λογισμικού, είναι μοναδικά και υπάρχει διακύμανση από την εφαρμογή της ελαστικής θεωρίας, στην εφαρμογή μη γραμμικής ανάλυσης με μεγάλες μετατοπίσεις και πλαστικοποίηση. Επομένως, απαιτείται πάντα η διερεύνηση των λειτουργιών ενός λογισμικού, και κατά πόσο αυτό μπορεί να υποστηρίξει την ζητούμενη ανάλυση, προκειμένου να ληφθούν αξιόπιστα αποτελέσματα και σωστή συμπεριφορά του προσομοιώματος. Οι βαθμοί ελευθερίας του στοιχείου, είναι η βάση για τα παραπάνω. Έτσι για παράδειγμα, κατά την προσομοίωση τρισδιάστατων επιφανειών με χρήση shell elements, αυτά θα πρέπει να διαθέτουν 5 ή 6 βαθμούς ελευθερίας σε κάθε τους κόμβο.

2.2.4 Προσομοίωση με συμπαγή στοιχεία

Τα συμπαγή στοιχεία (solid elements) κατά κανόνα αποτελούν μια πιο περίπλοκη μαθηματική μορφή των επιφανειακών στοιχείων. Τα τελευταία, προσομοιώνονται με επιφάνειες (τριγωνικές ή τετράπλευρες), ενώ αντιθέτως, τα συμπαγή στοιχεία αποτελούνται από τετράεδρα. Βασική διαφορά, αποτελεί πως κάθε μια πλευρά ενός συμπαγούς στοιχείου, είναι καθοριστικής σημασίας και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, κάτι που δεν ισχύει στα επιφανειακά στοιχεία. Σε γενικές γραμμές, διαθέτουν 3 βαθμούς ελευθερίας (β.ε.) ανά κόμβο, και η εναρμόνισή τους με τα υπόλοιπα συνδεδεμένα μέλη, καθώς και οι κατάλληλες συνθήκες στήριξης, είναι ύψιστης σημασίας. Επιπλέον, πρέπει να δίνεται αρκετή προσοχή στην διακριτοποίηση του στοιχείου τόσο σε όλο το μοντέλο, όσο και πιο συγκεκριμένα στα σημεία σύνδεσης ή τομής με διαφορετικά δομικά μέλη. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το πάχος του στοιχείου δεν είναι αμελητέο, επομένως πρέπει κατά την διακριτοποίηση του να δίνεται έμφαση, προκειμένου να αποφευχθούν προβλήματα σύγκλισης. Κρίνεται δόκιμο, σε γενικές εφαρμογές Πολιτικού Μηχανικού για σχεδιασμό και μελέτη, η διακριτοποίηση των συμπαγών στοιχείων, να γίνεται ανά επιμέρους επιφάνειες, χρησιμοποιώντας τετράπλευρα στοιχεία και όχι τριγωνικά. Πιο συγκεκριμένα, σε περιπτώσεις συγκέντρωσης υψηλών τάσεων ή και μη γραμμικών υπολογισμών, τα τετράπλευρα στοιχεία δίνουν την δυνατότητα ακριβέστερης απεικόνισης τόσο της παραμόρφωσης του φορέα, όσο και της εξασφάλισης ομαλής κατανομής των τάσεων.

Μέρος των αναλύσεων μεταλλικών κατασκευών, αποτελεί ο έλεγχος καθώς και ο υπολογισμός των απαιτούμενων κοχλίων, απαραίτητων για την σύνδεση των μεταλλικών στοιχείων. Αυτή η δυνατότητα δίνεται μέσω της κατάλληλης προσομοίωσης τους με πεπερασμένα στοιχεία, και συνηθέστερα με χρήση συμπαγών στοιχείων. Τα σημεία που απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή για την προσομοίωση των κοχλίων, είναι πρώτον η σωστή θεώρηση της δυσκαμψίας τους, και δεύτερον η κατάλληλη προσομοίωση της επαφής και της αλληλεπίδρασης τους με τα υπόλοιπα στοιχεία. Για την επίτευξη του πρώτου, χρειάζεται σύμφωνα με τους κανονισμούς (EN 1993-1-14 §5.1.4(3) και EN 1993-1-141 §5.1.4(3)) οι κοχλίες να προσομοιώνονται χρησιμοποιώντας την επιφάνεια του κορμού ορίζοντας την ονομαστική τους διατομή.

Όσον αφορά το δεύτερο ζήτημα, για κανονικές γεωμετρίες, προκειμένου να βελτιωθεί η συμπεριφορά της επαφής του κοχλία με την οπή των μεταλλικών ελασμάτων, προτείνεται να δημιουργούνται κυλινδρικοί όγκοι, εντός των μεταλλικών ελασμάτων, δίνοντας την ίδια διάμετρο του κοχλία. Έτσι, εξασφαλίζεται το ίδιο μοτίβο διακριτοποίησης στα στοιχεία των κοχλίων και των μεταλλικών ελασμάτων. Διαφορετικά, εάν εμφανίζονται αριθμητικά προβλήματα σύγκλισης, προτείνεται η χρήση της μεθόδου «αδύναμων ελατηρίων». Κατά αυτή την μέθοδο, εξασφαλίζεται η σταθεροποίηση του συστήματος, ως ότου έρθουν σε επαφή όλα τα στοιχεία, και έτσι αρχίσουν να λειτουργούν οι κοχλίες εντός της μη γραμμικής ανάλυσης.

2.2.5 Συνδυασμός στοιχείων

Αρκετές είναι οι φορές, που ένας φορέας δεν μπορεί να προσομοιωθεί χρησιμοποιώντας μόνο ένα είδος στοιχείου. Σε αυτές τις περιπτώσεις, τα περισσότερα διαθέσιμα λογισμικά, δίνουν την δυνατότητα στον χρήστη, να εισάγει στο ίδιο μοντέλο, περισσότερα από δύο είδη πεπερασμένων στοιχείων. Ίσως το πιο σημαντικό ζήτημα σε τέτοιου είδους προσομοιώματα, είναι η κατάλληλη συσχέτιση των βαθμών ελευθερίας των διαφορετικών στοιχείων. Η συνοχή του προσομοιώματος στα σημεία επαφής των διαφορετικών στοιχείων, εξαρτάται από τους διαφορετικούς βαθμούς ελευθερίας, οι οποίοι θα πρέπει να εναρμονίζονται τόσο για την επίτευξη της πραγματικής συμπεριφοράς του φορέα, όσο και για την ομαλή μετάβαση δυνάμεων και μετατοπίσεων από το ένα στοιχείο στο άλλο. Παράλληλα πρέπει να διακριτοποιούνται όλα τα στοιχεία, και συγκεκριμένα στα σημεία δι-επαφής, με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγονται συγκεντρώσεις τάσεων, αριθμητικές ιδιομορφίες, ή και φαινόμενα 2^{ας} τάξης. Τέλος, στα μικτά προσομοιώματα, για κάθε στοιχείο ξεχωριστά, ισχύουν οι βασικές αρχές του.

2.3 Στηρίξεις και φόρτιση προσομοιώματος

2.3.1 Ορισμός στηρίξεων

Η κατάλληλες συνθήκες στήριξης, καθώς και η προσομοίωση τους, αποτελεί ίσως το μοναδικό στοιχείο απολύτως απαραίτητο για την ομαλή λειτουργία και απόκριση ενός συστήματος. Στόχος όλων των αριθμητικών προσομοιωμάτων, είτε αυτά πραγματοποιούνται με πεπερασμένα στοιχεία είτε με γραμμικά, είναι η κατά το δυνατόν ρεαλιστική αναπαράσταση της συμπεριφοράς ενός πραγματικού φορέα. Έτσι, και οι συνθήκες στήριξης πρέπει να αποσκοπούν στην ρεαλιστική προσομοίωση των πραγματικών συνοριακών συνθηκών της κατασκευής, παρέχοντας παράλληλα ένα κινηματικό σταθερό σύστημα. Οι συνθήκες στήριξης μπορούν να εισαχθούν στο αριθμητικό προσομοίωμα με τρεις τρόπους: ως απευθείας εξωτερικές στηρίξεις, ως υπάρχοντα δομικά μέλη ή ως εσωτερικές στηρίξεις όταν εμφανίζεται μέρος της συνολικής κατασκευής. Σε κάθε περίπτωση, η δυσκαμψία των συνθηκών αυτών, πρέπει να είναι ίδια με αυτή των φυσικών στηρίξεων.

Περαιτέρω προσοχή αξίζει να δοθεί στην εφαρμογή σημειακών/τοπικών στηρίξεων σε επιφανειακά στοιχεία. Συνήθως, η εφαρμογή τους προκαλεί ανεπιθύμητες συγκεντρώσεις τάσεων με αποτέλεσμα να μην δίνεται μετέπειτα ακριβής απεικόνιση της κατανομής των τάσεων στον υπόλοιπο φορέα. Συμπερασματικά, αντί για σημειακές στηρίξεις προτείνεται η χρήση πιο ρεαλιστικών μεθόδων (π.χ. δέσμευση ολόκληρης της πλευράς ενός επιφανειακού στοιχείου). Επιπροσθέτως, υπάρχει το ενδεχόμενο εμφάνισης τοπικής μη ρεαλιστικής αύξησης τάσεων, εφόσον δεν εισαχθεί η στήριξη με την κατάλληλη δυσκαμψία. Μια πιθανή μέθοδος για σωστή απεικόνιση των στηρίξεων σε επιφανειακά μη γραμμικά προσομοιώματα, είναι η χρήση άκαμπτων δεσμεύσεων. Αυτό, μπορεί να επιτευχθεί είτε μέσω ενός διαφράγματος, είτε μέσω πλασματικών άκαμπτων στηρίξεων. Κατά αυτόν τον τρόπο, η στήριξη του φορέα, μπορεί να τοποθετηθεί στην υποθετική φυσική στήριξη. Οι άκαμπτες δεσμεύσεις εξασφαλίζουν την καθετότητα της ακραίας διατομής, δίνοντας παράλληλα την δυνατότητα προσομοίωσης πραγματικών συνθηκών στήριξης κύλισης ή πάκτωσης. Παρόλα αυτά, η χρήση της μεθόδου καθώς και

τα αποτελέσματα της, θα πρέπει να διερευνώνται, καθώς μπορεί να δημιουργήσει ανεπιθύμητη συμπεριφορά του φορέα (π.χ. παρεμπόδιση ή αμέλεια στρέψης της διατομής).

Πολλές φορές, η υπολογιστική ισχύς που διατίθεται μπορεί να μην επαρκεί για την εύκολη και ανεμπόδιστη χρήση προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων. Έτσι, κρίνεται σκόπιμη η μείωση του μεγέθους και της πολυπλοκότητας του μοντέλου. Ένας τρόπος, είναι όταν υπάρχουν συνθήκες στήριξης εξ' αιτίας υπαρχόντων δομικών μελών, να προσομοιώνεται μόνο η επιρροή τους (απλές στηρίξεις και δεσμεύσεις βαθμών ελευθερίας), αντί να γίνεται απευθείας απεικόνιση ολόκληρου του μέλους. Παράλληλα, ο χρήστης μπορεί να εκμεταλλευτεί άξονες συμμετρίας καθώς και συμμετρία φόρτισης αλλά και στηρίξεων. Όμως, θα πρέπει να δίνεται προσοχή όταν ένας άξονας συμμετρίας διέρχεται από μια στήριξη, καθώς αυτή θα πρέπει να εισαχθεί κανονικά, θεωρώντας πως αρχικά δεν ήταν μέρος των συνθηκών συμμετρίας. Τέλος, για να αξιοποιηθεί η συμμετρία ενός φορέα, θα πρέπει να έχει επαληθευτεί πρώτα, πως και η αναμενόμενη συμπεριφορά του φορέα θα είναι συμμετρική (μορφές αστοχίες, ιδιομορφές, παραμορφωμένη κατάσταση κ.α.). Αυτό σημαίνει πως όχι μόνο η γεωμετρία θα πρέπει να είναι συμμετρική, αλλά και πως η φόρτιση και η στήριξη του φορέα, οδηγεί σε συμμετρική απόκριση.

2.3.2 Ορισμός φορτίσεων

Προκειμένου η απόκριση του προσομοιώματος να είναι κατά το δυνατόν πλησιέστερη στην πραγματική απόκριση του φορέα, θα πρέπει να εισάγεται με κατάλληλο τρόπο και η καταπόνηση του φορέα. Έτσι, στόχος κατά τον ορισμό των φορτίσεων, είναι η αναπαράσταση των ίδιων αποτελεσμάτων στο προσομοίωμα, με αυτών των φυσικών φορτίων που ασκούνται στην κατασκευή. Μια βασική παράμετρος για την εισαγωγή των φορτίων, αποτελούν οι βαθμοί ελευθερίας του συστήματος. Προφανώς, τα φορτία θα πρέπει να ασκούνται μόνο στους ελεύθερους β.ε. του συστήματος και των πεπερασμένων στοιχείων, και όχι στους δεσμευμένους. Για παράδειγμα, δεν είναι εφικτό να εφαρμοστούν σημειακές καμπτικές ροπές σε συμπαγή στοιχείο.

Στις αναλύσεις μεταλλικών κατασκευών, και συνηθέστερα στις μη γραμμικές, είθισται η επιβολή της καταπόνησης του φορέα, να γίνεται με δύο διαφορετικές μεθόδους: μέσω επιβολής φορτίου, είτε μέσω επιβολής μετατόπισης. Όσον αφορά το πρώτο, η λογική είναι απλή, αφού πρακτικά, κατά την διάρκεια της ανάλυσης επιβάλλεται και προσαυξάνεται σταδιακά το φορτίο (π.χ. σε εργαστηριακές δοκιμές) και παράλληλα καταγράφεται η μεταβολή της μετατόπισης. Αυτή η μέθοδος είναι επαρκής και αποτελεσματική όταν πρόκειται για φορείς με καλή μεταλυγισμική συμπεριφορά, στους οποίους ο ανελαστικός δρόμος ισορροπίας είναι κατά κύριο λόγο ανοδικός (λ.χ. διατομές με παχύ τοίχωμα). Όμως, η μέθοδος επιβολής φορτίου, μειονεκτεί όταν ο φορέας εμφανίζει καθοδικό κλάδο στον δρόμο ισορροπίας (διάγραμμα επιβαλλόμενου φορτίου – καταγεγραμμένης μετατόπισης, P-δ), δηλαδή όσο προχωράει η ανάλυση, η παραμορφώσεις αυξάνονται, όμως το φορτίο εμφανίζει μείωση. Τέτοια συμπεριφορά, εμφανίζουν συνήθως οι λεπτότοιχες διατομές. Η παρουσία αυτής της μεθόδου είναι πολύ σημαντική, καθώς αν δεν υπήρχε, και κατ' επέκταση δεν ήταν δυνατή η πρόβλεψη καθοδικού κλάδου, οι πληροφορίες που θα εξαγόταν από τον δρόμο ισορροπίας θα υποδείκνυαν ακαριαίο λυγισμό (snap-through buckling).

Όσον αφορά την επιβολή των φορτίων στο προσομοίωμα, αυτά θα πρέπει να είναι συμβατά με την επιλεγόμενη μέθοδο επιβολής της φόρτισης. Στην περίπτωση επιβολής φορτίου, όλα τα ασκούμενα φορτία πρέπει να ορίζονται ή να μετατρέπονται σε σημειακά (είναι πιθανό η μετατροπή να γίνεται αυτόματα από το λογισμικό). Θα πρέπει να δίνεται έμφαση στον τρόπο της μετατροπής, ειδικά στις άκρες των μελών, ώστε να εξασφαλισθεί η μη εμφάνιση τοπικών αστοχιών. Επιπλέον, κατά την εφαρμογή της μεθόδου επιβολής φορτίου, μπορεί να προκύψουν τοπικοί λυγισμοί. Θα πρέπει πάντα να ελέγχεται εάν αποτελεί ρεαλιστική συμπεριφορά του προσομοιώματος, και αν θα μπορούσαν να εμφανιστούν αυτοί οι τοπικοί λυγισμοί στην πραγματική κατασκευή. Εάν όχι, για να αποφευχθούν μπορεί να γίνει χρήση άκαμπτων μελών ή δέσμευση σχετικών βαθμών ελευθερίας. Όμως έτσι, επηρεάζεται η συνολική δυσκαμψία του φορέα, και θα πρέπει ο χρήστης να αξιολογεί την επιρροή αυτή στην απόκριση

του φορέα και στην πιθανή μορφή αστοχίας. Αντίστοιχα, κατά την μέθοδο επιβολής μετατόπισης, οι επιβαλλόμενες μετατοπίσεις, θα πρέπει να μετατρέπονται σε μετατοπίσεις κόμβων. Είναι σημαντικό να σημειωθεί, πως η κατανομή των τάσεων με αυτή τη μέθοδο, θα είναι αρκετά διαφορετική από την προηγούμενη μέθοδο. Κατά την επιβολή μετατοπίσεων, η κατανομή των τάσεων αναπαριστά την πραγματική κατανομή τους, αν η κατασκευή φορτίζεται μέσω μια άκαμπτης συσκευής φόρτισης.

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω, η εφαρμογή των δύο μεθόδων μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικά αποτελέσματα, τα οποία οφείλονται στην διαφορετική απόκριση του συστήματος. Επομένως, θα πρέπει να δίνεται αρκετή έμφαση κατά την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου, η οποία είναι άμεσα συνδεδεμένη με τα αποτελέσματα που θέλει να εξάγει ο χρήστης. Τέλος, δίνεται πάντα η επιλογή συνδυασμού των δύο μεθόδων, και η διασταύρωση των αποτελεσμάτων.

2.4 Προσομοίωση Υλικών

2.4.1 Γενικές απαιτήσεις

Για την σωστή λειτουργία των αριθμητικών προσομοιωμάτων, και για να εξάγονται επαρκή αλλά και ρεαλιστικά αποτελέσματα, είναι απαραίτητη η ορθή εισαγωγή των υλικών του φορέα. Τόσο στις γραμμικές, πόσο μάλλον και στις μη γραμμικές αναλύσεις, το υλικό παίζει καθοριστικό ρόλο, ιδιαίτερα όταν πρόκειται να γίνει ανάλυση με μη γραμμικό υλικό. Όπως έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω, τα μέρη 1-14 και 1-141, έρχονται να συμπληρώσουν τα υπόλοιπα μέρη των Ευρωκωδίκων. Επίσης, σκοπός τους δεν είναι να αλλάξουν την στάθμη ασφαλείας υπαρχόντων κατασκευών, αλλά ούτε και να τροποποιήσουν τα αποτελέσματα και τις αντοχές που προκύπτουν από τις υπάρχουσες μεθόδους ανάλυσης και σχεδιασμού μεταλλικών κατασκευών. Συνεπώς, και η προσομοίωση των υλικών κατά την χρήση πεπερασμένων στοιχείων δεν διαφέρει σημαντικά.

Στο κεφάλαιο 2.1 αναφέρθηκε πως οι δυο πιθανοί «κανόνες» σχεδιασμού (αριθμητική προσομοίωση και αριθμητικοί υπολογισμοί για σχεδιασμό), πρέπει να διαχωρίζονται και να θεωρούνται διαφορετικές μέθοδοι. Μια σημαντική διαφοροποίηση είναι στις παραμέτρους του υλικού που χρησιμοποιεί η κάθε μέθοδος. Η πρώτη, και αφού αποσκοπεί στην αντικατάσταση ή στην επέκταση πειραματικών δεδομένων, είναι λογικό κατά την προσομοίωση του φορέα να γίνεται χρήση των μετρημένων ή μέσω τιμών των παραμέτρων του υλικού (f_y , f_u , E και ϵ_u). Οι τιμές αυτές λαμβάνονται μέσω κατάλληλου ελέγχου αντίστασης δοκιμίων, τα οποία προέρχονται από το ίδιο υλικό απ' το οποίο πρόκειται να κατασκευαστεί ο τελικός φορέας. Αντιθέτως, όταν πρόκειται για προσομοίωμα που έχει ως στόχο να γίνουν υπολογισμοί για σχεδιασμό μιας κατασκευής, οι ιδιότητες του υλικού παρέχονται κανονιστικά από τον Ευρωκώδικα 3 αλλά και από τις προδιαγραφές του εκάστοτε υλικού.

Συχνά, τα λογισμικά που υποστηρίζουν μη γραμμικές αναλύσεις, υποστηρίζουν και την εισαγωγή του νόμου του υλικού, περιγράφοντας τα σημεία της καμπύλης τάσεων παραμορφώσεων (σ - ϵ). Σε αυτή την περίπτωση, υπάρχει η δυνατότητα περιγραφής της καμπύλης με «στρογγυλεμένο» ή με διακριτά καθορισμένο σημείο διαρροής. Η απόφαση για την επιλογή της μιας ή της άλλης περίπτωσης, θα πρέπει να βασίζεται σε καλά εδραιωμένες πρακτικές (π.χ. γνωστά αποτελέσματα καμπύλης σ - ϵ μέσω ελέγχου δοκιμίων). Διαφορετικά, εάν οι πληροφορίες για την επιλογή του κατάλληλου μοντέλου υλικού, δεν είναι επαρκής, επιτρέπεται κανονιστικά η επιλογή ενός μοντέλου που οδηγεί σε χαμηλότερη πρόβλεψη αντίστασης, καθώς έτσι επιτυγχάνεται αντίσταση υπέρ της ασφαλείας. Τέλος, ισχύει γενικά πως οι καμπύλη σ - ϵ με μη διακριτό σημείο διαρροής οδηγεί σε ασφαλείς προβλέψεις της τελικής αντίστασης, στην περίπτωση στοιχείων ευάλωτων σε αστάθειες.

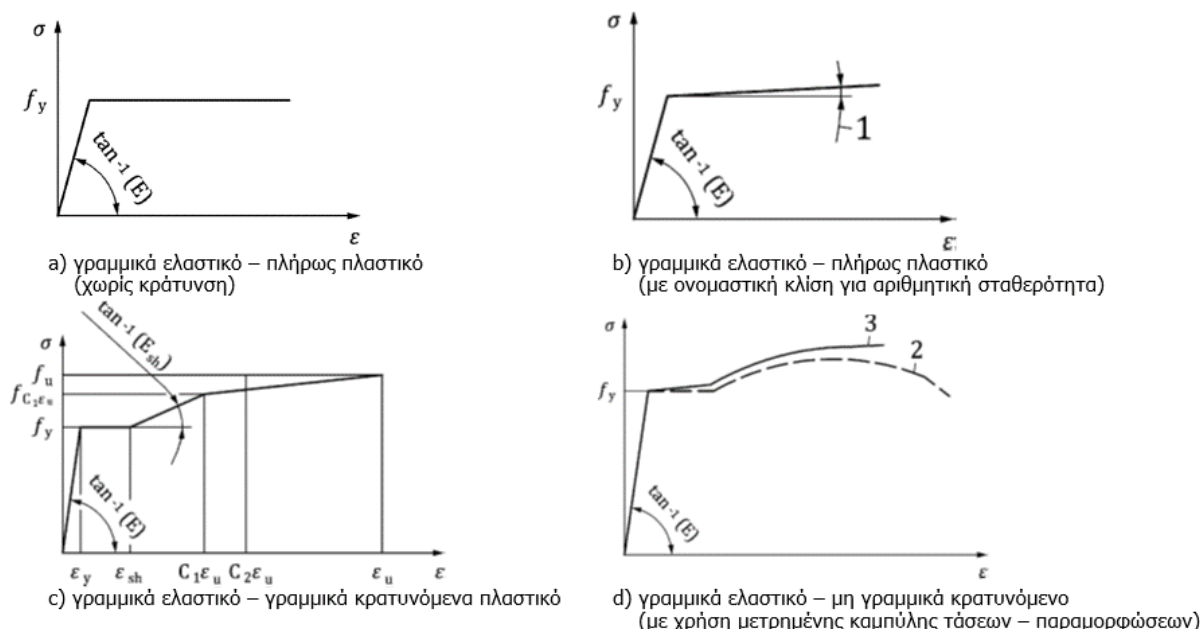
Οι βασικές κατηγορίες των υλικών μεταλλικών κατασκευών όσον αφορά τα προσομοιώματα, είναι 3 και χωρίζονται σε α) θερμής έλασης, β) ψυχρής έλασης, και γ) προχωρημένα μοντέλα υλικού. Παρακάτω θα παρουσιαστούν αναλυτικότερα αυτές οι επιλογές.

2.4.2 Νόμος υλικών θερμής έλασης

Κατά την εισαγωγή υλικού θερμής έλασης στο προσομοίωμα, ο χρήστης έχει τέσσερις βασικές επιλογές, όπως παρουσιάζονται παρακάτω:

- Γραμμικά ελαστικό – πλήρως πλαστικό με μηδενική κράτυνση
- Γραμμικά ελαστικό – πλήρως πλαστικό με ονομαστική κράτυνση για σταθεροποίηση
- Γραμμικά ελαστικό – γραμμικά κρατυνόμενα πλαστικό (τετρα-γραμμική κράτυνση)
- Γραμμικά ελαστικό – μη γραμμικά κρατυνόμενο (με χρήση μετρημένης καμπύλης σ-ε)

Η πρώτη, όπως αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 2-2 (a), αφορά διγραμμικό υλικό, πλήρως πλαστικό με μηδενική κράτυνση. Στο (b) δίνεται μια πολύ μικρή μη μηδενική τιμή, για λόγους σύγκλισης και σταθερότητας του προσομοιώματος. Η τρίτη επιλογή έχει χαρακτηριστικά μιας τετρα-γραμμικής αναπαράστασης της συνολικής καμπύλης τάσεων παραμορφώσεων, όπου παρατηρείται πρώτα πλήρως ελαστική περιοχή, έπειτα ένα πλατό διαρροής, και τέλος μια διγραμμική αναπαράσταση της κράτυνσης του χάλυβα. Η αναλυτική σχέση υπολογισμού του υλικού (c) παρουσιάζεται παρακάτω στον Τύπο 1. Η τέταρτη και τελευταία επιλογή προσομοίωσης υλικού, είναι να χρησιμοποιηθούν οι τιμές της καμπύλης του νόμου υλικού, οι οποίες εξήχθησαν από ελέγχους αντοχής δοκιμών σε εργαστηριακές δοκιμές.



Σχήμα 2-2: Νόμοι υλικού χάλυβα θερμής έλασης

Υπόμνημα Σχήματος 2-2:

1) $\tan^{-1}(E/10\ 000)$ 2) καμπύλη σ-ε από δοκίμια 3) πραγματική (true) καμπύλη σ-ε

Όσον αφορά τις αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού του υλικού c, αυτές δίνονται παρακάτω:

$$\sigma(\varepsilon) = \begin{cases} E \cdot \varepsilon & \text{για } \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ f_y & \text{για } \varepsilon_y < \varepsilon \leq \varepsilon_{sh} \\ f_y + E_{sh} \cdot (\varepsilon - \varepsilon_{sh}) & \text{για } \varepsilon_y < \varepsilon_{sh} < \varepsilon \leq C_1 \varepsilon_u \\ f_{C1\varepsilon_u} + \frac{f_u - f_{C1\varepsilon_u}}{\varepsilon_u - C_1 \varepsilon_u} \cdot (\varepsilon_u - C_1 \varepsilon_u) & \text{για } C_1 \varepsilon_u < \varepsilon \leq \varepsilon_u \end{cases}$$

Τύπος 1: Υπολογισμός τετραγραμμικού υλικού

όπου:

f_y είναι η τάση διαρροής

$\varepsilon_y = f_y / E$ είναι η παραμόρφωση διαρροής

f_u είναι η μέγιστη εφελκυστική αντοχή

e_{sh} είναι η παραμόρφωση σκλήρυνσης, που δίνεται από τον τύπο:

$$e_{sh} = 0.1 \cdot f_y / f_u - 0.055 \text{ αλλά } 0.015 \leq e_{sh} \leq 0.03$$

e_u είναι η μέγιστη παραμόρφωση, που δίνεται από τον τύπο:

$$e_u = 0.6 \cdot (1 - f_y / f_u) \text{ αλλά } 0.06 \leq e_u \leq A$$

A είναι η επιμήκυνση έπειτα την αστοχία (καθορίζεται από τις προδιαγραφές του υλικού)

C_1 είναι ένας συντελεστής υλικού, που δίνεται από τον τύπο:

$$C_1 = \frac{\varepsilon_{sh} + 0.25(\varepsilon_u - \varepsilon_{sh})}{\varepsilon_u}$$

E_{sh} είναι ο συντελεστής σκλήρυνσης (κλίση), που δίνεται από τον τύπο:

$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{C_2 \cdot \varepsilon_u - \varepsilon_{sh}}$$

C_2 είναι ένας συντελεστής υλικού, που δίνεται από τον τύπο:

$$C_2 = \frac{\varepsilon_{sh} + 0.4(\varepsilon_u - \varepsilon_{sh})}{\varepsilon_u}$$

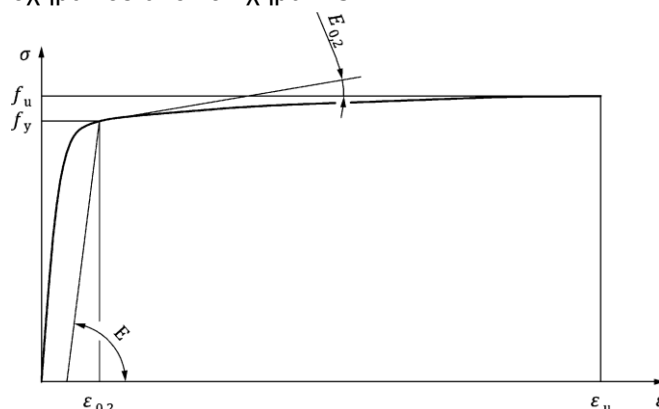
Πρέπει να σημειωθεί πως οι παραπάνω σχέσεις αφορούν την καμπύλη μηχανικών τάσεων-παραμορφώσεων και όχι των πραγματικών (true stress-strain). Γίνεται όμως μέσω των παρακάτω σχέσεων να μετατραπούν σε πραγματικές και να χρησιμοποιηθούν κατάλληλα.

$$\sigma_{true} = \sigma \cdot (1 - \varepsilon)$$

$$\varepsilon_{true} = -\ln(1 - \varepsilon)$$

2.4.3 Νόμος υλικών ψυχρής έλασης

Όσον αφορά τους φορείς με υλικό ψυχρής έλασης αλλά και την προσομοίωση του, οι επιλογές του χρήστη είναι πιο απλές και κατά κύριο λόγο είναι ένας ο τύπος υλικού. Πρέπει να σημειωθεί πως σημαντική διαφορά των υλικών ψυχρής έλασης, από τα θερμής, είναι πως εμφανίζουν «στρογγυλεμένο» σημείο διαρροής (μη διακριτό). Ο τύπος υλικού που αναφέρθηκε, είναι ο Ramberg-Osgood δύο σταδίων, ο οποίος θα αναλυθεί παρακάτω, με την βασική σχέση υπολογισμού να δίνεται από τον Τύπο 2, και το σχήμα του από το Σχήμα 2-3.



Σχήμα 2-3: Ramberg-Osgood δύο σταδίων

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E} + 0.002 \cdot \left(\frac{\sigma}{f_y} \right)^n & \text{για } \sigma \leq f_y \\ \frac{\sigma - f_y}{E_{0.2}} + \left(\varepsilon_u - \varepsilon_{0.2} - \frac{f_u - f_y}{E_{0.2}} \right) \cdot \left(\frac{\sigma - f_y}{f_u - f_y} \right) & \text{για } f_y < \sigma \leq f_u \end{cases}$$

Τύπος 2: Σχέση υπολογισμού Ramberg-Osgood δύο σταδίων

όπου:

σ είναι η τάση

ε είναι η παραμόρφωση

E, f_y, f_u δίνονται στο EN 1993-1-1 για ανθρακοχάλυβα και στο EN10088 ανοξείδωτο χάλυβα

n είναι ένας συντελεστής που μπορεί να λαμβάνεται σύμφωνα με τον Πίνακα 2-1 ή διαφορετικά να υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις μετρημένες ιδιότητες του υλικού ως: $n = \ln(4)/\ln(f_y/\sigma_{0.05})$, όπου $\sigma_{0.05}$ είναι η τάση που αντιστοιχεί σε 0.05 ανηγμένη παραμόρφωση (proof stress)

Steel	Coefficient n
Χάλυβας ψυχρής έλασης	8
Ωστενιτικός ανοξείδωτος χάλυβας	7
Φερριτικός ανοξείδωτος χάλυβας	14
Διφασικός ανοξείδωτος χάλυβας	8
Ποιότητες χάλυβα S500 – S700	14

Πίνακας 2-1: Τιμές συντελεστή n

$E_{0.2}$ είναι η εφαπτομενική κλίση της καμπύλης σ-ε στο σημείο της διαρροής και ορίζεται ως:

$$E_{0.2} = \frac{E}{1 + 0.002 n \frac{E}{f_y}}$$

ε_u είναι η μέγιστη παραμόρφωση, που δίνεται από τον τύπο:

$$\varepsilon_u = \begin{cases} 0.6 \cdot \left(1 - \frac{f_y}{f_u} \right) & \text{για ψυχρής έλασης και φερριτικούς ανοξείδωτους χάλυβες} \\ 1 - \frac{f_y}{f_u} & \text{για ωστενιτικούς και διφασικούς ανοξείδωτους χάλυβες} \end{cases}$$

όμως $\varepsilon_u \leq A$, όπου είναι η επιμήκυνση έπειτα την αστοχία (καθορίζεται από τις προδιαγραφές του υλικού)

m είναι ο δεύτερος εκθέτης του όρου της κράτυνσης και υπολογίζεται ως:

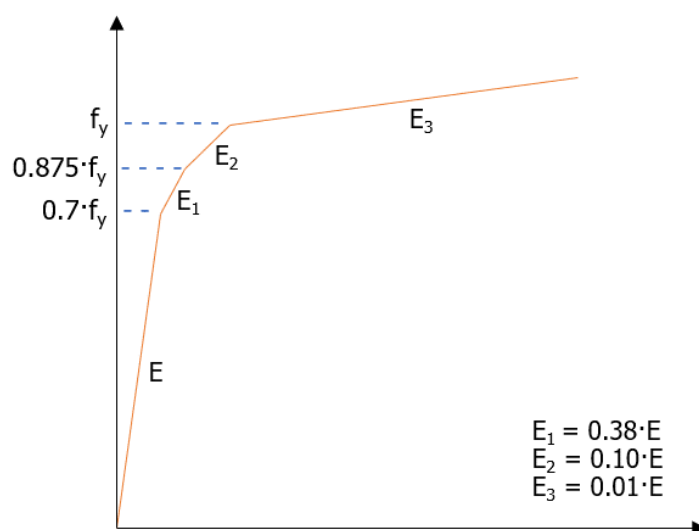
$$m = \begin{cases} 1 - 3.3 \cdot \frac{f_y}{f_u} & \text{για ψυχρής έλασης} \\ 1 - 2.8 \cdot \frac{f_y}{f_u} & \text{για όλους τους ανοξείδωτους χάλυβες} \end{cases}$$

Διαφορετικά υπολογίζεται από τις μετρημένες ιδιότητες υλικού ως εξής:

$$m = \frac{\ln\left(0.008 + \frac{\sigma_{1,0} - f_y}{E} - \frac{\sigma_{1,0} - f_y}{E_{0,2}}\right) - \ln\left(\varepsilon_u - \varepsilon_{0,2} - \frac{f_u - f_y}{E_{0,2}}\right)}{\ln(\sigma_{1,0} - f_y) - \ln(f_u - f_y)}$$

Σημειώνεται πως για περισσότερο πλαστικό υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί η προσέγγιση $(\varepsilon_u - \varepsilon_{0,2} - (f_u - f_y)/E_{0,2}) \approx \varepsilon_u$, παρέχοντας μια πιο ξεκάθαρη σχέση υπολογισμού των παραμορφώσεων.

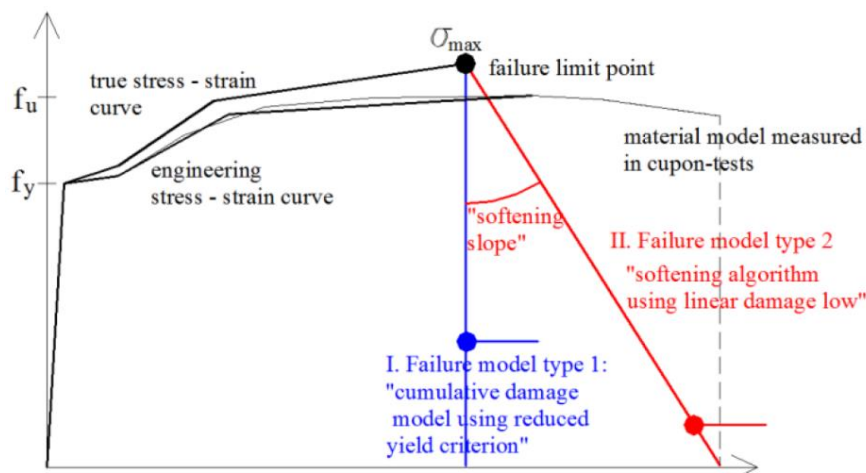
Ως εναλλακτική στον τύπο υλικού Ramberg-Osgood, δίνεται η επιλογή της χρήσης ενός τετραγραμμικού υλικού, όπως αυτό φαίνεται στο Σχήμα 2-4. Περαιτέρω απλοποίηση αυτού του τύπου, μπορεί να γίνει θεωρώντας $E_1=E_2=E$ και $E_3=E/100$.



Σχήμα 2-4: Τετραγραμμικός νόμος υλικού για φορείς ψυχρής έλασης

2.4.4 Προχωρημένα μοντέλα υλικού

Τελευταία κατηγορία μοντέλου υλικού μεταλλικών κατασκευών, αφορά κάποιους πιο εξελιγμένους νόμους υλικού· στόχος τους είναι να καλύψουν εκείνους τους φορείς που έχουν ως κύρια μορφή αστοχίας την θραύση (π.χ. μεταλλικές πλάκες συνδέσεων, κοχλίες κ.α.). Για να γίνει η κατάλληλη πρόβλεψη της θραύσης (ή των οριακών πλαστικών παραμορφώσεων αν ζητείται), απαιτείται ένα υλικό ικανό να μπορεί να διαχειριστεί μεγάλες παραμορφώσεις και να ικανοποιεί τα κριτήρια αστοχίας. Για την διασφάλιση αυτών των δύο κριτηρίων, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ταυτόχρονα, ένα είδος πεπερασμένου στοιχείου, το οποίο μπορεί να ακολουθήσει μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις, να μπορεί να προσομοιώσει την στένωση πριν τη θραύση (δοκιμή εφελκυσμού, περιοχή λαιμού), και τέλος να μπορεί να εφαρμοστεί σε αυτό, μοντέλο υλικού που πρόκειται να ενσωματώσει το κριτήριο αστοχίας (damage model). Η βάση αυτού του μοντέλου υλικού και η σχηματική του αναπαράσταση, δίνεται στο Σχήμα 2-5.



Σχήμα 2-5: Νόμος υλικού με κριτήριο αστοχίας (damage criterion)

Μπορούν να οριστούν διάφορα υλικά που να ενσωματώνουν κάποιο κριτήριο αστοχίας, εξαρτώνται όμως από τις ιδιότητες του υλικού πριν την αστοχία, και ταυτόχρονα από την υπό εξέταση μορφή αστοχίας και τον τύπο της ανάλυσης που έχει επιλεγεί. Στο παραπάνω σχήμα, παρουσιάζονται δύο τέτοιοι τύποι (με μπλε και κόκκινο χρώμα), οι οποίοι θεωρούνται ως οι πιο διαδεδομένοι και ευρέως χρησιμοποιούμενοι.

Η βασική αρχή του Τύπου I (μπλε χρώμα), αφορά την «συσσωρευμένη αστοχία» (cumulative damage), στην οποία το οριακό σημείο αστοχίας, ορίζεται από την τιμή της παραμόρφωσης που αντιστοιχεί στην εφελκυστική τάση του υλικού. Έπειτα, αυτή η τιμή μετατρέπεται σε πραγματική τιμή ανηγμένης παραμόρφωσης και χρησιμοποιείται ως οριακό σημείο αστοχίας. Για να γίνει η περιγραφή της προοδευτικής/σταδιακής αστοχίας, γίνεται χρήση μιας συνάρτησης αστοχίας, που έχει ως στόχο την μείωση της τάσης διαρροής του υλικού. Τέτοιου είδους υλικά και κριτήρια αστοχίας υλικού, αναπτύσσονται κυρίως για γραμμικώς ελαστικά υλικά αλλά και σε αναλύσεις κόπωσης.

Η δεύτερη προσέγγιση (Τύπος II, κόκκινο χρώμα), είναι ο ορισμός των κανόνων «από-σκλήρυνσης» των πολυγραμμικών υλικών, αφότου έχουν φτάσει στο οριακό σημείο αστοχίας τους. Κατά την χρήση αυτού του είδους υλικού και τύπου αστοχίας, η κλίση του τελευταίου κλάδου θα πρέπει να ορίζεται από τον σχεδιαστή. Ταυτόχρονα, η επιρροή της κλίσης στην τελική αντίσταση του φορέα, θα πρέπει να διερευνάται, και τελικά θα πρέπει να αξιολογείται κατά την διάρκεια της διαδικασίας σχεδιασμού. Αξίζει να σημειωθεί, πως μπορεί να υπάρχουν φορείς, δομικά μέλη ή κόμβοι, των οποίων η τελική αντοχή να μην επηρεάζεται σημαντικά από την κλίση της ευθείας. Ο λόγος είναι πως η μέγιστη παραμόρφωση που εμφάνισε το προσομοίωμα, βρίσκεται πολύ κοντά στο οριακό σημείο αστοχίας. Έτσι, αφού αστοχήσει το πρώτο σημείο στην ακραία ίνα, όλα τα υπόλοιπα μέρη θα υπερφορτωθούν ταχύτατα, και ολόκληρος ο φορέας θα αστοχήσει.

2.5 Ενσωμάτωση ατελειών φορέα

2.5.1 Τύποι ατελειών

Η σωστή προσομοίωση και εφαρμογή των ατελειών ενός φορέα, τόσο σε μέγεθος όσο και σε σχήμα, αποτελεί κλειδί για την διαδικασία υπολογισμού και σχεδιασμού της κατασκευής. Οι ατέλειες, ανεξαρτήτως του είδους τους έχουν την ικανότητα να επηρεάσουν σημαντικά την απόκριση του φορέα και ταυτόχρονα την τελική του αντίσταση, ειδικά όταν πρόκειται για ευαίσθητους σε φορείς. Όπως είναι γνωστό, οι ατέλειες υπάρχουν πάντα σε δομικά μέλη, παρά τις προσπάθειες των κατασκευαστών, για την ελαχιστοποίησή τους, στην φάση κατασκευής. Έτσι, και εξαιτίας της μη αμελητέας επίδρασης που έχουν στον φορέα, οι ατέλειες θα πρέπει πάντα να λαμβάνονται υπόψη στο αριθμητικό προσομοίωμα

κατά τον έλεγχο της τελικής αντίστασης, ειδικά όταν πρόκειται γίνεται υιοθέτηση προχωρημένων μεθόδων σχεδιασμού. Αξίζει να σημειωθεί, πως οι ατέλειες μπορούν να εισαχθούν στον φορέα είτε μέσω προσομοίωσης τους στην τέλεια γεωμετρία, είτε μέσω ενός συνόλου ισοδύναμων οριζόντιων δυνάμεων.

Οι βασικές κατηγορίες αρχικών ατελειών σε μεταλλικές κατασκευές, που εμφανίζονται ευρέως στην διεθνή βιβλιογραφία είναι τρεις και διαχωρίζονται ως εξής

- Γεωμετρικές ατέλειες
- Κατασκευαστικές ατέλειες
- Ατέλειες υλικού

Εν συντομία, οι γεωμετρικές ατέλειες καλύπτουν την διακύμανση των διαστάσεων ενός μέλους, την απώλεια καθετότητας ενός φορέα και την ευθύτητα ή την ομαλότητα ενός μέλους. Οι κατασκευαστικές ατέλειες αφορούν κατά κύριο λόγο απρόβλεπτες παραμέτρους όπως εκκεντρότητες κόμβων, άνιση θεμελίωση, αλλά και μικρές διαφοροποιήσεις στις συνθήκες στήριξης του φορέα. Τέλος, οι ατέλειες υλικού, καλύπτουν διακυμάνσεις των τιμών των παραμέτρων του υλικού, αλλά και παραμένουσες τάσεις, όπως αυτές προέκυψαν από την φάση κατασκευής των μεταλλικών μελών.

Όλες οι παραπάνω κατηγορίες, εφόσον εμφανίζονται στην πραγματική κατασκευή, και δεν είναι αμελητέες, θα πρέπει να ενσωματώνονται με κάποιο τρόπο στο αριθμητικό προσομοίωμα. Οι ατέλειες, μπορούν να προσομοιωθούν είτε ως ανεξάρτητες ή μια από την άλλη, χρησιμοποιώντας ξεχωριστές τιμές για γεωμετρικές ατέλειες και παραμένουσες τάσεις, είτε ταυτόχρονα εφαρμόζοντας μια τιμή για ισοδύναμες γεωμετρικές ατέλειες, η οποία καλύπτει όλους τους τύπους ατελειών. Έτσι, είναι πολύ σημαντικός ο προσδιορισμός του πλάτους των ισοδύναμων γεωμετρικών ατελειών, και ταυτόχρονα οι προκαθορισμένες και τυποποιημένες τιμές πρέπει πάντα να έχουν ισχυρό επιστημονικό υπόβαθρο.

Όσον αφορά τους τρόπους με τους οποίους εισάγονται οι αρχικές ατέλειες (γεωμετρικές ή ισοδύναμες γεωμετρικές) σε ένα προσομοίωμα, αυτοί είναι οι τρεις παρακάτω:

- Μετρημένο σχήμα ατελειών στον υπό εξέταση φορέα (ισχύει μόνο για γεωμετρικές ατέλειες)
- Σχήμα ατελειών βασισμένο σε προκαθορισμένες τιμές και συναρτήσεις, (επιτρέπεται και για ισοδύναμες γεωμετρικές ατέλειες)
- Σχήματα ατελειών βασισμένα στις ιδιομορφές του φορέα, όπως αυτές προέκυψαν από γραμμική ανάλυση λυγισμού (LBA) (επιτρέπεται για γεωμετρικές και ισοδύναμες γεωμετρικές ατέλειες)

Στην πρώτη επιλογή, το σχήμα των ατελειών προκύπτει από επι τόπου μετρήσεις μέσω laser scanning, ενώ το πλάτος τους εξαρτάται άμεσα από τον στόχο της εφαρμογής. Όταν πρόκειται για επαλήθευση αριθμητικού προσομοιώματος, και εφόσον ελέγχεται ένα συγκεκριμένο δομικό μέλος ή ένα δοκίμιο, τότε οι μετρημένες τιμές (σχήμα και πλάτος) των γεωμετρικών ατελειών μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως έχουν, ταυτόχρονα με παραμένουσες τάσεις. Αντιθέτως, όταν στόχος της υπολογιστικής διαδικασίας είναι ο σχεδιασμός, μέσω αριθμητικού προσομοιώματος, κάνοντας απευθείας έλεγχο αντίστασης, το σχήμα των ατελειών μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως έχει, όμως το πλάτος θα πρέπει να είναι εντός ορίων που ορίζουν οι κανονισμοί, λαμβάνοντας υπόψη τις κατασκευαστικές ανοχές.

Η δεύτερη κατηγορία, αφορά προκαθορισμένες τιμές, όπως αυτές θα παρουσιαστούν στην §2.5.4. Οι τιμές αυτές, έχουν προκύψει εμπειρικά και έπειτα έχουν ενσωματωθεί στους κανονισμούς, καθώς αναπαριστούν τα συνηθέστερα μεγέθη ατελειών που παρατηρούνται μετά την κατασκευή των μελών, και δεν εξαρτώνται από την κατασκευαστική συμπεριφορά, τις παραμορφώσεις και την μορφή αστοχίας. Τέτοιοι είδους ατέλειες, είναι ανεξάρτητες από τις εφαρμοζόμενες συνοριακές συνθήκες αλλά και την καταπόνηση του φορέα. Κατά κύριο λόγο, είναι βασισμένες σε περιγραφή συναρτήσεων, συνήθως «κυματοειδείς» ή τριγωνομετρικές. Παρά την δυσκολία και την πολυπλοκότητα που συναντάται στον ορισμό αυτής της κατηγορίας ατελειών, δίνουν ικανοποιητικές προσεγγίσεις στο πραγματικό σχήμα του

υπό εξέταση φορέα, και ταυτόχρονα, δίνουν κατάλληλες αντοχές της κατασκευής, όταν αυτές συνδυάζονται με παραμένουσες τάσεις.

Η τρίτη κατηγορία, είναι η μόνη που βασίζεται σε ανάλυση που έγινε σε προηγούμενο χρόνο. Συγκεκριμένα, για να εφαρμοστεί αυτός ο τύπος ατελειών, πρέπει πρώτα να γίνει μια γραμμική ανάλυση λυγισμού (LBA), και έπειτα οι ιδιομορφές που θα προκύψουν από αυτήν, να χρησιμοποιηθούν (ως σχήμα) με κατάλληλο πλάτος σαν αρχικές γεωμετρικές ατέλειες. Έτσι, παρέχεται η δυνατότητα χρήσης της χαμηλότερης (συνήθως και δεσπόζουσας) ιδιομορφής να χρησιμοποιηθεί ως σχήμα ατελειών. Η πρακτική αυτή, ορίζεται σε μαθηματική βάση ενώ παράλληλα η τεχνική προσομοίωσης είναι σαφώς ορισμένη και διαδεδομένη σε καθημερινή πρακτική. Σύμφωνα με διεθνή βιβλιογραφία, αλλά και όπως έχει αποδειχθεί, η εφαρμογή ατελειών με βάση τα σχήματα των ιδιομορφών, οδηγεί σε ασφαλή αποτελέσματα και αντοχές. Παρόλα αυτά, υπάρχει πάντα το ενδεχόμενο, η μορφή αστοχίας μιας κατασκευής να διαφέρει από το σχήμα της πρώτης ιδιομορφής, εξαιτίας σημαντικών πλαστικών παραμορφώσεων αλλά και ανακατανομής του φορτίου που συμβαίνει σε προχωρημένες αναλύσεις. Επομένως, είναι σημαντικό, να ελέγχεται η μορφή αστοχίας της κατασκευής που προέκυψε από την μη γραμμική ανάλυση, και να συγκρίνεται με την μορφή αστοχίας που θεωρήθηκε αρχικά. Εάν και εφόσον υπάρχει μεγάλη διαφοροποίηση (π.χ. να αστοχούν διαφορετικά μέλη), θα ήταν χρήσιμο να ερευνηθούν και μεγαλύτερης τάξης ιδιομορφές, και εάν κρίνεται απαραίτητο να υπάρξει συνδυασμός των σχημάτων τους, κατά την εισαγωγή των αρχικών ατελειών.

Εάν χρησιμοποιούνται γεωμετρικές ή ισοδύναμες γεωμετρικές ατέλειες σε μια μη γραμμική ανάλυση, θα πρέπει να υιοθετηθούν οι ατέλειες που αντιστοιχούν σε κάθε εξεταζόμενο τρόπο λυγισμού. Ο γενικός κανόνας είναι ότι αυτά τα προβλήματα σταθερότητας μπορούν να ελεγχθούν απευθείας από το αριθμητικό προσομοίωμα, για κάθε αντίστοιχη μορφή αστοχίας που εφαρμόζεται. Δηλαδή, εάν για παράδειγμα εφαρμόζονται καθολικές ατέλειες ταλάντωσης (sway), ο έλεγχος καθολικού λυγισμού μπορεί να αντικατασταθεί από την μη γραμμική ανάλυση λυγισμού από το προσομοίωμα, και τα υπόλοιπα πιθανά προβλήματα ευστάθειας που μπορεί να προκύψουν, να ελέγχονται χωριστά. Εάν ο χρήστης επιλέξει να διερευνήσει τα διάφορα προβλήματα ευστάθειας μέσω του μοντέλου, θα πρέπει να εφαρμόζονται σχήματα ατελειών, που σχετίζονται με το κάθε ένα πρόβλημα, και έπειτα αυτά να συνδυάζονται κατάλληλα ακολουθώντας του κανόνες, όπως αυτοί θα παρουσιαστούν στο κεφάλαιο 2.6.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, δίνεται η επιλογή στον χρήστη, να λάβει υπόψη του περισσότερες από μια ιδιομορφές, προκειμένου να εφαρμόσει τις αρχικές ατέλειες. Σε αυτή την περίπτωση, θα πρέπει πάντα να εισάγεται στο προσομοίωμα η δυσμενέστερη περίπτωση συνδυασμού ιδιομορφών (απεικονίζοντας ρεαλιστικό συνδυασμό), η οποία κατ' επέκταση οδηγεί στην χαμηλότερη αντοχή του φορέα. Επιπλέον, συνήθως το πλάτος των αρχικών ατελειών μπορεί να εφαρμοστεί προς δύο διευθύνσεις (θετικό ή αρνητικό πρόσημο), οπότε εάν η δυσμενέστερη περίπτωση δεν είναι προφανής, θα πρέπει να γίνεται διερεύνηση· δηλαδή, πρέπει να γίνονται περισσότερες από μια αναλύσεις, χρησιμοποιώντας διαφορετικές κατευθύνσεις και πρόσημο ατελειών, προκειμένου να αξιολογηθεί η επιρροή τους στην απόκριση και την τελική αντίσταση της κατασκευής. Παράλληλα με την διερεύνηση της επίδρασης της κατεύθυνσης των ατελειών στην αντοχή του φορέα, θα πρέπει επίσης να ελέγχεται εάν η εφαρμοζόμενη ατέλεια είναι φυσικά δυνατή ή όχι. Πρέπει να σημειωθεί, πως το πλήθος των ιδιομορφών που θα επιλεγεί για συνδυασμό, δεν είναι αυθαίρετο. Έχουν διεξαχθεί αρκετές έρευνες προκειμένου να βρεθεί ο βέλτιστος αριθμός ιδιομορφών για συνδυασμό, και συνήθως το συμπέρασμα είναι μεταξύ τριών και έξι ιδιομορφών. Το μόνο σίγουρο, είναι πως θα πρέπει το κρίσιμο φορτίο της κάθε ιδιομορφής που πρόκειται να ληφθεί υπόψη, να μην διαφέρει σε μεγάλο βαθμό από το κρίσιμο φορτίο της πρώτης ιδιομορφής (δεσπόζουσας).

Όταν πρόκειται να γίνει χρήση πεπερασμένων στοιχείων για προσομοίωση μεταλλικής κατασκευής, με χάλυβα ψυχρής έλασης, πάλι θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όλων των ειδών οι αρχικές ατέλειες. Η βασική διαφορά όμως, είναι πως κανονιστικά, επιτρέπεται μόνο η χρήση ισοδύναμων γεωμετρικών ατελειών, και όχι των ανεξάρτητων γεωμετρικών ατελειών. Σημειώνεται, πως θα πρέπει να γίνεται χρήση

των ισοδύναμων γεωμετρικών ατελειών ανεξάρτητα τον τύπο ανάλυσης όπως αυτοί διαχωρίστηκαν στην §2.1 (ανάλυση που απαιτεί πρόσθετους ελέγχους σχεδιασμού, και απευθείας έλεγχος αντίστασης). Όσον αφορά φορείς χάλυβα ψυχρής έλασης, ο πρώτος τύπος ανάλυσης είναι συνήθως LA, LBA, GNA ή GNIA με χρήση πεπερασμένων στοιχείων δοκού. Αντιθέτως, όταν πρόκειται για απευθείας έλεγχο αντίστασης του φορέα, επικρατεί η GMNIA με επιφανειακά στοιχεία. Σε αυτή την περίπτωση, προτείνεται η χρήση τετραγραμμικού μοντέλου υλικού (2.4.2. (c)) όπου θα θεωρείται η f_y ίση με την ονομαστική τιμή της τάσης διαρροής. Τονίζεται, ότι μπορεί να γίνει χρήση και της απλοποιημένης μορφής τετραγραμμικού υλικού, εφόσον η δεσπόζουσα ιδιομορφή του φορέα, είναι καθολικός λυγισμός.

2.5.2 Γεωμετρικές ατέλειες

Στόχος των γεωμετρικών ατελειών, όπως ήδη αναφέρθηκε, είναι η αναπαράσταση των γεωμετρικών διακυμάνσεων ενός φορέα, από την τέλεια, ευθεία γεωμετρία, οι οποίες κατά κύριο λόγο γίνονται κατά την φάση κατασκευής. Επομένως, το σχήμα και το πλάτος των γεωμετρικών ατελειών, εξαρτάται άμεσα από την μέθοδο και την τεχνική της παραγωγής των μελών, και άρα κατ' επέκταση η μέγιστη τιμή της, περιορίζεται από τα μέγιστα όρια που ορίζουν οι κατασκευαστές. Προκειμένου να εισαχθούν οι γεωμετρικές ατέλειες σε ένα προσομοίωμα, υπάρχουν οι παρακάτω προτεινόμενες μέθοδοι:

- Εφαρμογή του μετρημένου σχήματος και μεγέθους ατελειών του δομικού μέλους
- Εφαρμογή των προτεινόμενων σχημάτων που δίνονται στην §5.4.4 του EN 1993-1-14, με πλάτος ίσο με το 80% των κατασκευαστικών ορίων (τουλάχιστον $L/1000$)
- Εφαρμογή του σχήματος ιδιομορφής (μέσω LBA) με πλάτος ίσο με το 80% των κατασκευαστικών ορίων (τουλάχιστον $L/1000$)

Το ποσοστό 80%, προτείνεται για εφαρμογή σε συγκολλητές διατομές και μέλη, εκτός αν τα Εθνικά Παραρτήματα ορίζουν διαφορετικές τιμές.

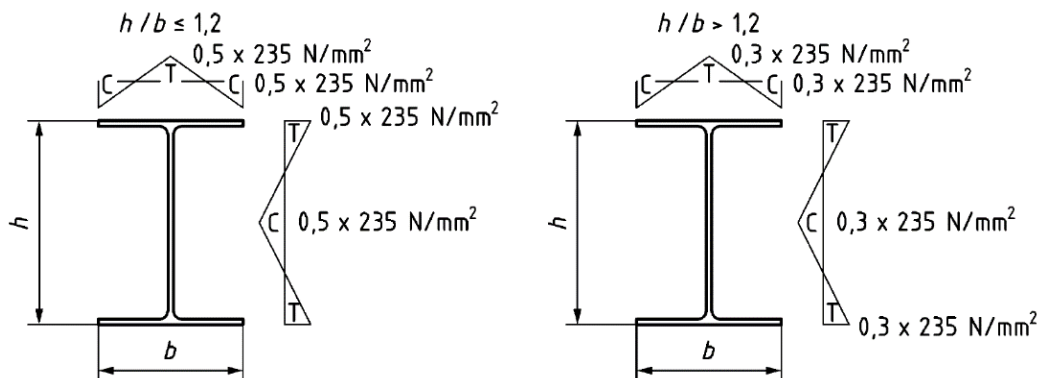
2.5.3 Παραμένουσες τάσεις

Όπως και οι γεωμετρικές ατέλειες, έτσι και οι παραμένουσες τάσεις, γίνονται κατά την διαδικασία παραγωγής των μελών (συγκόλληση, θερμή και ψυχρή έλαση κλπ.). Στο προσομοίωμα, θα πρέπει να αναπαρίστανται από αρχικές τάσεις ή αρχικές παραμορφώσεις (ανάλογα με το λογισμικό), δίνοντας έτσι μια κατάσταση ισορροπίας των εσωτερικών τάσεων στον υπολογισμό, απουσία εξωτερικών δυνάμεων. Στις σημερινές κατασκευές από χάλυβα, οι παραμένουσες τάσεις διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Τις μεμβρανικές τάσεις και τις καμπτικές τάσεις, και διαχωρίζονται κατά κύριο λόγο από τον τρόπο προσομοίωσης τους. Για παράδειγμα, σε συγκολλητά λεπτότοιχα επιφανειακά στοιχεία, δεσπίζουν οι παραμένουσες μεμβρανικές τάσεις. Για συγκολλητές διατομές γενικότερα, η μέγιστη τιμή εφελκυστικής παραμένουσας τάσης μπορεί να ληφθεί ίση με το όριο διαρροή του υλικού, για ποιότητες χάλυβα S235 έως S700. Παράλληλα, η μέγιστη τιμή της θλιπτικής παραμένουσας τάσης, εξαρτάται πλήρως από την διαδικασία παραγωγής που ακολουθείται, καθώς και την γεωμετρία της διατομής. Αντίθετα με την εφελκυστική, το άνω όριο της θλιπτικής τάσης είναι ανεξάρτητο από την ποιότητα του χάλυβα, εξαρτάται όμως από την γεωμετρία του φορέα (π.χ. λόγος πλάτους-πάχους). Οι παραμένουσες καμπτικές τάσεις, κυριαρχούν σε χαλύβδινα μέλη που έχουν υποστεί εν ψυχρώ επεξεργασία, σε σωλήνες, ή σε κοίλες τετραγωνικές διατομές που προέρχονται από σωληνωτές διατομές. Σε αυτή την περίπτωση, οι παραμένουσες τάσεις διαφοροποιούνται μέσω του πάχους του στοιχείου. Σε καθημερινές πρακτικές, υιοθετείται γραμμική μεταβολή των τάσεων, παρά την ευρέως διαδεδομένη γνώση, ότι η κατανομή είναι σαφώς μη γραμμική.

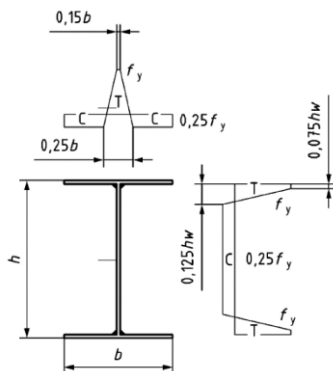
Και οι δύο τύποι παραμενουσών τάσεων, παίζουν καθοριστικό ρόλο τόσο στην απόκριση της κατασκευής, όσο και στην αντοχή έναντι λυγισμού. Εξ ου και ο κανόνας πως στους μεταλλικούς φορείς ψυχρής έλασης εφαρμόζονται μόνο ισοδύναμες γεωμετρικές ατέλειες, και όχι ανεξάρτητες γεωμετρικές (βλ. §2.5.1). Επιπλέον, αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο περισσότερες από μία ιδιομορφές, χρησιμοποιούνται προκειμένου να γίνει έλεγχος αντίστασης έναντι λυγισμού, που εξαρτάται από τις

διαφορετικές διαδικασίες παραγωγής των μελών. Σε κάθε περίπτωση, στο αριθμητικό προσομοίωμα, οι παραμένουσες τάσεις πρέπει να εισάγονται αξιοποιώντας ένα σύστημα ισορροπίας τάσεων, λαμβάνοντας υπόψη τις αρχικές τάσεις/παραμορφώσεις, ή εφαρμόζοντας θερμοκρασιακά φορτία που έχουν το ίδιο αποτέλεσμα. Εάν δεν ισορροπούν οι παραμένουσες τάσεις στο προσομοίωμα, τότε τα πεπερασμένα στοιχεία παραμορφώνονται, δηλαδή οι αρχικές γεωμετρικές ατέλειες θα τροποποιηθούν εξαιτίας των παραμενουσών τάσεων, το οποίο έπειτα θα οδηγήσει σε μεταβολή της τελικής αντίστασης του εξεταζόμενου φορέα.

Τα συστήματα ισορροπίας τάσεων, που αναφέρθηκαν παραπάνω, για διατομές διπλού ταυ (ελατές και συγκολλητές), συγκολλητές κιβωτιοειδείς, κοίλες κυκλικές και ορθογωνικές διατομές, λαμβάνονται σύμφωνα με τα Σχήμα 2-6, έως Σχήμα 2-9 και τον Πίνακα 2-2.

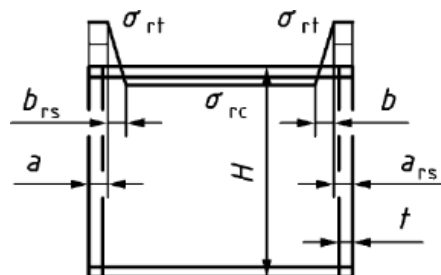


Σχήμα 2-6: Παραμένουσες τάσεις για ελατές διατομές διπλού ταυ

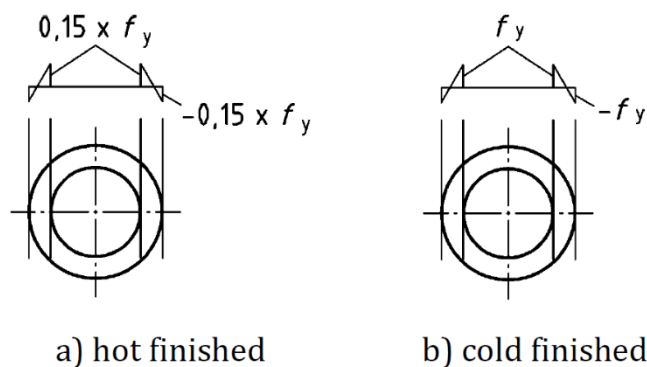


Σχήμα 2-7: Παραμένουσες τάσεις για συγκολλητές διατομές διπλού ταυ

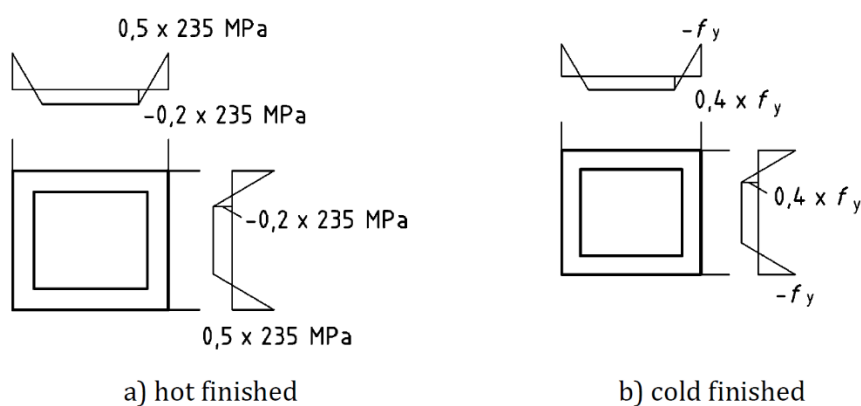
H/t	Welding type	σ_{rt}/f_y	σ_{rc}/f_y	a_{rs}	b_{rs}
10	-	1,0	-0,60	0	from equilibrium
20	Heavy weld	1,0	-0,82	3t	3t
20	Light weld	1,0	-0,29	1.5t	1.5t
40	Heavy weld	1,0	-0,29	3t	3t
40	Light weld	1,0	-0,13	1.5t	1.5t



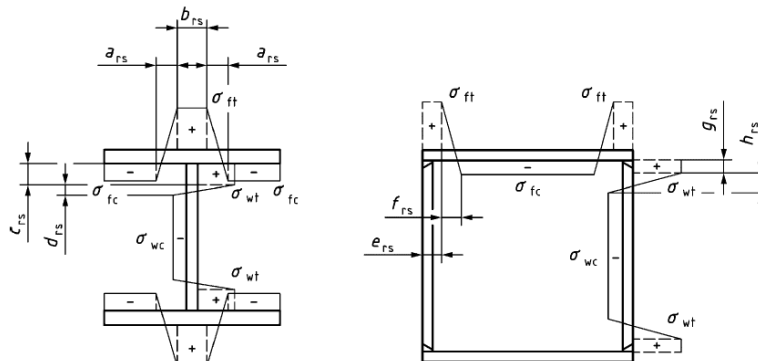
Πίνακας 2-2: Παραμένουσες τάσεις για συγκολλητές κιβωτιοειδείς διατομές



Σχήμα 2-8: Παραμένουσες τάσεις για κοίλες κυκλικές διατομές (CHS)



Σχήμα 2-9: Παραμένουσες τάσεις για κοίλες ορθογωνικές διατομές (RHS)



Σχήμα 2-10: Παραμένουσες τάσεις για συγκολλητές διατομές ανοξείδωτου χάλυβα

Predictive model		$\sigma_{ft} = \sigma_{wt}$	$\sigma_{fc} = \sigma_{wc}$	a_{rs}	b_{rs}	c_{rs}	d_{rs}
Austenitic	welded	$0,8f_y$	from equilibrium	$0,225b_f$	$0,05b_f$	$0,025h_w$	$0,225h_w$
Duplex, Ferritic		$0,6f_y$					
Austenitic, Duplex, Ferritic	laser welded	$0,5f_y$	from equilibrium	$0,1b_f$	$0,075b_f$	$0,0375h_w$	$0,1h_w$

Πίνακας 2-3: Τιμές παραμενουσών για συγκολλητές διατομές διπλού ταυ ανοξείδωτου χάλυβα

Predictive model	$\sigma_{ft} = \sigma_{wt}$	$\sigma_{fc} = \sigma_{wc}$	e_{rs}	f_{rs}	g_{rs}	h_{rs}
Austenitic	$0,8f_y$	from equilibrium	0 for $b_w/t(b_f/t) < 20$	$5t_f$	0 for $b_w/t(b_f/t) < 20$	$5t_w$
Duplex, Ferritic	$0,6f_y$		$t_w + 0,025c_f$ for $b_w/t(b_f/t) \geq 20$		$0,025h_w$ for $b_w/t(b_f/t) \geq 20$	

Πίνακας 2-4: Τιμές παραμενουσών τάσεων για συγκολλητές κιβωτιοειδείς διατομές ανοξείδωτου χάλυβα

Η τελευταία μέθοδος προσομοίωσης και εφαρμογής των παραμενουσών τάσεων, βασίζεται στο ήδη αναφερθέν γεγονός πως η τιμή και το σχήμα των παραμενουσών τάσεων, εξαρτάται άμεσα από την διαδικασία παραγωγής των χαλύβδινων μελών. Νέες και πρωτοποριακές πρακτικές μεθόδων παραγωγής μπορούν να ληφθούν υπόψη στο σχεδιασμό, απευθείας μέσω της εφαρμογής τους στο αριθμητικό προσομοίωμα. Έτσι, παραμένουσες τάσεις, βασιζόμενες σε εργαστηριακές δοκιμές μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν στον σχεδιασμό μέσω προσομοιωμάτων. Όμως, αυτή η μέθοδος, είναι εφαρμόσιμη αποκλειστικά σε μεθόδους απευθείας ελέγχου αντίστασης και αριθμητικών προσομοιωμάτων προκειμένου να γίνει επέκταση ή αντικατάσταση πειραματικών δεδομένων.

2.5.4 Ισοδύναμες γεωμετρικές ατέλειες

Οι ισοδύναμες ατέλειες, αποτελούν τον δεύτερο τρόπο εισαγωγής ατελειών στον φορέα, και σκοπός τους είναι η ενσωμάτωση πολλών ειδών ατελειών και παραμενουσών τάσεων σε μια τιμή που ορίζεται κανονιστικά. Έτσι, το μέρος 1-14 του ΕΚ3, ένα σύστημα ταξινόμησης των ισοδύναμων γεωμετρικών ατελειών, βασισμένο στον υπό εξέταση φορέα, και εφαρμόσιμο στην ατελή γεωμετρία του. Σύμφωνα με αυτό το σύστημα, οι ισοδύναμες γεωμετρικές ατέλειες κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- Ισοδύναμες γεωμετρικές ατέλειες για τον καθολικό φορέα (global structures) (π.χ. πλαίσια),
- Ισοδύναμες γεωμετρικές ατέλειες για δομικά μέλη,
- Ισοδύναμες γεωμετρικές ατέλειες για διατομές (μορφής πλάκας),
- Ισοδύναμες γεωμετρικές ατέλειες για επιφανειακούς φορείς (shell structures).

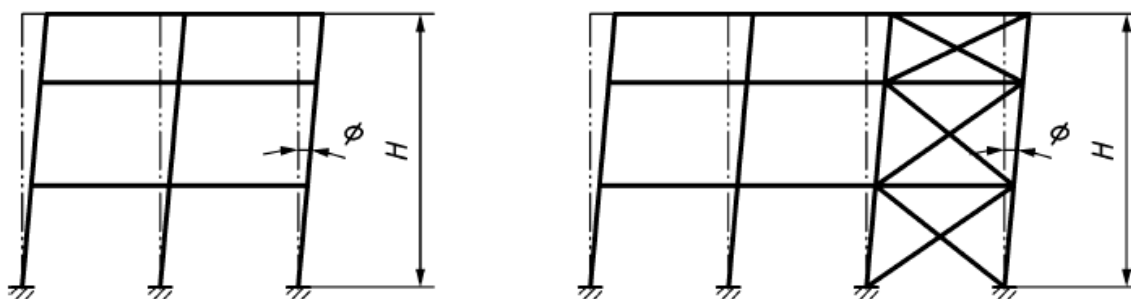
Το σύστημα αυτό, ακολουθεί κατά κύριο λόγο την στρατηγική πίσω τους ελέγχους έναντι λυγισμού που πραγματοποιούνται στις μεταλλικές κατασκευές. Δηλαδή:

- Καθολικός έλεγχος ευστάθειας (π.χ. καθολικός λυγισμός μεταθετών πλαισίων)
- Έλεγχος ευστάθειας μέλους (π.χ. καμπτικός λυγισμός, στρεπτοκαμπτικός λυγισμός)
- Έλεγχος λυγισμού στοιχείου πλάκας, ο οποίος συνήθως ανήκει σε ελέγχους επιπέδου διατομής (π.χ. τοπικός και καθολικός λυγισμός ενισχυμένης ή όχι πλακών)
- Λυγισμός επιφανειακών στοιχείων.

Παρά την παραπάνω διακριτοποίηση των ελέγχων, η ανάγκη για εισαγωγή του συστήματος ταξινόμησης γεννάται όχι μόνο στον διαχωρισμό των ατελειών βάσει προβλημάτων ευστάθειας, αλλά κυρίως επειδή είναι η βάση για τους κανόνες συνδυασμούς ατελειών, όπως αυτοί θα παρουσιαστούν παρακάτω.

Βασική κατηγορία ισοδύναμων γεωμετρικών ατελειών, αποτελούν οι καθολικές ισοδύναμες γεωμετρικές ατέλειες, οι οποίες συμβολίζονται με το γράμμα φ. Αυτές, λαμβάνονται από τον κανονισμό EN 1993-1-1:2022, 7.3.2. Αυτή η μορφή ατελειών, αναφέρεται σε πλαίσια ευαίσθητα έναντι καθολικού λυγισμού (μεταθετά), όπως φαίνεται από το Σχήμα 2-11. Στο αριθμητικό προσομοίωμα, εισάγονται στην καθολική ανάλυση υπό τη μορφή μια αρχικής καθολικής μετάθεσης του πλαισίου. Στόχος, είναι η αναπαράσταση των αποτελεσμάτων των ατελειών, συμπεριλαμβανομένου των παραμενουσών τάσεων και των ανεξάρτητων γεωμετρικών ατελειών, όπως απώλεια καθετότητας μέλους, εκκεντρότητες

μεγαλύτερες των κατασκευαστικών ανοχών κλπ. Σύμφωνα με τον ΕΚ3, μέρος 1-1, η αρχική ατέλεια ϕ , πρέπει να εισάγεται σε όλες τις σχετικές οριζόντιες κατευθύνσεις της κατασκευής, αλλά πρέπει να λαμβάνεται υπόψη μόνο σε μία κατεύθυνση την φορά.



Σχήμα 2-11: Καθολικές ατέλειες πλαισίου σύμφωνα με EN3-1-1 7.3.2

Η τιμές τις αρχικής ατέλειας ϕ , λαμβάνονται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\phi = \phi_0 \cdot \alpha_H \cdot \alpha_m$$

Όπου:

ϕ_0 η βασική τιμή ατελειών:

$\phi_0 = 1/400$ για επαλήθευση ελαστικής αντοχής διατομών και μελών

$\phi_0 = 1/200$ για επαλήθευση πλαστικής αντοχής διατομών και μελών

α_H είναι ο μειωτικός συντελεστής ύψους H (σε m), με

$$\alpha_H = \frac{2}{\sqrt{H}} \quad \text{αλλά } \alpha_H \leq 1.0$$

α_m ο μειωτικός συντελεστής για τα αμετάθετα υποστυλώματα, με

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \left(1 + \frac{1}{m} \right)}$$

m το πλήθος υποστυλωμάτων σε μια σειρά, τα οποία φέρουν ένα κατακόρυφο φορτίο N_{Ed} όχι μικρότερο από το 50% της μέσης τιμής όλων των υποστυλωμάτων στο κατακόρυφο επίπεδο που ελέγχεται.

Δεύτερη κατηγορία ισοδύναμων γεωμετρικών ατελειών, είναι εκείνες που αναφέρονται όχι καθολικά, αλλά ξεχωριστά στα δομικά μέλη ενός φορέα. Το μέγεθος αυτών των ατελειών, εξαρτάται άμεσα από τον επιλεγόμενο τύπο ανάλυσης και μεθόδου ελέγχου αντοχής. Εφόσον γίνεται χρήση μεθόδων που απαιτούν περεταίρω υπολογισμού για σχεδιασμό (βλ. Σχήμα 2-1), οι ισοδύναμες γεωμετρικές ατέλειες, μπορούν να ληφθούν από τον ΕΚ3, μέρη 1-1:2022 7.3.3, ή το μέρος 2, ή σε οποιοδήποτε άλλο μέρος του ΕΚ3 στο οποίο ορίζονται οι ισοδύναμες γεωμετρικές ατέλειες. Επομένως, γίνεται χρήση αυτών των τιμών, εάν πραγματοποιείται απευθείας έλεγχος αντίστασης έναντι λυγισμού χρησιμοποιώντας αναλύσεις με μη γραμμικότητα γεωμετρίας και αρχικές ατέλειες (GNIA) ή δευτέρας τάξης πλαστικές αναλύσεις δομικών μελών. Αξίζει να σημειωθεί, πως το πλάτος των ατελειών που δίνεται από τα μέρη EN1993-1-1 ή EN1993-2, έχουν βαθμονομηθεί έναντι των καμπυλών λυγισμού, εφαρμόζοντας GNI Analysis. Επομένως, εξασφαλίζεται ακριβής απεικόνιση της αντίστασης της κατασκευής, εφόσον γίνεται χρήση αυτών των τιμών ατελειών, σε συνδυασμό με GNIA, για έλεγχο έναντι λυγισμού.

Αντιθέτως, εάν ο σχεδιασμός ενός φορέα γίνεται μέσω μεθόδων απευθείας εύρεσης της τελικής αντίστασης (GMNIA), η βαθμονόμηση των τιμών των ισοδύναμων γεωμετρικών ατελειών, γίνεται μέσω διαφορετικών μεθόδων. Πιο συγκεκριμένα, διεξάγονται διαφορετικές μέθοδοι για καμπτικό λυγισμό, πλευρικό-στρεπτικό λυγισμό, και λυγισμό επιφανειακών μελών (πλακών). Στο παρόν κείμενο, δεν θα

παρουσιάζεται ολόκληρο το επιστημονικό υπόβαθρο πίσω από την εύρεση αυτών των τιμών. Παρακάτω δίνεται η σχέση υπολογισμού ισοδύναμων γεωμετρικών ατελειών για καμπτικό λυγισμό, σχήματος τόξου ή μισού κύματος, ή και για ατέλειες μέσω ιδιομορφών.

$$e_0 = \frac{\alpha L}{150} \quad \text{αλλά} \quad e_0 \geq \frac{L}{1000}$$

όπου:

L το μήκος του μέλους

α ο συντελεστής ατελειών, σύμφωνα με τον EN1993-1-1 ή EN1993-1-4

Όσον αφορά τον πλευρικό στρεπτικό λυγισμό μέλους, η τιμή των ισοδύναμων γεωμετρικών ατελειών, ακολουθεί την σχέση:

$$e_0 = \alpha \cdot L \cdot \beta_{LT} \quad \text{αλλά} \quad e_0 \geq \frac{L}{1000}$$

όπου:

α ο συντελεστής ατελειών για καμπτικό λυγισμό περί τον ασθενή άξονα

β_{LT} ο συντελεστής σχετικής ατέλειας μορφής τόξου, για πλευρικό στρεπτικό λυγισμό, σύμφωνα με τον Πίνακα 2-5.

Shape	β_{LT}
bow	combination of 1/150 (half-sine wave) and 1/215 (full sine wave)
buckling shape	1/150

Πίνακας 2-5: Συντελεστής σχετικής ατέλειας μορφής τόξου

Για τον υπολογισμό του πλάτους ισοδύναμων ατελειών, όταν πρόκειται για ιδιομορφές με τοπικούς λυγισμούς (distortional buckling modes), πρέπει να γίνεται με χρήση της σχέσης:

$$e_{0,dist} = 0,3 \cdot t \cdot \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr,d}}}$$

όπου:

t το πάχος,

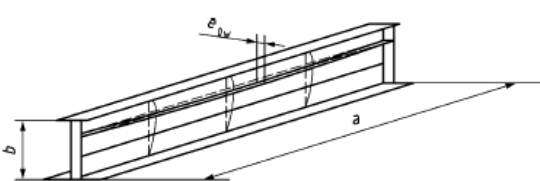
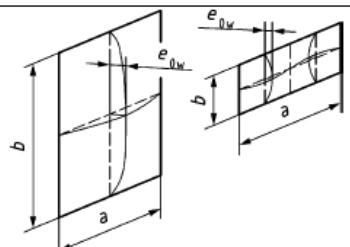
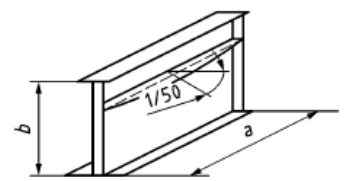

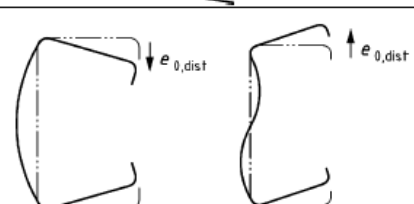
f_{yb} η βασική τάση διαρροής όπως αυτή ορίζεται από τον EN1993-1-3,

$\sigma_{cr,d}$ η ελαστική κρίσιμη τάση τοπικού λυγισμού

Η τρίτη κατηγορία του συστήματος των ισοδύναμων γεωμετρικών ατελειών, αφορά τις ατέλειες σε επίπεδο διατομής μορφής πλάκας. Οι τιμές της, μπορούν να λαμβάνονται σύμφωνα με τους Πίνακες 2-6 και Πίνακας 2-7.

Component/type of imperfection	Shape	Magnitude
longitudinal stiffener with length a	bow	$\min (a/400, b/400)$
panel or sub-panel with short span a or b	buckling shape	$\min (a/200, b/200)$
stiffener or flange subject to twist	bow twist	$1 / 50$
outstand elements for cold-formed structures – local	buckling shape	$b / 125$
outstand elements for cold-formed structures – distortional	buckling shape	see Formula (5.17)

Πίνακας 2-6: Ισοδύναμες γεωμετρικές ατέλειες για διατομές μορφής πλάκας (α)

Type of imperfection	Component
longitudinal stiffener with length a	
panel or sub-panel	
stiffener or flange subject to twist	
local buckling of outstand elements for cold-formed structures	
distortional buckling of cold-formed sections	

Πίνακας 2-7: Ισοδύναμες γεωμετρικές ατέλειες για διατομές μορφής πλάκας (β)

Ως εναλλακτική, αντί για συγκεκριμένες τιμές ισοδύναμων γεωμετρικών ατελειών, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει να τις αντικαταστήσει με κατάλληλες ιδεατές δυνάμεις, οι οποίες θα ασκούνται στο μέλος. Το μέγεθος αυτών των δυνάμεων τόσο για ατέλειες πλαισίου όσο και για ατέλειες μέλους, μορφής τόξου, θα πρέπει να λαμβάνονται σύμφωνα με τους όρους που ορίζονται στις παραγράφους EN 1993-1-1:2022, 7.3.2 και 7.3.3. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι ισοδύναμες ατέλειες μέλους που προτείνονται στο EN1993-1-

3, είναι συνεπείς με τη συγκεκριμένη διατύπωση που υιοθετείται από τον κώδικα EN1993-1-14, για τον έλεγχο έναντι λυγισμού. Πιο συγκεκριμένα, οι αρχικές ατέλειες του μέλους προέκυψαν με τέτοιο τρόπο ώστε όταν εφαρμόζονται στο μοντέλο ενός ομοιόμορφου μέλους σε αξονική θλίψη, μια ανάλυση 2^{ας} τάξης, έχει ως αποτέλεσμα την ίδια αντοχή σε θλίψη με την αντοχή που προκύπτει βάσει EN1993-1-3. Τέλος, για στοιχεία κελύφους (shell elements), θα πρέπει να επιλέγονται ισοδύναμες γεωμετρικές ατέλειες όπως ορίζονται στο EN 1993-1-6, ανάλογα με την κατηγορία ποιότητας της κατασκευής.

2.5.5 Συνδυασμός ατελειών

Όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα, οι ισοδύναμες γεωμετρικές ατέλειες, ακολουθούν μια κατηγοριοποίηση με βάσει το είδος της ατέλειες που πρόκειται να προσομοιωθεί, ενώ παράλληλα ονομάζονται ισοδύναμες, καθώς στην κάθε τιμή, συμπεριλαμβάνεται η δράση γεωμετρικών ατελειών και παραμενουσών τάσεων ταυτόχρονα. Υπάρχουν πολλές περιπτώσεις όπου στο ίδιο προσομοίωμα, πρέπει να εισαχθούν περισσότερες από μια τιμές ισοδύναμων γεωμετρικών ατελειών, προκειμένου να διερευνηθεί η ευστάθεια του φορέα κατά την αλληλεπίδραση των ατελειών. Τότε, θα πρέπει να αποφεύγεται ο «διπλασιασμός» του αποτελέσματος των παραμενουσών τάσεων, αφού λαμβάνονται υπόψη πολλές φορές, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε συντηρητικά αποτελέσματα αντοχών. Έτσι, κρίνεται απαραίτητο, να οριστούν κάποιοι κανόνες συνδυασμών ατελειών, οι οποίοι είναι ιδιαίτερα σημαντικοί. Αντιθέτως, εάν στον φορέα εισάγονται ανεξάρτητα οι γεωμετρικές ατέλειες και οι παραμενουσες τάσεις, τότε οι γεωμετρικές ατέλειες αναπαριστούν όλες τις πιθανές αποκλίσεις από τον τέλειο φορέα, και θα πρέπει το πλάτος τους και το σχήμα τους, να λαμβάνεται σύμφωνα με όσα περιγράφηκαν στην παράγραφο 2.5.2. Δηλαδή, κατά τον συνδυασμό ατελειών μέσω γεωμετρικών ατελειών, και ανεξάρτητων παραμενουσών τάσεων, δεν υπάρχουν κανόνες συνδυασμού, και κάθε τιμή εισάγεται όπως ακριβώς αυτή ορίζεται κανονιστικά. Πρέπει να σημειωθεί όμως, πως ακόμη και σε αυτή την περίπτωση, θα πρέπει να διερευνώνται όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί, και τελικά να λαμβάνεται εκείνος που οδηγεί στην δυσμενέστερη περίπτωση, δηλαδή στην χαμηλότερη αντοχή του φορέα. Οι κατηγορίες ατελειών, όπως αυτές ορίζονται στην παράγραφο 2.5.4, αποτελούν την βάση των κανόνων συνδυασμού ατελειών. Επιπλέον, όπου χρησιμοποιούνται ισοδύναμες γεωμετρικές ατέλειες, που προκύπτουν από διαφορετικές υπο-ομάδες (π.χ. ατέλειες πλαισίου, ατέλειες μελών και ατέλειες διατομή), κάθε ατέλεια πρέπει να λαμβάνεται υπόψη με το μέγιστο πλάτος της, και να προστίθενται γραμμικά. Κατά αυτό τον τρόπο, παρέχεται ένας ασφαλής σχεδιασμός.

Όσον αφορά τις ισοδύναμες ατέλειες για διατομές μορφής πλάκας, είναι απαραίτητοι κάποιοι κανόνες συνδυασμών, αφού οι αρχικές ατέλειες παίζουν καθοριστικό ρόλο στην τελική αντίσταση της διατομής. Έτσι, οι δεδομένοι κανόνες σχεδιασμού είναι ότι η κύρια (δεσπόζουσα) μορφή ατέλειας εφαρμόζεται σε ποσοστό 100% της κανονιστικής τιμής, ενώ όλες οι υπόλοιπες που επιλέγει ο χρήστης για συνδυασμό, εισάγονται σε ποσοστό 70%. Σημειώνεται πως και εδώ θα πρέπει να γίνεται διερεύνηση της κύριας μορφής ατέλειας, οπότε κάθε τύπος ατέλειας θα πρέπει να ελέγχεται ως κύρια μορφή, και τελικά να επιλέγεται εκείνος ο συνδυασμός που προκαλεί την δυσμενέστερη περίπτωση.

Τέλος, για τον συνδυασμό ατελειών σε φορείς χάλυβα ψυχρής έλασης, το μέγεθος ισοδύναμης ατέλειας μέλους, μπορεί να μειωθεί στην αντίστοιχη τιμή ανεξάρτητης γεωμετρικής ατέλειας $L/1000$, όταν αυτή συνδυάζεται με τοπικές ισοδύναμες ατέλειες. Καθώς οι διατομές ψυχρής έλασης, είναι αρκετά ευάλωτες σε μορφές λυγισμού, συνίσταται η δοκιμή διαφορετικών συνδυασμών τοπικών και παραμορφωτικών (distortional) ατελειών, προκειμένου να βρεθεί η δυσμενέστερη περίπτωση. Παράλληλα, συνιστώνται οι έλεγχοι συνδυασμών αυτών των ατελειών, με ατέλειες μέλους (απώλεια ευθύτητας κ.λπ.), χωρίς όμως να είναι απαραίτητος ο συνδυασμός τους σε δύο διαφορετικές κατευθύνσεις.

3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ

3.1 Γενικές απαιτήσεις ανάλυσης

Όλες οι παραπάνω αρχές σχεδιασμού που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 2, αφορούν αποκλειστικά την σωστή και ακριβής εισαγωγή της γεωμετρίας του προσομοιώματος, των υλικών του, αλλά και όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους σχεδιασμού. Το επόμενο απαραίτητο βήμα, κατά την ανάλυση μεταλλικών κατασκευών βάσει πεπερασμένων στοιχείων, είναι η επιλογή του είδους ανάλυσης, προκειμένου να προβλεφθεί η επαρκής και σωστή απόκριση και αντοχή του φορέα. Ιδιαίτερη προσοχή θα δοθεί κατά κύριο λόγο στις μη γραμμικές αναλύσεις, καθώς εκείνες είναι που απαιτούν την υπολογιστική ισχύ, αλλά και τις προχωρημένες δυνατότητες του λογισμικού.

Εφόσον η σχέση μεταξύ φόρτισης, κατασκευής και απόκρισης, είναι γραμμική, τότε ολόκληρη η συμπεριφορά του φορέα θεωρείται γραμμική, και παράλληλα η ανάλυση που γίνεται για σχεδιασμό, θεωρείται και αυτή γραμμική. Στην περίπτωση, που οποιαδήποτε παράμετρος δεν έχει γραμμική συμπεριφορά, τότε τόσο η συμπεριφορά όσο και η ανάλυση, χαρακτηρίζονται ως μη γραμμικές. Ως γνωστόν, τα αποτελέσματα των μη γραμμικών αναλύσεων, είτε αυτά είναι η παραμόρφωση του φορέα είτε οι εξαγόμενες αντοχές του, είναι αρκετά ευαίσθητα στις ρυθμίσεις που δίνονται από τον χρήστη στο λογισμικό, προκειμένου να διεξαχθεί η μη γραμμική ανάλυση. Οι ρυθμίσεις επίλυσης, όπως αυτές ονομάζονται, οι οποίες πρέπει να ορίζονται κατάλληλα, με στόχο την ορθή πρόβλεψη αποτελεσμάτων από το λογισμικό, είναι οι παρακάτω:

- Ενεργοποίηση μεγάλων γεωμετρικών μη γραμμικοτήτων (μεγάλες μετατοπίσεις και παραμορφώσεις)
- Εφαρμογή ιδιοτήτων μη γραμμικών υλικών
- Επιλογές καθορισμού της εφαρμογής φορτίου (βήμα άσκησης του φορτίου)
- Ενεργοποίηση προέντασης, εάν αυτό απαιτείται
- Επιλογή του επιλυτή και ρύθμιση του
- Επιλογές για αριθμητική σταθεροποίηση του προσομοιώματος

Αξίζει να σημειωθεί, πως στην παραπάνω κατηγοριοποίηση, η χρήση του όρου φορτίο ή φόρτιση, αναφέρεται είτε σε επιβολή δύναμης είτε μετατόπισης. Κάθε μια από τις παραπάνω ρυθμίσεις που πρέπει να καλύπτει το λογισμικό, είναι εξίσου σημαντική, όμως απαιτείται μια ιδιαίτερη προσοχή στο βήμα άσκησης του φορτίου, το οποίο κατ' επέκταση, επηρεάζει την σύγκλιση των εσωτερικών επιλύσεων που γίνονται στο λογισμικό. Μικρότερο βήμα, και προσαρμογή του βήματος μπορεί να επηρεάζει θετικά την

σύγκλιση και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Στις μη γραμμικές αναλύσεις, κάθε βήμα απαιτεί πολλαπλές επαναλήψεις, έως ότου το λογισμικό βρει λύση. Κάθε επανάληψη εμπεριέχει την επίλυση μικρότερων προβλημάτων και εξισώσεων, τα οποία προοδευτικά προχωρούν προς το τελικό αποτέλεσμα, το οποίο ικανοποιεί όλες τις εξισώσεις ισορροπίας του φορέα. Η ακρίβεια της επίλυσης εξαρτάται από τα προκαθορισμένα κριτήρια σύγκλισης, τα οποία τελικά καθορίζουν και τότε θα ολοκληρωθεί μια επιτυχημένη επίλυση του συστήματος. Έτσι, ένα λογισμικό χρήσης πεπερασμένων στοιχείων για μη γραμμικές αναλύσεις, θα πρέπει να μπορεί να ελέγξει τουλάχιστον δύο από τα παρακάτω κριτήρια:

- i. Σύγκλιση φορτίου
- ii. Σύγκλιση μετατοπίσεων
- iii. Σύγκλιση στροφών
- iv. Σύγκλιση ροπών

Τα δύο τελευταία κριτήρια, στροφών και ροπών, απαιτούνται μόνο σε προσομοιώματα όπου γίνεται χρήση στοιχείων δοκού ή επιφανειακών (shell), σε πλαίσια συστήματα.

Για την επιλογή του βήματος φόρτισης του φορέα θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τέσσερις παράμετροι:

1. Ένα μικρό αρχικό βήμα, μπορεί να εξασφαλίσει καλύτερη σύγκλιση στην αρχή των υπολογισμών, ειδικά εάν γίνεται χρήση στοιχείων επαφής (contact elements),
2. Η χρήση μικρού βήματος, συνήθως αυξάνει τον χρόνο επίλυσης του συστήματος,
3. Η χρήση σχετικά μεγάλου βήματος, συνήθως οδηγεί σε αποτελέσματα ακατάλληλα για το κρίσιμο φορτίο
4. Κατά την γραμμική φάση του δρόμου ισορροπίας του φορέα, μπορεί να γίνει χρήση μεγαλύτερου βήματος φόρτισης για μικρότερο χρόνο επίλυσης, αλλά θα πρέπει έπειτα να μικρύνει την στιγμή που οι μη γραμμικότητες γίνονται εμφανείς

Οι βασικές πηγές μη γραμμικής συμπεριφοράς του φορέα προκύπτουν από:

- Γεωμετρική μη γραμμικότητα (μεγάλες μετατοπίσεις ή και παραμορφώσεις)
- Μη γραμμικότητα υλικού και διαρροής του (σχέση τάσεων-παραμορφώσεων)
- Τοπολογική μη γραμμικότητα (αλλαγή συνθηκών στήριξης)

Το επιλεγόμενο λογισμικό, θα πρέπει να έχει την δυνατότητα να προσομοιώσει και επαρκώς μεγάλες μετατοπίσεις σχετικά με την γεωμετρία του φορέα, αφού οι αιτίες που προκαλούν την μη γραμμικότητα γεωμετρίας, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όταν πρόκειται να επιλεχθεί ο τύπος ανάλυσης που θα αναπαραστήσει με μεγαλύτερη ακρίβεια την συμπεριφορά της κατασκευής. Εφόσον επέλθει κάποια αλλαγή στις συνθήκες στήριξης του φορέα, τότε σημαίνει πως εμφανίζονται τοπολογικές μη γραμμικότητες. Αυτές, συνήθως σχετίζονται με τις σημαντικές παραμορφώσεις του φορέα, εξαιτίας της μη γραμμικότητας γεωμετρίας. Τέλος, εφόσον ο νόμος του υλικού, δηλαδή η σχέση τάσεων παραμορφώσεων, είναι μη γραμμική, τότε γίνεται αναφορά για μη γραμμικότητα υλικού. Θα πρέπει να υπάρχει σαφής διαχωρισμός γραμμικών και μη γραμμικών υλικών, στις δυνατότητες του προγράμματος.

Εφόσον τίποτα από τα παραπάνω, δεν εμφανίζεται στο προσομοίωμα και στην συμπεριφορά αυτού, και άρα κανενός είδους μη γραμμικότητα δεν δημιουργείται ή καλύπτεται από τους κανονισμούς σχεδιασμού, τότε μπορεί να γίνει χρήση γραμμικής ανάλυσης. Αντιθέτως, ακόμη και ένας τύπος μη γραμμικότητας να εμφανιστεί, θα πρέπει να εφαρμοστεί μη γραμμική ανάλυση. Στην περίπτωση όμως που χρησιμοποιηθεί γραμμική ανάλυση, η αρχή της επαλληλίας είναι εφαρμόσιμη και η λύση του συστήματος, ανεξάρτητη από την διαδικασία επιβολής του φορτίου. Αντιθέτως, θα πρέπει να διεξάγεται ξεχωριστή μη γραμμική ανάλυση για κάθε είδους φόρτιση ή συνδυασμού φορτίσεων.

3.2 Τύποι αναλύσεων

Κάθε φορέας είναι μοναδικός, επομένως θα πρέπει πάντα ο τύπος της ανάλυσης που επιλέγεται από τον χρήστη, να αντικατοπτρίζει το υπό εξέταση πρόβλημα. Συγκεντρωτικά, όλοι οι τύποι αναλύσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-1.

Τύποι αναλύσεων	Παραμορφώσεις	Νόμος Υλικού	Γεωμετρία
Γραμμική Ανάλυση (LA)	Γραμμικές	Γραμμικός ελαστικός	Τέλεια
Γραμμική ανάλυση λυγισμού (LBA)	Γραμμικές	Γραμμικός ελαστικός	Τέλεια
Ανάλυση με μη γραμμικότητα υλικού (MNA)	Γραμμικές	Ελαστο-πλαστικός	Τέλεια
Ανάλυση με μη γραμμικότητα Γεωμετρίας (GNA)	Μη γραμμικές	Γραμμικός ελαστικός	Τέλεια
Ανάλυση με μη γραμμικότητα Γεωμετρίας και Υλικού (GMNA)	Μη γραμμικές	Μη γραμμικός	Τέλεια
Ανάλυση με μη γραμμικότητα Γεωμετρίας και αρχικές ατέλειες (GNIA)	Μη γραμμικές	Γραμμικός ελαστικός	Ατελής
Ανάλυση με μη γραμμικότητα Γεωμετρίας και Υλικού με αρχικές ατέλειες (GMNIA)	Μη γραμμικές	Μη γραμμικός	Ατελής

Πίνακας 3-1: Τύποι αναλύσεων

3.2.1 Γραμμική Ανάλυση (LA)

Πρόκειται για έναν τύπου ανάλυσης ο οποίος προβλέπει την συμπεριφορά του φορέα βασισμένη σε μικρές μετατοπίσεις και τάσεις, αλλά και σε γραμμικά ελαστικό υλικό. Επιπλέον, γεωμετρία του φορέα δεν εμπεριέχει ατέλειες, επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να προσδιορίσει εσωτερικά εντατικά μεγέθη, τάσεις και παραμορφώσεις του φορέα. Συνήθως, όπως περιγράφηκε στην §2.1 εφαρμόζεται σε αριθμητικούς υπολογισμούς για σχεδιασμό, οι οποίοι απαιτούν πρόσθετους ελέγχους. Τα αποτελέσματα της γραμμικής ανάλυσης δεν λαμβάνουν υπόψη φαινόμενα 2^{ας} τάξης, μεγάλες μετατοπίσεις και μη γραμμικότητες υλικού, οπότε αυτά είναι που θα πρέπει να ελέγχονται σε μετέπειτα στάδιο.

3.2.2 Γραμμική ανάλυση λυγισμού (LBA)

Η γραμμική ανάλυση λυγισμού, αποσκοπεί στην πρόβλεψη των ιδιομορφών και τον ιδιοτιμών της κατασκευής, σύμφωνα με τις οποίες ο φορέας θα παραμορφωθεί, υποθέτοντας πως δεν θα επέλθει κάποια αλλαγή στην γεωμετρία πριν τον λυγισμό, ή κάποια αλλαγή κατεύθυνσης του φορτίου. Όλων των ειδών οι ατέλειες αγνοούνται, ενώ παράλληλα γίνεται χρήση ελαστικού υλικού. Η ανάλυση παρέχει αποτελέσματα για την κρίσιμη ελαστική αντοχή λυγισμού, κατά την οποία ο φορέας αστοχεί στην

αντίστοιχη μορφή λυγισμού. Οι λόγοι για να εφαρμοστεί κανείς γραμμική ανάλυση λυγισμού ποικίλουν, και μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής: (i) προσδιορισμός των ιδιομορφών της κατασκευής με σκοπό να χρησιμοποιηθούν σε μεταγενέστερο έλεγχο έναντι λυγισμού (ii) προσδιορισμός των ιδιομορφών της κατασκευής με σκοπό να χρησιμοποιηθούν ως σχήμα γεωμετρικών ατελειών ή ισοδύναμων γεωμετρικών ατελειών σε μη γραμμικές αναλύσεις, όπως GNIA ή GMNIA (iii) για σκοπού επαλήθευσης του προσομοιώματος, ελέγχοντας την απόκριση της κατασκευής.

3.2.3 Ανάλυση με μη γραμμικότητα υλικού (MNA)

Αφορά ανάλυση της «τέλειας», χωρίς ατέλειες, κατασκευής εφαρμόζοντας υποθέσεις μικρών μετατοπίσεων, μικρών τάσεων και ένα ιδεατό ελαστο-πλαστικό νόμο υλικού. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης μόνο με μη γραμμικότητα υλικού, είναι η πλαστική αντίσταση του φορέα (R_{MNA}), όπου η επιρροή της μεταβολής της γεωμετρίας δεν λαμβάνεται υπόψη. Παράλληλα μπορεί να προβλεφθεί και να αξιολογηθεί η πλαστικός μηχανισμός κατάρρευσης του φορέα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-1, ο συγκεκριμένος τύπος ανάλυσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε αναλύσεις που απαιτούν μεταγενέστερους ελέγχους σχεδιασμού, όσο και για απευθείας προσδιορισμό της τελικής αντίστασης της κατασκευής. Η δεύτερη περίπτωση, μπορεί να εφαρμοστεί, μόνο εφόσον η κατασκευή δεν είναι ευάλωτη σε φαινόμενα 2^{ας} τάξης, και η μορφή αστοχίας δεν είναι ευάλωτη στις ατέλειες του φορέα, κάτι που δεν συνηθίζεται στις μεταλλικές κατασκευές. Παρόλα αυτά, με την υιοθέτηση ενός ιδεατού, γραμμικώς ελαστικού-πλήρως πλαστικού υλικού, με μηδενική σκλήρυνση, μπορεί να εξαχθεί από την MNA, το πλαστικό φορτίο αναφοράς της κατασκευής υπό τον δεδομένο συνδυασμό φορτίων, το οποίο ορίζεται ως ένας συντελεστής επαύξησης R_{pl} , στις τιμές σχεδιασμού. Ο συντελεστής αυτός, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε επόμενες αναλύσεις, προκειμένου να γίνουν οι απαιτούμενοι έλεγχοι σχεδιασμού.

3.2.4 Ανάλυση με μη γραμμικότητα Γεωμετρίας (GNA)

Πρόκειται για ανάλυση του τέλειου φορέα, χρησιμοποιώντας γραμμικά ελαστικό νόμο υλικού, συμπεριλαμβάνοντας μόνο τις μη γραμμικότητες της γεωμετρίας. Έτσι, η πηγή της μη γραμμικής συμπεριφοράς, εμφανίζεται από τις μεγάλες μετατοπίσεις (που προκαλούν μεγάλες παραμορφώσεις συγκριτικά με την γεωμετρία του φορέα, επηρεάζοντας έτσι τις εξισώσεις ισορροπίας του συστήματος), και από τις μεγάλες ανηγμένες παραμορφώσεις που προκύπτουν (παράγουν μη γραμμική σχέση μεταξύ μετατοπίσεων και παραμορφώσεων). Η GNA, συνήθως χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των εσωτερικών δυνάμεων και τάσεων, συμπεριλαμβανομένων γεωμετρικών μη γραμμικοτήτων. Μπορεί τέλος, να εξαχθεί ο συντελεστής επαύξησης R_{GNA} . Παρά το γεγονός ότι η GNA είναι μέρος της κατηγορίας αναλύσεων που αποσκοπούν στον αριθμητικό υπολογισμό για σχεδιασμό, δεν συνηθίζεται η εφαρμογή της, αφού συνήθως επικρατεί και επιλέγεται η GNIA. Θεωρητικά όμως, GNA μπορεί να εφαρμοστεί αποκλειστικά σε φορείς οι οποίοι δεν είναι ευάλωτοι σε γεωμετρικές ατέλειες, αλλά ευάλωτοι σε μεγάλες παραμορφώσεις.

3.2.5 Ανάλυση με μη γραμμικότητα Γεωμετρίας και Υλικού (GMNA)

Οι αναλύσεις με μη γραμμικότητα γεωμετρίας και υλικού, εφαρμόζονται στον τέλειο φορέα, λαμβάνοντας υπόψη συνδυαστικά τις μη γραμμικότητες των αναλύσεων MNA και GNA. Συνήθως, εφαρμόζεται σε αριθμητικούς υπολογισμούς για απευθείας έλεγχο της τελικής αντίστασης της κατασκευής, εφόσον δεν είναι ευάλωτοι οι φορείς σε αρχικές ατέλειες. Έχει παρατηρηθεί, πως τέτοιου τύπου φορείς έχουν πλαστικές μορφές αστοχίας.

3.2.6 Ανάλυση με μη γραμμικότητα Γεωμετρίας και αρχικές ατέλειες (GNIA)

Πρόκειται για τον πρώτο τύπο ανάλυσης που περιγράφεται, ο οποίος αφορά τον ατελή φορέα, λαμβάνοντας δηλαδή υπόψη αρχικές γεωμετρικές ατέλειες, σε συνδυασμό με μη γραμμικότητα γεωμετρίας. Οι ατέλειες περιλαμβάνονται ρητά, και αφορούν όλους τους πιθανούς τύπους, όπως αυτοί αναφέρθηκαν στην §2.5. Στόχος των GNIA είναι ο προσδιορισμός των εσωτερικών δυνάμεων και τάσεων

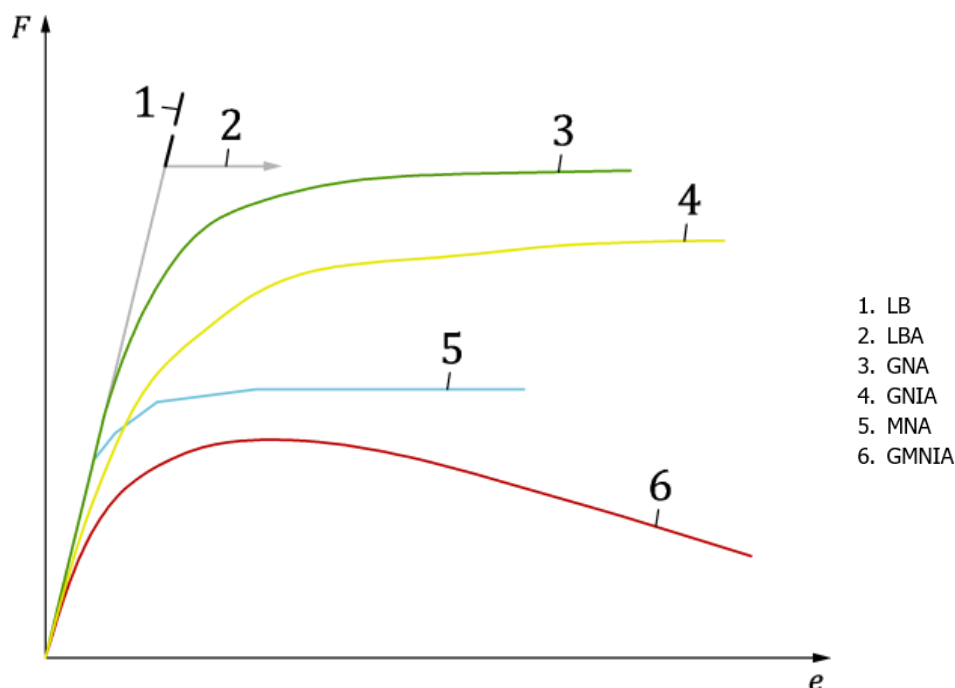
της ατελούς κατασκευής, οι οποίες όμως χαρακτηρίζονται ως 2^{ας} τάξης, δεδομένου ότι εφαρμόζονται υποθέσεις που αφορούν γεωμετρικές μη γραμμικότητες 2^{ας} τάξης. Το αποτέλεσμα των υπολογισμών που διεξάγονται, οδηγούν στον συντελεστή επαύξησης R_{GNIA} . Η εφαρμογή των αναλύσεων GNI, υπάγεται στην κατηγορία των αναλύσεων που απαιτούν μετέπειτα έλεγχο των αποτελεσμάτων για τον τελικό σχεδιασμό. Αυτός ο τύπος ανάλυσης είναι ευρέως διαδεδομένος σε καθημερινά ζητήματα, καθώς λόγω της εφαρμογής της στον ατελή φορέα, δίνεται η δυνατότητα της μετατροπής των ελέγχων ευστάθειας σε ελέγχους διατομών ή ελέγχους τάσεων.

3.2.7 Ανάλυση με μη γραμμικότητα Γεωμετρίας και Υλικού με αρχικές ατέλειες (GMNIA)

Η GMNIA είναι ο τύπος ανάλυσης που λαμβάνει υπόψη όλων των ειδών μη γραμμικότητες και δεν αγνοεί κανενός είδους ατελειών. Επομένως, το προσομοίωμα που κατασκευάζεται για τέτοιου είδους αναλύσεις, είναι το πιο ρεαλιστικό, και το πιο «κοντινό» στην πραγματική μορφή του φορέα. Συνεπώς, έχει ως αποτέλεσμα και την εξαγωγή των πιο ρεαλιστικών αποτελεσμάτων, ενώ απεικονίζει και την πιο ρεαλιστική απόκριση του φορέα. Χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των χαρακτηριστικών αντοχών της κατασκευής συμπεριλαμβανομένων των ατελειών, και γεωμετρικών και υλικού μη γραμμικότητες. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών οδηγούν στον συντελεστή επαύξησης R_{GMNIA} , ή αλλιώς της χαρακτηριστικής αντοχής του φορέα R_k , εφόσον δεν είναι απαραίτητη κάποια προσαρμογή του τελικού αποτελέσματος. Στόχος της εφαρμογής της GMNIA είναι η απευθείας εύρεση τη τελικής αντίστασης, μέσω αριθμητικών προσομοιωμάτων.

3.2.8 Σύγκριση αποτελεσμάτων διαφόρων αναλύσεων

Στο Σχήμα 3-1, περιγράφεται μέσω διαγράμματος Φορτίου-Μετατόπισης (F-e), η σύγκριση των αναμενόμενων αποτελεσμάτων των παραπάνω αναλύσεων. Πρέπει να σημειωθεί πως η LBA (1), δεν παρέχει πάντα τον υψηλότερο συντελεστή φορτίου, όπως φαίνεται στο διάγραμμα, καθώς η μεταλυγισμική συμπεριφορά της κατασκευής που συνήθως προβλέπεται από τις μη γραμμικές αναλύσεις, μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένους συντελεστές φορτίου, προτού επέλθει η αστοχία του φορέα. Επιπλέον, όπως ήταν αναμενόμενο, την χαμηλότερη αντίσταση, και ταυτόχρονα την πιο ρεαλιστική, την δίνει η GMNIA (6), όπου στο συγκεκριμένο παράδειγμα παρέχει την δυνατότητα πρόβλεψης καθοδικού κλάδου του δρόμου ισορροπίας.



Σχήμα 3-1: Γραφική αναπαράσταση αποτελεσμάτων τύπων αναλύσεων

3.3 Θερμική ανάλυση

Η θερμική ανάλυση είναι εξίσου σημαντική στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων των μεταλλικών κατασκευών, καθώς επιτρέπει στον μηχανικό να αξιολογήσει τις επιπτώσεις των μεταβολών της θερμοκρασίας στην απόκριση του φορέα. Οι μεταλλικές κατασκευές, εκτίθενται σε διάφορες συνθήκες θερμοκρασίας, όπως διακυμάνσεις της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, φωτιά αλλά και θερμότητα που μπορεί να παράγεται εξ αιτίας βιομηχανικών διεργασιών. Αυτές οι αλλαγές στην θερμοκρασία, μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την συμπεριφορά και την ακεραιότητα της κατασκευής.

Με την ενσωμάτωση της θερμικής ανάλυσης στα πεπερασμένα στοιχεία, καθίσταται πιο εύκολος ο εντοπισμός πιθανών ζητημάτων όπως θερμικές τάσεις και παραμορφώσεις. Επιπλέον, βοηθά στον προσδιορισμό της κατανομής της θερμοκρασίας εντός της χαλύβδινης κατασκευής, η οποία μπορεί να επηρεάσει την απόδοση των υλικών που χρησιμοποιούνται στην εκάστοτε κατασκευή. Έτσι, η θερμική ανάλυση μέσω λογισμικών πεπερασμένων στοιχείων, θα πρέπει να βασίζεται στην εδραιωμένες αρχές και υποθέσεις της θεωρίας μεταφοράς θερμότητας. Στο παρόν κεφάλαιο, θα παρουσιαστούν συνοπτικά οι απαραίτητες προϋποθέσεις που θα πρέπει να πληρούνται από το αριθμητικό προσομοίωμα προκειμένου να διεξαχθεί μια θερμική ανάλυση. Εκτενέστερη αναφορά με λεπτομέρειες, εμπεριέχεται στα μέρη 1-14 και 1-141 του ΕΚ3.

Σε θερμομηχανικά προβλήματα, η θερμότητα που παράγεται από την πλαστικοποίηση κατά την παραμόρφωση, μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, «αποσυνδέοντας» έτσι τα θερμικά και τα μηχανικά προβλήματα. Η εξίσωση της μεταφοράς θερμότητας θα πρέπει να λυθεί πρώτα, έτσι ώστε να ληφθεί η εξέλιξη του πεδίου θερμοκρασίας στα δομικά μέλη. Στη συνέχεια θα πρέπει να γίνει η μηχανική ανάλυση του προβλήματος. Στην περίπτωση που η μηχανική απόκριση είναι πιθανό να επηρεάσει την κατανομή της θερμοκρασίας στα δομικά στοιχεία, θα πρέπει να διεξάγεται ταυτόχρονη θερμική και μηχανική ανάλυση.

Βάσει του παραπάνω διαχωρισμού, σε θερμομηχανικά προβλήματα, το προσομοίωμα υπεύθυνο για την μηχανική απόκριση θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τα εξής:

- Θερμοκρασίες υπολογισμένες σύμφωνα με τον EN 1993-1-2
- Θερμοκρασιακή εξάρτηση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού
- Γεωμετρικές ατέλειες (εάν είναι σχετικές)
- Αποτελέσματα μη γραμμικότητας γεωμετρίας (εάν είναι σχετικές)
- Μη γραμμική συμπεριφορά υλικού (εάν είναι σχετικές)

Αντιθέτως, το προσομοίωμα υπεύθυνο για την θερμική απόκριση θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη:

- Θερμικές δράσεις
- Σχετικές οριακές συνθήκες
- Θερμοκρασιακή εξάρτηση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού
- Ορισμός επαρκούς μεγέθους χρονικού βήματος για την αποφυγή αριθμητικής αστάθειας λύσης
- Ορισμός ενός κριτηρίου σύγκλισης λόγω της μη γραμμικότητας του προβλήματος

Τέλος, οι παραμένουσες τάσεις θεωρούνται αμελητέες σε περίπτωση πυρκαγιάς, αφού μόνο οι γεωμετρικές ατέλειες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στα θερμομηχανικά προβλήματα.

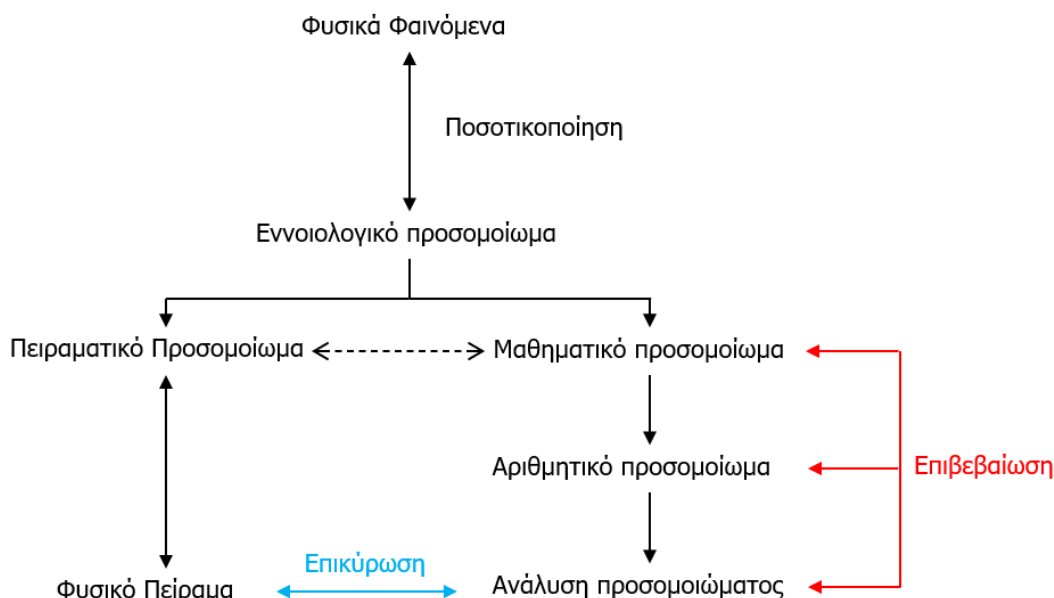
4 ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΚΥΡΩΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ

4.1 Εισαγωγή

Όπως θα οριστούν παρακάτω, θα φανεί πως οι έννοιες «Επιβεβαίωση» και «Επικύρωση» είναι διαφορετικές μεταξύ τους, παρόλα αυτά τα βήματα τους μπορεί να καλύπτονται μερικώς ή και πλήρως σε αρκετές περιπτώσεις, όπως θα περιγραφεί αναλυτικά στις δύο επόμενες υπο-παραγράφους. Σε κάθε περίπτωση, πρωταρχικός στόχος είναι ο έλεγχος της ορθότητας και της ακρίβειας του προσομοιώματος αλλά και των μαθηματικών σχέσεων που το καθορίζουν, ενώ παράλληλα ελέγχονται ή συγκρίνονται τα αποτελέσματα του με άλλα γνωστά αποτελέσματα ή με τις κανονιστικές απαιτήσεις. Η διαδικασία της Επιβεβαίωσης, ξεκινά ήδη πριν κατασκευαστεί το προσομοίωμα με όλες τις παραμέτρους που το χαρακτηρίζουν. Πιο συγκεκριμένα, το πρώτο βήμα είναι η αναγνώριση του συστήματος, των απαραίτητων στοιχείων που πρέπει να χρησιμοποιηθούν, καθώς και οι εσωτερικές και εξωτερικές δυνάμεις, με βάση τα φυσικά φαινόμενα που πρόκειται να καταπονήσουν την πραγματική κατασκευή (εννοιολογική προσομοίωση / conceptual modelling). Έπειτα, το κύριο μέλημα, είναι η επιλογή και πρόβλεψη των Ποσοτήτων Απόκρισης Συστήματος (System Response Quantity, SRQ), το οποίο αποτελεί σημαντικό βήμα τόσο για την διαδικασία Επιβεβαίωσης όσο και για την Επικύρωση. Στην κάθε περίπτωση όμως οι ποσότητες αυτές υπόκεινται σε διαφορετικούς περιορισμούς. Για την Επιβεβαίωση, οι ποσότητες αυτές περιγράφουν την απόκριση του συστήματος, οι οποίες συγκρίνονται με τις ήδη γνωστές αντίστοιχες τιμές τους από μια ανάλυση που θεωρείται ορόσημο της σύγκρισης. Αντιθέτως, για την διαδικασία της επικύρωσης, τα πειραματικά δεδομένα περιορίζονται από τον αριθμό των δοκιμών και το σύστημα μέτρησης. Στις παραγράφους 4.2 και 4.3 θα γίνει αναλυτικότερη περιγραφή των δύο διαδικασιών, όμως συνοπτικά, για καλύτερη κατανόηση των εννοιών και της διακριτοποίησής τους, δίνεται μια σχηματική αναπαράσταση των δύο διαδικασιών στο Σχήμα 4-1.

Η διαδικασία της Επιβεβαίωσης, αφορά τον έλεγχο της καταλληλότητας και της ακρίβειας του αριθμητικού προσομοιώματος, συγκριτικά με το μαθηματικό προσομοίωμα. Παράλληλα, η Επικύρωση, καθορίζει κατά πόσο το μαθηματικό προσομοίωμα επιλέγεται σωστά, και «μεταφέρεται» επακριβώς στο

αριθμητικό από τον χρήστη. Το αριθμητικό προσομοίωμα θα πρέπει να επαληθευτεί για να αποδειχθεί ότι η υπολογιστική λύση αποτελεί μια καλή προσέγγιση και ότι τα μοντέλα εφαρμόζονται, κατανοούνται και χρησιμοποιούνται σωστά. Επόμενος στόχος της Επιβεβαίωσης, είναι ο έλεγχος ευαισθησίας του προσομοιώματος στην διακριτοποίηση (π.χ. τύπος πεπερασμένου στοιχείου, πυκνότητα διακριτοποίησης, ατέλειες, κ.λπ.), και να αποδεικνύει την σωστή εφαρμογή της υπολογιστικής ανάλυσης.



Σχήμα 4-1: Ερμηνεία διαδικασίας επικύρωσης και επαλήθευσης.

Επικύρωση του προσομοιώματος ή της τεχνικής προσομοίωσης, είναι ο έλεγχος όπως αναφέρθηκε της ορθότητας και της ακρίβειας του προσομοιώματος, καθώς και της ακρίβειας των υπό ανάλυση φυσικών φαινομένων. Πιο συγκεκριμένα, στόχος της διαδικασίας Επικύρωσης, είναι να καθορίσει εάν το αριθμητικό προσομοίωμα μπορεί να αναπαραστήσει κατάλληλα τα υπό εξέταση φυσικά φαινόμενα που καταπονούν την φυσική κατασκευή. Παράλληλα, στοχεύει στον εντοπισμό και τον διαχωρισμό των σημαντικών αποκλίσεων της τεχνικής προσομοίωσης, στην εξάλειψη ή τη μείωση των αναπόφευκτων σφαλμάτων και στην αξιολόγηση των αβεβαιοτήτων στα αποτελέσματα. Το αριθμητικό μοντέλο, αλλά και το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων, θα πρέπει να επαληθεύονται, συγκρίνοντας τα υπολογιστικά αποτελέσματά τους, με τα πειραματικά δεδομένα που έχει ο χρήστης στην διάθεση του, ή με γνωστές αναλυτικές λύσεις, προκειμένου να αποδειχθεί η ορθή σύλληψη των φυσικών φορτίσεων.

Όπως συμπεραίνεται από τα παραπάνω, σε γενικές γραμμές, οι διαδικασίες Επιβεβαίωσης και Επικύρωσης των αποτελεσμάτων και του προσομοιώματος, είναι περίπλοκες και χρονοβόρες μέθοδοι, και, κανονιστικά, δεν απαιτούνται σε καθημερινές πρακτικές σχεδιασμού, για κάθε αριθμητικό προσομοίωμα που κατασκευάζεται. Έτσι, όπως αναφέρεται στο μέρος EN 1993-1-14, όταν προηγουμένως το αριθμητικό προσομοίωμα έχει επικυρωθεί, η διαδικασία της Επιβεβαίωσης μπορεί να αγνοηθεί βάσει εμπειρίας και μηχανικής κρίσης του χρήστη. Δηλαδή, εάν ο χρήστης χρησιμοποιεί επανειλημμένως το ίδιο ή παρόμοιο αριθμητικό προσομοίωμα για διαδικασίες σχεδιασμού (π.χ. διερεύνηση ιδίων μορφών αστοχίας, χρήση ίδιας πυκνότητας πλέγματος διακριτοποίησης, κ.α.), τότε η επιβεβαίωση καταλληλότητας του μοντέλου θα πρέπει να γίνεται μόνο την πρώτη φορά, και από κει και έπειτα, το προσομοίωμα θεωρείται αποδεκτό. Παρόλα αυτά, επειδή η κρίση του μηχανικού δεν εξαλείφεται σε καμία περίπτωση, ο χρήστης θα πρέπει και θα ήταν σημαντικό να ελέγχει κατά πόσο το μοντέλο που πρόκειται να χρησιμοποιήσει, είναι κατάλληλο για τον στόχο που χρησιμοποιείται. Σε αυτή την περίπτωση, ο σχεδιαστής θα μπορούσε να έχει συγκριτικό υπόβαθρο ή προηγούμενη εμπειρία σχετικά με τον αναλυόμενο τρόπο αστοχίας και την αντίσταση που πρέπει να αποκτηθεί. Επομένως, πιθανές μεγάλες διαφορές, απροσδόκητα λάθη και αδικαιολόγητα μεγαλύτερες αντιστάσεις που

προέρχονται από το αριθμητικό μοντέλο, μπορούν να πραγματοποιηθούν και να εξαλειφθούν από τον σχεδιαστή.

Κρίνεται σημαντικό, στην περίπτωση που το προσομοίωμα εφαρμόζεται για απευθείας έλεγχο αντίστασης, ακόμη και για τις τυπικές περιπτώσεις σχεδιασμού, να γίνεται ξανά η μελέτη ευαισθησίας πλέγματος (mesh sensitivity study), εάν το μέγεθος του μοντέλου ή η δομή του αλλάζει σημαντικά. Αυτό, συνίσταται καθώς η προηγούμενως επαληθευμένη διακριτοποίηση του φορέα, μπορεί να μην είναι πλέον επαρκής, το οποίο πιθανό να οδηγήσει σε σημαντική πηγή σφαλμάτων. Επιπλέον, εφόσον υπάρξει σημαντική αλλαγή του προσομοιώματος, το πιο πιθανό, να τροποποιηθούν το σχήμα των ατελειών καθώς και η κατεύθυνση των ισοδύναμων γεωμετρικών ατελειών, ειδικά αν ο φορέας είναι ευαίσθητος σε αυτές. Ως εκ τούτου, θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή και στις εφαρμοζόμενες ατέλειες.

Οι παραπάνω κανόνες και συστάσεις όπως αυτά αναφέρθηκαν, υποδεικνύουν πως η πλήρης διαδικασία επικύρωσης και επαλήθευσης, θα πρέπει να εκτελείται πάντα χωρίς καμία απλοποίηση εάν πρόκειται να ελεγχθεί το ζήτημα αποφυγής ελέγχων ασφαλείας, ή εφόσον το αριθμητικό προσομοίωμα χρησιμοποιείται για αριθμητικές προσομοιώσεις που σκοπό έχουν την επέκταση ή την αντικατάσταση πειραματικών δεδομένων. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η ακρίβεια του προσομοιώματος θα πρέπει πάντα να αποδεικνύεται. Τέτοιου είδους μοντέλα, κυρίως έχουν ερευνητικούς και αναπτυξιακούς στόχους, διερευνώντας νέες στατικές λύσεις ή μορφές αστοχίας, οι οποίες στο παρελθόν δεν είχαν μελετηθεί ή δεν ήταν ευρέως κατανοητές. Επομένως, η απόδειξη της ακρίβειας τους κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική.

4.2 Βήματα διαδικασίας επιβεβαίωσης

Όπως έχει ήδη περιγραφεί παραπάνω, η διαδικασία της Επιβεβαίωσης, αφορά τον έλεγχο της καταλληλότητας και της ακρίβειας του αριθμητικού προσομοιώματος. Για να γίνει αυτό, θα πρέπει να είναι γνωστές οι βασικές πηγές σφαλμάτων που μπορεί να εμφανιστούν· είναι οι εξής:

- Σφάλμα στα δεδομένα εισόδου
- Αυτόματη στρογγυλοποίηση από το λογισμικό
- Ακατάλληλη διακριτοποίηση (μέγεθος πλέγματος)
- Ακατάλληλη επιλογή πεπερασμένου στοιχείου
- Ακατάλληλες συνοριακές συνθήκες και συνθήκες φόρτισης
- Ακατάλληλη εισαγωγή ατελειών
- Ακατάλληλη μέθοδος επιβολής φορτίου
- Ακατάλληλες ρυθμίσεις παραμέτρων επίλυσης
- Λάθη προγραμματισμού στο λογισμικό

Για την ασφαλή πρόβλεψη των παραπάνω ειδών σφαλμάτων, κατά την φάση της Επιβεβαίωσης, θα πρέπει να ικανοποιούνται οι εξής έλεγχοι:

- Έλεγχος διακριτοποίησης (πυκνότητα, σύγκλιση)
- Έλεγχος ευαισθησίας παραμέτρων εισόδου
- Ανάλυση ευαισθησίας ατελειών (όπου απαιτείται)
- Εφαρμογή κρίσης του μηχανικού στα αποτελέσματα των υπολογισμών

Σε κάθε προσομοίωμα, θα πρέπει το μέγεθος του πλέγματος της διακριτοποίησης, καθώς και το είδος πεπερασμένου στοιχείου, να επιλέγεται με βάση τις Ποσότητες Απόκρισης Συστήματος (SRQs) που πρόκειται να ελεγχθούν. Προκειμένου να αποφευχθούν σφάλματα στην διακριτοποίηση του φορέα, υπάρχει η δυνατότητα διεξαγωγής Μελέτης Πυκνότητας Πλέγματος· χρησιμοποιείται για να αποδείξει πως το επιλεγμένο μέγεθος πλέγματος συνδυαστικά με τον τύπου πεπερασμένου στοιχείου, δίνουν ακριβείς αποτελέσματα και «συνεργάζονται» κατάλληλα, έτσι ώστε το υπό εξέταση πρόβλημα καθώς και τα αποτελέσματα των υπολογισμών, να μην επηρεάζονται σημαντικά από αυτά. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει αποδεδειγμένα κάποια κατάλληλη διακριτοποίηση πλέγματος, θα πρέπει να διεξάγεται

μελέτη σύγκλισης, χρησιμοποιώντας διαδοχικά διαφορετικές πυκνότητες, ξεκινώντας από μια αραιή, και καταλήγοντας σε μια εύλογα πυκνή· τα αποτελέσματα της κάθε ανάλυσης θα πρέπει να αξιολογούνται και τελικά να συγκρίνονται μεταξύ τους. Θεωρείται πως έχει επέλθει σύγκλιση και τα αποτελέσματα είναι ακριβή, εάν η μελέτη σύγκλισης οδηγεί σε σταθερό αποτέλεσμα, εμφανίζοντας προσέγγιση της τάξης του 5%.

Όσον αφορά τον έλεγχο ευαισθησίας των παραμέτρων εισόδου, πολλές φορές κρίνεται απαραίτητο να διεξαχθεί μια μελέτη ευαισθησίας, η οποία θα περιλαμβάνει μικρές αλλαγές στις υπό εξέταση παραμέτρους, καθορίζοντας έτσι ποια από αυτά τα στοιχεία είναι κρίσιμα. Ταυτόχρονα αξιολογείται το πιθανό εύρος στο οποίο κάθε παράμετρος μπορεί να διαφέρει χωρίς να προκαλεί ουσιαστικές αλλαγές σε κάθε ποσότητα απόκρισης του συστήματος.

Για να γίνει ανάλυση ευαισθησίας ατελειών, θα πρέπει ο στόχος του προσομοιώματος να είναι η επέκταση εργαστηριακών και πειραματικών αποτελεσμάτων, εκεί όπου οι ατέλειες συμπεριλαμβάνουν αβεβαιότητες και επηρεάζουν τα αποτελέσματα τόσο μέσω του επιλεγμένου τύπου πεπερασμένων στοιχείων, όσο και από τον τύπο, το σχήμα αλλά και το μέγεθος των ατελειών. Εάν στο προσομοίωμα εφαρμόζονται κανονιστικές τιμές των ατελειών, με στόχο τους αριθμητικούς υπολογισμούς για σχεδιασμό, τότε δεν απαιτείται ανάλυση ευαισθησίας ατελειών, αφού η ακρίβεια τους έχει ήδη αποδειχθεί μέσω του υποβάθρου των κανονισμών. Επομένως, δεν πρέπει να γίνει κάποιος πρόσθετος έλεγχος ατελειών.

Τέλος, και ίσως το πιο σημαντικό βήμα της διαδικασίας Επιβεβαίωσης, αποτελεί η κρίση του μηχανικού. Σε κάθε περίπτωση, τα αποτελέσματα ενός λογισμικού, εξαρτώνται άμεσα από τα δεδομένα εισαγωγής που δίνει ο χρήστης. Επομένως, εάν εμφανιστεί κάποιο λάθος, είναι στην κρίση του μηχανικού, να το αξιολογήσει και να το διορθώσει ή να το επαληθεύσει. Όλες οι κύριες χαρακτηριστικές τιμές εξόδου (π.χ. παραμορφώσεις, δρόμοι ισορροπίας, διαγράμματα εσωτερικών εντατικών μεγεθών, κ.λπ.), που περιγράφουν την απόκριση του συστήματος, θα πρέπει να ελέγχονται προσεκτικά, βάσει απλών πρακτικών και προσομοιωμάτων ή βάσει προηγούμενης εμπειρίας του μηχανικού.

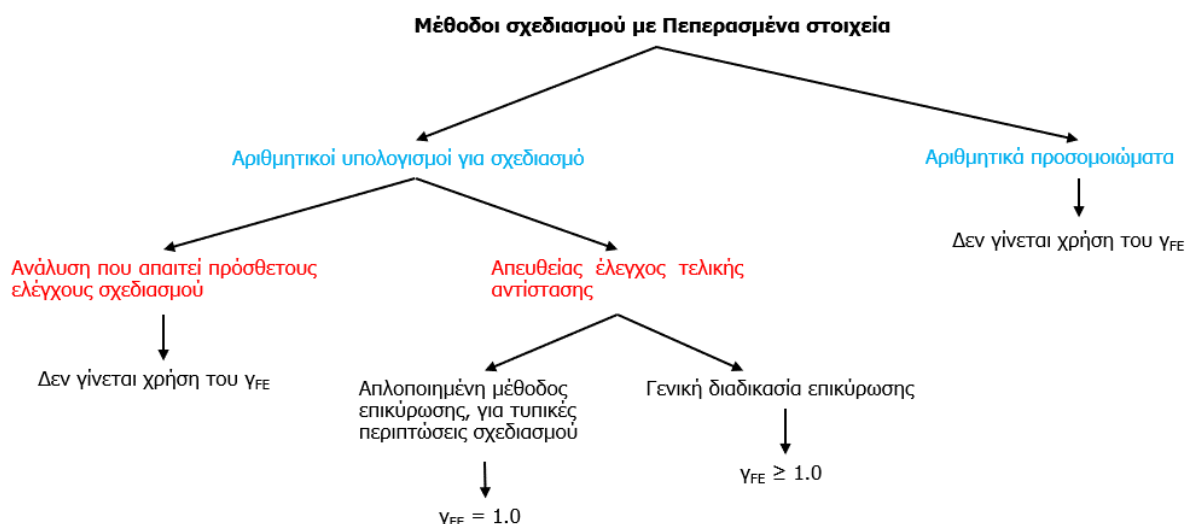
4.3 Επικύρωση αποτελεσμάτων

Όσον αφορά την επικύρωση/επαλήθευση των αποτελεσμάτων, πρόκειται για την σύγκριση των τιμών εξόδου ενός αριθμητικού προσομοιώματος, με περιπτώσεις «ορόσημα», των οποίων τα αποτελέσματα είναι γνωστά και ήδη επιβεβαιωμένα, που αποσκοπεί στην ανάδειξη της καταλληλότητας του αριθμητικού προσομοιώματος. Επομένως, η διαδικασία της επικύρωσης αναφέρεται πάντα σε συγκεκριμένο είδος κατασκευή, συγκεκριμένη μορφή αστοχίας αλλά και διαστάσεις, οι οποίες κατά τον έλεγχο θα πρέπει να έχουν αναγνωριστεί επακριβώς. Τα επιδιωκόμενα όρια της κάθε παραμέτρου, καθορίζονται από τον «τομέα εφαρμογής», ενώ ο «τομέας επαλήθευσης», τις υπό έλεγχο παραμέτρους, και χαρακτηρίζει τις δυνατότητες του προσομοιώματος, για ακριβή αναπαράσταση του φυσικού πειράματος. Τα δύο αυτά πεδία, μπορεί να μην επικαλύπτονται καθόλου, να επικαλύπτονται μερικώς ή και πλήρως. Εάν υπάρχει επικάλυψη, η διαδικασία της επικύρωσης, αποδεικνύει την δυνατότητα εφαρμογής του αριθμητικού προσομοιώματος ενώ η επιβεβαίωση αποδεικνύει περαιτέρω την καταλληλότητα της λύσης που προσφέρει το προσομοίωμα. Στην περίπτωση που δεν εμφανίζεται επικάλυψη των δύο τομέων, δηλαδή δεν υπάρχουν αναλυτικές λύσεις ή αποτελέσματα βάσει πειραμάτων για το υπο διερεύνηση πρόβλημα, η Επιβεβαίωση του μοντέλου λειτουργεί και ως διαδικασία επικύρωσης των αποτελεσμάτων, επαληθεύοντας την ποιότητα των εξαγόμενων τιμών.

Απώτερος σκοπός της διαδικασίας Επικύρωσης, είναι η πρόβλεψη και η ελαχιστοποίηση των αβεβαιοτήτων που εμφανίζονται κατά την ανάλυση. Ως αβεβαιότητα, ορίζεται η παράμετρος που σχετίζεται με το αποτέλεσμα μιας λύσης που χαρακτηρίζει τη διασπορά των τιμών, που θα μπορούσαν εύλογα να συσχετιστούν με μια ακριβή λύση. Οι αβεβαιότητες μπορούν να θεωρηθούν ως τα όρια των σφαλμάτων, τα οποία μπορούν να απλουστευθούν ή και όχι. Το καλύτερο δυνατό επίπεδο επικύρωσης

αποτελεσμάτων, μπορεί να επιτευχθεί όταν γίνεται χρήση συγκριτικών μεθόδων, κατά τις οποίες κάθε υπολογιστικό αποτέλεσμα, θεωρείται ως στοχαστική μεταβλητή, η κάθε μια με τις δικές τους αβεβαιότητες εισόδου και εξόδου. Έτσι, αντί να χρησιμοποιούνται αποκλειστικές τιμές για κάθε παράμετρο, υπάρχουν τιμές με ένα φάσμα που δύναται να χαρακτηριστεί, όπως για παράδειγμα από την μέση και την τυπική απόκλιση. Το αποτέλεσμα μιας τέτοιας μεθόδου, παρέχεται από επαναλαμβανόμενους υπολογισμούς τροποποιώντας τις παραμέτρους εισόδου, σύμφωνα με τις εκτιμώμενες πιθανοτικές κατανομές των πειραματικών δεδομένων.

Οι μορφές επικύρωσης των αποτελεσμάτων που έχουν παρουσιαστεί μέχρι τώρα, αποτελούν πιο προχωρημένες και ειδικές μεθόδους, που σκοπό έχουν την επίτευξη του υψηλότερου επιπέδου επαλήθευσης. Το μέρος EN 1993-1-14, προτείνει στις περιπτώσεις που δεν εφαρμόζονται τέτοιες μέθοδοι, η αξιοπιστία του αριθμητικού προσομοιώματος να ελέγχεται μέσω του συντελεστή γ_{FE} . Ο συντελεστής αυτός, καλύπτει όλες τις αβεβαιότητες που πηγάζουν από ένα αριθμητικό προσομοίωμα αλλά και από την εκτελεσθείσα ανάλυση, και κυρίως δεν επικαλύπτει τα πεδία εφαρμογής άλλων συντελεστών ασφαλείας που ορίζονται σε όλα τα μέρη του EN 1993. Η μέθοδος εφαρμογής του συντελεστή γ_{FE} , συνδέεται άμεσα και με τον σκοπό την ανάλυσης, όπως συνοψίζεται στο Σχήμα 4-2.



Σχήμα 4-2: Πεδίο εφαρμογής του συντελεστή γ_{FE}

Όπως περιγράφεται και από το παραπάνω σχήμα, οι περιπτώσεις που δεν απαιτείται η χρήση του συντελεστή γ_{FE} είναι όταν η ανάλυση μέσω πεπερασμένων γίνεται όταν απαιτούνται μετέπειτα έλεγχοι για τον σχεδιασμό της κατασκευής, ή αν το αριθμητικό προσομοίωμα αποσκοπεί στην συμπλήρωση και τον προσδιορισμό της τελικής αντίστασης που έχει προκύψει βάσει πειραματικών δοκιμών. Αντιθέτως, εάν το αριθμητικό προσομοίωμα αποσκοπεί στην απευθείας εύρεση της τελικής αντίστασης του φορέα, τότε η αβεβαιότητα του σχεδιασμού πρέπει να αξιολογείται βασισμένη στον συνδυασμό όλων των συντελεστών του μέρους EN 1993, συμπεριλαμβανομένου και του συντελεστή γ_{FE} .

Στο πλαίσιο της διαδικασίας επικύρωσης, ο νόμος υλικού που χρησιμοποιείται θα πρέπει να εισάγεται με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών ελέγχου υλικού αλλά και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, θα πρέπει να προέρχονται από πειραματικά δεδομένα, ανεξάρτητα από την εφαρμοσμένη μέθοδο σχεδιασμού. Οι κρίσιμες ιδιότητες των μελών ψυχρής έλασης, όπως αυτές καλύπτονται από το μέρος EN1993-1-3, είναι οι ιδιότητες του υλικού και το πάχος τους. Κατά συνέπεια, η επαλήθευση των αποτελεσμάτων, θα πρέπει να πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη τις μετρημένες τιμές αυτών των χαρακτηριστικών. Αντιθέτως, εάν κατά την διαδικασία του πειράματος οι μετρημένες τιμές προκύψουν εντός των επιτρεπόμενων ανοχών σύμφωνα με το μέρος EN 1090-4, τότε μπορούν να αξιοποιηθούν τα ονομαστικά πλάτη των στοιχείων της διατομής.

Για καθορισμό της τιμής του συντελεστή γ_{FE} , μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω σχέσεις, όπως αυτές περιγράφονται στο Παράρτημα Α του EN1993-1-14. Οι σχέσεις αυτές, έχουν απευθείας εφαρμογή στα αριθμητικά προσομοιώματα, που αποσκοπούν σε αριθμητικούς υπολογισμούς, για απευθείας έλεγχο της αντίστασης.

Ο συντελεστής γ_{FE} μπορεί να προσδιοριστεί βάσει σύγκρισης του αποτελέσματος των αριθμητικών υπολογισμών (R_{check}) με τα αποτελέσματα του πειράματος που είναι γνωστά (R_{test}), ή με γνωστές αντοχές, που θεωρούνται αποδεκτές εξαιτίας ευρέως αποδεδειγμένων μεθόδων (R_k). Χρησιμοποιώντας το ίδιο λογισμικό θα πρέπει να υπολογιστεί η αντίσταση (R_{check}) για άλλους παρόμοιους τύπους φορέων για τους οποίους είναι γνωστή η χαρακτηριστική αντίσταση ($R_{k,known}$). Η γνωστή περίπτωση που χρησιμοποιείται για σύγκριση, θα πρέπει να εξάγεται από ένα προσομοίωμα το οποίο χρησιμοποιεί παρόμοιες παραδοχές και εμφανίζει παρόμοια μορφή αστοχίας με την υπό εξέταση κατασκευή, αλλά και παραμέτρους ελέγχου (π.χ. λυγηρότητα, μεταλυγισμική συμπεριφορά, χαρακτηρισμός υλικού κ.α.). Συγκρίνοντας τελικά την τιμή R_{check} και την τιμή $R_{test,known}$, θα πρέπει οι περιπτώσεις ελέγχου να πληρούν τις ίδιες συνθήκες «ομοιότητας» όπως περιγράφηκαν παραπάνω.

Στην περίπτωση που διεξάγεται μια γενική επαλήθευση του προσομοιώματος, και είναι γνωστές οι τιμές $R_{k,known}$ και $R_{test,known}$, και παράλληλα πραγματοποιούνται αριθμητικοί υπολογισμοί, δηλαδή είναι γνωστό και το μέγεθος R_{check} , τότε, ο συντελεστής προσομοιώματος γ_{FE} υπολογίζεται βάσει παραμέτρων που προκύπτουν από την στατιστική αξιολόγηση της διαδικασίας επιβεβαίωσης, όπως αυτή ορίζεται από τους κανόνες του prEN 1990:2021, Παράρτημα Δ. Έτσι, τελικά ο συντελεστής γ_{FE} υπολογίζεται από την σχέση:

$$\gamma_{FE} = \frac{1}{m_X \cdot (1 - k_n \cdot V_X)} \geq 1,0$$

Όπου:

m_X	είναι η μέση τιμή του λόγου των μετρούμενων (ή γνωστών) και υπολογισμένων αποτελεσμάτων για n δείγματα,
k_n	είναι ο χαρακτηριστικός παράγοντας ευθραυστότητας σύμφωνα με το prEN 1990:2021, Παράρτημα Δ, Πίνακας Δ.1 (θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η σειρά δεδομένων που αντιστοιχεί στο « V_X άγνωστο»)
V_X	είναι ο συντελεστής διακύμανσης του λόγου των μετρούμενων (ή γνωστών) και υπολογισμένων αποτελεσμάτων για n δείγματα.

Απαιτείται προσοχή, καθώς, αν για την μέση τιμή του λόγου των μετρούμενων αποτελεσμάτων (m_X), ισχύει η ανισότητα $0,8 < m_X < 1,25$, τότε η διαδικασία αυτή δεν είναι εφαρμόσιμη, καθώς τότε η προσομοίωση μπορεί να θεωρηθεί μη-έγκυρη και θα πρέπει να γίνουν περαιτέρω υπολογισμοί για να διαπιστωθούν οι αιτίες της ασυμφωνίας.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται απευθείας έλεγχος αντίστασης για τη διερεύνηση τυπικών περιπτώσεων σχεδιασμού (έλεγχος τρόπων αστοχίας με υπάρχον μοντέλο αντίστασης σχεδιασμού βάσει του Ευρωκώδικα) και εάν το αριθμητικό μοντέλο επαληθεύεται σύμφωνα με την ενότητα 4.2, τότε μπορεί να εφαρμοστεί μια απλοποιημένη διαδικασία επικύρωσης του προσομοιώματος, χρησιμοποιώντας μια προκαθορισμένη τιμή για το παράγοντα μοντέλου χωρίς τη απαίτηση για στατιστική αξιολόγηση. Αντιθέτως, εάν εκτελείται άμεσος έλεγχος αντίστασης για τον έλεγχο των τρόπων αστοχίας, όταν δεν υπάρχουν σχετικά αποτελέσματα πειράματος, και παράλληλα η αναγνώριση παρόμοιας μορφής αστοχίας, φόρτισης και οριακών συνθηκών είναι δύσκολη, ο μηχανικός θα πρέπει να χρησιμοποιήσει κριτική αξιολόγηση για να καθορίσει μια κατάλληλη τιμή. Τέλος, ο συντελεστής γ_{FE} , συνδέεται άμεσα με το εκάστοτε αριθμητικό προσομοίωμα (κάθε μοντέλο μπορεί να έχει διαφορετικό συντελεστή). Επομένως, στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται προηγουμένως επικυρωμένα αριθμητικά προσομοιώματα για ζητήματα με παρόμοιες ή ελαφρώς αλλαγμένες γεωμετρικές συνθήκες, συνθήκες φόρτισης ή στήριξης, και δεν υπάρχει σημαντική αλλαγή στον τρόπο αστοχίας, μπορεί να εφαρμοστεί η τιμή του συντελεστή, όπως αυτή υπολογίστηκε προηγουμένως, στο αρχικό προσομοίωμα.

5 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

5.1 Οριακή Κατάσταση Αστοχίας

5.1.1 Γενικά

Ο έλεγχος του φορέα σε οριακή κατάσταση αστοχίας, με τη βοήθεια προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων, είναι ίσως το τελευταίο στάδιο μιας ολοκληρωμένης μελέτης, και είναι εξίσου σημαντικό, καθώς επιτρέπει στον χρήστη να αξιολογήσει την φέρουσα ικανότητα της κατασκευής υπό τις ακραίες συνθήκες φόρτισης, όπως αυτές ορίζονται από τον κανονισμό. Με την προσομοίωση αλλά και την ανάλυση της συμπεριφοράς της κατασκευής χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, ο μηχανικός μπορεί πλέον να αξιολογήσει την ικανότητά της να αντέξει τα μέγιστα αναμενόμενα και προβλεπόμενα φορτία, αποτρέποντας παράλληλα τις καταστροφικές αστοχίες. Πρακτικά, αφορά έναν έλεγχο των αποτελεσμάτων του λογισμικού, εφαρμόζοντας πάντα κριτική σκέψη, που αποσκοπεί στην εξασφαλίζει την αξιοπιστία και την απόδοση του φορέα, επιτρέποντας στον σχεδιαστή/μηχανικό να λαμβάνει τεκμηριωμένες αποφάσεις, ώστε να βελτιστοποιείται ο σχεδιασμός και να πληρούνται όλες οι απαιτούμενες κανονιστικές αντοχές και ευστάθειες.

Οι τρόποι με τους οποίους γίνεται ο τελικός έλεγχος του φορέα, εξαρτώνται άμεσα από τον επιλεγμένο τύπο ανάλυσης, και κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- Έλεγχος τάσεων και σχεδιασμός βάσει υπολογισμένων τάσεων, όταν τα ζητήματα ευστάθειας είναι αμελητέα (καλύπτεται από την § 5.1.2)
- Έλεγχος πλαστικής αντοχής, όταν τα ζητήματα ευστάθειας είναι αμελητέα (καλύπτεται από την § 5.1.3)
- Έλεγχος αντοχής έναντι λυγισμού (καλύπτεται από την § 5.1.3)

Το μέρος EN 1993-1-14, παρέχει κανόνες σχεδιασμού σύμφωνα με τους οποίους γίνεται η πρόγνωση την χαρακτηριστικών τιμών αντοχών, υπολογισμένες από τις αριθμητικές αναλύσεις, ενώ επιπρόσθετοι κανόνες σχεδιασμού ορίζονται σε όλα τα υπόλοιπα σχετικά μέρη του ΕΚ3.

5.1.2 Έλεγχος τάσεων

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, κάθε έλεγχος συνδέεται άμεσα με τον επιλεγμένο τύπο ανάλυσης, και ταυτόχρονα, κάθε τύπος ανάλυσης χρησιμεύει για συγκεκριμένους ελέγχους οριακής κατάστασης. Έτσι,

και σύμφωνα με το μέρος EN1993-1-14, προκειμένου να υπολογιστούν οι τάσεις και οι παραμορφώσεις σχεδιασμού, και για να πραγματοποιηθεί έλεγχος τάσεων, πρέπει να εφαρμοστεί μια από τις παρακάτω αναλύσεις:

- Γραμμική ελαστική ανάλυση (LA)
- Ανάλυση με μη γραμμικότητα Γεωμετρίας και Υλικού (GNA)

Για να γίνει σωστά ο έλεγχος τάσεων, πρέπει να έχει προηγηθεί η θεώρηση πως σε κάθε σημείο της κατασκευής, και κατ' επέκταση κάθε πεπερασμένο στοιχείο, λαμβάνει ως άνω όριο τάσης σχεδιασμού ($\sigma_{eq,Ed}$), την υψηλότερη ισοδύναμη τάση von Mises, όπως αυτή προσδιορίζεται από την αριθμητική ανάλυση, πλην εξαιρέσεων/μοναδικοτήτων, κατά τις οποίες θα πρέπει να λαμβάνεται με βάση τους ελέγχους σχεδιασμού σύμφωνα με όσα αναφέρονται στον EN 1993 (όλα τα μέρη). Όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο 2.2.1, πολλές φορές εξαιτίας σφαλμάτων του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων (κατά την εισαγωγή, την διακριτοποίηση και στην γεωμετρία), υπάρχει περίπτωση το αριθμητικό μοντέλο να παρουσιάσει συγκεντρώσεις τάσεων σε θέσεις κόμβων, αρμών ή και επιβολής φορτίων, ή ακόμη και σε περιοχές στηρίξεων και θέσεις όπου το πλέγμα της διακριτοποίησης παρουσιάζει αλλαγές στην μορφή του. Αυτές οι συγκεντρώσεις τάσεων, μπορούν να έχουν διαφορετική προέλευση και κατά κύριο λόγο ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες:

- a. Γεωμετρικές (φυσικές) συγκεντρώσεις τάσεων
- b. Αριθμητικές συγκεντρώσεις τάσεων (μοναδικότητες)

Όσον αφορά τις αριθμητικές συγκεντρώσεις τάσεων, μπορούν να αγνοηθούν στο στάδιο του σχεδιασμού αφού προκύπτουν από σφάλματα αριθμητικής προσέγγισης των φυσικών τάσεων ή παραμορφώσεων. Αντιθέτως, όταν παρατηρείται συγκέντρωση τάσεων εξαιτίας της γεωμετρίας του φορέα, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ή να αμελούνται, ανάλογα με την επιλεγμένη μέθοδο ανάλυσης και τα εκάστοτε κριτήρια οριακής κατάστασης. Εκτενέστερη διαφοροποίηση των γεωμετρικών και αριθμητικών συγκεντρώσεων τάσεων, δίνεται στο Παράρτημα Β.

5.1.3 Έλεγχος πλαστικής αντοχής

Για τον υπολογισμό της πλαστικής αντίστασης της κατασκευής θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν μία ή περισσότερες από τις ακόλουθες αναλύσεις:

- a. Ανάλυση με μη γραμμικότητα υλικού (MNA)
- b. Ανάλυση με μη γραμμικότητα Γεωμετρίας και Υλικού (GMNA)

Η πρώτη περίπτωση, και όπως έχει παρουσιαστεί αναλυτικά αυτή η μέθοδος στην § 3.2.3, αφορά ανάλυση της «τέλειας», δηλαδή χωρίς ατέλειες, κατασκευής εφαρμόζοντας υποθέσεις μικρών μετατοπίσεων, μικρών τάσεων και ένα ιδεατό ελαστο-πλαστικό νόμο υλικού. Χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της απόκρισης της κατασκευής, μέσω ενός διαγράμματος φορτίου-μετατόπισης (P-δ, δρόμος ισορροπίας), που σχετίζεται άμεσα με τον συνδυασμό φορτίσεων από τον οποίο καταπονείται ο φορέας. Συνήθως δεν εφαρμόζεται για απευθείας καθορισμό της αντίστασης της κατασκευής, ειδικά εάν ο φορέας πρόκειται να είναι ευαίσθητος σε φαινόμενα λυγισμού. Όσον αφορά την δεύτερη περίπτωση, οι αναλύσεις με μη γραμμικότητα γεωμετρίας και υλικού, εφαρμόζονται στον τέλειο φορέα, λαμβάνοντας υπόψη συνδυαστικά τις μη γραμμικότητες υλικού και γεωμετρίας. Συνήθως, εφαρμόζεται σε αριθμητικούς υπολογισμούς για απευθείας έλεγχο της τελικής αντίστασης της κατασκευής, εφόσον δεν είναι εύαλτοι οι φορείς σε αρχικές ατέλειες. Έτσι, εξαιτίας αυτής της ευαισθησίας, δηλαδή της μεγάλης επιρροής της γεωμετρίας στην απόκριση της κατασκευής, έχει παρατηρηθεί, πως τέτοιου τύπου φορείς έχουν πλαστικές μορφές αστοχίας. Επομένως, σε αυτές τις περιπτώσεις, θα πρέπει πάντα να γίνεται χρήση GMNA, προκειμένου να καθοριστεί η πλαστική αντοχή της κατασκευής.

Κατά τον έλεγχο πλαστικής αντοχής, και στις δύο περιπτώσεις, θεωρείται πως ο φορέας καταπονείται από τα μεγέθη σχεδιασμού, τα οποία πολλαπλασιάζονται με έναν συντελεστή φορτίου, έως ότου

επιτευχθεί το όριο πλαστικής αντοχής. Η αντοχή του φορέα (R_{MNA} ή R_{GMNA}), μπορεί να καθοριστεί αξιολογώντας το υπολογισμένο διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης που προκύπτει από την εκάστοτε ανάλυση, με βάση τα δύο κριτήρια που θα παρουσιαστούν στην παράγραφο 5.1.5. Είναι κρίσιμο να σημειωθεί, πως κατά την ανάλυση MNA, πρέπει να γίνεται χρήση του ιδανικού, γραμμικού νόμου ελαστικού-τέλεια πλαστικού υλικού με μηδενική σκλήρυνση, προκειμένου να εξαχθεί η πλαστική αντοχή του υπο εξέταση φορέα. Πρέπει να σημειωθεί επίσης ότι σε περίπτωση χρήσης επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων (shell elements), μπορεί να γίνει χρήση μόνο της ανάλυσης MNA.

Η χαρακτηριστική τιμή της αντοχής της κατασκευής, όπως αναφέρθηκε και στην §4.3, δηλαδή η χαρακτηριστική τιμή της πλαστικής αντίστασης ($R_{pl,k}$), καθορίζεται από τις αντοχές R_{MNA} ή R_{GMNA} , για MNA ή GMNA αντίστοιχα, αφού πρώτα προσαρμοστούν κατάλληλα με χρήση του συντελεστή γ_{FE} , σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$R_{pl,k} = \frac{R_{MNA}}{\gamma_{FE}} \quad \text{ή} \quad R_{pl,k} = \frac{R_{GMNA}}{\gamma_{FE}}$$

όπου:

γ_{FE} ο συντελεστής φορτίου όπως ορίζεται στην §4.3

R_{MNA} ή R_{GMNA} είναι οι υπολογισμένες πλαστικές αντοχές βάσει MNA ή GMNA αντίστοιχα, λαμβάνοντας υπόψη τα κριτήρια οριακής κατάστασης στην §5.1.5

Τέλος, για να προκύψει η τελική τιμή της αντοχής σχεδιασμού, $R_{pl,d}$, απαιτούνται όλοι οι μερικού συντελεστές, για την αντίστοιχη μορφή αστοχίας, όπως αυτοί ορίζονται σύμφωνα με τα όλα τα μέρη των EN 1990 και EN 1993.

5.1.4 Έλεγχος αντοχής έναντι λυγισμού

Ο δεύτερος τρόπος για να γίνει Μέθοδοι σχεδιασμού ο έλεγχος του φορέα σε οριακή κατάσταση αστοχίας, με τη βοήθεια προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων, είναι μέσω ελέγχου αντοχής του φορέα έναντι λυγισμού. Σε αυτή την μέθοδο δίνονται τέσσερις πιθανές μέθοδοι σχεδιασμού και ελέγχου, και κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- Σχεδιασμός μέσω LA ή MNA σε συνδυασμό με LBA
- Σχεδιασμός μέσω GNIA σε συνδυασμό με LBA
- Σχεδιασμός μέσω GNIA σε συνδυασμό με την αντίσταση της διατομής
- Σχεδιασμός μέσω GMNIA

Οι παραπάνω μέθοδοι αφορούν όλα τα είδη πεπερασμένων στοιχείων, εκτός από τα στοιχεία κελύφους, για τα οποία ο έλεγχος αντίστασης λυγισμού, δίνονται από το μέρος EN 1993-1-6.

A. Σχεδιασμός μέσω LA ή MNA σε συνδυασμό με LBA

Μέσω των αναλύσεων LA ή MNA συνδυαστικά με την LBA, δύναται ο καθορισμός της ανηγμένης λυγνότητας του εξεταζόμενου φορέα, που σχετίζεται άμεσα με την εφαρμοζόμενη συνθήκη φόρτιση ή και των συνδυασμό φορτίσεων. Υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{R_{pl}}{R_{cr}}} \quad \text{όπου:} \quad R_{cr} \quad \text{η ελάχιστη ελαστική κρίσιμη αντοχή έναντι λυγισμού}$$

$$R_{pl} \quad \text{η πλαστική αντίσταση της κατασκευής (EN 1993 όλα τα μέρη)}$$

Η τιμή της R_{cr} καθορίζεται από τα αποτελέσματα που εξάγονται μέσω της LBA, και αναφέρεται στην υπο εξέταση μορφή αστοχίας, με την χαμηλότερη τιμή ιδιοσυχνότητας. Ταυτόχρονα, η τιμή της R_{pl} θα πρέπει να καθορίζεται μέσω της MNA, ή συντηρητικός μέσω γραμμικής ελαστικής ανάλυσης (LA), βασιζόμενη σε έλεγχο τάσεων. Όσον αφορά τους πλαισιακούς φορείς, οι σχετικές τιμές των R_{cr} και R_{pl} , μπορούν να προσδιοριστούν για κάθε διαφορετικό είδος τάσεων (ορθές ή διατμητικές τάσεις) χωριστά,

ή εναλλακτικά να προσδιοριστούν για συνδυασμένα πεδία τάσεων. Τέλος, όπως έχει αναφερθεί ήδη σε πολλά σημεία του κειμένου, όλες οι σχέσεις και οι υπολογισμοί των μεγεθών, πρέπει να είναι συμβατές με τους ήδη υπάρχοντες κανονισμούς. Επομένως, έτσι και η ανηγμένη λυγνρότητα της παραπάνω σχέσης, πρέπει να ερμηνεύεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι «συνεπής» με την χρήση που προτείνεται από τα υπόλοιπα σχετικά μέρη των κανονισμών (EN 1993, όλα τα μέρη).

B. Σχεδιασμός μέσω GNIA σε συνδυασμό με LBA

Στόχος της ανάλυσης με μη γραμμικότητα γεωμετρίας, εφαρμοζόμενη στον ατελή φορέα, σε συνδυασμό με την Γραμμική Ανάλυση Λυγισμού, είναι ο προσδιορισμός των μη-γραμμικών εσωτερικών εντατικών μεγεθών και τάσεων αλλά και της σχετικής λυγνρότητας της κατασκευής. Αυτή η μέθοδος σχεδιασμού, είναι δόκιμη εάν πρέπει να ελεγχθούν περισσότερες από μια ιδιομορφή λυγισμού του φορέα, το οποίο εξαρτάται αρχικά από την μορφή αστοχίας του (καθολική αστοχία, τοπική, ή συνδυαστικά), και δεύτερον από τον βαθμό ευαισθησίας του προσομοιώματος στις μεταβολές γεωμετρίας και στο μέγεθος των ατελειών. Επιπλέον, είναι εφαρμόσιμη μόνο στην περίπτωση εντός επιπέδου λυγισμού και ιδιομορφών. Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως η αρχή στην οποία βασίζεται αυτή η μέθοδος σχεδιασμού, είναι η υπόθεση πως ο έλεγχος ευστάθειας ενός φορέα μπορεί να αντικατασταθεί από μια ανάλυση που συμπεριλαμβάνει γεωμετρικές μη γραμμικότητες του ατελή φορέα, η οποία υπολογίζει απευθείας εντάσεις και τάσεις 2^{ας} τάξης, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βάση του ελέγχου τάσεων σύμφωνα με τα μέρη EN 1993-1-1 έως 1-5.

Όπως αναφέρθηκε στην §2.5.4, ένα ή περισσότερα σχήματα ιδιομορφών, μπορούν να αντικατασταθούν από ισοδύναμες γεωμετρικές ατέλειες. Επομένως, συνδυαστικά με ανάλυση GNIA, μπορεί να γίνει έλεγχος αντίστασης έναντι λυγισμού πολλών ιδιομορφών ταυτόχρονα, ο οποίος όμως, δεν θα πρέπει να βασίζεται στον συνολικό υπολογισμό της λυγνρότητας του φορέα, αλλά θα πραγματοποιείται με επαλήθευση της αντίστασης σε επίπεδο διατομής. Η συγκεκριμένη μέθοδος, περιλαμβάνει έναν συνολικό έλεγχο ευστάθειας ολόκληρης της κατασκευής, χρησιμοποιώντας καθολικές ισοδύναμες γεωμετρικές ατέλειες. Στην περίπτωση που τα φαινόμενα 2^{ας} τάξης (μη γραμμικής γεωμετρίας) σε μεμονωμένα μέλη ή ορισμένες ατέλειες μεμονωμένων μελών, δεν λαμβάνονται υπόψη εξ ολοκλήρου στη συνολική ανάλυση, η ευστάθειας τους, θα πρέπει να ελέγχεται σύμφωνα με τα σχετικά κριτήρια ασφαλείας που δίνονται στο μέρος EN 1993-1-1, με περισσότερες λεπτομέρειες στην παράγραφο EN1993-1-1:2022, 7.2.2 (μέθοδος M3). Διαφορετικά, δηλαδή στην περίπτωση που η ευστάθεια μεμονωμένων μελών και οι σχετικές τους εντός επιπέδου ατέλειες, συμπεριλαμβάνονται στην ανάλυση, τότε ο μεμονωμένος έλεγχος ευστάθειας τους δεν είναι απαραίτητος για κάθε ένα μέλος. Ωστόσο, θα πρέπει να πραγματοποιείται συμπληρωματικός έλεγχος εκτός επιπέδου ευστάθειας σύμφωνα με του κανονισμούς του μέρους EN 1993-1-1:2022, 7.2.2 (μέθοδος M4) ή 8.3 (Γενική μέθοδος).

C. Σχεδιασμός μέσω GNIA σε συνδυασμό με αντίσταση διατομής

Πρόκειται για μια βελτιωμένη παραδοχή της μεθόδου σχεδιασμού με GNIA σε συνδυασμό με LBA (περίπτωση B). Σε αυτή την περίπτωση, προσομοιώνονται όλες οι πιθανές συσχετιζόμενες ατέλειες διαφορετικών σχημάτων ιδιομορφών (εντός και εκτός επιπέδου συνδυαστικά με στρεπτικές μορφές λυγισμού). Όπως και προηγουμένως, όταν γίνεται χρήση ισοδύναμων γεωμετρικών ατελειών, που σχετίζονται με όλες τις πιθανές μορφές αστοχίας, και εφαρμόζεται GNIA, ο έλεγχος αντοχής έναντι λυγισμού, μπορεί να αντικατασταθεί από έλεγχο τάσεων, σύμφωνα με τις απαιτήσεις που καθορίζονται στα μέρη EN 1993-1-1 έως 1-5.

D. Σχεδιασμός μέσω GMNIA

Στόχος της ανάλυσης με μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας, στον ατελή φορέα, κατά κύριο λόγο, είναι ο προσδιορισμός της συμπεριφοράς της κατασκευής που απεικονίζεται από τον δρόμο ισορροπίας (διάγραμμα φορτίου μετατόπισης, P-δ), που σχετίζεται με τις επιλεγμένες συννοριακές συνθήκες και τον

αναλυόμενο συνδυασμό φορτίσεων. Σε μια GMNIA, πρέπει πάντα να λαμβάνονται υπόψη οι εξής ατέλειες:

- Γεωμετρικές ατέλειες (σύμφωνα με §2.5.2)
- Κατασκευαστικές ατέλειες (σύμφωνα με §2.5.3)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί οι μορφές ατελειών μπορούν να εισάγονται στο προσομοίωμα είτε ξεχωριστά, είτε υπό την μορφή των ισοδύναμων γεωμετρικών ατελειών, σύμφωνα με την §2.5.5. Παράλληλα, μπορεί να γίνει και χρήση και εισαγωγή ατελειών μέσω των σχημάτων ιδιομορφών, όπως αυτές προκύπτουν από την LBA. Προφανώς, μπορεί να γίνει χρήση και περισσότερων από μια ιδιομορφών, όμως πρέπει να σχετίζονται και να επηρεάζουν το κρίσιμο φορτίο της υπό εξέτασης κατασκευής, για να ληφθούν υπόψη.

Το τελικό ατελές σχήμα του φορέα, θα πρέπει να προκύπτει ύστερα από επαλληλία των ατελειών (ανεξάρτητων γεωμετρικών και παραμενουσών τάσεων, ή ισοδύναμων γεωμετρικών ατελειών), προκειμένου να καλύπτονται όλες οι πιθανές μορφές αστοχίας και γεωμετρικών αποκλίσεων. Πιο συγκεκριμένα, η μορφή των ισοδύναμων γεωμετρικών ατελειών θα πρέπει να αντικατοπτρίζει τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες και τις συνοριακές συνθήκες του φορέα, με έναν ρεαλιστικό και ταυτόχρονα ασφαλή τρόπο. Σημειώνεται, πως στην περίπτωση χρήσης συνδυασμού διαφορετικών ισοδύναμων γεωμετρικών ατελειών, θα πρέπει να γίνεται διερεύνηση της κύριας (δεσπόζουσας) μορφής ατέλειας, άρα και κάθε τύπος ατέλειας θα πρέπει να ελέγχεται ως κύρια μορφή, και τελικά να επιλέγεται εκείνος ο συνδυασμός που προκαλεί την δυσμενέστερη αντοχή.

Για να γίνει η τελική αξιολόγηση της αντίστασης της κατασκευής, οι τιμές σχεδιασμού θα πρέπει να τροποποιούνται μέσω του συντελεστή επαύξησης φορτίου, καθορίζοντας έτσι την μορφή του σχετικού δρόμου ισορροπίας, που αναπαριστά την ελαστο-πλαστική απόκριση του συστήματος. Η αντοχή έναντι σχεδιασμού για την συγκεκριμένη μέθοδο, συμβολίζεται με R_{GMNIA} , και καθορίζεται και αξιολογείται σύμφωνα με την §5.1.5. Η χαρακτηριστική τιμή της αντοχής έναντι λυγισμού, $B_{b,k}$, προκύπτει διαιρώντας την R_{GMNIA} , με τον συντελεστή γ_{FE} . Δηλαδή

$$R_{b,k} = \frac{R_{GMNIA}}{\gamma_{FE}} \quad \text{όπου:} \quad \gamma_{FE} \quad \text{ο συντελεστής όπως ορίζεται από την §4.3}$$

R_{GMNIA} η υπολογισμένη αντοχή έναντι λυγισμού, βασισμένη σε GMNIA πληρώντας τα κριτήρια της §5.1.5

Τέλος, η αντοχή σχεδιασμού, $R_{b,d}$, προκύπτει μέσω της χαρακτηριστικής αντοχής, αφού εφαρμοστούν όλοι μερικοί συντελεστές, όπως αυτοί ορίζονται από τους κανονισμούς EN 1990 και EN 1993.

5.1.5 Μέθοδος αξιολόγησης αναλύσεων με μη γραμμικότητα υλικού

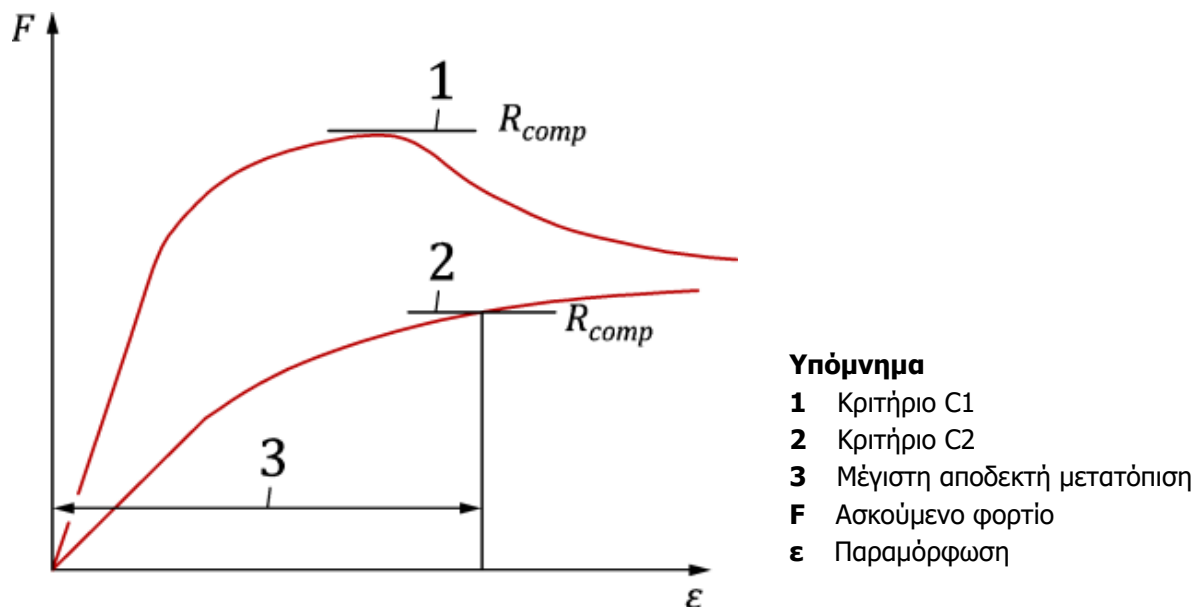
Ένα από τα βασικότερα αποτελέσματα που θα πρέπει να εξαγονται από τις αναλύσεις στις οποίες γίνεται απευθείας έλεγχος της τελικής αντίστασης αλλά και στις αναλύσεις που έχουν ως στόχο την επιβεβαίωση και επέκταση πειραματικών δεδομένων, είναι ο δρόμος ισορροπίας ή αλλιώς το διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης, P-δ. Για να προκύψει αυτό το διάγραμμα, οι τιμές σχεδιασμού θα πρέπει να τροποποιηθούν κατάλληλα μέσω συντελεστών επαύξησης, καθορίζοντας έτσι την τελική ελαστοπλαστική συμπεριφορά της κατασκευής.

Η τελική αντίσταση της κατασκευής, R_{comp} , θα πρέπει να καθορίζεται, αξιολογώντας δυο κριτήρια ασφαλείας, τα οποία εφαρμόζονται στον δρόμο ισορροπίας του φορέα. Σε κάθε περίπτωση, θα πρέπει να λαμβάνεται ίση με την χαμηλότερη τιμή που προκύπτει από τα κριτήρια C1 και C2. Τα κριτήρια αυτά, εκφράζονται ως εξής:

- Κριτήριο C1: το μέγιστο φορτίο του υπολογισμένου δρόμου ισορροπίας
- Κριτήριο C2: το φορτίο που αντιστοιχεί στην μέγιστη επιτρεπτή παραμόρφωση, πριν επέλθει η

αστοχία και το οριακό φορτίο. Η μέγιστη αποδεκτή πλαστική παραμόρφωση διατομών ψυχρής έλασης δίνεται από το μέρος prEN 1993-1-3, για διατομές μορφής πλάκας στο μέρος prEN 1993-1-5, και για επιφανειακά στοιχεία στο μέρος prEN 1993-1-6.

Η σχηματική αναπαράσταση για την επιλογή και την ικανοποίηση των δύο κριτηρίων ασφαλείας, φαίνεται στο Σχήμα 5-1.



Σχήμα 5-1: Καθορισμός αντίστασης κατασκευής μέσω ανάλυσης μη γραμμικού υλικού

Η τελική αντίσταση R_{comp} , θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να καλύπτει τις απαιτήσεις αξιοπιστίας, όπως αυτές ορίζονται σύμφωνα με τις αρχές του prEN 1990. Τέλος, κατά τον άμεσο έλεγχο αντίστασης, η υπολογισμένη αντίσταση, θα πρέπει να τροποποιείται με βάση τον συντελεστή γ_{FE} , καλύπτοντας έτσι τις αβεβαιότητες που πηγάζουν από το αριθμητικό προσομοίωμα και την εκτελεσθείσα ανάλυση.

5.2 Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας

Ο έλεγχος της κατασκευής στη οριακή κατάσταση λειτουργικότητας (ΟΚΛ), είναι εξίσου σημαντικός για τον σχεδιασμό μεταλλικών κατασκευών, καθώς εξασφαλίζει πως η κατασκευή πληροί συγκεκριμένα κριτήρια απόδοσης, κατά την διάρκεια της προβλεπόμενης διάρκειας ζωής της. Ενώ ο έλεγχος της οριακής κατάστασης αστοχίας (ΟΚΑ), εστιάζει στην τελική αντοχή και την ασφάλεια της κατασκευής, η ΟΚΛ, αντιμετωπίζει παράγοντες όπως οι μετατοπίσεις, τα βέλη, η «άνεση» των χρηστών, δηλαδή ζητήματα λειτουργικότητας. Στόχος του συγκεκριμένου ελέγχου, είναι η αξιολόγηση της απόκρισης του εξεταζόμενου φορέα υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, λαμβάνοντας υπόψη τα ενεργά φορτία της κατασκευής. Αυτή η επιβεβαίωση και η επαλήθευση των κριτηρίων, βοηθά στην αποφυγή υπερβολικών παραμορφώσεων που μπορεί να επηρεάσουν την λειτουργικότητα του φορέα.

Στο πλαίσιο του ελέγχου της Οριακής Κατάστασης Λειτουργικότητας, με χρήση πεπερασμένων στοιχείων, μπορεί να γίνει χρήση αριθμητικών προσομοιωμάτων, για τον έλεγχο όλων των απαραίτητων κριτηρίων που δίνονται στους κανονισμούς prEN 1990 και EN1993 (όλα τα μέρη). Σε αυτή την περίπτωση, οι γεωμετρικές ιδιότητες του προσομοιώματος, αλλά και οι παράμετροι του υλικού, θα πρέπει να εισάγονται με τις ονομαστικές τους τιμές, προκειμένου να γίνει πρόβλεψη των σχετικών τάσεων, παραμορφώσεων και κραδασμών. Για να γίνει ο έλεγχος σε ΟΚΛ, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ίδιοι τύποι ανάλυσης που αναφέρονται στην §3.2, λαμβάνοντας πάντα υπόψη τις απαιτήσεις Λειτουργικότητας, όπως αυτές καθορίζονται από τους ΕΚ0 και ΕΚ3.

Πιο συγκεκριμένα, οι τάσεις και οι παραμορφώσεις θα πρέπει να υπολογίζονται υποθέτοντας γραμμική ελαστική συμπεριφορά, εφαρμόζοντας LA, GNA ή GNIA, και λαμβάνοντας υπόψη τους κανόνες σχεδιασμού των σχετικών τμημάτων του EN1993. Στην περίπτωση που το προσομοίωμα εμπεριέχει μη γραμμικότητες υλικού στην ανάλυση, και ταυτόχρονα, μπορεί να συμβεί πλαστική ανακατανομή των δυνάμεων και ροπών στον φορέα σε επίπεδο φορτίου σχεδιασμού κατά την ΟΚΛ, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη σύμφωνα με τους κανόνες που ορίζουν τα σχετικά μέρη του ΕΚ3.

5.3 Οριακή Κατάσταση Κόπωσης

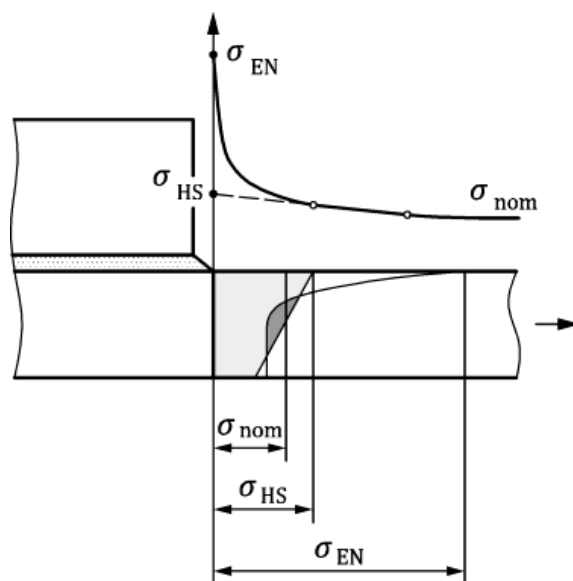
Στο παρόν κεφάλαιο, θα καλυφθεί εν συντομία, ο σχεδιασμός μεταλλικών κατασκευών έναντι κόπωσης, καθώς δεν αποτελεί αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας, παρόλα αυτά, είναι αδύνατο να αποφευχθεί ο έλεγχος, αφού είναι ουσιαστικής σημασίας, ειδικά στις μεταλλικές κατασκευές. Οι μεταλλικές κατασκευές υπόκεινται συχνά σε επαναλαμβανόμενα ή ανακυκλιζόμενα φορτία με την πάροδο του χρόνου, όπως ο άνεμος, τα φορτία κυκλοφορίας ή οι κραδασμοί. Αυτά τα κυκλικά φορτία μπορεί να προκαλέσουν σωρευτικές φθορές, και τελικά να οδηγήσουν σε αστοχία κόπωσης, εάν δεν ληφθούν σωστά υπόψη στο σχεδιασμό.

Με την ενσωμάτωση της ανάλυσης κόπωσης στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, οι μηχανικοί μπορούν να προσομοιώσουν τις συνθήκες κυκλικής φόρτισης και να αξιολογήσουν τη διάρκεια ζωής έναντι κόπωσης της μεταλλικής κατασκευής. Αυτή η ανάλυση περιλαμβάνει την εξέταση παραγόντων όπως το εύρος τάσεων, οι συγκεντρώσεις τάσεων και ο αριθμός των κύκλων φορτίου που θα βιώσει η κατασκευή κατά τη διάρκεια της αναμενόμενης διάρκειας ζωής της. Εκτελώντας μια ανάλυση κόπωσης εντός της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, οι μηχανικοί μπορούν να εντοπίσουν περιοχές επιρρεπείς σε ζημιές λόγω κόπωσης, και έτσι να αποφευχθούν απροσδόκητες αστοχίες, παρατείνοντας την διάρκεια ζωής του έργου.

Η γραμμική ελαστική ανάλυση θα πρέπει να χρησιμοποιείται, σε συνδυασμό με τις ακόλουθες μεθόδους, για την επαλήθευση της κατάστασης σχεδιασμού κόπωσης:

- μέθοδος ονομαστικής τάσης (σ_{nom}), όταν οι ονομαστικές τάσεις προσδιορίζονται από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων
- μέθοδος γεωμετρικής τάσης (hot spot) (σ_{HS})
- μέθοδος ενεργής τάσης ακμής (σ_{EN})

Οι ορισμοί αυτών των τριών τάσεων αναφοράς δίνονται παρακάτω και απεικονίζονται στο Σχήμα 5-2.



Σχήμα 5-2: Ορισμοί ονομαστικής, γεωμετρικής και ενεργούς τάσης

Ονομαστική τάση (σ_{nom}):

Η τάση στο «μητρικό» μεταλλικό έλασμα ή σε μια συγκόλληση που υπολογίζεται στο σημείο μιας πιθανής θέσης ρωγμής χρησιμοποιώντας γραμμική ανάλυση, εξαιρουμένων όλων των επιδράσεων συγκεντρώσεων τάσεων, που έχουν ήδη ληφθεί υπόψη στην κατηγορία λεπτομέρειας κόπωσης.

Γεωμετρική (hot spot) τάση (σ_{HS}):

Η τάση στο «μητρικό» μεταλλικό έλασμα σε ένα πέλμα συγκόλλησης, που ενσωματώνει όλα τα φαινόμενα αύξησης της τάσης λόγω της συνολικής γεωμετρίας, αλλά εξαιρουμένης αυτής του ίδιου του προφίλ συγκόλλησης.

Ενεργός τάση (σ_{EN}):

Η συνολική τάση σε μια πλασματική εγκοπή στο πέλμα ή τη βάση της συγκόλλησης, που υπολογίζεται με ανάλυση LA. Η ενεργός τάση περιλαμβάνει την επίδραση όλων των γεωμετρικών ιδιοτήτων της συγκολλημένης λεπτομέρειας, συμπεριλαμβανομένης της τάσης λόγω της ίδιας της συγκόλλησης.

Αυτές οι τρεις μέθοδοι, σε συνδυασμό με τις αρχές του σχεδιασμού έναντι κόπωσης σε αντίστοιχα μέρη του ΕΚ3, είναι οι βασικές προκειμένου να γίνει ένας πλήρης έλεγχος. Κάθε μέθοδος έχει και διαφορετικό πεδίο εφαρμογής, σε διαφορετικούς τύπους χάλυβα, με διαφορετικές προσεγγίσεις, αναλόγως την επιλεγμένη ανάλυση. Περισσότερες πληροφορίες αλλά και λεπτομέρειες, παρέχονται από το μέρος EN1993-1-14, στο Κεφάλαιο 8.2, στο οποίο δίνονται και σχετικές αναφορές από το μέρος EN1993-1-9.

6 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

6.1 Γενικά

Τα παρακάτω παραδείγματα, αποσκοπούν στην εφαρμογή όλων των θεωρητικών στοιχείων όπως αυτά παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, και έχουν ως στόχο την ανάδειξη της χρήσης των πεπερασμένων στοιχείων σε παραδείγματα σχεδιασμού αλλά και παραδείγματα σύγκρισης αποτελεσμάτων.

Πιο συγκεκριμένα, θα παρουσιαστούν τρία παραδείγματα, τα οποία έχουν εισαχθεί και στο προς υποβολή μέρος του ΕΚ3 1-141. Ένα παράδειγμα σχεδιασμού και δύο παραδείγματα επικύρωσης των αποτελεσμάτων βάσει πειραματικών δεδομένων. Στόχος των δύο παραδειγμάτων επαλήθευσης, είναι να δώσουν στους μηχανικούς το απαραίτητο επιστημονικό υπόβαθρο για την κατάλληλη αξιοποίηση και επαλήθευση των αποτελεσμάτων προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων. Όπως έχει περιγραφεί και στο Κεφάλαιο 4.3, η διαδικασία της επικύρωσης αφορά την σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με πειραματικά δεδομένα ή με γνωστές ακριβής λύσεις, αποσκοπώντας στην ανάδειξη της ακρίβειας και της αξιοπιστίας του προσομοιώματος. Επομένως, επιλέγονται κάποιες βασικές περιπτώσεις αναφοράς αξιολογώντας διαφορετικές μορφές αστοχίας, οι οποίες μπορούν να ελεγχθούν από τους χρήστες σε καθημερινές πρακτικές. Στην περιγραφή των παραδειγμάτων, δίνονται λεπτομέρειες για όλες τις σχετικές πληροφορίες που απαιτούνται για την ανάπτυξη του προσομοιώματος, προκειμένου να επιτευχθούν ίδια αποτελέσματα με αυτά των πειραμάτων. Τέλος, οι επιλεγμένες περιπτώσεις αναφοράς αναδεικνύουν την ακρίβεια και την λεπτομέρεια που μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση πεπερασμένων στοιχείων, συγκριτικά με το πραγματικό φυσικό πείραμα. Αντιθέτως, το παράδειγμα σχεδιασμού, όπως υποδεικνύει και ο τίτλος του, αφορά τον σχεδιασμό ενός φορέα, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις απαραίτητες παραδοχές και απαιτήσεις, για απευθείας υπολογισμό της τελικής αντίστασης του.

Σε γενικές γραμμές, τα τρία παραδείγματα περιλαμβάνουν τα εξής: το πρώτο, αφορά την προσομοίωση ενός κοντού υποστυλώματος κοίλης ορθογωνικής διατομής, με χάλυβα ψυχρής έλασης, το οποίο είναι αμφιαρθρωτό και φορτίζεται σε καθαρή έκκεντρη θλίψη. Στόχος, είναι η ρεαλιστική πρόβλεψη της πλευρικής μετατόπισης και η σύγκριση των αποτελεσμάτων του προσομοιώματος με τα πειραματικά δεδομένα. Στο δεύτερο παράδειγμα, γίνεται προσομοίωση μιας συγκολλητής διατομής ανοξείδωτου χάλυβα, καταπονούμενη από δυο φορτία κάθετα στον διαμήκη άξονα, και αποσκοπεί στην αναπαράσταση του πλευρικού στρεπτικού λυγισμού, και στην ταυτόχρονη παράθεση του δρόμου ισορροπίας του προσομοιώματος και του φυσικού πειράματος. Το τρίτο και τελευταίο παράδειγμα που διεξήχθη, αφορά τον σχεδιασμό ενός τυπικού μεταλλικού πλαισίου με κεκλιμένη στέγη, με δύο πιθανούς τρόπους μόρφωσης γεωμετρίας και υλικών. Η πρώτη περίπτωση ελέγχεται με δομικό χάλυβα S235,

καταπονούμενο από δύο κατακόρυφα φορτία στις κορυφές των υποστυλωμάτων. Όσον αφορά την δεύτερη περίπτωση το υλικό του πλαισίου είναι διγραμμικός χάλυβας με μηδενική κράτυνση, με όριο διαρροής $f_y = 352\text{Μπα}$. Ταυτόχρονα, διερευνάται η επιρροή του συνδυασμού ιδιομορφών πλαισίου, και τελικά εξάγονται αποτελέσματα για την τελική αντοχή του πλαισίου.

6.2 Παράδειγμα Σύγκρισης – Κοντό υποσύλωμα διατομής RHS σε θλίψη

6.2.1 Γενικές πληροφορίες παραδείγματος

Το συγκεκριμένο παράδειγμα αναπαριστά την προσομοίωση ενός αμφιαρθρωτού κοντού υποστυλώματος, κοίλης ορθογωνικής διατομής, χάλυβα ψυχρής έλασης, καταπονούμενο από καθαρή έκκεντρη θλίψη. Το υποσύλωμα ονομαστικού ύψους 1500mm, τελικά αστοχεί σε καμπτικό λυγισμό περί τον ισχυρό άξονα. Τα πειραματικά δεδομένα, αποτελούν μέρος της ολοκληρωμένης έρευνας που διεξήχθη από τους Arrayago et al [7], στην οποία έγιναν αρκετά υπο-πειράματα και μετρήσεις, στα οποία διερευνήθηκε η απόδοση κατασκευών από ανοξείδωτο χάλυβα σε διαφορετικά επίπεδα. Στην εκτεταμένη μελέτη επίσης, περιγράφεται μια σειρά δοκιμών σε διάφορες διατομές και μέλη από ωστενιτικό ανοξείδωτο χάλυβα. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, έγινε ανάλυση και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα διατομής 100x80x4. Η συμπεριφορά του υποστυλώματος, αναπαράχθηκε αριθμητικά, χρησιμοποιώντας το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ADINA Structures FEA, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις σχετικές παραμέτρους για την ακριβή αναπαράσταση της συμπεριφοράς μεταλλικών μελών, συμπεριλαμβάνοντας μη γραμμικότητες γεωμετρίας και υλικού, αρχικές γεωμετρικές ατέλειες, καθώς και παραμένουσες τάσεις. Τελικά, εξάγονται με βάση τα αριθμητικά αποτελέσματα, ο δρόμος ισορροπίας καθώς και το κρίσιμο φορτίο του φορέα, και συγκρίνεται με εκείνα που έχουν ως βάση το πείραμα. Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα αναδεικνύουν πως το αριθμητικό προσομοίωμα είναι ικανό για ακριβή αναπαράσταση της απόκρισης του φορέα έναντι καμπτικού λυγισμού, και η μορφή αστοχίας, συμβαδίζει με εκείνη του πειράματος. Όμως, έπειτα από εκτενή διερεύνηση των παραμέτρων του προσομοιώματος, η αντοχή του υποστυλώματος υπολογίστηκε μικρότερη από εκείνη του πειράματος που εκτελέστηκε κατά την διεξαγωγή της έρευνας [7].

6.2.2 Περιγραφή προβλήματος

Το παράδειγμα επικύρωσης πειραματικών αποτελεσμάτων, προσομοιώνει την απόκριση μια κοίλης ορθογωνικής διατομής, ωστενιτικού χάλυβα ψυχρής έλασης, η οποία εμφανίζει μορφή αστοχίας καμπτικού λυγισμού. Η διατομή του υποστυλώματος θεωρείται εξ ολοκλήρου ενεργή, επομένως το παράδειγμα δεν λαμβάνει υπόψη την αλληλεπίδραση στην μορφή αστοχίας, μεταξύ καθολικών και τοπικών ιδιομορφών.

Το υποσύλωμα ύψους 1500mm, αποτελεί ένα εκ των πολλών δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν στην εκτεταμένη μελέτη των Arrayago et al. Πιο συγκεκριμένα, οι παράμετροι του υποστυλώματος καθορίζονται σύμφωνα με τις ιδιότητες του δοκιμίου CS2-C1 του πειράματος [7]. Έτσι, οι ακριβείς διαστάσεις της διατομής, το μέγεθος της αρχικής ατέλειας (μορφής τόξου), η αρχική κατασκευαστική εκκεντρότητα επιβολής του φορτίου, καθώς και ο νόμος του υλικού, είναι όλα μετρημένα μεγέθη βάσει πειράματος.

Το συγκεκριμένο παράδειγμα μπορεί να φανεί κατάλληλο για επικύρωση άλλων ανοξείδωτων χαλύβδινων υποστυλωμάτων ή/και δοκών, παρόμοιας κοίλης διατομής, και παράλληλα παρέχει καθοδήγηση για την σωστή προσομοίωση της μη γραμμικής συμπεριφοράς διατομών ψυχρής έλασης, με χρήση πεπερασμένων στοιχείων.

6.2.3 Πειραματικά δεδομένα

Τα χαρακτηριστικά της διατομής RHS, λαμβάνονται πειραματικά από μετρήσεις και διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 6-1, όπου περιγράφονται οι μετρημένες γεωμετρικές ιδιότητες, με H το

συνολικό ύψος της διατομής, B είναι το συνολικό πλάτος, t το πάχος της διατομής, και R_{ext} η εξωτερική ακτίνα της γωνίας της διατομής. Τέλος, L είναι το μετρημένο ύψος του υποστυλώματος, το w_g εκφράζει την μέγιστη αρχική ατέλεια μέλους μετρημένη κατά μήκος του δοκιμίου, και αναφέρεται στην αντίστοιχη διεύθυνση καμπτικής μορφή λυγισμού.

H	B	t	R_{ext}	L	w_g	e_m
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
99.5	80.0	3.9	11.4	1500.0	1.04	1.93

Πίνακας 6-1: Μετρημένες γεωμετρικές παράμετροι υποστυλώματος

Το υπό εξέταση υποστυλωμα, κατασκευάστηκε μέσω ψυχρής έλασης, χρησιμοποιώντας ωστενιτικό χάλυβα ποιότητας EN 1.4301. Προκειμένου να ληφθούν υπόψη τα αποτελέσματα της ψυχρής έλασης, η συμπεριφορά τάσεων-παραμορφώσεων του υποστυλώματος, καθορίστηκε μέσω ελέγχων εφελκυσμού δοκιμών, τα οποία κόπηκαν από την επίπεδη (flat) περιοχή, αλλά και από την γωνία της διατομής. Έτσι, έγινε η εκτίμηση των αποτελεσμάτων για τις βασικές παραμέτρους του υλικού, που αντιστοιχούν στο διβάθμιο νόμο υλικού Ramberg-Osgood, κατάλληλο για προσομοίωση ανοξείδωτου χάλυβα. Πιο συγκεκριμένα, για την εισαγωγή του νόμου υλικού στο λογισμικό ADINA, χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις υπολογισμού της παραγράφου 2.4.3, που αντιστοιχούν και στις σχέσεις που παρουσιάζονται στον ΕΚ3 μέρος 1-14, §5.3.3. Στον Πίνακα 6-2 συνοψίζονται τα αποτελέσματα των εφελκυστικών ελέγχων, για την flat περιοχή και για την γωνία της διατομής, όπου E είναι το μέτρο ελαστικότητας, f_y η τάση διαρροή, f_u η μέγιστη εφελκυστική αντοχή, και ϵ_u η μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση. Τέλος, οι παράμετροι n και m , αφορούν τους εκθέτες στους όρους του δεύτερου κλάδου του νόμου υλικού, που αφορά την σκλήρυνση.

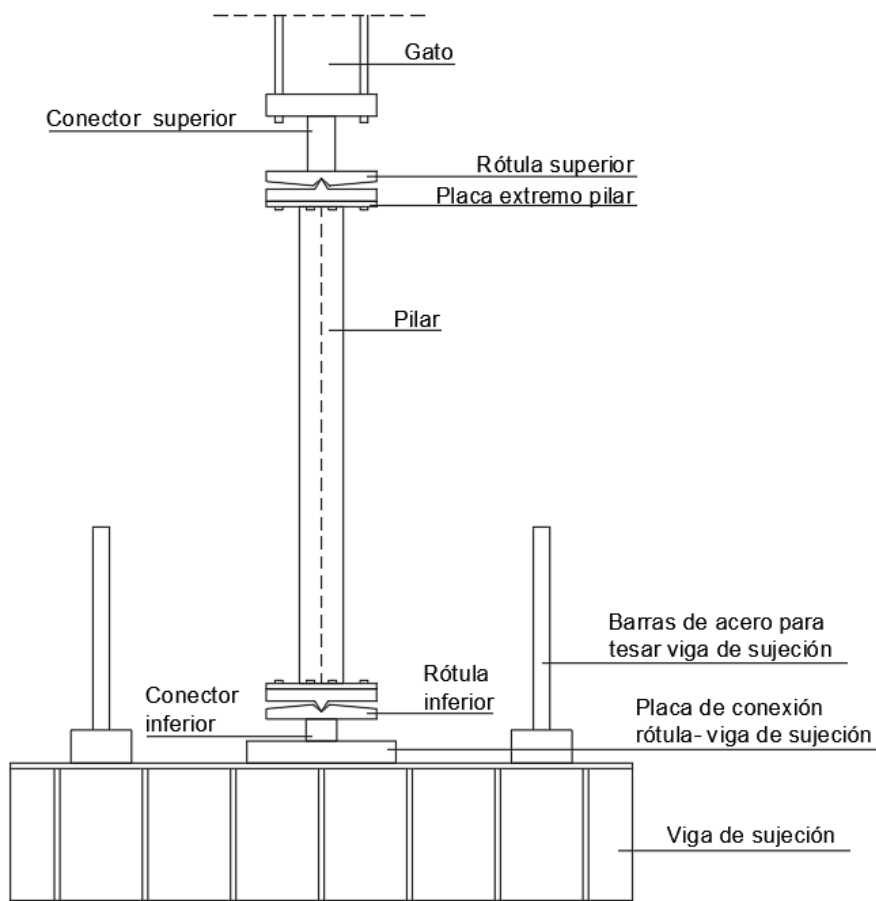
Coupon	E [MPa]	f_y [MPa]	f_u [MPa]	ϵ_u [mm/mm]	n	m
Flat region	183,098	398	622	0.36	7.1	2.3
Corner region	181,345	539	746	0.45	5.6	7.0

Πίνακας 6-2: Μετρημένες παράμετροι υλικού από δοκιμές εφελκυσμού

Αξίζει να σημειωθούν και οι συνθήκες υπό τις οποίες διεξήχθη το πείραμα, και η σύγκριση τους με τα δεδομένα του προσομοιώματος. Επομένως, η διάταξη του πειράματος, φαίνεται σχηματικά Σχήμα 6-1 όπου διακρίνονται δύο συγκολλημένες πλάκες στα άκρα του υποστυλώματος, οι οποίες έπειτα συνδέθηκαν με δύο στηρίγματα τα οποία επιτρέπουν την ελεύθερη περιστροφή περί τον κύριο άξονα της διατομής. Ο άξονας περιστροφής των ελασμάτων εντοπίζεται 50mm μακριά από τα άκρα της διατομής, οπότε το ενεργό μήκος του υποστυλώματος θεωρείται 1600mm (1500+50+50=1600mm). Η βάση που στηρίζεται η πλάκα έδρασης είναι ακλόνητη, προκειμένου να περιοριστεί η κατακόρυφη μετακίνηση της διατομής, ενώ το άνω στήριγμα είναι συνδεδεμένο με ένα υδραυλικό μηχανισμό ο οποίος ασκεί την αξονική θλιπτική δύναμη. Τέλος, η αρχική εκκεντρότητα επιβολής του φορτίου e_m προς την κατεύθυνση της πλευρικής μετατόπισης, υπολογίστηκε εκ των υστέρων βάσει των αποτελεσμάτων φορτίου-μετατόπισης, και η τιμή της δίνεται στον Πίνακα 6-1.

6.2.4 Ανάπτυξη αριθμητικού προσομοιώματος

Το αριθμητικό προσομοίωμα αναπτύχθηκε με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων (shell elements), αναπαριστώντας την μέση επιφάνεια του κάθε στοιχείου, και δόθηκαν οι μετρημένες τιμές του Πίνακα 6-1. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ADINA Structures, στο οποίο δημιουργήθηκαν δύο ομάδες πεπερασμένων στοιχείων (Element Group), μια για τις πλευρές τις διατομής, και μια για τις γωνίες της.



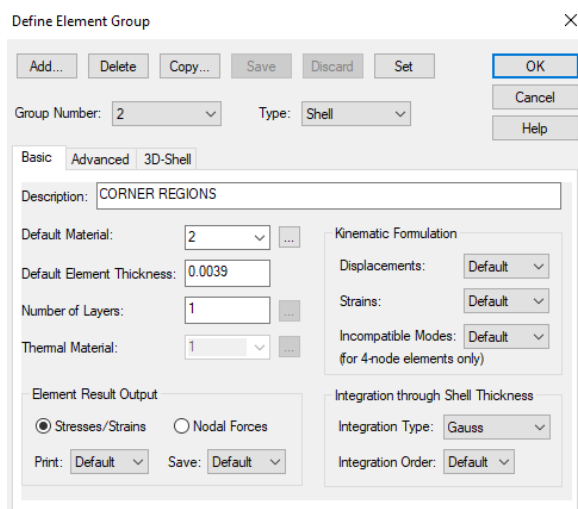
Σχήμα 6-1: Διάταξη πειράματος θλιπτικής καταπόνησης υποστυλώματος

Σε κάθε Element Group δόθηκε το πάχος του ($t=3.9\text{mm}$), και το αντίστοιχο υλικό από τον Πίνακα 6-2. Ενδεικτικά, φαίνονται οι παράμετροι της ομάδας πεπερασμένων των γωνιακών στοιχείων, στην Εικόνα 6-1. Η διακριτοποίηση έγινε αρχικά με τετραγωνικά στοιχεία και ομοιόμορφη κατανομή πλέγματος, και πιο συγκεκριμένα, στις πλευρές της διατομής το μέγεθος των στοιχείων έχουν διαστάσεις $10\text{mm} \times 10\text{mm}$, ενώ στις στρογγυλεμένες γωνίες, οι διαστάσεις έχουν μέγεθος $10\text{mm} \times 5\text{mm}$. Σχηματικά η διακριτοποίηση φαίνεται στην Εικόνα 6-2. Το κρίσιμο φορτίο του φορέα, καθώς και η μορφή αστοχίας του υποστυλώματος, καθορίστηκαν από ανελαστική ανάλυση 2^{ης} τάξης, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις μη γραμμικότητες υλικού και γεωμετρίας. Επιπλέον, έγινε εισαγωγή αρχικών γεωμετρικών ατελειών, επομένως η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε είναι Ανάλυση με μη γραμμικότητα Γεωμετρίας και Υλικού με αρχικές ατέλειες (GMNIA). Οι αρχικές γεωμετρικές ατέλειες λήφθηκαν βάσει του σχήματος της πρώτης ιδιομορφής, οπότε πραγματοποιήθηκε μια γραμμική ανάλυση λυγισμού (LBA) πριν την GMNIA, για απόκτηση του σχήματος ατελειών μέλους.

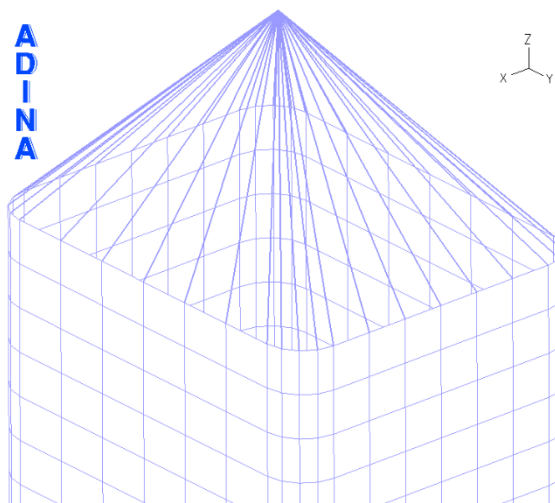
6.2.5 Συνοριακές συνθήκες και φόρτιση φορέα

Οι συνθήκες στήριξης του προσομοιώματος, εισάχθηκαν μέσω δέσμευσης των κινηματικών συνθηκών την ακραίων κόμβων της διατομής. Πιο συγκεκριμένα, οι ακμές των ακραίων διατομών, συνδέθηκαν με δύο σημεία αναφοράς, τοποθετημένα σε απόσταση 50mm από τα άκρα, με το άνω σημείο επιπλέον 1.93mm «ηλάι» του κέντρου της διατομής, καθώς εκεί βρίσκεται το σημείο περιστροφής των αξόνων των αρθρώσεων. Έπειτα, όλοι οι κόμβοι των ακραίων διατομών συνδέθηκαν μέσω άκαμπτων πλασματικών δοκών (rigid links, βλ. Εικόνα 6-2) στα δύο αυτά σημεία, και τέλος, η δέσμευση των βαθμών ελευθερίας δόθηκε στα δύο σημεία αναφοράς. Όλοι οι βαθμοί ελευθερίας ήταν δεσμευμένοι, εκτός την περιστροφή περί τον κύριο άξονα στην βάση του υποστυλώματος, ενώ ελεύθερος ήταν και ο

βαθμός ελευθερίας της κατακόρυφης μετατόπισης στην κορυφή του υποστυλώματος. Το θλιπτικό φορτίο που προκαλείται από τον υδραυλικό μηχανισμό, επιβλήθηκε ως μια κατακόρυφη μετατόπιση στο ανώτερο σημείο αναφοράς, προκειμένου να προβλεφθεί η μεταλυγισμική συμπεριφορά του υποστυλώματος.



Εικόνα 6-1: Element Group γωνιακών στοιχείων



Εικόνα 6-2: Διακριτοποίηση φορέα

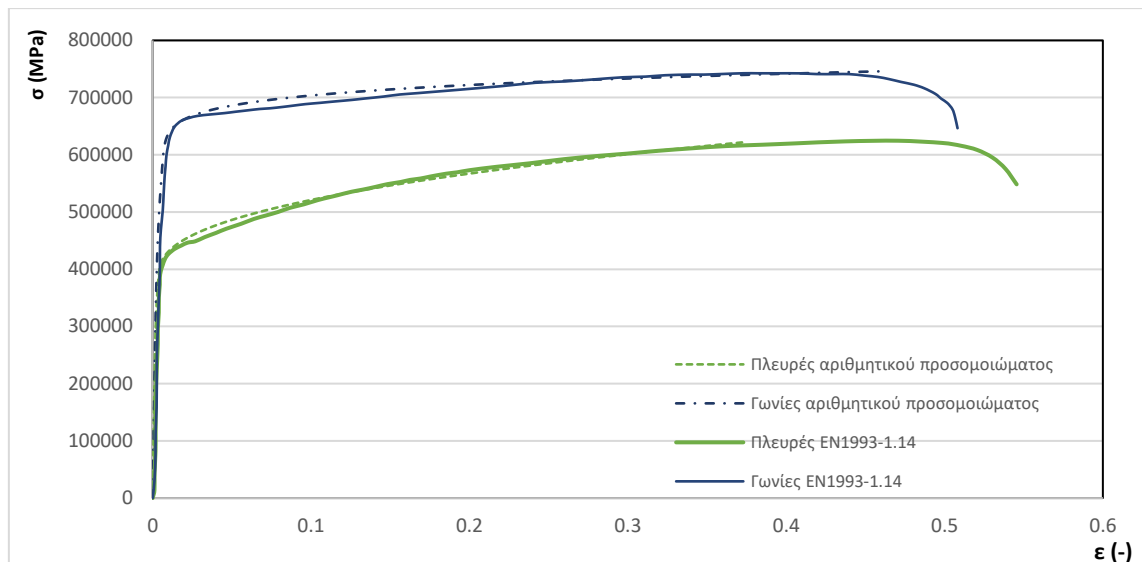
6.2.6 Νόμος υλικού

Το βασικό χαρακτηριστικό των χαλύβων ψυχρής έλασης, είναι η μη γραμμική σχέση τάσεων-παραμορφώσεων, καθώς και η σημαντική σκλήρυνση έπειτα την διαρροή του υλικού, επομένως απαιτείται η εισαγωγή ενός τύπου υλικού, το οποίο είναι ικανό να προσομοιώσει τα παραπάνω χαρακτηριστικά. Έτσι, σύμφωνα με τις σχέσεις που παρουσιάζονται στον ΕΚ3 μέρος 1-14, §5.3.3, αλλά και στο κεφάλαιο 2.4.3 του κειμένου, υιοθετήθηκε το πλέον κατάλληλο υλικό, με τον διβάθμιο νόμο Ramberg-Osgood. Οι δύο νόμοι υλικού φαίνονται στο Διάγραμμα 6-1, ενώ για σκοπούς σύγκρισης, εμφανίζεται στο διάγραμμα και ο νόμος υλικού για τις πλευρές και τις γωνίες του υποστυλώματος, όπως αυτός υπολογίστηκε από τους πειραματικούς ελέγχους. Αξίζει να σημειωθεί πως ο λόγος για τον οποίο δόθηκαν δύο διαφορετικές ποιότητες χάλυβα στην ίδια διατομή, είναι η διαδικασία παραγωγής και έλασης των διατομών ψυχρής έλασης. Κατά την διαδικασία αυτή, εμφανίζεται μεγάλη αύξηση της αντοχής καθώς υπόκεινται σε σημαντικές πλαστικές παραμορφώσεις. Έτσι, στο προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων εισάχθηκαν οι «ενισχυμένες» παράμετροι υλικού, διαφοροποιώντας έτσι της πλευρές και τις γωνίες της διατομής, και ανατέθηκαν οι αντίστοιχοι νόμοι υλικού, που πλέον συμπεριλαμβάνουν τα αποτελέσματα της ψυχρής έλασης. Τέλος, οι σχέσεις υλικού Ramberg-Osgood, αναφέρονται στις μηχανικές τάσεις-παραμορφώσεις, επομένως μέσω των σχέσεων

$$\sigma_{\text{true}} = \sigma \cdot (1 - \epsilon)$$

$$\epsilon_{\text{true}} = -\ln(1 - \epsilon)$$

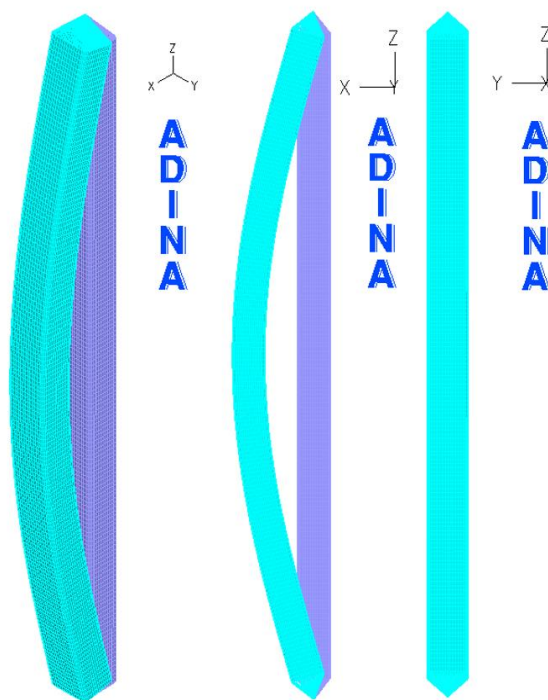
έγινε η μετατροπή τους σε νόμο υλικού πραγματικών τάσεων-ανηγμένων παραμορφώσεων.



Διάγραμμα 6-1: Διβάθμιος νόμος υλικού Ramberg-Osgood

6.2.7 Αρχικές ατέλειες

Οι αρχικές γεωμετρικές ατέλειες μέλους, λήφθηκαν βάσει των σχημάτων της ιδιομορφής που εμφανίζει μορφή αστοχίας καμπτικού λυγισμού, η οποία εξήχθη όπως αναφέρθηκε μέσω γραμμική ανάλυσης λυγισμού (LBA). Το σχήμα της ιδιομορφής φαίνεται στην Εικόνα 6-3. Το πλάτος της αρχικής γεωμετρικής ατέλειας, ισούται με την μετρημένη τιμή της, δηλαδή ίσο με 1.04mm, όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 6.1 (μέγεθος w_0). Για την κατεύθυνση της ατέλειας (πρόσθημο) έγινε διερεύνηση σε συνδυασμό με το πρόσθημο της αρχικής κατασκευαστικής εκκεντρότητας του φορτίου, προκειμένου να βρεθεί ο δυσμενέστερος συνδυασμός, που κατ' επέκταση προκαλεί και την μικρότερη αντοχή του φορέα. Έτσι, βρέθηκε πως η χαμηλότερη αντοχή προκύπτει για αντίθετα πρόσθημα, (θετική εκκεντρότητα με αρνητική ατέλεια ή ανάποδα), το οποίο οφείλεται στον διπλό άξονα συμμετρίας του υποστυλώματος. Τα αποτελέσματα του δρόμου ισορροπίας παρουσιάζονται αναλυτικά στην παράγραφο 6.2.8. Όσον αφορά τις παραμένουσες τάσεις, λαμβάνονται υπόψη έμμεσα, από τις υιοθετημένες ιδιότητες του υλικού.



Εικόνα 6-3: 1η ιδιομορφή λυγισμού (3D, XZ, YZ)

6.2.8 Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων

Η επικύρωση των αποτελεσμάτων του αριθμητικού προσομοιώματος βασίζεται στην σύγκριση των πειραματικών δεδομένων, με εκείνα που εξήχθησαν από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Η σύγκριση γίνεται μέσω των δρόμων ισορροπίας (διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης), οι οποίοι αναφέρονται στο μέσο του υποστυλώματος, και κατ' επέκταση προσδιορίζουν την τελική αντοχή του υποστυλώματος. Το αριθμητικό προσομοίωμα κρίνεται κατάλληλο για ακριβή και ρεαλιστική αναπαράσταση της μορφής αστοχίας του υποστυλώματος, όπως φαίνεται από την σύγκριση της φωτογραφίας από το πείραμα, και της παραμορφωμένης κατάστασης του μοντέλου (Εικόνα 6-4).



Εικόνα 6-4: Σύγκριση παραμορφωμένου φορέα πειράματος-προσομοιώματος

Αντιθέτως, η υπολογισμένη αντοχή του υποστυλώματος δεν βρέθηκε ίδια με του πειράματος της έρευνας [7], παρά την ρεαλιστική απόκριση. Πιο συγκεκριμένα, ενώ το πείραμα έδωσε αντοχή υποστυλώματος ίση με 493.3kN, το αριθμητικό προσομοίωμα καθώς και οι υπολογισμοί «στο χέρι», (βασισμένοι στους αντίστοιχους κανονισμούς του ΕΚ3), δίνουν την δυσμενέστερη αντοχή υποστυλώματος έναντι καμπτικού λυγισμού ίση με 369.94kN και 379.43kN αντίστοιχα. Πρέπει να σημειωθεί, πως έγιναν αρκετές διερευνήσεις στις παραμέτρους του προσομοιώματος, προκειμένου να αποκλιστεί κάθε πιθανό ενδεχόμενο λάθους, και άρα μειωμένης αντοχής.

Αρχικά, διερευνήθηκε ο νόμος του υλικού, και πιο συγκεκριμένα η εισαγωγή του στο αριθμητικό προσομοίωμα ως μηχανικές ή ως πραγματικές τάσεις-παραμορφώσεις. Τα αποτελέσματα δεν άλλαξαν και η αντοχή υπολογίστηκε ίση με 369kN. Έπειτα, έγινε διερεύνηση της πυκνότητας του πλέγματος του προσομοιώματος, κατά την οποία και πάλι δεν υπήρξε διαφοροποίηση της τελικής αντίστασης. Η

προτεινόμενη πυκνότητα του παραδείγματος, είναι 10mm*10mm η οποία ήταν η πρώτη που εφαρμόστηκε. Έπειτα, έγινε δοκιμή με πυκνότερο πλέγμα 10mm*5mm σε όλο τον φορέα. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως η επιρροή του πλέγματος δεν είναι σημαντική καθώς η τελική αντίσταση δεν διαφοροποιήθηκε. Επίσης, αποδυνκνείουν πως η αρχική πυκνότητα 10mm*10mm ήταν επαρκής για ακριβή απόκριση του συστήματος. Τέλος, έγινε διερεύνηση των συνθηκών στήριξης του προσομοιώματος, και η εισαγωγή διαφορετικών από των προτεινόμενων του πειράματος, όπου και πάλι, δεν υπήρξε διαφοροποίηση της αντοχής, αλλά ούτε και της ρεαλιστικής απόκρισης του συστήματος. Παρακάτω ακολουθούν οι υπολογισμοί «στο χέρι», που έγιναν σύμφωνα με τους σχετικούς κανονισμούς του ΕΚ3.

Διατομή RHS100x80x4:

$$A = 13\text{cm}^2 \quad B = 80\text{mm} \quad H = 100\text{mm} \quad R_{\text{ext}} = 11.4\text{mm} \quad t = 4\text{mm}$$

$$c = H - 2 \cdot R_{\text{ext}} = 76.5\text{mm} \quad \text{όρα } c/t = 19.1\text{mm}$$

$$E_{\text{flat}} = 183098 \text{ MPa} \quad E_{\text{corner}} = 181345 \text{ MPa}$$

$$f_{\text{flat}} = 398 \text{ MPa} \quad f_{\text{corner}} = 539 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{\text{flat}} = \sqrt{235/398} = 0.768 \quad \varepsilon_{\text{corner}} = \sqrt{235/539} = 0.66$$

$$c/t = 19.1\text{mm} \quad \text{που αντιστοιχεί σε γωνία κλάσης 2 και πλευρές κλάσης 1}$$

για κοίλη διατομή, ψυχρής έλασης λαμβάνεται καμπύλη λυγισμού c

$$I = 136,9\text{cm}^4 \quad i = \sqrt{I/A} = 3.24$$

Αμφιαρθρωτό υποστύλωμα άρα $k = 1.0$ οπότε το κρίσιμο μήκος λυγισμού $L_{\text{cr}} = k \cdot L = 150\text{cm}$

Λυγηρότητα: γενικά ισχύει $\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{E/f_y}$ άρα $\lambda_1^{\text{flat}} = 67.39$ και $\lambda_1^{\text{corner}} = 57,63$

Ανηγγμένη λυγηρότητα: γενικά $\bar{\lambda} = (L_{\text{cr}}/i) \cdot (1/\lambda_1)$ άρα $\lambda_{\text{flat}} = 0.686$ και $\lambda_{\text{corner}} = 0.802$

$$\text{Συντελεστής } \Phi: \quad \Phi = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right] \quad \text{με } \Phi_{\text{flat}} = 0.855 \text{ και } \Phi_{\text{corner}} = 0.969$$

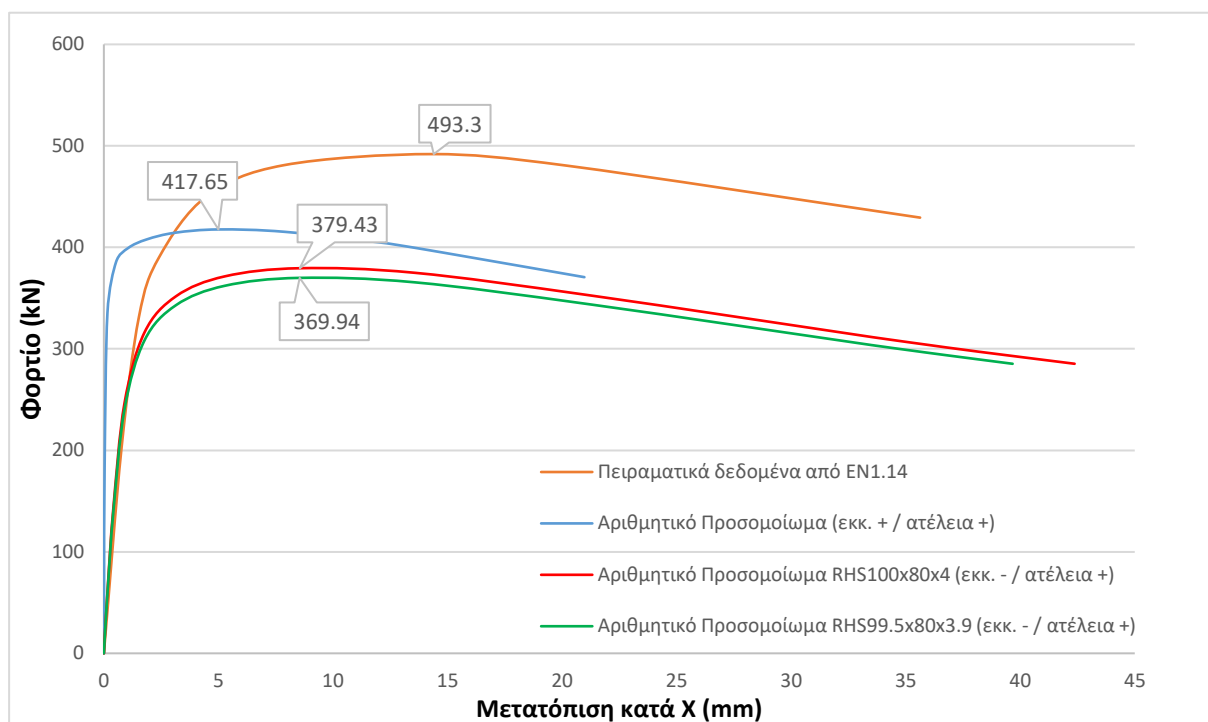
$$\text{Μειωτικός συντελεστής λυγισμού: } \chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad \text{με } \chi_{\text{flat}} = 0.733 \text{ και } \chi_{\text{corner}} = 0.661$$

$$\text{Η αντοχή του μέλους έναντι καμπτικού λυγισμού προκύπτει από τον τύπο: } N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot f_y \cdot A}{\gamma_{M1}}$$

$$\text{Άρα } N_{b,Rd}^{\text{flat}} = 379.43\text{kN} \text{ και } N_{b,Rd}^{\text{corner}} = 462.96\text{kN}$$

Προφανώς η τελική αντοχή του μέλους ισούται με την δυσμενέστερη περίπτωση των δύο αντοχών, επομένως $N_{b,Rd} = 379.37\text{kN}$.

Αξιίζει να σημειωθεί πως παρά τον χαρακτηρισμό της διατομής ως RHS100x80x4, όπου 4mm το πάχος της, οι μετρημένες διαστάσεις της αντιστοιχούν σε πάχος 3.9mm. Στην αρχική προσομοίωση του φορέα όπως αναφέρθηκε στην §6.2.4, δόθηκε πάχος 3.9mm. Όμως, έγινε και προσομοίωση του μέλους με διαστάσεις 100x80x4, και όπως φαίνεται στα συγκεντρωτικά διαγράμματα, η αντίσταση που εξήχθει από το λογισμικό είναι ίση με ακρίβεια δύο δεκαδικών με την κανονιστικά υπολογισμένη αντοχή έναντι καμπτικού λυγισμού. Επιπλέον, στους παρακάτω δρόμους ισορροπίας, διακρίνεται και η περίπτωση ανάλυσης όπου δόθηκαν ίδια πρόσημα για την κατασκευαστική εκκεντρότητα επιβολής φορτίου και την αρχική γεωμετρική ατέλεια, που όπως είναι φανερό, οδηγεί σε αρκετά αυξημένη αντοχή και δυσκαμψία υποστυλώματος. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα φορτίου μετατόπισης (P-δ), των πειραματικών δεδομένων (πορτοκαλί χρώμα), της ανάλυσης με τις μετρημένες διαστάσεις και αντίθετα πρόσημα εκκεντρότητας και ατέλειας (RHS99.5x80x3.9) (πράσινο χρώμα), της ανάλυσης με ομόσημη εκκεντρότητα και ατέλεια (γαλάζιο χρώμα), και τελικά της ανάλυσης με διαστάσεις 100x80x4 και αντίθετα πρόσημα (κόκκινο χρώμα).



Διάγραμμα 6-2: Σύγκριση αποτελεσμάτων αναλύσεων κοντού υποστυλώματος

6.3 Παράδειγμα Σύγκρισης – Πλευρικός λυγισμός συγκολλητής διατομής

6.3.1 Γενικές πληροφορίες παραδείγματος

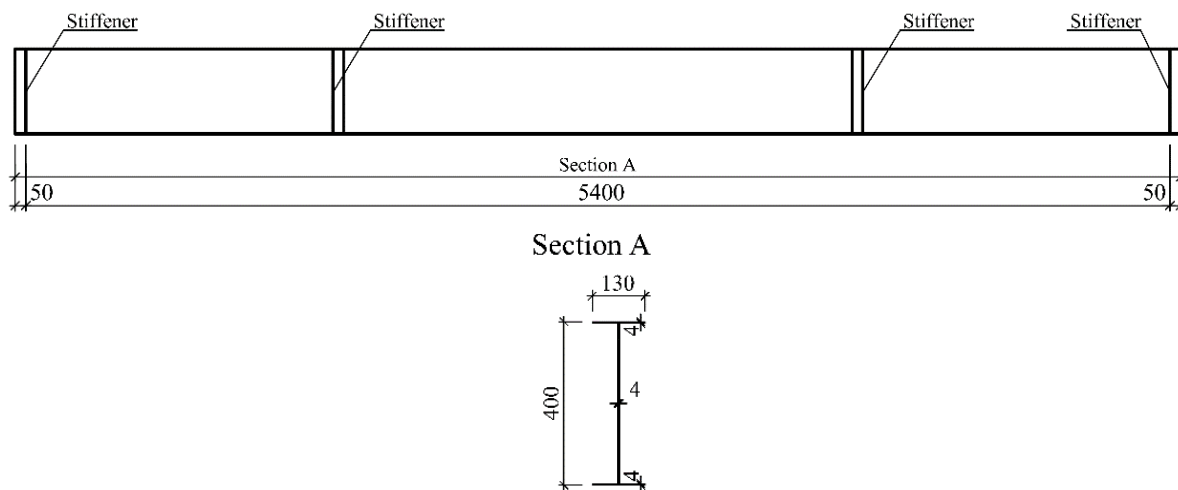
Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, γίνεται προσομοίωση με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων, μιας απλώς στηριγμένης συγκολλητής δοκού, η οποία φέρει εγκάρσιες ενισχύσεις, και καταπονείται σημειακά. Σκοπός, είναι η πρόβλεψη του στρεπτικού λυγισμού αλλά και η απόκριση της δοκού σε τοπικούς λυγισμούς, αλλά και η μορφή αστοχίας της. Η εξεταζόμενη δοκός έχει διαστάσεις 400mm συνολικού ύψους και 130mm πλάτους· αποτελείται από συγκολλητά ελάσματα ανοξείδωτου χάλυβα EN1.4301. Το συνολικό άνοιγμα της δοκού ισούται με 5400mm, ενώ τα δύο σημειακά φορτία, ασκούνται σε απόσταση 1450mm από τις στηρίξεις. Το μήκος της δοκού μεταξύ δύο διαδοχικών εγκάρσιων ενισχύσεων (stiffeners) και κατ' επέκταση με σταθερή και την μεγαλύτερη ροπή αδρανείας, είναι 2500mm. Το προσομοίωμα, είναι βασισμένο σε εκτενέστερη έρευνα των Michal Jandera και Marek Šorf [15], κατά την οποία έγινε μελέτη διαφόρων διαστάσεων διατομών και μήκους δοκών. Πιο συγκεκριμένα, διεξήχθησαν πειραματικοί έλεγχοι σε έξι χαλύβδινες δοκούς, με παρόμοιες συνθήκες στήριξης, λαμβάνοντας υπόψη μη γραμμικότητες υλικού αλλά και γεωμετρίας. Όσον αφορά το προσομοίωμα, εφαρμόστηκε μη γραμμική ανάλυση, συμπεριλαμβανομένων μη γραμμικοτήτων υλικού και γεωμετρίας (GMNIA), χρησιμοποιώντας το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ADINA Structures. Τελικά, με βάση τα αποτελέσματα του λογισμικού, δημιουργήθηκαν οι αντίστοιχοι δρόμοι ισορροπίας του φορέα, και λήφθηκαν όλες οι πιθανές μορφές αστοχίας, οι οποίες τελικά συγκρίθηκαν με τα πειραματικά αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης, δείχνουν πως το ανεπτυγμένο αριθμητικό προσομοίωμα, είναι ικανό να αναπαραστήσει ρεαλιστικά και με μεγάλη ακρίβεια τον στρεπτικό λυγισμό και την συμπεριφορά της διατομής έναντι τοπικών λυγισμών, αδυνατώντας όμως λόγω δυνατοτήτων χρήσης του λογισμικού, να γίνει εισαγωγή, και κατ' επέκταση να ληφθούν υπόψη οι παραμένουσες τάσεις, που όπως αποδεικνύεται επηρεάζουν αλλά σε μικρό ποσοστό την τελική αντίσταση του φορέα.

6.3.2 Περιγραφή προβλήματος

Η εφαρμογή του προβλήματος επικεντρώνεται στην συμπεριφορά μιας δοκού από ανοξείδωτο χάλυβα, που υπόκειται σε καθολική και τοπική αστάθεια. Η επικύρωση των αποτελεσμάτων αλλά και του προσομοιώματος, εφαρμόζεται μέσω ανάλυσης GMNIA, με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων (shell elements), προκειμένου να ληφθούν με ακρίβεια υλικού αλλά και γεωμετρικές μη γραμμικότητες, καθώς και οι γεωμετρικές ατέλειες σε συνδυασμό με αρχικές παραμένουσες τάσεις των συγκολλητών μελών της διατομής διπλού ταυ. Το τελικό πόρισμα του παραδείγματος προκύπτει ύστερα από σύγκριση των δρόμων ισορροπίας (διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης) μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και των αποτελεσμάτων του αριθμητικού προσομοιώματος. Ως εκ τούτου, η προβλεπόμενη αντοχή της δοκού παρέχεται μαζί με την ικανότητα παραλαβής φορτίου της δοκού. Συμπερασματικά, η μορφή αστοχίας του μέλους, οφείλεται κατά κύριο λόγο στον καθολικό λυγισμό (πλευρικός στρεπτικός λυγισμός), με ταυτόχρονη αλληλεπίδραση φαινομένων τοπικών λυγισμού στον κορμό της διατομής· αυτός είναι επίσης και ο κύριος τομέας εφαρμογής της σύγκρισης των αποτελεσμάτων του παραδείγματος.

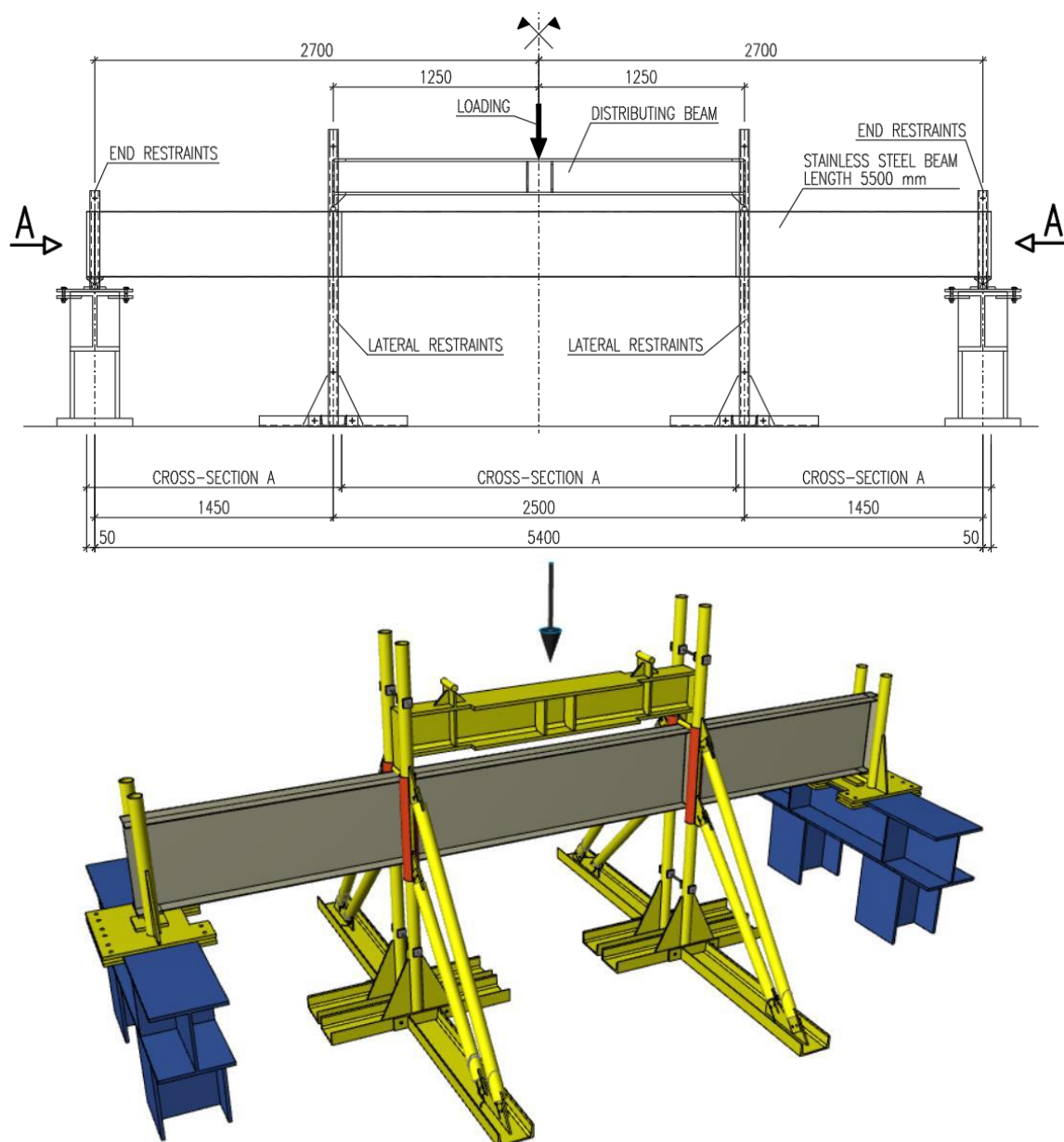
6.3.3 Πειραματικά δεδομένα

Τα πειραματικά δεδομένα, δηλ. διαστάσεις διατομής, συνθήκες στήριξης, νόμος υλικού κ.α., παρουσιάζονται όπως δίνονται μέσω της εκτεταμένης έρευνας [15], μέρος της οποίας είναι το συγκεκριμένο παράδειγμα. Τα συγκολλητά μέρη της διατομής (πέλματα, κορμός, εγκάρσιες ενισχύσεις), κόπηκαν με τεχνολογία λέιζερ, από «φύλλα» ανοξείδωτου χάλυβα και στην συνέχεια συγκολλήθηκαν με την μέθοδο TIG. Η διατομή είναι διπλής συμμετρίας, με πέλματα πλάτους 130mm, και συνολικό ύψος 400mm, ενώ το πάχος τόσο των πελμάτων όσο και του κορμού είναι 4mm (επομένως το καθαρό ύψος κορμού είναι $400-4-4=392\text{mm}$). Η ποιότητα του ωστενιτικού χάλυβα, είναι EN 1.4301. Η ονομαστική διάταξη της δοκού, αλλά και το στήσιμο του πειράματος (συνθήκες στήριξης), παρουσιάζονται σχηματικά στις Εικόνα 6-5 και Εικόνα 6-6.



Εικόνα 6-5: Γεωμετρία δοκού

Από τις ίδιες εικόνες, διακρίνονται και οι θέσεις των εγκάρσιων ενισχύσεων του κορμού (stiffeners), το συνολικό άνοιγμα της δοκού, αλλά και η ακριβής τοποθέτηση των στηρίξεων. Επιπλέον, η δοκός στηρίζεται πλευρικά, και στα δύο πέλματα, προκειμένου να αποφευχθεί η στρέψη της δοκού, στις θέσεις των ενισχύσεων (50mm από τα άκρα) και στα σημεία επιβολής των φορτίων (1450mm από τα άκρα). Τέλος, το μήκος λυγισμού της δοκού, εξ αιτίας των ενισχύσεων, ανάγεται σε 2500mm. Οι ακριβείς και μετρημένες διαστάσεις της διατομής, καθώς και η λυγιστικότητα κάθε στοιχείου της αλλά και της συνολικής διατομής, δίνονται στον Πίνακα 6-3.



Εικόνα 6-6: Σχηματική απεικόνιση πειραματικής διάταξης δοκού

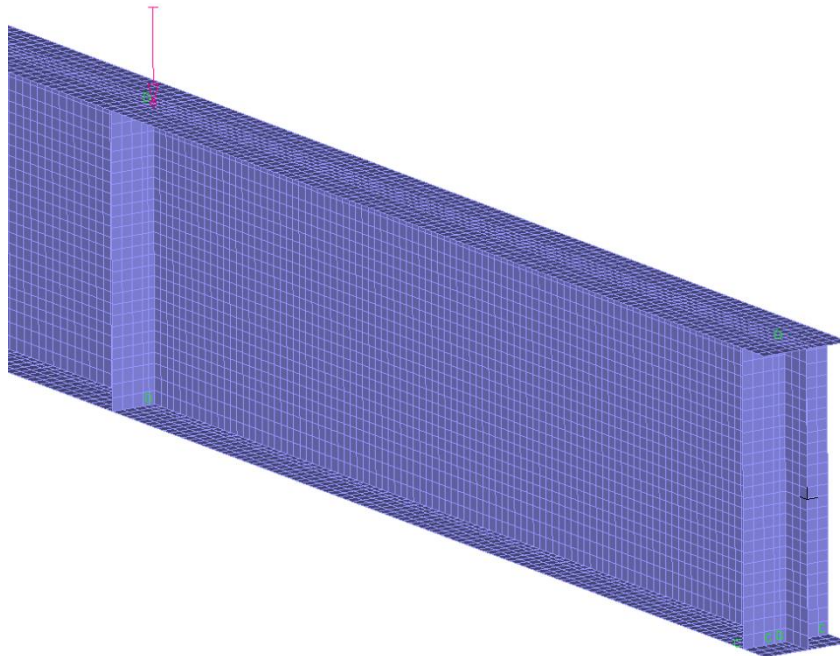
Πίνακας 6-3: Μετρημένες διαστάσεις δοκού

Πέλματα			Κορμός			Δοκός		
b_f [mm]	t_f [mm]	$\bar{\lambda}_{p,f}$ [-]	h [mm]	t_w [mm]	$\bar{\lambda}_{p,f}$ [-]	Άνοιγμα L [mm]	Μήκος μεταξύ ενισχύσεων L_{LT} [mm]	$\bar{\lambda}_{p,f}$ [-]
130.1	3.97	0.993	400.5	3.97	0.862	5400	2500	0.636

6.3.4 Ανάπτυξη αριθμητικού προσομοιώματος

Για την επίλυση και την πρόβλεψη της απόκρισης του συστήματος, εφαρμόστηκε ανάλυση με μη γραμμικότητα γεωμετρίας και υλικού συμπεριλαμβανομένου των αρχικών στελειών (GMNIA). Το προσομοίωμα, κατασκευάστηκε μέσω του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ADINA Structures,

χρησιμοποιώντας επιφανειακά στοιχεία κελύφους (shell elements), αναπαριστώντας την μέση επιφάνεια του κάθε στοιχείου. Όσον αφορά την διακριτοποίηση των στοιχείων, δόθηκε κατά το δυνατόν ομοιόμορφη, τετραγωνική και ορθογωνική κατανομή σε ολόκληρο τον φορέα. Έτσι, στα άκρα των πελμάτων το πλέγμα διακριτοποίησης είναι 15mm*16mm, ενώ στο κέντρο τους είναι 9mm*16mm. Στον κορμό της διατομής, δόθηκε σε όλο το ύψος του, διακριτοποίηση πλέγματος 14mm*15mm.



Εικόνα 6-7: Διακριτοποίηση φορέα

Εφόσον εισήχθησαν αρχικές γεωμετρικές ατέλειες, και πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας τις δύο πρώτες ιδιομορφές του φορέα, εφαρμόστηκε πρότινος γραμμική ανάλυση λυγισμού (LBA), προκειμένου να ληφθούν τα σχήματα ατελειών, και ύστερα να εισαχθούν με τα κατάλληλα πλάτη, όπως αυτά περιγράφονται σε παρακάτω υπο-κεφάλαιο (βλ. 6.3.7 Αρχικές ατέλειες).

6.3.5 Συνοριακές συνθήκες και φόρτιση φορέα

Οι συνοριακές συνθήκες εισάχθηκαν έτσι ώστε να προσομοιώνουν ρεαλιστικά, τους περιορισμούς μετακινήσεων, που επιβλήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία. Επομένως, η πλευρική μετατόπιση της δοκού δεσμεύθηκε στο μέσο των δύο πελμάτων σε όλες τις θέσεις όπου υπάρχουν εγκάρσιες ενισχύσεις κορμού, αλλά και στα σημεία των στηρίξεων στα άκρα. Ο βαθμός ελευθερίας της κατακόρυφης μετατόπισης δεσμεύτηκε στο κάτω πέλμα των δύο άκρων, ενώ η οριζόντια (διαμήκης) μετατόπιση παρεμποδίστηκε μόνο στην μια εκ των δύο στηρίξεων.

Όσο για την φόρτιση του φορέα, εφαρμόστηκαν δύο ίσα κατακόρυφα σημειακά φορτία στο μέσο του άνω πέλματος της διατομής, στα σημεία των ενδιάμεσων ενισχύσεων (σε απόσταση 1450mm από τις στηρίξεις).

6.3.6 Νόμος υλικού

Το συγκεκριμένο παράδειγμα, αφορά την επικύρωση πειραματικών αποτελεσμάτων, όπως αυτά προέκυψαν κατά την εκτενέστερη έρευνα [15]. Επομένως, η ποιότητα του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε για την συγκολλητή διατομή, προέκυψε από πειραματικές μετρήσεις και ελέγχους εφελκυσμού σε δοκίμια τα οποία κόπηκαν από τα ίδια φύλλα χάλυβα της διατομής. Έτσι, τρία δοκίμια ελέγχθηκαν δίνοντας το κάθε ένα αποτελέσματα για τις χαρακτηριστικές παραμέτρους του υλικού. Τελικά, λήφθηκαν οι μέσες τιμές των τριών δοκιμών για τις ιδιότητες του υλικού, ενώ έγινε χρήση των σχέσεων Ramberg-Osgood,

όπως αυτές προτάθηκαν από τους Gardner and Nethercot [15]. Οι σχέσεις παρουσιάζονται παρακάτω, ενώ οι μετρημένες τιμές των δοκιμών δίνονται στον Πίνακα 6-4.

$$\text{για } \sigma \leq f_y \quad \varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left[\frac{\sigma}{f_y} \right]^n$$

$$\text{για } \sigma > f_y \quad \varepsilon = \frac{(\sigma - f_y)}{E_{0.2}} + \left(0.008 - \frac{\sigma_{1.0} - f_y}{E_{0.2}} \right) \left(\frac{\sigma - f_y}{\sigma_{1.0} - f_y} \right)^{n'_{0.2,1.0}} + \varepsilon_{t0.2}$$

όπου: $E_{0.2}$ είναι το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας που αντιστοιχεί στην f_y

$\sigma_{1.0}$ είναι η τάση που αντιστοιχεί σε 1.0% παραμόρφωση

$\varepsilon_{t0.2}$ είναι η παραμόρφωση για $\sigma=f_y$

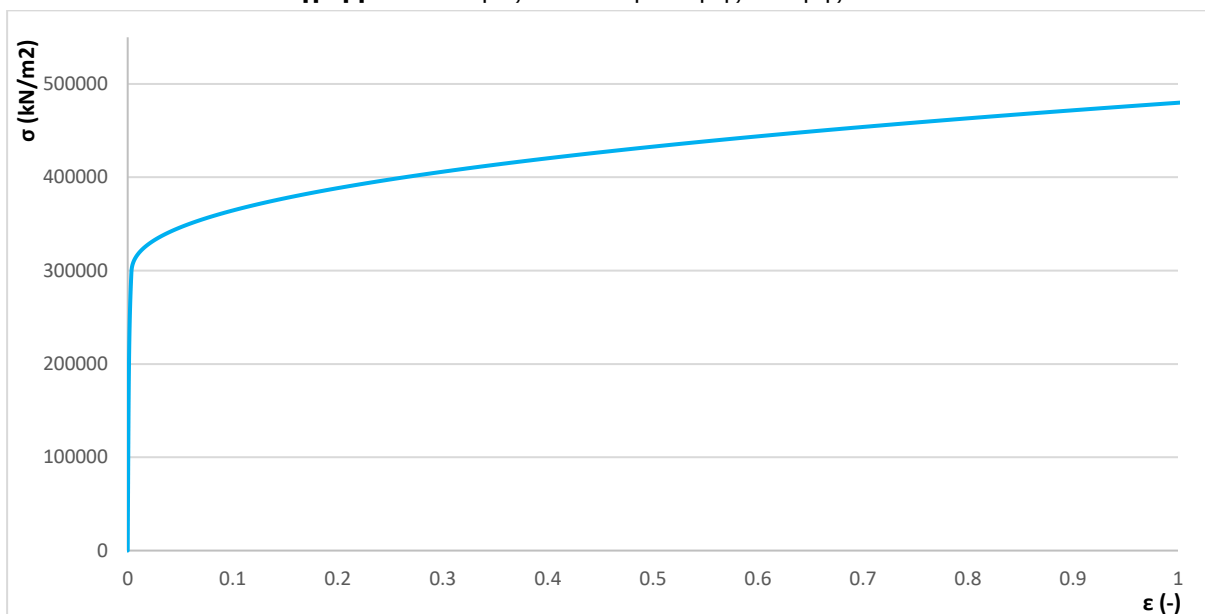
n είναι η παράμετρος μη γραμμικότητας του πρώτου κλάδου του διαγράμματος σ - ε

$n'_{0.2,1.0}$ είναι η παράμετρος μη γραμμικότητας του δεύτερου κλάδου του διαγράμματος σ - ε

Δοκίμιο	f_y [MPa]	f_u [MPa]	E [GPa]	n [-]	$n'_{0.2,1.0}$ [-]
1-1.4301	297.8	637.4	195.7	5.60	2.30
2-1.4301	297.3	622.0	197.3	5.50	2.35
3-1.4301	298.8	638.1	195.2	5.80	2.37
Μέση τιμή	298.0	632.5	196.1	5.63	2.34

Πίνακας 6-4: Μετρημένες παράμετροι υλικού

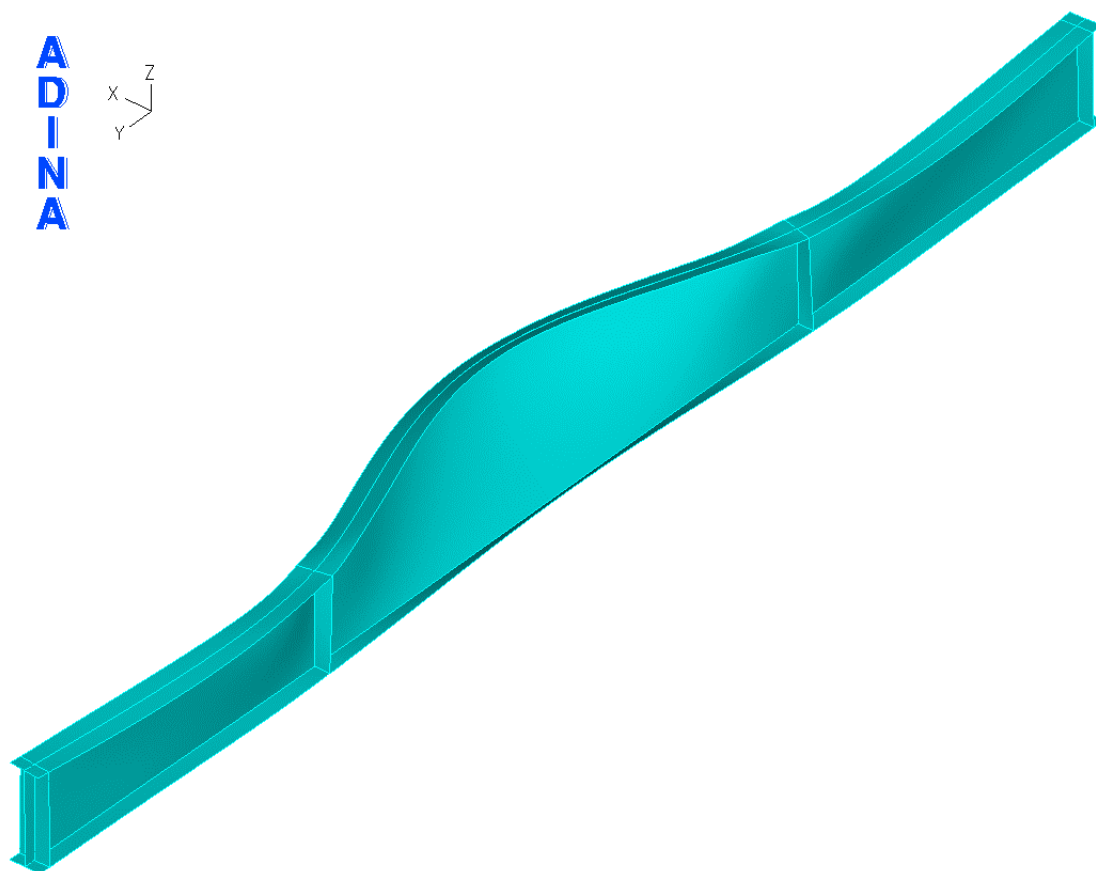
Διάγραμμα 6-3: Νόμος υλικού συγκολλητής διατομής διπλού ταυ



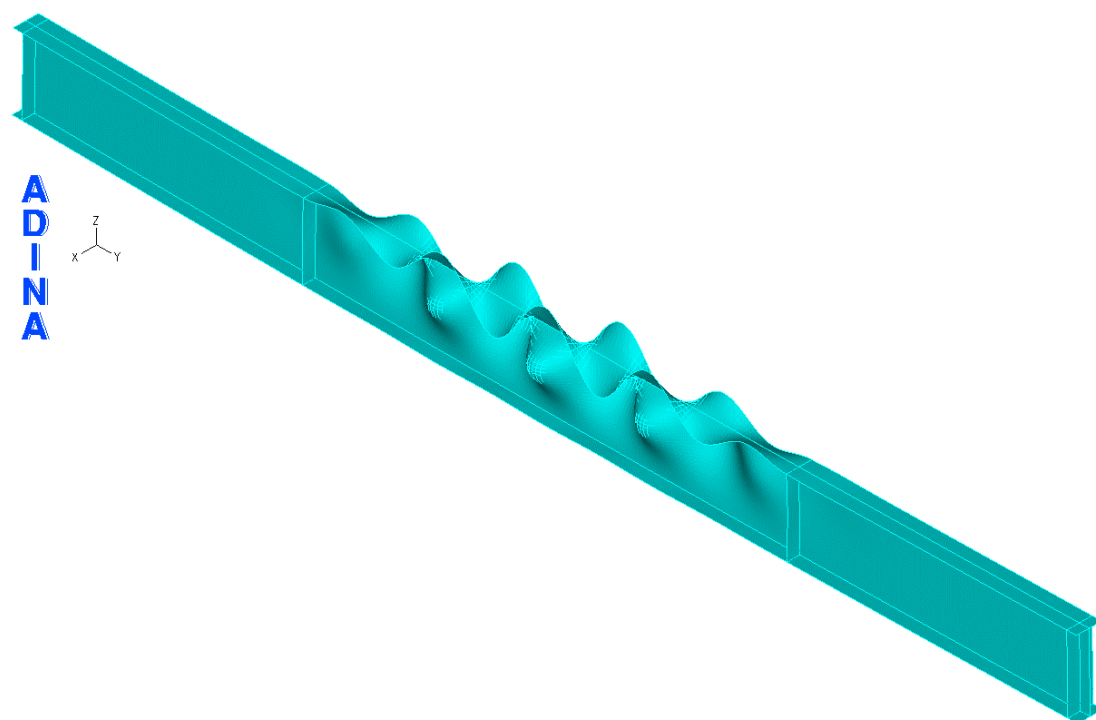
6.3.7 Αρχικές ατέλειες

Για την εισαγωγή των αρχικών γεωμετρικών ατελειών, λήφθηκαν υπόψη οι δύο πρώτες ιδιομορφές της δοκού, οι οποίες σχηματικά, παρουσιάζονται στις Εικόνα 6-8 και Εικόνα 6-9. Το μέγεθος των αρχικών ατελειών δόθηκε ίσο με το μετρημένο από το πείραμα, και οι τιμές για καθολική και τοπική ατέλεια, δίνονται στον

Πίνακας 6-5. Στην αρχική έρευνα, στην οποία ελέγχθηκε η απόκριση της δοκού, οι παραμένουσες τάσεις λαμβάνονται υπόψη, προκειμένου να αναδειχθεί η επιρροή τους στην τελική αντοχή του συστήματος. Κατά την εφαρμογή του παραδείγματος στην παρούσα εργασία, λόγω περιορισμένων δυνατοτήτων του προγράμματος οι παραμένουσες τάσεις δεν συμπεριλαμβάνονται στην ανάλυση.



Εικόνα 6-8: 1^η ιδιομορφή δοκού (καθολικός λυγισμός)



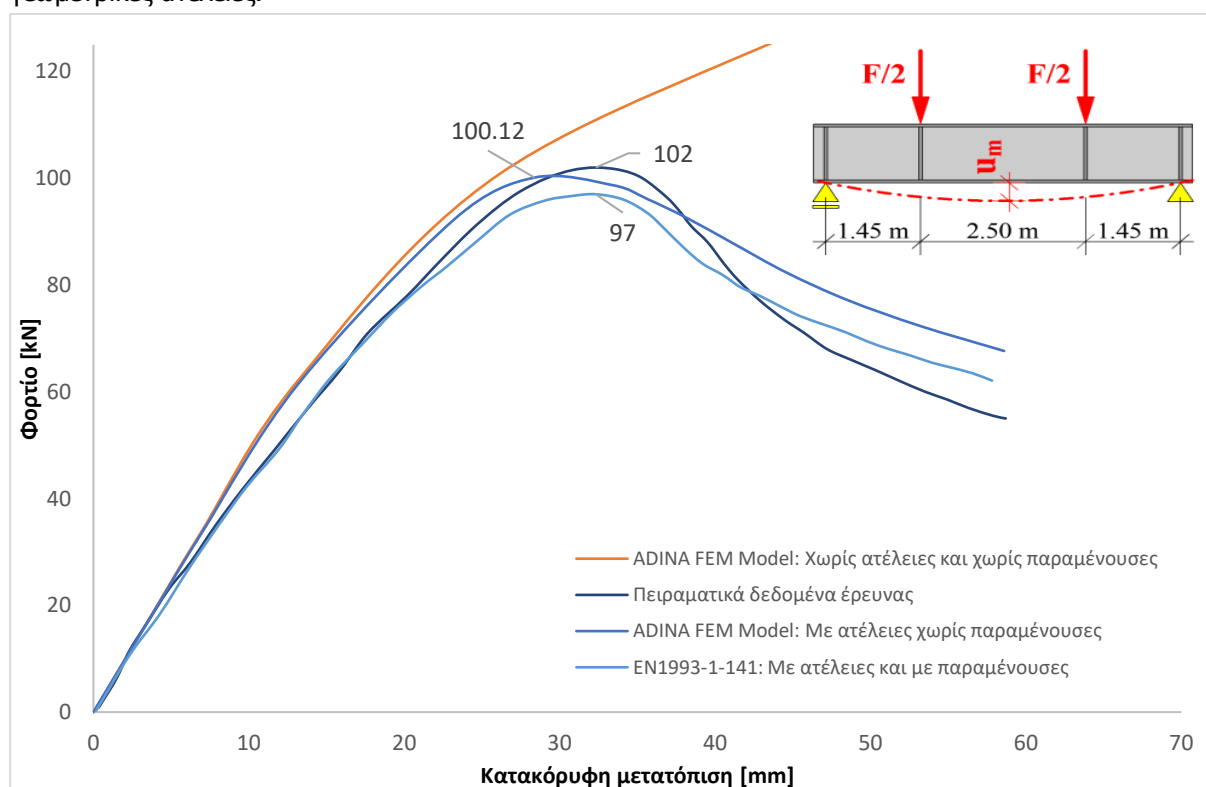
Εικόνα 6-9: 2^η ιδιομορφή δοκού (τοπικός λυγισμός)

Πίνακας 6-5: Πλάτος αρχικών ατελειών δοκού

Καθολικές ατέλειες δ_{gl} [mm]	Τοπικές ατέλειες δ_{loc} [mm]
130.1	3.97

6.3.8 Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων

Βάσει των αποτελεσμάτων της εκτενέστερης έρευνας, φαίνεται πως η επιρροή των παραμενουσών τάσεων, δεν είναι τόσο σημαντικό όσο η επιρροή της μη γραμμικότητας υλικού και γεωμετρίας του φορέα. Όπως αναφέρεται και στην τεχνική έκθεση της έρευνας [15], η ποσοστιαία απόκλιση της αντοχής της δοκού χωρίς παραμένουσες τάσεις, είναι 5% (υπερ-εκτίμηση, μεγαλύτερη αντοχή). Επιπλέον σημειώνεται ελάχιστη και αμελητέα διαφορά 2% μεταξύ αποτελεσμάτων αριθμητικού προσομοιώματος και πειραματικών δεδομένων, γεγονός που υποδεικνύει την ικανότητα ενός προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων να αναπαραστήσει ρεαλιστικά και με ακρίβεια ένα πραγματικό πείραμα. Παράλληλα, στο Διάγραμμα 6-4, φαίνεται και η περίπτωση κατά την οποία οι αρχικές γεωμετρικές ατέλειες αμελούνται. Τότε, η προβλεπόμενη αντοχή και το κρίσιμο φορτίο υπερ-εκτιμώνται σημαντικά, γεγονός που αναδεικνύει τόσο την σημασία της εισαγωγής αρχικών γεωμετρικών ατελειών, όσο και την ευαισθησία της συγκεκριμένης, αλλά και γενικότερα των μεταλλικών κατασκευών, στις αρχικές γεωμετρικές ατέλειες.

**Διάγραμμα 6-4:** Σύγκριση αποτελεσμάτων πειραματικών δεδομένων και αριθμητικού προσομοιώματος

6.4 Παράδειγμα Σχεδιασμού – Αντοχή πλαισίου, πρώτη παραδοχή

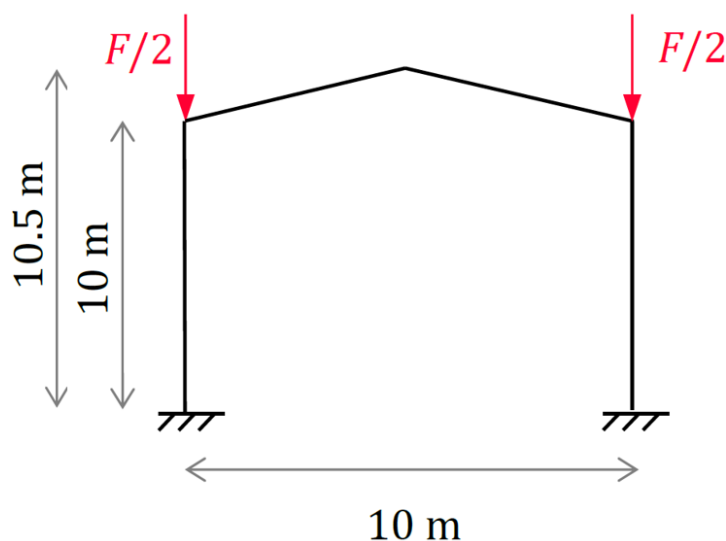
6.4.1 Γενικές πληροφορίες παραδείγματος

Το συγκεκριμένο παράδειγμα, αφορά τον σχεδιασμό, δηλαδή την εύρεση της τελικής αντοχής ενός τυπικού μεταλλικού πλαισίου με κεκλιμένη στέγη, το οποίο υποβάλλεται σε κατακόρυφη σημειακή φόρτιση, στις κορυφές των υποστυλωμάτων. Για τον υπολογισμό, λαμβάνονται υπόψη όλες τις απαραίτητες παραδοχές και απαιτήσεις, για απευθείας υπολογισμό της τελικής αντίστασης του. Ταυτόχρονα, διερευνάται η επιρροή του συνδυασμού ιδιομορφών πλαισίου, και τελικά εξάγονται αποτελέσματα για την τελική αντοχή του πλαισίου. Στόχος της εφαρμογής αλλά και του επιλεγμένου πλαισίου, είναι η ανάδειξη της αναγκαιότητας συμπερίληψης διαφορετικών τύπων αρχικών γεωμετρικών ατελειών κατά τον σχεδιασμό μεταλλικών κατασκευών, με χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Παράλληλα, παρέχονται πληροφορίες όσον αφορά τον τρόπο συνδυασμού ιδιομορφών αλλά και την κατεύθυνση των αρχικών ατελειών, αλλά και πως αυτά επηρεάζουν την τελική αντοχή. Πρέπει να σημειωθεί, πως το συγκεκριμένο παράδειγμα, εκτελέστηκε πρώτη φορά σε εκτενέστερη έρευνα, η οποία διεξήχθη από τους Arragago και Rasmussen [8], που αφορούσε την μελέτη της επιρροής του συνδυασμού αρχικών ατελειών σε πληθώρα διαφορετικών πλαισίων (μεταθετά και αμετάθετα). Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για την εύρεση της αντοχής, ήταν GMNIA, δηλαδή ανάλυση με μη γραμμικότητα γεωμετρίας και υλικού, με αρχικές ατέλειες.

6.4.2 Περιγραφή προβλήματος

Κύριο μέλημα του παραδείγματος, είναι ο έλεγχος της επιρροής του συνδυασμού αρχικών γεωμετρικών ατελειών, για το σχεδιασμό μεταθετού πλαισίου, με χρήση προχωρημένων μεθόδων που βασίζονται σε αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων. Το πλαίσιο, αποτελείται από δύο πακτωμένα στο έδαφος υποστυλώματα και δύο κεκλιμένες δοκούς· η σύνδεση του με τα υποστυλώματα θεωρείται άκαμπτη. Καταπονείται από δύο ίσα φορτία στις κορυφές των υποστυλωμάτων, τα οποία είναι πρότυπης διατομής HEB 340 από χάλυβα S235, όπως και οι δοκοί. Η τοπικοί άξονες όλων των μελών είναι προσανατολισμένοι έτσι ώστε να η διατομή να κάμπτεται περί τον ισχυρό της άξονα.

Στο αριθμητικό προσομοίωμα που αναπτύχθηκε, λήφθηκαν υπόψη τόσο οι καθολικές ατέλειες (ατέλειες μεταθετών πλαισίου) όσο και οι τοπικές σε επίπεδο μέλους (ατέλειες μορφής τόξου). Η γεωμετρία του πλαισίου, καθώς και οι συνοριακές συνθήκες αλλά και η φόρτιση του, φαίνεται στην Εικόνα 6-10.



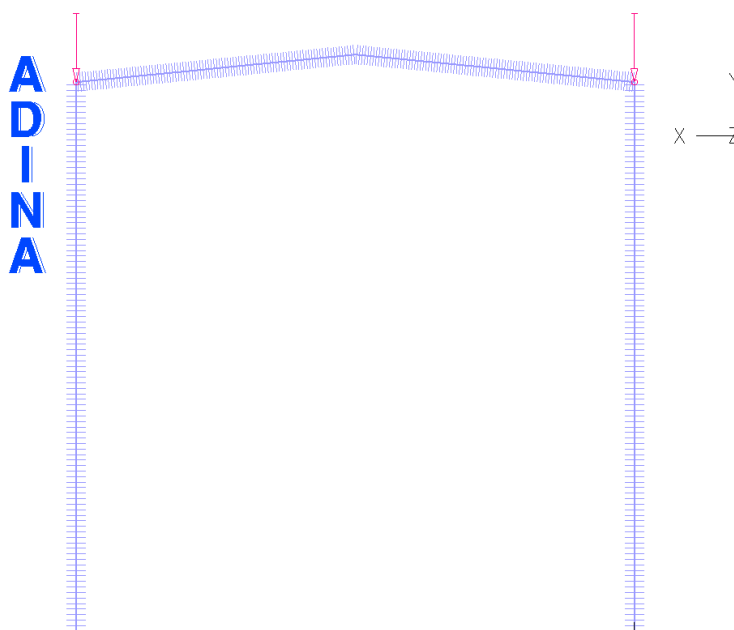
Εικόνα 6-10: Εξεταζόμενο μεταθετό πλαίσιο

6.4.3 Ανάπτυξη αριθμητικού προσομοιώματος

Το προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε για τον σχεδιασμό, δημιουργήθηκε μέσω του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ADINA Structures, με χρήση στοιχείων δοκού (beam elements). Κάθε μέλος διαιρέθηκε σε 100 επιμέρους στοιχεία, δίνοντας τα χαρακτηριστικά της διατομής HEB 340, χρησιμοποιώντας την επιλογή του ADINA για εισαγωγή I διατομών, εισάγοντας τις εξωτερικές διαστάσεις και το πάχος της διατομής, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-11.

Εικόνα 6-11: Διαστάσεις διατομής HEB 340

Το κρίσιμο φορτίο του πλαισίου, καθώς και η μορφή αστοχίας του, καθορίστηκε από 2^{ας} τάξης ανελαστική ανάλυση, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις μη γραμμικότητες υλικού και γεωμετρίας (GMNIA). Οι αρχικές γεωμετρικές ατέλειες εισήχθησαν βάσει συνδυασμού των ιδιομορφών που λήφθηκαν από γραμμική ανάλυση λυγισμού (LBA), δίνοντας κατάλληλο πρόσημο και πλάτος, προκειμένου να προκύψει ο δυσμενέστερος συνδυασμός, και κατ' επέκταση η μικρότερη αντοχή πλαισίου.



Εικόνα 6-12: Μορφή πλαισίου μέσω του λογισμικού ADINA

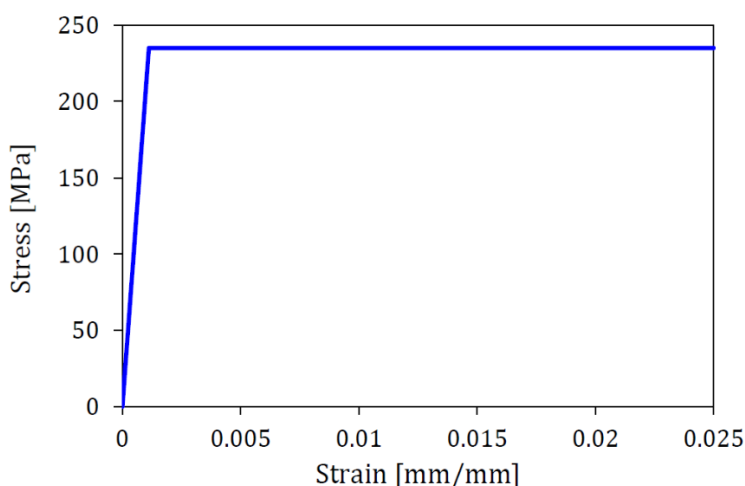
6.4.4 Συνοριακές συνθήκες και φόρτιση φορέα

Όσον αφορά της στηρίξεις του πλαισίου, οι βάσεις των υποστυλωμάτων θεωρούνται πλήρως πακτωμένες (δέσμευση έξι βαθμών ελευθερίας), ενώ οι συνδέσεις μεταξύ δοκών και υποστυλωμάτων, θεωρούνται άκαμπτες, δηλαδή δεν επιτρέπεται η σχετική στροφή. Το πλαίσιο, αφού θεωρείται επίπεδο (XY), δεσμεύεται στην εκτός επιπέδου διεύθυνση (YZ), προκειμένου να καταπονείται μόνο από εντός επιπέδου κάμψη και λυγισμό. Η καταπόνηση του φορέα, γίνεται μέσω δύο κατακόρυφων σημειακών και ίσων φορτίων, στην κορυφή των υποστυλωμάτων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-12.

6.4.5 Νόμος υλικού

Το πλαίσιο είναι κατασκευασμένο από χάλυβα ποιότητας S235, με χαρακτηριστική τιμή μέτρου ελαστικότητας (E) 210GPa, και όριο διαρροής f_y ίσο με 235MPa. Ο νόμος υλικού θεωρείται ελαστικός πλήρως πλαστικός, ακολουθώντας το Σχήμα 2-2 (α), της παραγράφου 2.4.2, ή αντίστοιχα την περίπτωση (α) της παραγράφου 5.3.2(1) του EN1993-1-14, που αναφέρεται σε νόμους υλικών θερμής έλασης. Η αντίστοιχη μορφή του διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων για χάλυβα S235, φαίνεται στο

Διάγραμμα 6-5. Η μετατροπή των μηχανικών σε πραγματικών τάσεων έγινε με χρήση των σχέσεων που δίνονται από το μέρος EN1993-1-14 στην §5.3.1(13).



Διάγραμμα 6-5: Εφαρμοσμένος νόμος υλικού S235

6.4.6 Αρχικές ατέλειες

Οι αρχικές γεωμετρικές ατέλειες είναι αναπόφευκτες στις μεταλλικές κατασκευές, καθώς επηρεάζονται άμεσα από τις κατασκευαστικές ανοχές. Οι ατέλειες, εφόσον κυρίως αφορούν την απώλεια καθετότητας αλλά και ευθύτητας ή και ατέλειες σε επίπεδο διατομής, μπορούν να έχουν σημαντική επιρροή τόσο στην απόκριση όσο και στην αντίσταση της κατασκευής. Επομένως, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατάλληλα κατά την ανάλυση και τον σχεδιασμό μεταλλικών φορέων, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για αναλύσεις ανωτέρας τάξης, που έχουν στόχο τον απευθείας υπολογισμό της τελικής αντίστασης. Στόχος της εκτενέστερης έρευνας στην οποία βασίζεται το συγκεκριμένο παράδειγμα σχεδιασμού, είναι η διερεύνηση της επιρροής του συνδυασμού και της κατεύθυνσης των αρχικών ατελειών, οι οποίες είναι εφαρμοσμένες βάσει των σχημάτων των χαμηλότερων ιδιομορφών του πλαισίου. Επομένως, διάφοροι τύποι αρχικών ατελειών λήφθηκαν υπόψη, με διάφορα πλάτη και κατευθύνσεις. Αρχικά, ενσωματώνονται σύμφωνα με την §5.4 του EN1993-1-14, καθολικές αρχικές γεωμετρικές ατέλειες (π.χ. ατέλειες μεταθετών πλαισίων), αλλά και αρχικές γεωμετρικές ατέλειες μέλους (π.χ. ατέλειες μορφής τόξου). Παραμένουσες τάσεις δεν λήφθηκαν υπόψη, καθώς ελέγχεται η επιρροή μόνο των γεωμετρικών ατελειών.

Αρχικός σκοπός της εφαρμογής, ήταν η γραμμική επαλληλία πλήθους ιδιομορφών, προκειμένου να ελεγχθεί ο συνδυασμός των σχημάτων, και κατά πόσο αυτός επηρεάζει την τελική αντοχή, αλλά και την απόκριση του φορέα. Επομένως, η μορφή των γεωμετρικών ατελειών, είναι βασισμένη στα σχήματα των ιδιομορφών του πλαισίου όπως αυτά προέκυψαν από LBA, οι οποίες εισάγονται με διάφορες τιμές πλάτους και συνδυασμό πρόσημων, διερευνώντας έτσι την δυσμενέστερη περίπτωση, δηλαδή την χαμηλότερη αντοχή. Τα πλάτη του κάθε τύπου ιδιομορφής προκύπτουν βάσει της §7.3.2 του μέρους EN 1993-1-1, κατά την οποία η σχέση υπολογισμού για καθολικές μορφές είναι:

$$\phi = \phi_0 \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m \quad (5.5)$$

όπου ϕ_0 είναι η βασική τιμή: $\phi_0 = 1/200$

α_h είναι ο μειωτικός συντελεστής σχετικός με το ύψος h εφαρμόσιμος σε υποστυλώματα

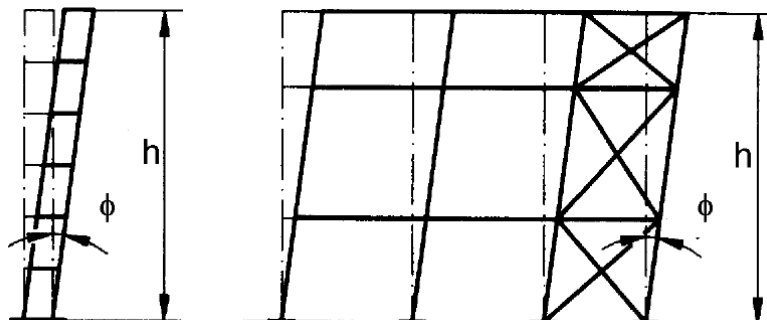
$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}} \quad \text{αλλά} \quad \frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1,0$$

h είναι το ύψος της κατασκευής σε μέτρα

α_m είναι ο μειωτικός συντελεστής σχετικός με τον αριθμό των στύλων σε έναν όροφο,

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \left(1 + \frac{1}{m} \right)}$$

m είναι ο αριθμός των στύλων σε έναν όροφο και περιλαμβάνει μόνο εκείνους τους στύλους που φέρουν κατακόρυφο φορτίο N_{Ed} όχι μικρότερο του 50% της μέσης τιμής του φορτίου των στύλων στο υπό θεώρηση κατακόρυφο επίπεδο



Εικόνα 6-13: Ισοδύναμες ατέλειες μετάθεσης

Αντιθέτως, η τιμή των αρχικών τοπικών ατελειών μέλους, για καμπτικό λυγισμό ισούνται με e_0/L όπου L είναι το μήκος του μέλους.

Για τις καθολικές ατέλειες, οι τιμές που λήφθηκαν υπόψη στο προσομοίωμα, ισούταν αρχικά με $\phi_0=1/200$ όπως καθορίζεται από την παραπάνω σχέση, ενώ διερευνήθηκαν και με $\phi_0 1/5000$, που είναι μια σημαντικά μικρότερη αλλά όχι αμελητέα τιμή. Παράλληλα, για τις ατέλειες μέλους, δόθηκαν ατέλειες $L/1000$ και $L/200$, οι οποίες αντιστοιχούν στην προτεινόμενη τιμή για ανεξάρτητες τοπικές ατέλειες, και στην ισοδύναμη γεωμετρική ατέλεια αντίστοιχα, του EN 1993-1-14.

Τελικά σε κάθε ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για διερεύνηση της αντοχής του πλαισίου, δόθηκαν 3 τιμές ατελειών: δύο ίσες τοπικές σε κάθε υποστυλώμα, και μια καθολική ατέλεια. Από αυτές η καθολική ατέλεια είχε δύο τιμές, άρα δύο περιπτώσεις ($1/200$ και $1/500$), και η τοπικές επίσης δύο τιμές ($L/1000$ και $L/200$). Συνοπτικά, όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί πρόσημων και ατελειών, φαίνονται στον Πίνακα 6-6.

Καθολική ατέλεια φο	Τοπική ατέλεια ε ₀	Τοπική ατέλεια υποστυλώματος Κ ₁	Τοπική ατέλεια υποστυλώματος Κ ₂
1/200	L/1000	+	+
1/200	L/1000	-	+
1/200	L/200	+	+
1/200	L/200	-	-
1/5000	L/1000	+	+
1/5000	L/1000	-	+
1/5000	L/200	+	+
1/5000	L/200	-	-

Πίνακας 6-6: Συνδυασμοί ατελειών

Οι συνδυασμοί αυτοί, αποτελούν μόνο το μισό πλήθος συνδυασμών, καθώς ο φορέας είναι πλήρως συμμετρικός, επομένως έγινε ανάλυση μόνο με αυτούς. Το πλήθος των ιδιομορφών που χρησιμοποιήθηκε αρχικά, ήταν οι έξι πρώτες, προκειμένου να προβλεφθεί κατάλληλα η αντοχή του πλαισίου, λαμβάνοντας υπόψη την αλληλεπίδραση των χαμηλότερων ιδιομορφών. Όμως, όπως θα φανεί και στην επόμενη ενότητα, τα αποτελέσματα της αντοχής του πλαισίου, ήταν ικανοποιητικά (ελάχιστη απόκλιση αποτελεσμάτων), ακόμη και με χρήση μόνο της πρώτης ιδιομορφής.

6.4.7 Αξιολόγηση αριθμητικών αποτελεσμάτων

Α. Επιρροή κατεύθυνσης (πρόσημου) του συνδυασμού ατελειών

Αρχικά, ελέγχθηκε η επιρροή της κατεύθυνσης των γεωμετρικών ατελειών, στην τελική αντίσταση του πλαισίου, στην περίπτωση που συνδυάζονται τόσο καθολικές όσο και τοπικές ατέλειες. Στο Σχήμα 6-2 φαίνεται η κρίσιμη μορφή αστοχίας. Αξίζει να σημειωθεί πως το κρίσιμο φορτίο, αναφέρεται στην συνολική αντίσταση του πλαισίου, και αντιστοιχεί στο μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο του δρόμου ισορροπίας (διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης) της ανάλυσης. Στο σχήμα, παρουσιάζονται αποτελέσματα για τιμή τοπικής ατέλειας μέλους ε₀ L/1000 σε συνδυασμό με δύο διαφορετικές τιμές καθολικών ατελειών, 1/200 και 1/5000.

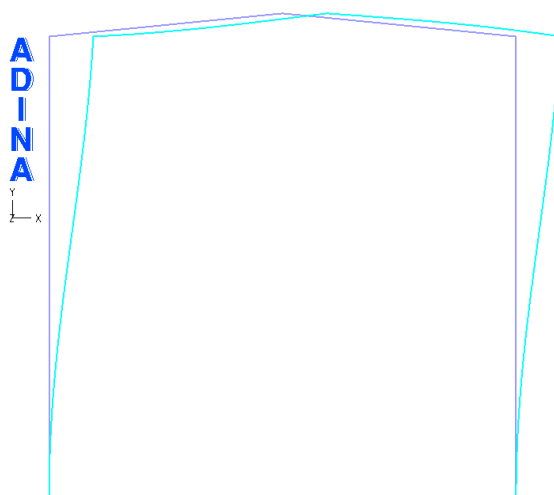
Τα αποτελέσματα δείχνουν αρχικά, πως στην περίπτωση που εισάγονται συνδυαστικά καθολικές και τοπικές ατέλειες, το προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων, προβλέπει καθολική μορφή αστοχίας του πλαισίου, με σχετικά ίδιες τιμές. Το αποτέλεσμα αυτό, είναι ανεξάρτητο του μεγέθους της καθολικής ατέλειες, γεγονός που επισημαίνει την εισαγωγή και την λήψη της καθολικής ατέλειας στην ανάλυση του πλαισίου. Παρακάτω, παρουσιάζονται τα κρίσιμα φορτία για 4 συνδυασμούς πρόσημων τοπικών ατελειών, λαμβάνοντας υπόψη θετική καθολική ατέλεια (μετάθεση προς τα δεξιά). Τα αποτελέσματα δείχνουν πως η επιρροή της κατεύθυνσης των τοπικών ατελειών, είναι αμελητέας σημασίας όσον αφορά την κρίσιμη μορφή αστοχίας, αλλά και το κρίσιμο φορτίο τους πλαισίου.



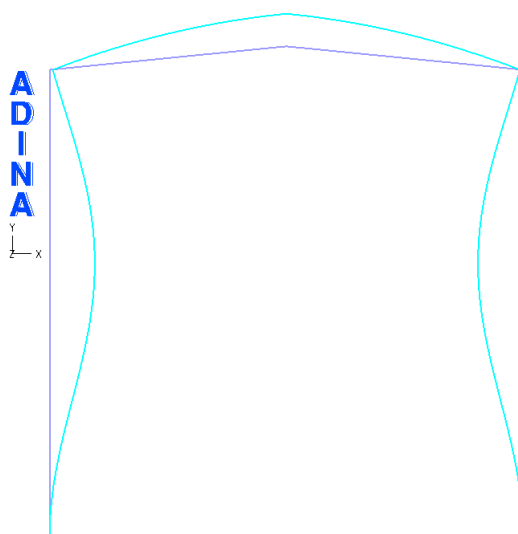
Σχήμα 6-2: Μορφή αστοχίας πλαισίου

Εξ άλλου, κάτι τέτοιο ήταν αναμενόμενο, καθώς όπως φαίνεται από τους συντελεστές επαύξησης φορτίου, που προκύπτουν από την LBA, οι πρώτες ιδιομορφές απέχουν αρκετά μεταξύ τους, γεγονός που υποδεικνύει την μικρή τους επιρροή, ειδικά όταν λαμβάνεται υπόψη η πρώτη, δεσπόζουσα ιδιομορφή.

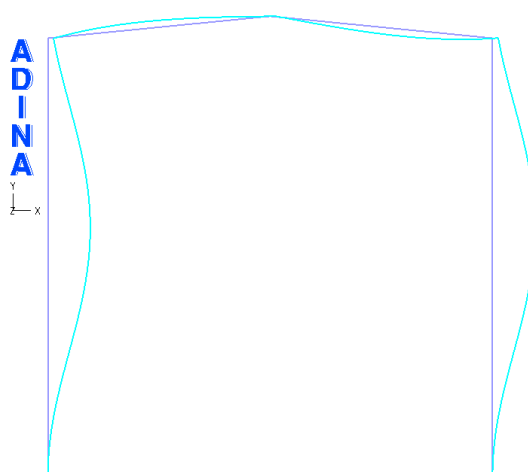
Σύμφωνα με την έρευνα [14], προτείνεται να εισάγονται γεωμετρικές ατέλειες από πολλές ιδιομορφές προκειμένου να εμφανίζονται οι ατέλειες σε όλα τα μέλη ενός φορέα, και άρα να γίνεται καλύτερη κατανομή των αβεβαιοτήτων. Ένας αποδεκτός και αποτελεσματικός τρόπος για να γίνει αυτό, είναι η επαλληλία ιδιομορφών, όπως γίνεται και στο συγκεκριμένο παράδειγμα σχεδιασμού, κατά τον οποίο κάθε ιδιομορφή εισάγεται στο προσομοίωμα με έναν συντελεστή βαρύτητας. Το βασικό ερώτημα που γεννάται από αυτή την διαδικασία, και εμφανίστηκε και κατά τον σχεδιασμό του πλαισίου, είναι πόσο πρέπει να είναι το πλήθος των ιδιομορφών που θα λαμβάνονται υπόψη, προκειμένου τα αποτελέσματα να είναι ικανοποιητικά και με μικρή απόκλιση. Στην ίδια έρευνα, προτείνεται πως συνήθως δεν εμφανίζεται δραστική μείωση του κρίσιμου φορτίου, μετά την χρήση των πρώτων 6 ιδιομορφών, συνεπώς γίνεται κατάλληλη πρόβλεψη τόσο της μορφής αστοχίας αλλά και της αντοχής του φορέα. Όμως, στο συγκεκριμένο πλαίσιο η δεσπόζουσα ιδιομορφή εμφανίζει αρκετά μικρότερο συντελεστή λ, από τις επόμενες ιδιομορφές, έχοντας ως αποτέλεσμα την πρόβλεψη με ακρίβεια της τελικής αντίστασης του φορέα, ακόμη και με χρήση μόνο μιας ιδιομορφής. Αυτό, οφείλεται κυρίως στην μεταθετότητα του πλαισίου, και στην απώλεια πλευρικής εξασφάλισης. Τα σχήματα των πρώτων τριών ιδιομορφών, φαίνονται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 6-14: 1η ιδιομορφή, συντελεστής φορτίου 1.09



Εικόνα 6-15: 2η ιδιομορφή, συντελεστής φορτίου 3.45

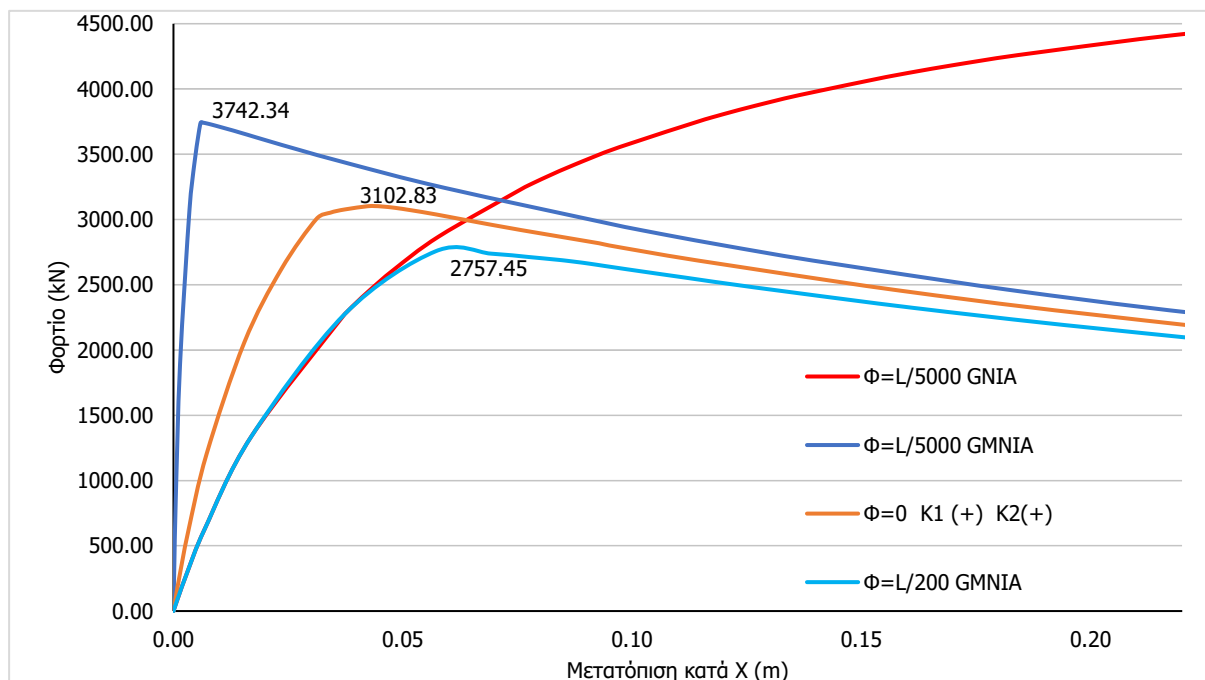


Εικόνα 6-16: 3η ιδιομορφή, συντελεστής φορτίου 4.5

Β. Επιρροή τύπου ατέλειας στον συνδυασμό

Ανάλυση του προσομοιώματος διεξήχθη επιπλέον λαμβάνοντας μόνο τις τοπικές γεωμετρικές ατέλειες, αγνοώντας την μετάθεση του πλαισίου. Δηλαδή φ_0 ισούταν με 0, ενώ οι τοπικές ατέλειες, εισήχθησαν

με τιμές $L/1000$ και $L/200$ με διάφορους συνδυασμούς των πρόσθμων τους. Σε αυτή την περίπτωση, εμφανίζεται μια ξεκάθαρη επιρροή της κατεύθυνσης των ατελειών, στην τελική μορφή αστοχίας του πλαισίου. Εφαρμόζοντας GMNIA, και λαμβάνοντας αποτελέσματα για τους δρόμους ισορροπίας των διαφορετικών περιπτώσεων, συμπεραίνεται πως σε κάποιες περιπτώσεις συνδυασμού (ομόσημες τοπικές ατέλειες υποστυλωμάτων), η αστοχία του πλαισίου πλησιάζει εκείνη που λήφθηκε στην περίπτωση που εφαρμόζονταν και οι καθολικές ατέλειες, ενώ για άλλες περιπτώσεις (ετερόσημες τοπικές ατέλειες υποστυλωμάτων), η ανάλυση οδηγεί σε αυξημένες τιμές του κρίσιμου φορτίου. Τα συμπεράσματα είναι ίδια τόσο για $L/1000$ όσο και $L/200$.



Διάγραμμα 6-6: Συγκεντρικά αποτελέσματα αναλύσεων πλαισίου

Γ. Τελικά συμπεράσματα

Η ανάλυση δείχνει πως ακόμη και για μικρές τιμές καθολικών ατελειών ($\phi_0=1/5000$), το πλαίσιο εμφανίζει καθολική μορφή αστοχίας (μετάθεση πλαισίου), για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς κατευθύνσεων των τοπικών ατελειών. Το γεγονός αυτό, υπογραμμίζει την σπουδαιότητα των καθολικών ατελειών, όχι μόνο στην μορφή αστοχίας, αλλά και στην τελική αντοχή του πλαισίου. Σε παρόμοιο πλαίσιο, το γεγονός πως με μικρές τιμές ομόσημων τοπικών ατελειών, είναι εφικτή η εμφάνιση μετάθεσης του πλαισίου, αναδεικνύει την αναγκαιότητα για εισαγωγή και έλεγχο συνδυασμού διαφορετικών σχημάτων ιδιομορφών, ως αρχικές γεωμετρικές ατέλειες, όταν πρόκειται να γίνει σχεδιασμός μέσω GMNIA. Επιπλέον, ο συνδυασμός ιδιομορφών, εξασφαλίζει την εμφάνιση της δυσμενέστερης μορφής αστοχίας, και έτσι η αστάθεια το φορέα, σχετίζεται άμεσα με την μορφή αστοχίας που πρόκειται να «ενεργοποιηθεί».

Όσον αφορά τα αποτελέσματα του παραδείγματος, αλλά και της εκτενέστερης έρευνας, συγκριτικά με τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τις αναλύσεις της παρούσας εργασίας, σημειώνεται μεγάλη απόκλιση κυρίως στην τελική αντοχή του πλαισίου. Πιο συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα της έρευνας των Arrayago και Rasmussen δίνουν αποτελέσματα της τάξης των 330kN, ενώ οι αναλύσεις που έγιναν μέσω του λογισμικού ADINA, και επιβεβαιώθηκαν μέσω των κανονισμών για σχεδιασμό μεταλλικών κατασκευών, δίνουν αποτελέσματα περί των 2757kN. Προφανώς, η τεράστια αυτή απόκλιση δεν είναι φυσιολογική, όμως φαίνεται πως τα αποτελέσματα της εκτενέστερης έρευνας είναι λάθος, καθώς μέσω των επιβεβαιωμένων και ελεγμένων πρακτικών που προτείνει ο ΕΚ3, η αντοχή του πλαισίου, και κατ'

επέκταση η αντοχή των υποστυλωμάτων, ισούται με 2750kN, όπως φαίνεται από τις παρακάτω σχέσεις υπολογισμού.

Αντοχή θλιβόμενης διατομής HEB340

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά:

$$I_y = 36660 \text{ cm}^4 \quad i_y = 14.6 \text{ cm} \quad b = 300 \text{ mm} \quad h = 340 \text{ mm} \quad t_w = 12 \text{ mm} \quad t_f = 21.5 \text{ mm} \\ r = 27 \text{ mm} \quad A = 171 \text{ cm}^2$$

$$\text{Ποιότητα χάλυβα S235} \Rightarrow \varepsilon = \sqrt{235/235} = 1$$

Κατάταξη κορμού

$$c/t = 20.25 \text{ mm} < 28 \cdot \varepsilon = 9 \quad \text{που αντιστοιχεί σε κατηγορία 1}$$

Κατάταξη πελμάτων

$$c/t = 5.44 \text{ mm} < 9 \cdot \varepsilon = 9 \quad \text{που αντιστοιχεί σε κατηγορία 1}$$

Συνολικά η διατομή HEB340 είναι κατηγορίας 1

Καμπύλη λυγισμού

$$h/b = 1.13 < 1.2$$

$$t_f = 21.5 \text{ mm} < 100 \text{ mm} \Rightarrow \text{περί τον } \gamma\text{-}\gamma \text{ αντιστοιχεί καμπύλη λυγισμού } b, \text{ δηλ. } a = 0.34$$

Ισοδύναμο μήκος λυγισμού

$$n_1 = (K_c + K_1)/(K_c + K_1 + K_{11} + K_{12}) \text{ για την κορυφή}$$

$$n_2 = (K_c + K_2)/(K_c + K_2 + K_{11} + K_{22}) \text{ για την βάση}$$

$$\text{όπου για τα υποστυλώματα } K_i = I_i/L_i$$

$$\text{για τις δοκούς } K_i = \alpha \cdot I_{ij}/L_{ij}$$

$$\text{περί τον } \gamma\text{-}\gamma: K_{cy} = I_y/L = 36.66 \text{ cm}^3$$

$$K_{12} = 1.5 \cdot I_{12}/L_{12} = 9.69 \text{ cm}^3$$

Οπότε τελικά $n_1 = 0.4$ και $n_2 = 0$ για πάκτωση

Σύμφωνα με τα νομογραφήματα προκύπτει ο συντελεστής $\beta_y = 1.16$, άρα το ισοδύναμο μήκος λυγισμού είναι $L_y = 1.16 \cdot L = 11.6 \text{ m}$

Ανηγμένη λυγηρότητα

$$\lambda_y = L_y/i_y \cdot \lambda_1 = 0.864$$

$$\text{και με } a = 0.34 \text{ για καμπύλη } \beta, \text{ με } \Phi = 0.5 \cdot \left[1 + a \cdot (\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2 \right] \text{ προκύπτει } \Phi_y = 0.986$$

Μειωτικός συντελεστής λυγισμού χ

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad \text{Αντικαθιστώντας προκύπτει } \chi_y = 0.684.$$

Τελικά η αντοχή υποστυλώματος διατομής HEB340 έναντι καμπτικού λυγισμού, ισούται με

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot f_y \cdot A}{\gamma_{M1}} \quad \text{Άρα τελικά, } N_{b,Rd} = 2749.1 \text{ kN}$$

Συγκριτικά, η απόκλιση με την αντοχή του υποστυλώματος που προέκυψε μέσω του λογισμικού ADINA, και με χρήση μεθόδων απευθείας εύρεσης της τελικής αντίστασης, είναι αμελητέα αφού προέκυψε:

$$N_{b,Rd}^{GMNIA} = 2757 \text{ kN}.$$

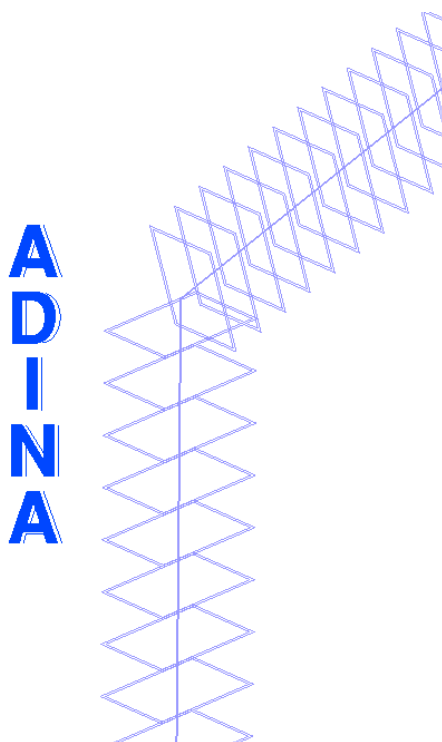
6.5 Παράδειγμα Σχεδιασμού – Αντοχή πλαισίου, δεύτερη παραδοχή

6.5.1 Γενικές πληροφορίες παραδείγματος

Το συγκεκριμένο παράδειγμα, αποτελεί παραδοχή του πλαισίου του προηγούμενου παραδείγματος, διαφοροποιώντας την γεωμετρία, το υλικό αλλά και τις διατομές των μελών του πλαισίου. Όπως και το παράδειγμα 6.4, το πλαίσιο είναι βασισμένο στην ίδια έρευνα των Arrayago και Rasmussen [8], που αφορούσε την μελέτη της επιρροής του συνδυασμού αρχικών ατελειών σε πληθώρα διαφορετικών πλαισίων (μεταθετά και αμετάθετα). Πιο συγκεκριμένα, η παραδοχή αυτή αποτελεί διόρθωση της προηγούμενης, καθώς ύστερα από επικοινωνία με την ίδια την καθηγήτρια Arrayago, αποδείχθη πως τα δεδομένα του προβλήματος στην έρευνα [8] παρουσιάζονται λάθος. Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας έγινε επιπλέον έλεγχος του πλαισίου με την σωστή γεωμετρία και τις σωστές ιδιότητες του πλαισίου. Στόχος της εφαρμογής, είναι η ανάδειξη της αναγκαιότητας συμπερίληψης διαφορετικών τύπων αρχικών γεωμετρικών ατελειών κατά τον σχεδιασμό μεταλλικών κατασκευών, με χρήση πεπερασμένων στοιχείων, ενώ παράλληλα εξάγεται η τελική αντοχή του πλαισίου. Τα αποτελέσματα εξήχθησαν μέσω ανάλυσης με μη γραμμικότητα γεωμετρίας και υλικού, με αρχικές ατέλειες (GMNIA), και συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα της καθηγήτριας Arrayago.

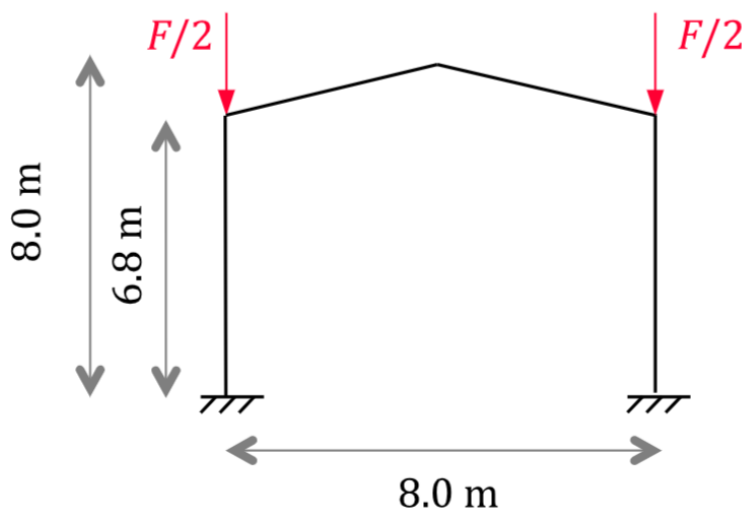
6.5.2 Περιγραφή προβλήματος

Κύριο μέλημα του παραδείγματος, είναι ο έλεγχος της επιρροής του συνδυασμού αρχικών γεωμετρικών ατελειών, για το σχεδιασμό μεταθετού πλαισίου, με χρήση προχωρημένων μεθόδων που βασίζονται σε αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων. Το πλαίσιο, αποτελείται από δύο πακτωμένα στο έδαφος υποστυλώματα και δύο κεκλιμένες δοκούς· η σύνδεση του με τα υποστυλώματα θεωρείται άκαμπτη. Καταπονείται από δύο ίσα φορτία στις κορυφές των υποστυλωμάτων, τα οποία είναι πρότυπης διατομής RHS150x100x4 από διγραμμικό χάλυβα με όριο διαρροής $f_y=352$ MPa, όπως και οι δοκοί. Η τοπικοί άξονες όλων των μελών είναι προσανατολισμένοι έτσι ώστε να η διατομή να κάμπτεται περί τον ισχυρό της άξονα όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-17.



Εικόνα 6-17: Προσανατολισμός τοπικών αξόνων διατομών πλαισίου

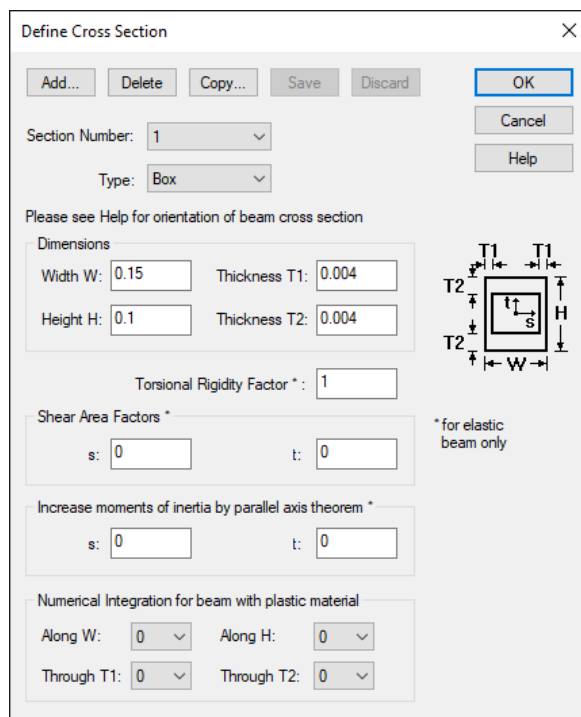
Στο αριθμητικό προσομοίωμα που αναπτύχθηκε, λήφθηκαν υπόψη τόσο οι καθολικές ατέλειες (ατέλειες μεταθετών πλαισίου) όσο και οι τοπικές σε επίπεδο μέλους (ατέλειες μορφής τόξου). Η γεωμετρία του πλαισίου, καθώς και οι συνοριακές συνθήκες αλλά και η φόρτιση του, φαίνεται στην Εικόνα 6-18.



Εικόνα 6-18: Γεωμετρία πλαισίου

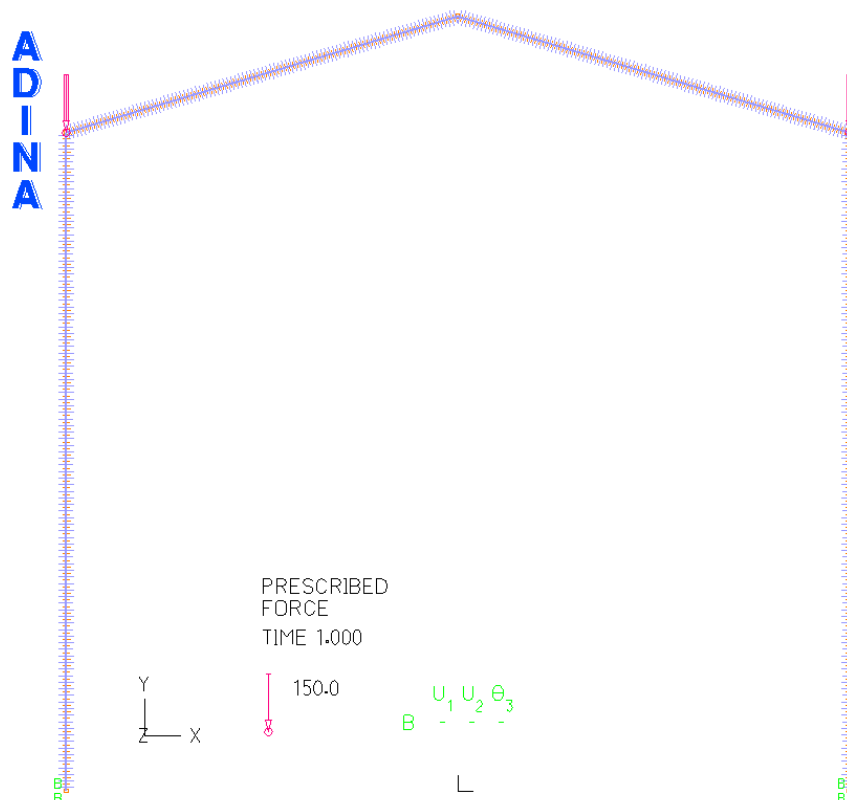
6.5.3 Ανάπτυξη αριθμητικού προσομοιώματος

Το προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε για τον σχεδιασμό, δημιουργήθηκε μέσω του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ADINA Structures, με χρήση στοιχείων δοκού (beam elements). Κάθε μέλος διαιρέθηκε σε 100 επιμέρους στοιχεία, δίνοντας τα χαρακτηριστικά της διατομής RHS150x100x4 χρησιμοποιώντας την επιλογή του ADINA για εισαγωγή box διατομών, εισάγοντας τις εξωτερικές διαστάσεις και το πάχος της διατομής, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-19.



Εικόνα 6-19: Διαστάσεις διατομής RHS 150x100x4

Το κρίσιμο φορτίο του πλαισίου, καθώς και η μορφή αστοχίας του, καθορίστηκε από 2^{ας} τάξης ανελαστική ανάλυση, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις μη γραμμικότητες υλικού και γεωμετρίας (GMNIA). Οι αρχικές γεωμετρικές ατέλειες εισήχθησαν βάσει συνδυασμού των ιδιομορφών που λήφθηκαν από γραμμική ανάλυση λυγισμού (LBA), δίνοντας κατάλληλο πρόσημο και πλάτος, προκειμένου να προκύψει ο δυσμενέστερος συνδυασμός, και κατ' επέκταση η μικρότερη αντοχή πλαισίου.



Εικόνα 6-20: Μορφή πλαισίου μέσω του λογισμικού ADINA

6.5.4 Συνοριακές συνθήκες και φόρτιση φορέα

Όσον αφορά της στηρίξεις του πλαισίου, οι βάσεις των υποστυλωμάτων θεωρούνται πλήρως πακτωμένες (δέσμευση έξι βαθμών ελευθερίας), ενώ οι συνδέσεις μεταξύ δοκών και υποστυλωμάτων, θεωρούνται άκαμπτες, δηλαδή δεν επιτρέπεται η σχετική στροφή. Το πλαίσιο, αφού θεωρείται επίπεδο (XY), δεσμεύεται στην εκτός επιπέδου διεύθυνση (YZ), προκειμένου να καταπονείται μόνο από εντός επιπέδου κάμψη και λυγισμό. Η καταπόνηση του φορέα, γίνεται μέσω δύο κατακόρυφων σημειακών και ίσων φορτίων, στην κορυφή των υποστυλωμάτων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-12.

6.5.5 Νόμος υλικού

Το πλαίσιο είναι κατασκευασμένο από διγραμμικό χάλυβα ορίου διαρροής $f_y = 352\text{MPa}$, με χαρακτηριστική τιμή μέτρου ελαστικότητας (E) 200GPa. Ο νόμος υλικού θεωρείται ελαστικός πλήρως πλαστικός, ακολουθώντας το Σχήμα 2-2 (α), της παραγράφου 2.4.2, ή αντίστοιχα την περίπτωση (α) της παραγράφου 5.3.2(1) του EN1993-1-14, που αναφέρεται σε νόμους υλικών θερμής έλασης. Η μετατροπή των μηχανικών σε πραγματικών τάσεων επιλέχθηκε να γίνει αυτόματα μέσω του λογισμικού.

6.5.6 Αρχικές ατέλειες

Στόχος της εκτενέστερης έρευνας στην οποία βασίζεται το συγκεκριμένο παράδειγμα σχεδιασμού, είναι η διερεύνηση της επιρροής του συνδυασμού και της κατεύθυνσης των αρχικών ατελειών, οι οποίες είναι εφαρμοσμένες βάσει των σχημάτων των χαμηλότερων ιδιομορφών του πλαισίου. Επομένως, διάφοροι

τύποι αρχικών ατελειών λήφθηκαν υπόψη, με διάφορα πλάτη και κατευθύνσεις. Αρχικά, ενσωματώνονται σύμφωνα με την §5.4 του EN1993-1-14, καθολικές αρχικές γεωμετρικές ατέλειες (π.χ. ατέλειες μεταθετών πλαισίων), αλλά και αρχικές γεωμετρικές ατέλειες μέλους (π.χ. ατέλειες μορφής τόξου). Παραμένουσες τάσεις δεν λήφθηκαν υπόψη, καθώς ελέγχεται η επιρροή μόνο των γεωμετρικών ατελειών. Αρχικός σκοπός της εφαρμογής, ήταν η γραμμική επαλληλία πλήθους ιδιομορφών, προκειμένου να ελεγχθεί ο συνδυασμός των σχημάτων, και κατά πόσο αυτός επηρεάζει την τελική αντοχή, αλλά και την απόκριση του φορέα. Επομένως, η μορφή των γεωμετρικών ατελειών, είναι βασισμένη στα σχήματα των ιδιομορφών του πλαισίου όπως αυτά προέκυψαν από LBA, οι οποίες εισάγονται με διάφορες τιμές πλάτους και συνδυασμό πρόσθμων, διερευνώντας έτσι την δυσμενέστερη περίπτωση, δηλαδή την χαμηλότερη αντοχή. Τα σχήματα των ιδιομορφών, είναι τα ίδια με το παράδειγμα 6.4.

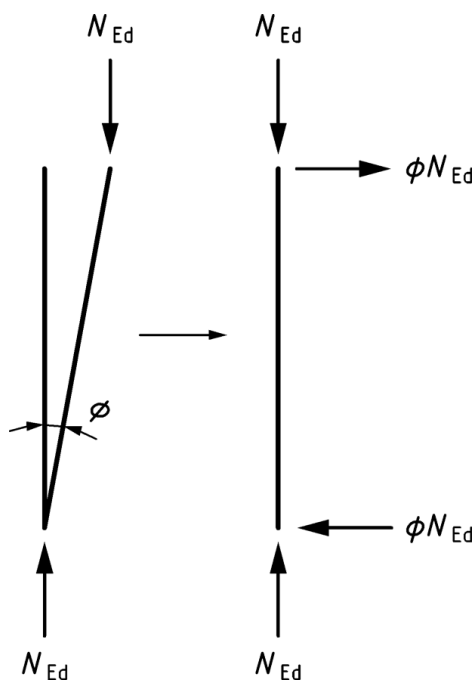
Επιπλέον, και ως εναλλακτική, η επιβολή των καθολικών ατελειών έγινε και με δεύτερο τρόπο, μέσω ισοδύναμων οριζόντιων δυνάμεων. Τα πλάτη του κάθε τύπου ιδιομορφής προκύπτουν βάσει της §7.3.2 του μέρους EN 1993-1-1, κατά την οποία η σχέση υπολογισμού για καθολικές μορφές είναι:

$$\varphi = \varphi_0 \cdot a_h \cdot a_m \quad (5.5)$$

Ενώ το μέγεθος του ισοδύναμου οριζόντιου φορτίου προκύπτει βάσει της σχέσης:

$$F = \varphi \cdot N_{Ed}$$

Όπου φ είναι το πλάτος της συνολικής καθολικής ατέλειας και N_{Ed} , το ασκούμενο αξονικό φορτίο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6-3.

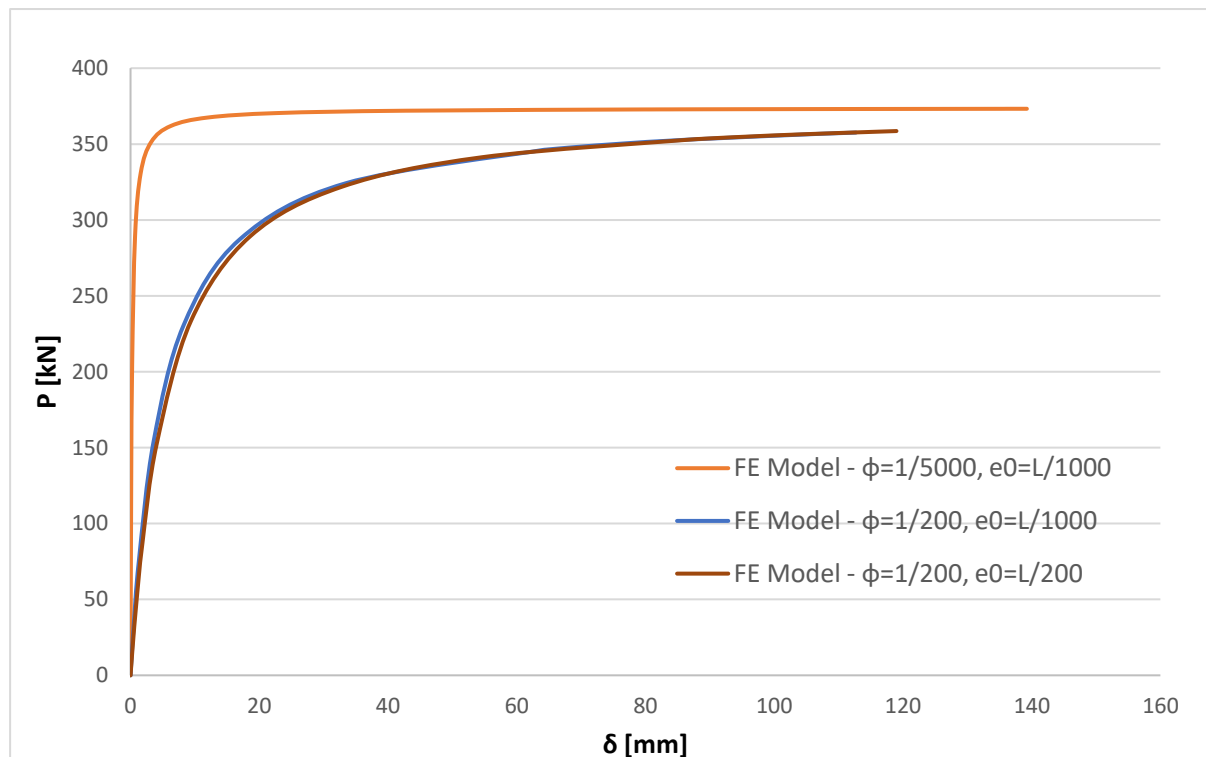


Σχήμα 6-3: Αντικατάσταση αρχικής καθολικής ατέλειας με ισοδύναμα οριζόντια φορτία

Όμως, δεν ήταν εφικτό οι απαραίτητες ιδιότητες και ρυθμίσεις του προσομοιώματος, να συνδυαστούν (λ.χ. είδος υλικού, τύπος πεπερασμένου στοιχείου, είδος ανάλυσης κ.α.) για την ομαλή λειτουργία του προγράμματος, και κατ' επέκταση την ρεαλιστική απόκριση του φορέα. Έτσι, παρά το γεγονός ότι οι αναλύσεις με εφαρμογή ισοδύναμων δυνάμεων αντί για εισαγωγή ατελειών βάσει ιδιομορφών, πραγματοποιήθηκαν, τα αποτελέσματά τους, λόγω αδυναμίας του προγράμματος, κρίνονται λανθασμένα, επομένως δεν παρουσιάζονται.

6.5.7 Αξιολόγηση αριθμητικών αποτελεσμάτων

Όντας απλή παραλλαγή του προηγούμενου παραδείγματος, οι περιπτώσεις ελέγχου συνδυασμού ατελειών, είναι ίδιες με του παραδείγματος 6.4. Τα αποτελέσματα του προσομοιώματος, συγκρινόμενα και με τις απαντήσεις της κας Arrayago, κρίνονται σωστά, αντικατοπτρίζοντας ρεαλιστικά την απόκριση του πλαισίου, αλλά και την αντοχή του. Πιο συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα των αναλύσεων, συγκεντρώνονται στο Διάγραμμα 6-7.



Διάγραμμα 6-7: Αποτελέσματα αναλύσεων πλαισίου RHS 150x100x4

Από το διάγραμμα, εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Είναι απαραίτητη η εισαγωγή καθολικών αρχικών ατελειών, για ρεαλιστική απόκριση του φορέα, και κατάλληλη πρόβλεψη της μορφής αστοχίας
- Η επιρροή του μεγέθους των αρχικών τοπικών ατελειών είναι αμελητέα, εφόσον εισάγεται συνδυασμός καθολικών και τοπικών ατελειών
- Η τελική αντοχή, όπως αυτή προκύπτει από το αριθμητικό προσομοίωμα ισούται με $F_{cr}=357.57$ kN.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν από την κα Arrayago, με χρήση ελαστο-πλαστικού υλικού, πλάτος αρχικής καθολικής ατέλειας $\phi=1/200=0.005$ και τοπικής ατέλειας $e_0 = L/1000$, το κρίσιμο φορτίο προκύπτει $F_u=358$ kN.

Τέλος, παρατηρήθηκε πως ακόμη και για μηδενική καθολική ατέλεια, αλλά με ομόσημη απόκλιση καθετότητας των δύο υποστυλωμάτων, η μορφή αστοχίας είναι καθολική μετάθεση του πλαισίου, γεγονός που δίνει έμφαση στην σημασία εισαγωγής συνδυασμού ατελειών, υπό την μορφή σχημάτων ιδιομορφών.

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μέσω μια συνολικής επισκόπησης της ουσίας της διπλωματικής εργασίας, συμπεραίνεται πως οι αναλύσεις μεταλλικών κατασκευών με χρήση πεπερασμένων στοιχείων, είναι σε πολλές περιπτώσεις ένα αναπόφευκτο μέσο, εάν ο μηχανικός θέλει να πετύχει αρχικά μεγαλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων. Επιπλέον, τα πεπερασμένα στοιχεία, τόσο στις μεταλλικές κατασκευές όσο και με άλλα υλικά, δίνουν την δυνατότητα ρεαλιστικής απεικόνισης των παραμέτρων απόκρισης ενός συστήματος. Η κατανομή ή η συγκέντρωση των τάσεων, οι παραμορφώσεις, τα εξωτερικά αλλά και εσωτερικά εντατικά μεγέθη, είναι οι βασικότερες ιδιότητες που μπορούν να προβλεφθούν επακριβώς και ρεαλιστικά. Όπως αναφέρθηκε σε αρκετά σημεία στην εισαγωγή, αλλά και μέσα στο κύριο μέρος της διπλωματικής, η χρήση ενός λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων, απαιτεί σε αρκετές περιπτώσεις πολύ μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ, προκειμένου η ανάλυση να επιφέρει τα αναμενόμενα αποτελέσματα, γεγονός που καθιστά τις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων λιγότερο προσιτές για καθημερινές πρακτικές και απλά παραδείγματα. Όμως, στόχος των νέων μερών του ΕΚ3, 1-14 και 1-141, είναι η απλούστευση και παράλληλα η πλήρης καθοδήγηση όσον αφορά την προσομοίωση των φορέων. Συνοψίζοντας τα βασικά ευρήματα της βάσης των υπαρχόντων κανονισμών, το κύριο αντικείμενο των νέων τμημάτων είναι πρωτίστως να χρησιμοποιηθούν ως αφετηρία για περαιτέρω ερευνητικές προσπάθειες και ανάπτυξη, ενώ παράλληλα παρέχουν γενικές συστάσεις σχεδιασμού για μια ευρεία γκάμα αριθμητικών προσομοιωμάτων που σχετίζονται με καθημερινά θέματα Πολιτικού Μηχανικού.

Τέλος, τα συμπεράσματα που εξήχθησαν μέσω της ανάλυσης των τεσσάρων παραδειγμάτων, συνοψίζονται παρακάτω:

- Απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά την εισαγωγή των δεδομένων
- Η επαρκής διακριτοποίηση είναι κλειδί για την σωστή λειτουργία του προσομοιώματος
- Περίπλοκη γεωμετρία φορέων είναι δυνατό να προσομοιωθεί με ακρίβεια
- Το επίπεδο ασφαλείας κατά την χρήση πεπερασμένων στοιχείων δεν τροποποιείται συγκριτικά με τους υπάρχοντες κανονισμούς
- Η κρίση του μηχανικού αναλαμβάνει καθοριστικό ρόλο στην ερμηνεία και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και του προσομοιώματος.

8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Γαντές Χ. (2016) "Μη γραμμική συμπεριφορά των κατασκευών" Κάλλιπος, Ανοιχτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις <http://hdl.handle.net/11419/5318>
- [2] Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Γ. (2005α). «Σχεδιασμός δομικών έργων από χάλυβα, 2η έκδοση», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα
- [3] Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Γ., (2005β). «Σιδηρές κατασκευές, παραδείγματα εφαρμογής του Ευρωκώδικα 3, Τόμος Ι». Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
- [4] ABAQUS Documentation, The Riks method and Arc length method: [Configuring a static, Riks procedure](#)
- [5] ADINA System Online Manuals (2021)
- [6] Arrayago I., E. Real, L. Gardner (2015), "Description of stress–strain curves for stainless steel alloys", Mater. Des. 87 540–552. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.08.001>
- [7] Arrayago I., González-de-León I., Real E., Mirambell E (2020) "Tests on stainless steel frames. Part I: preliminary tests and experimental set-up". *Thin-Walled Structures* 157, 107005. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107005>
- [8] Arrayago I., Rasmussen K.J.R (2022), "Influence of the imperfection direction on the ultimate response of steel frames in advanced analysis". *Journal of Constructional Steel Research* 190, 107137 <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.02.016>
- [9] Jandera M., Gardner L., Machacek J. (2008) "Residual stresses in cold-rolled stainless steel hollow sections", *Journal of Constructional Steel Research* <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.07.022>
- [10] Kala Z. (2011), "Sensitivity analysis of steel plane frames with initial imperfections", *Eng. Struct.* 33 (8) 2342–2349. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.04.007>
- [11] prEN 1993-1-1 (2019) Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. Final Document. Brussels, Belgium, 2019.
- [12] prEN 1993-1-14 (2022), Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-14: Design assisted by finite element analysis.

- [13] prEN 1993-1-141-first draft (2022), Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-141: Background and Explanations on EN 1993-1-14 Design assisted by finite element analysis.
- [14] S. Shayan, K.J.R. Rasmussen, H. Zhang (2014), "On the modelling of initial geometric imperfections of steel frames in advanced analysis", J. Constr. Steel Res. 98 167–177. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.02.016>
- [15] Šorf M., Jandera M. (2020) "Lateral-torsional buckling of slender cross-section stainless steel beams". Structures, Vol. 28, 2020, p. 1466-1478. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.09.073>
- [16] Walport F., I. Arrayago, L. Gardner, D.A. Nethercot (2021), "Assessment and treatment of second order effects in plastically-designed stainless steel frames", J. Constr. Steel Res. 187, 106981. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106981>
- [17] Zdeněk Kala (2011), "Sensitivity analysis of steel plane frames with initial imperfections" <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.04.007>